



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

CAROLINA DE VASCONCELOS PEIXOTO

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA
APLICAÇÃO DE ELEMENTOS RECICLADOS EM TELHADOS
VERDES MODULARES**

Recife, PE
2019



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

CAROLINA DE VASCONCELOS PEIXOTO

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA
APLICAÇÃO DE ELEMENTOS RECICLADOS EM TELHADOS
VERDES MODULARES**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós- graduação em Engenharia Civil, da Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Profa. Dra. Stela Fucale Sukar

Recife, PE
2019

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Universidade de Pernambuco – Recife

P379a Peixoto, Carolina de Vasconcelos
Análise da viabilidade técnica e econômica da aplicação
de elementos reciclados em telhados verdes modulares./
Carolina de Vasconcelos Peixoto. – Recife: UPE, Escola
Politécnica, 2019.
101 f.: il.

Orientador: Profª. Dra. Stela Fucale Sukar

Dissertação (Mestrado - Construção Civil) Universidade
de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil, 2019.

1. Construção Sustentável. 2. Telhados Verdes. 3.
Reciclagem. 4. Cobertura Vegetal Modular. I. Engenharia
Civil – Dissertação. II. Sukar, Stela Fucale (orient.). III.
Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado
em Construção Civil. IV. Título.

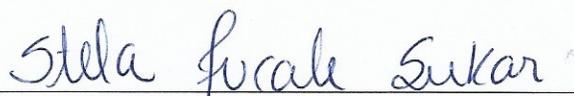
CDD: 690.15

CAROLINA DE VASCONCELOS PEIXOTO

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA APLICAÇÃO DE
ELEMENTOS RECICLADO EM TELHADOS VERDES MODULARES**

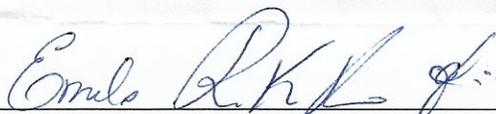
BANCA EXAMINADORA:

Orientador(a)



Profa. Dra. Stela Fucale Sukar
Universidade de Pernambuco

Examinadores



Profa. Dra. Emilia Rahnemay Kohlman Rabbani
Universidade de Pernambuco



Prof. Dr. Vicente de Paulo Silva
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Recife-PE
2019

DEDICATÓRIA

Aos meus amados pais, Flávia de Vasconcelos Peixoto e João Câncio Peixoto Filho, por todo o esforço e dedicação em prol da minha educação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me fortalecer e me dar saúde para concluir esta jornada. Por todas as bênçãos recebidas e por ter colocado pessoas especiais em minha vida para ajudar na caminhada.

Aos meus pais, Flávia de Vasconcelos Peixoto e João Câncio Peixoto Filho, por todo o apoio emocional, pela preocupação em me proporcionar uma educação digna e um lar de amor. Também por todo o cuidado que tem comigo não só nesse, mas em todos os aspectos de minha vida.

Ao meu irmão, Eduardo Peixoto, pela companhia, pelos conselhos e pela ajuda na elaboração dos gráficos e organização do trabalho.

A professora Stela Fucale Sukar, pela orientação, por toda a atenção dada em todas as etapas da pesquisa e pela confiança depositada em mim. Também por todos os conhecimentos passados, e por cada contribuição para a melhoria do trabalho.

A Gerson Vasconcelos, por todo o amor e carinho dados neste período. Pela disponibilidade e atenção em ajudar a montar as estruturas de suporte dos protótipos, além da ajuda em todas as coletas de amostras.

Ao aluno Antônio Carmo, por toda a ajuda na montagem dos protótipos, na instalação em campo e nos ensaios laboratoriais. Por todo o tempo investido em nossa pesquisa, apesar de todas as dificuldades encontradas.

A professora Maria de Los Angeles Perez Fernandez Palha, da UFPE, por ter cedido o laboratório e sua equipe para ajudar nos ensaios laboratoriais.

Ao técnico de laboratório Fábio, pelo auxílio na realização dos ensaios de caracterização relacionados à pesquisa.

Aos professores do PEC pelos ensinamentos transmitidos nas disciplinas durante o mestrado, em especial ao professor Willames, pela contribuição estatística dada na reta final da dissertação.

A CAPES, pelo auxílio financeiro dado durante a pesquisa.

Às empresas Ecotelhado, Quadro Vivo e CBARD, pelas doações de materiais necessários à pesquisa.

Aos demais amigos e a todos que colaboraram direta ou indiretamente, na execução deste trabalho.

RESUMO

A consciência ambiental, as novas legislações e a competitividade do mercado vêm estimulando o setor da construção civil a investir no campo da sustentabilidade. O telhado verde é um exemplo de sistema a ser incorporado em obras que buscam adotar este conceito, no entanto, sua etapa de produção pode consumir em excesso recursos naturais, que poderiam ser substituídos por elementos reciclados. Neste contexto, a pesquisa avalia a viabilidade técnica e econômica do uso de elementos reciclados como componentes de telhados verdes modulares, tais como: lodo proveniente de estação de tratamento de efluentes, chapas feitas de embalagens Tetrapak, resíduos da construção e demolição, manta composta de filamentos de garrafa PET, manta de poliéster reciclado e módulos de polietileno de alta densidade reciclado. A metodologia adotada compreendeu, inicialmente, a seleção de ensaios de caracterização dos materiais a serem empregados nas camadas de telhado verde, seguida pela montagem em laboratório de três diferentes tipos de protótipos, sendo um convencional e dois com elementos recicláveis. A composição reciclada que apresentou melhores resultados de custo e carga seca, foi selecionada para instalação em campo, juntamente com a composição convencional, totalizando-se a montagem e instalação em campo de 12 protótipos (6 de cada tipo). Após a instalação em terreno localizado em Recife-PE, amostras de água em seis eventos de chuvas foram quantificadas e coletadas para análise de parâmetros de qualidade da água para usos restritivos não potáveis (pH, cor aparente, turbidez e coliformes fecais e termotolerantes). Os resultados indicaram que os protótipos contendo elementos reciclados apresentaram custos de instalação em média 21% inferiores quando comparados ao sistema convencional, e que a composição reciclada foi capaz de reter até 91% do volume precipitado (em média), enquanto que a média máxima para a composição convencional foi de 83%. Comparando-se os resultados de qualidade da água obtidos com os limites estabelecidos pela correspondente normativa brasileira, verificou-se que o parâmetro de pH foi o único a apresentar dados considerados aceitáveis (entre 6 e 8), para todas as chuvas analisadas. Nos parâmetros físico-químicos (turbidez, cor aparente e pH), observou-se que a composição reciclada apresentou resultados equivalentes ou superiores à composição convencional, e no que se refere aos parâmetros microbiológicos, as composições convencional e reciclada apresentaram dados equivalentes para os parâmetros de coliformes totais e termotolerantes, para os três últimos eventos de chuva analisados. Finalmente, pôde-se constatar a potencialidade do uso de elementos recicláveis (sustentáveis) na construção civil, especificamente para a composição de telhados verdes.

Palavras-chave: Construção sustentável. Telhados Verdes. Reciclagem. Cobertura vegetal modular.

ABSTRACT

Environmental awareness, new legislation and market competitiveness have encouraged the construction industry to invest in the sustainability field. Green roof is an example of system to be incorporated in buildings that seek to adopt this concept, however, its production stage can excessively consume natural resources, which could be replaced by recycled elements. In this context, this research evaluates the technical and economic feasibility of using recycled elements as modular green roofs components, such as: sludge from an effluent treatment plant, slabs made of recycled Tetrapak packaging, construction and demolition waste, PET bottle filaments, recycled polyester drainage blankets and recycled high density polyethylene modules. The methodology adopted includes the selection and characterization tests of the materials to be used in the green roof layers, followed by the laboratory assembly of three different compositions of prototypes, one conventional and two with recyclable elements. The recycled composition that presented the best results for costs and dry load, was selected for field installation along with the conventional composition, totaling the assembly and field installation of 12 prototypes (6 of each kind). Water samples from six rainfall events were quantified and collected for water quality parameters analysis for non-potable restrictive uses (pH, apparent color, turbidity and fecal and thermotolerant coliforms). The results indicated that prototypes containing recycled elements had a 21% lower mean installation cost when compared to the conventional system, and that the recycled composition was able to retain up to 90,97% of the precipitated volume (on average), while the maximum average for the conventional composition was 83%. Comparing the water quality results obtained with the limits established by the corresponding Brazilian legislation, it was verified that the pH parameter was the only one to present acceptable data (between 6 and 8), for all rains analyzed. In the physical-chemical parameters (Turbidity, apparent color and pH), it was observed that the recycled composition presented equivalent or superior results to the conventional composition. Regarding to the microbiological parameters, the conventional and recycled compositions presented equivalent results for total and thermotolerant coliforms, for the last three rainfall events analyzed. Finally, it was possible to verify the recyclable elements usage potential in the civil construction field, specifically as green roof layers.

Keywords: Sustainable construction. Green Roofs. Recycling. Modular system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Projeção de cidade contendo o máximo de aproveitamento de telhados verdes.....	20
Figura 2 - Tipos de telhados verdes quanto à espessura da camada de substrato.....	21
Figura 3 - (A) Telhado verde contínuo, (B) Telhado verde modular.....	22
Figura 4 - Camadas de um telhado verde.....	23
Figura 5 - Montagem de telhados verdes convencionais: (a) Manta geotêxtil sobre argila expandida; (b) Solo sobre manta geotêxtil; (c) Vegetação sobre camada de substrato; (d) Telhado verde instalado.....	24
Figura 6 - Foto com câmera de infravermelho evidenciando diferença de temperatura entre a cobertura de concreto e o telhado verde.	29
Figura 7 - Avaliação do impacto ambiental de um telhado verde.....	36
Figura 8 - Módulos de 0,17m ² instalados em lérída, espanha.....	37
Figura 9 - Resultados de capacidade de retenção dos módulos.....	38
Figura 10 - Módulos de resíduos de couro.....	38
Figura 11 - Diferentes modelos de módulos estudados (A) Hexagonal (B) Alveolar simples (C) Alveolar grelhado (D) Reciclado (E) Modular com galocha.....	40
Figura 12 - Análise do quantitativo de água armazenado em 43 eventos de chuva.....	41
Figura 13 - Estudo comparativo entre 16 protótipos de telhados verdes.....	42
Figura 14 - Unidades Compostas de 2 módulos sem vegetação.....	43
Figura 15 - Procedimento metodológico adotado na pesquisa apresentado em fluxograma.....	49
Figura 16 - Módulo de PEBD/PEAD virgem para composição convencional.....	51
Figura 17 - Argila Expandida (A) Embalagem de 18kg adquirida; (B) Aspecto visual do produto...51	
Figura 18 - Manta geotêxtil.	52
Figura 19 - Terra vegetal.....	52
Figura 20 - Módulo de chapas de Tetra Pak.....	53
Figura 21 - Agregado reciclado de RCD.....	54
Figura 22 - Manta de poliéster reciclado.....	54
Figura 23 - Módulo de PEAD Reciclado.....	55
Figura 24 - Manta de drenagem composta por filamentos de garrafa PET.....	55
Figura 25 - Pó da casca do coco.....	56
Figura 26 - Ensaio de granulometria por peneiramento com o RCD.	57
Figura 27 - Permeâmetro de carga constante: (A) argila expandida; (B) Agregado reciclado de RCD.....	57
Figura 28 - Montagem dos protótipos em laboratório (Etapa 1).....	58
Figura 29 - Pesagem dos protótipos em balança de precisão.....	59
Figura 30 - Localização de terreno onde foram instalados os protótipos.....	59
Figura 31 - Estrutura de apoio para os protótipos contendo sistema de captação individualizada....	60
Figura 32 - (A) Pluviômetro instalado; (B) Água retida pelo sistema.....	61
Figura 33 - Recipientes de coleta identificados.....	61
Figura 34 - Inoculação das amostras em caldo CLT.....	63
Figura 35 - Leitura dos resultados após 48h em caldo CLT (A) Positivo; (B) Negativo.....	63
Figura 36 - Amostras em Banho Maria a 44,5 ± 0,2°C.....	64
Figura 37 - turbidímetro modelo ORION AQ 3010.....	64
Figura 38 - Espectrofotômetro Spectroquant Pharo300 utilizado para o ensaio de cor aparente.....	65
Figura 39 - Medidor de pH Tecnopon mPA 210.....	65
Figura 40 - Curva granulométrica do agregado de RCD.....	67
Figura 41 - Regressão linear para percentual de retenção x volume precipitado.....	73
Figura 42 - Intervalos de confiança para quantidade de água contida no sistema de coleta.....	74
Figura 43 - Intervalos de confiança para coliformes totais.....	75

Figura 44 - Regressão para coliformes totais.	76
Figura 45 – Regressão para coliformes totais após ajuste.....	77
Figura 46 - Intervalos de confiança para coliformes termotolerantes.....	78
Figura 47 - Regressão para coliformes termotolerantes.....	79
Figura 48 - Intervalos de confiança para turbidez.	80
Figura 49 - Regressão para Turbidez.....	81
Figura 50 - Amostras coletadas da Chuva 1.....	81
Figura 51 - Amostras coletadas da Chuva 3.....	82
Figura 52 - Amostras coletadas da Chuva 4.....	82
Figura 53 - Amostras coletadas da Chuva 6.....	82
Figura 54 - Intervalos de confiança da cor aparente da chuva 6.....	83
Figura 55 - Intervalos de confiança do pH para as 6 chuvas analisadas.....	85
Figura 56 - Regressão linear para valores de pH.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificações dos telhados verdes quanto à espessura do Substrato.....	21
Tabela 2 - Comparativo de temperaturas superficiais internas de acordo com o sistema de cobertura.....	28
Tabela 3 - Parâmetros de qualidade de água da chuva para usos restritivos não potáveis	44
Tabela 4 - Comparativo de resultados obtidos com NBR 15527 (2007)	45
Tabela 5- Composição dos materiais empregados nos protótipos de telhado verde.....	50
Tabela 6 - Resumo dos ensaios laboratoriais realizados.....	62
Tabela 7 - Peso específico seco.....	68
Tabela 8 - Condutividade hidráulica.....	68
Tabela 9 – Análise físico-química do lodo.....	69
Tabela 10 - Custos das composições estudadas por m ²	69
Tabela 11 - Carga dos protótipos (condição seca).....	71
Tabela 12 - Cargas médias das composições de referência quando saturadas.....	71
Tabela 13 - Volume de chuvas durante o período de avaliação dos protótipos.....	72
Tabela 14 - Quantidade média de água contida no sistema de coleta dos protótipos.....	73
Tabela 15 - Dados de coliformes totais.....	75
Tabela 16 - Dados de coliformes termotolerantes.....	77
Tabela 17 - Dados de turbidez.....	79
Tabela 18 - Amostras coletadas da chuva 6.....	83
Tabela 19 - Dados de pH.....	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparativo de Guias de Telhados Verdes.....	32
Quadro 2 - Comparativo de Leis que tornam Obrigatória a Instalação de Cobertas Verdes.....	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Considerações iniciais.....	14
1.2 Justificativa.....	15
1.3 Objetivos.....	17
1.3.1 <i>Objetivo geral</i>	17
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	17
1.4 Estrutura do trabalho.....	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1 A Construção sustentável e os telhados verdes.....	19
2.2 Definição e tipos de telhado verde.....	20
2.3 Ordem e função das camadas de um telhado verde.....	22
2.4 Benefícios dos telhados verdes.....	24
2.5 Legislações envolvendo telhados verdes.....	30
2.5.1 <i>No mundo</i>	31
2.5.2 <i>No Brasil</i>	33
2.6 Materiais usados em telhados verdes.....	36
2.7 Medição da performance de telhados verdes.....	38
2.8 Parâmetros de qualidade da água proveniente de telhados verdes.....	43
2.8.1 <i>Coliformes totais e termotolerantes</i>	45
2.8.2 <i>Cloro residual livre</i>	46
2.8.3 <i>Turbidez</i>	46
2.8.4 <i>Cor aparente</i>	47
2.8.5 <i>pH</i>	47
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
3.1 Programa de investigação.....	48
3.2 Materiais.....	48
3.3 Métodos.....	50
3.3.1 <i>Caracterização dos materiais</i>	56
3.3.2 <i>Montagem dos protótipos de telhado verde</i>	57
3.3.3 <i>Instalação dos protótipos em campo e coleta de amostras de água</i>	59
3.3.4 <i>Ensaio de caracterização de amostras de água coletadas</i>	61
3.3.5 <i>Análise dos dados</i>	66
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	67
4.1 Caracterização de materiais de composição dos protótipos.....	67
4.1.1 <i>Adequação do RCD à camada drenante</i>	67
4.1.2 <i>Adequação do lodo à camada de substrato</i>	68
4.2 Levantamento de custos dos protótipos.....	69
4.3 Estimativa de carga exercida pelos protótipos.....	70
4.3.1 <i>Carga seca</i>	70
4.3.2 <i>Carga saturada</i>	71
4.4 Quantidade da água de escoamento.....	72
4.4.1 <i>Volume precipitado por evento de chuva</i>	72
4.4.2 <i>Quantidade de água individualizada</i>	72
4.5 Aspectos microbiológicos de qualidade da água.....	74
4.5.1 <i>Coliformes totais</i>	74
4.5.2 <i>Coliformes termotolerantes</i>	77
4.6 Aspectos físico-químicos de qualidade da água.....	79
4.6.1 <i>Turbidez</i>	79

4.6.2 <i>Cor aparente</i>	81
4.6.3 <i>pH</i>	84
5 CONCLUSÕES	87
5.1 Principais conclusões.....	87
5.2 Sugestões para futuras pesquisas.....	89
REFERÊNCIAS	90
APÊNDICE	99

1 INTRODUÇÃO

São abordados aspectos históricos e legislativos, além de conceitos referentes à sustentabilidade na construção civil e aos telhados verdes. São apresentados ainda os objetivos desta pesquisa e as problemáticas ambientais relacionadas à produção dos elementos convencionalmente encontrados em telhados verdes, assim como alternativa viável para solucionar tais questões.

1.1 Considerações iniciais

De acordo com o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (2014), a construção civil utiliza mais da metade dos recursos naturais extraídos do planeta na produção e manutenção do ambiente construído, fazendo com que esta atividade seja considerada uma das menos sustentáveis do planeta. O impacto gerado pelo setor da construção civil acabou ganhando visibilidade dentro do cenário mundial (LIRA, 2017), sendo necessária a implementação de práticas e elementos sustentáveis neste setor.

Segundo o Instituto de Pesquisas em Infraestrutura Verde e Ecologia Urbana (INVERDE, 2009), a construção que busca ser sustentável usa materiais locais, reciclados e recicláveis; tira partido do clima e do entorno para reduzir o consumo de energia e de água; procura não produzir resíduos, mas transformar os mesmos em insumos que voltam para a cadeia produtiva; transforma terrenos degradados em infraestrutura verde; e usa o paisagismo funcional, além do estético.

Loiola, Mary e Silva (2018) afirmam que os telhados verdes desempenham um papel importante na busca de cidades mais sustentáveis e que desde a década de 1990, a instalação de telhados verdes tornou-se uma prática mais comum, especialmente nas áreas urbanas das cidades desenvolvidas do mundo.

A origem dos telhados verdes não está claramente documentada, no entanto, registros mostram que civilizações antigas, como as que moravam às margens dos Rios Tigre e Eufrates já faziam uso deste sistema, sendo o caso mais famoso o dos Jardins Suspensos da Babilônia (DILLY, 2016).

Apesar de bem difundido no mundo, Dilly (2016) afirma que, no Brasil, o telhado verde ainda pode ser considerado um sistema bastante inovador, sem possuir uma gama variada de informações e documentação técnica. Para Kozmhinsky et al. (2016), são necessárias mudanças de visão e atitude empresarial e gestão pública, com objetivo de estimular as construtoras a adotarem a instalação de telhados verdes nas novas edificações no perímetro urbano.

Segundo Dreher, Jacoski e Medeiros (2016), os telhados verdes são áreas vegetadas sobre edificações, independente de sua tipologia, podendo apresentar vegetação rasteira, arbustiva ou de porte arbóreo. Peixoto (2016) afirma que um telhado verde é normalmente composto pela sequência de camadas que confere ao sistema: suporte, drenagem, filtração, substrato e vegetação.

Estruturas com ampla área de cobertura são especialmente apropriadas para a instalação dos telhados verdes, que podem ser incorporados em novas construções ou adicionados aos edifícios existentes durante uma reforma. Na maioria dos casos são construídos em telhados planos ou de baixo ângulo, podendo ser instalados também com alta inclinação desde que possuam características especiais de projeto para evitar deslizamento de material e garantir a sobrevivência das plantas (MASSACHUSETTS METROPOLITAN AREA PLANNING COUNCIL, 2005).

O tipo de telhado verde mais adequado para cada projeto e os materiais escolhidos variam de acordo com o executor, necessidades e desejos do usuário, espaço disponível, custo, tipo de cobertura da edificação e capacidade de suporte, bem como a localização da área desejada (JOBIM, 2013).

1.2 Justificativa

Diversas cidades ao redor do mundo têm incentivado ou obrigado os construtores a implantar telhados verdes em seus projetos a partir da elaboração de certificações, guias ou legislações. Copenhague, San Francisco, Basiléia, Toronto e Tóquio já tornaram a implantação de coberturas vegetais obrigatória em determinados tipos de construções (KAZMIERCZAK; CARTER, 2010; SNOW, 2016; TORONTO, 2013; WILKINSON; DIXON, 2016).

Na América Latina, a cidade de Recife, capital do Estado de Pernambuco, foi a pioneira a obrigar a instalação de telhados verdes por meio da Lei Ordinária 18.112 (RECIFE, 2015), enquadrando novos empreendimentos habitacionais com mais de 4 pavimentos ou não-habitacionais com mais de 400 m² e exigindo no mínimo 30% da superfície descoberta.

Recife é uma cidade tropical com altas temperaturas e possui um índice de precipitação significativo, superior a 2.000 mm por ano, com fortes chuvas em todas as estações do ano. Além disso, o sistema de drenagem urbana é ineficiente, o que leva a inundações nas regiões caracterizadas por menor topografia (LEMOS; KAUSKALE, 2017).

De acordo com Stovin (2010), o escoamento de águas pluviais de telhados urbanos contribui significativamente para a inundação de esgotos e problemas de qualidade de água urbana. A autora afirma ainda que os telhados verdes fornecem uma oportunidade para reduzir e atenuar o escoamento de águas pluviais, amenizando os alagamentos.

Segundo Teotónio, Silva e Cruz (2018), os telhados verdes trazem também como benefícios: diminuição do consumo de energia, possibilidade de agricultura em telhados urbanos, aumento do valor da propriedade, ganhos estéticos e recreativos para as edificações, melhorias no isolamento térmico e acústico, redução de ruído, remoção da poluição do ar, mitigação do efeito de ilha de calor urbana, além de melhorias na saúde pública e preservação ecológica.

Recomenda-se que engenheiros, arquitetos e projetistas detenham conhecimento sobre esta tecnologia, já que dependendo dos materiais utilizados, esta alternativa pode se mostrar menos ecológica do que deveria. De acordo com Eksi e Rowe (2016), os benefícios do telhado verde só são levados em consideração depois que o telhado está pronto, no entanto, é preciso considerar também a energia incorporada necessária para produzir e transportar os materiais necessários para construir o telhado verde para que o mesmo seja verdadeiramente sustentável.

Para demonstrar a importância da etapa de produção, Lira (2017) fez uma análise comparativa do ciclo de vida de um telhado verde e chegou à conclusão que o uso de recursos minerais e fósseis do telhado verde na etapa de produção dos componentes superou as etapas de transporte, execução, operação, manutenção e disposição final, representando 75% do total.

Uma das soluções comuns utilizadas em telhados verdes como camada de drenagem, por exemplo, são os materiais de pedra porosa (argila expandida, xisto expandido, pozolana natural, etc). A demanda e a consequente extração desses materiais de pedra levam a um grande impacto ambiental; trazendo a destruição da paisagem natural, o déficit na gestão de resíduos e outros impactos decorrentes do posterior processamento destes materiais (VILA et al., 2011).

Eksi e Rowe (2016) afirmam que a reciclagem tem o potencial de tornar os telhados verdes mais sustentáveis, diminuindo seu impacto sobre o meio ambiente. Estudos, como Araújo et al. (2013); Martins e Pinto (2015); Rincón et al. (2014), apontam os materiais reciclados como elementos que possuem potencial para uso nesse tipo de sistema.

Neste sentido, a presente pesquisa tem como foco o emprego de materiais reciclados na composição de telhados verdes modulares, como forma alternativa para substituição de materiais convencionais, tendo-se em conta a necessidade de preservação de matérias primas naturais e o aproveitamento de resíduos. Além disso, busca-se contribuir para que a prática de telhados verdes venha a ser aos poucos adotada nos projetos de edificações na Região Metropolitana de Recife-PE.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Analisar a viabilidade técnica e econômica de telhados verdes modulares constituídos de componentes reciclados, comparando-se com uma composição de telhado verde convencional.

1.3.2 Objetivos específicos

Destaca-se os seguintes objetivos específicos da pesquisa:

- Caracterizar os materiais utilizados na composição dos protótipos de telhados verdes;
- Determinar custos financeiros de cada protótipo;
- Avaliar as cargas seca e saturada de cada protótipo.
- Avaliar o potencial de retenção de água e a qualidade da água coletada pelos protótipos.

1.4 Estrutura do trabalho

A apresentação do trabalho está dividida em cinco capítulos:

O capítulo 1 consta de uma breve introdução, contendo as considerações iniciais, a justificativa do trabalho, os objetivos, e a estrutura da pesquisa;

O capítulo 2 apresenta o referencial teórico, abordando temas relevantes para o entendimento e funcionamento de um telhado verde, suas camadas, classificações, benefícios, legislações, e as formas de medição da performance dos mesmos;

No capítulo 3 são descritos os materiais e métodos empregados no programa de investigação experimental (laboratório e campo), detalhando-se os materiais e métodos empregados.

No capítulo 4 são analisados os resultados obtidos, sendo estes comparados com as normativas técnicas vigentes e dados da literatura;

Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas e as sugestões para futuras pesquisas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

São abordados os principais temas relacionados aos telhados verdes, como: construção sustentável, definição de telhados verdes, classificações, ordem e função das camadas, benefícios, legislações nacionais e internacionais e técnicas de medição da performance dos mesmos.

2.1 A Construção sustentável e os telhados verdes

O crescimento econômico tem sido financiado pelo uso insustentável de recursos não renováveis, pela destruição da diversidade biológica e pela emissão de gases de efeito estufa, que vem desencadeando crises ambientais globais (MARTINE; ALVES, 2015).

O desenvolvimento e a construção sustentáveis não são de responsabilidade exclusiva dos pesquisadores, mas requerem ações conjuntas de todos os envolvidos na criação e uso do ambiente construído. Os clientes precisam exigir um ambiente construído mais sustentável, os profissionais precisam adotar e promover práticas de construção sustentável, o setor de construção precisa se comprometer a seguir processos de construção sustentável e órgãos reguladores devem incentivar e capacitar esse tipo de projeto (THE INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION, 2002).

A sustentabilidade no segmento da construção civil implica em sistemas construtivos que promovam integração com o meio ambiente, adaptando-os para as necessidades de uso, produção e consumo humano, sem esgotar os recursos naturais, preservando-os para as gerações futuras; além da adoção de soluções que propiciem edificações econômicas e o bem-estar social. (CÂMARA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, 2008, p. 7)

Vila et al. (2011) reitera a afirmação de que uma das principais formas de construção sustentável é o desenvolvimento e aplicação de sistemas que permitem a integração de elementos ambientais naturais na construção, e afirma que os telhados verdes são uma solução construtiva projetada com o objetivo de tornar os edifícios mais sustentáveis e compatíveis com o meio ambiente.

Segundo Friedman (2018), as cobertas das construções representam entre 40% e 50% das superfícies em áreas urbanas. Caso este espaço passe a ser ocupado por telhados verdes (vide Figura 1), além do impacto estético na paisagem urbana, essa alternativa pode oferecer benefícios adicionais em termos de proteção ambiental e qualidade de vida (TEOTÓNIO; SILVA; CRUZ, 2018).

Figura 1: Projeção de cidade contendo o máximo de aproveitamento de telhados verdes



Fonte: Instituto Cidade Jardim (2014)

2.2 Definição e tipos de telhados verdes

Telhados verdes, vivos, ecológicos, vegetados, cobertura vegetal, jardim suspenso, dentre outros, são denominações dadas ao sistema construído em cima de uma edificação, que permite o crescimento de vegetação em um meio de cultivo (CITY OF TORONTO GREEN ROOF TECHNICAL ADVISOR GROUP, 2010).

Os telhados verdes podem ser classificados de acordo com espessura da camada de substrato e também de acordo com o tipo de sistema construtivo (WILLES, 2014).

i) Quanto à espessura da camada de substrato:

Os telhados verdes podem ser classificados em intensivos, semi-intensivos e extensivos, dependendo da espessura da camada de substrato, como pode ser observado na Tabela 1 e na Figura 2. O telhado verde do tipo intensivo possui uma ampla gama de opções disponíveis para

projetos e usos; isso significa que os canteiros podem ser equipados de forma a criar uma comodidade comparável às instalações de um parque no nível do solo (FLL, 2008).

Segundo Ferraz (2012), o tipo semi-intensivo é uma cobertura intermediária entre a intensiva e a extensiva, tanto na profundidade do substrato quanto na variedade de espécies. Já o tipo extensivo apresenta um perfil muito mais fino, que pode limitar a diversidade de plantas no telhado, no entanto, pode também ser facilmente adaptado a um edifício existente e permite ser usado com segurança em estruturas pré-existentes (PERI et al., 2012).

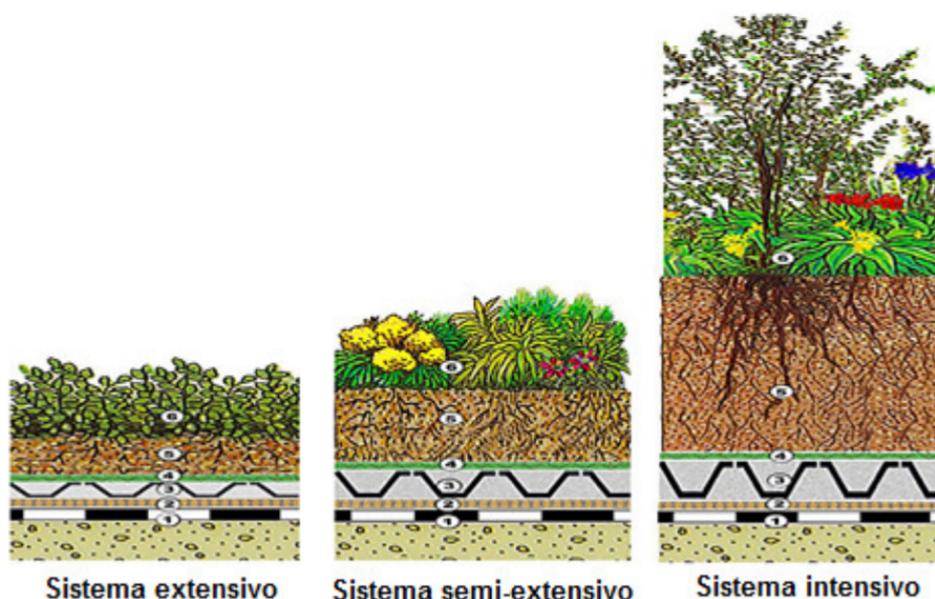
Tabela 1: Classificações dos telhados verdes quanto à espessura do substrato

	Extensivo	Semi-intensivo	Intensivo
Espessura do substrato	6 a 20 cm	12 a 25 cm	15 a 40 cm
Manutenção	Baixa	Periodicamente	Regularmente
Irrigação	Não	Moderada	Regularmente
Vegetação	Gramíneas, suculentas, musgo	Ervas, gramíneas e arbustos pequenos	Gramíneas, arbustos e árvores
Custo	Menos oneroso	Medianamente oneroso	Mais oneroso
Carga na estrutura*	60 a 150 kg/m ²	120 a 200 kg/m ²	180 a 500 kg/m ²

*Quando saturado

Fonte: Traduzido e Adaptado a partir de IGRA (2015)

Figura 2: Tipos de telhados verdes quanto à espessura da camada de substrato



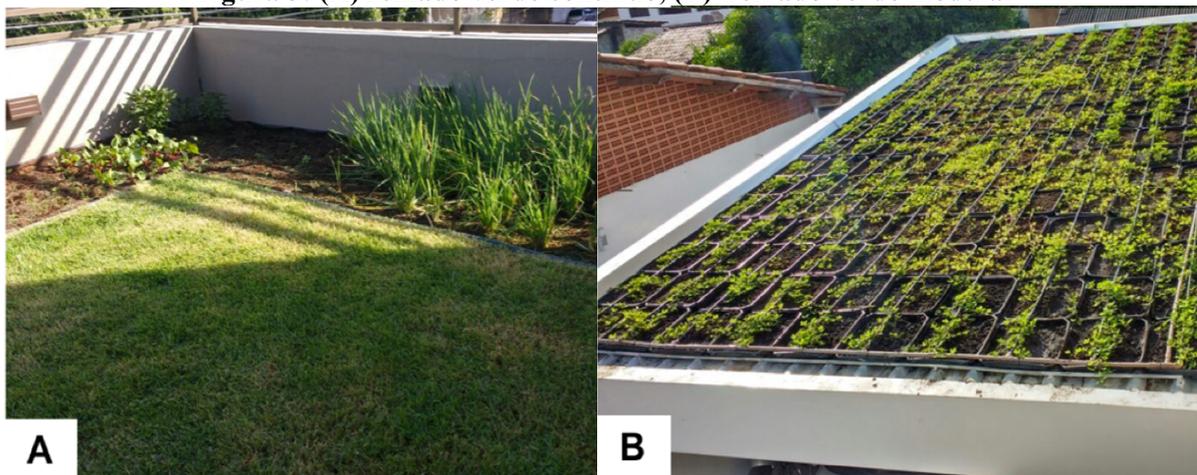
Fonte: Adaptado de Green Roof Technology (2017)

ii) *Quanto ao método construtivo:*

De acordo com Gregoire e Clausen (2011), os telhados verdes podem ser do tipo contínuo (Figura 3 (A)), isto é, construídos diretamente sobre uma plataforma ou sobre a laje da edificação, ou podem ser do tipo modular (Figura 3 (B)), onde o telhado verde é montado sobre peças que se encaixam entre si, denominadas de bandejas.

Segundo Velazquez (2003), os telhados verdes modulares permitem fácil manutenção e reparo, além da simplicidade e rapidez na instalação, pois as bandejas podem chegar no local de instalação já preenchidas com as camadas do telhado verde, necessitando apenas do encaixe entre as mesmas. Ainda segundo a autora, este sistema permite que no mesmo telhado sejam instaladas diferentes configurações de alturas e materiais nas camadas.

Figura 3: (A) Telhado verde contínuo, (B) Telhado verde modular



Fonte: Rocha (2017)

2.3 Ordem e função das camadas de um telhado verde

A especificação de um telhado verde deve ser única para cada tipo de sistema e requer um bom entendimento dos componentes e do comportamento de cada parte do sistema funcionando em conjunto (DILLY, 2016).

Um telhado verde sempre deve ser instalado sobre laje devidamente impermeabilizada, com sistema de escoamento ou armazenamento de água da chuva previamente instalado. Esta base para o telhado verde já faz parte do procedimento padrão de diversas construtoras para cobertura de seus empreendimentos, mesmo quando os mesmos não possuem telhados verdes, conforme Peixoto (2016). Sobre esta base, deverá se sobrepôr a estrutura dos telhados verdes, conforme

Figura 4, basicamente formada de baixo para cima, por uma camada de drenagem, uma camada de filtração, uma camada de substrato e uma camada de vegetação (CHEN; KANG; LIN, 2018).



Fonte: Adaptado de Chen, Kang e Lin (2018)

A camada inferior é a de drenagem, que, segundo Lira (2017), para que seja eficaz, deve permitir que a água percole verticalmente na camada. O guia alemão *Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau* (FLL, 2008) afirma que a camada de drenagem deve conter espaço suficiente para absorver qualquer excesso de água, e, em seguida, canalizá-lo para fora do telhado. Desde que sejam utilizados materiais adequados, esta camada também poderá atuar como um reservatório de água. Dilly (2016) ressalta que a argila expandida é um material bastante aceito para compor a camada drenante.

A camada filtrante tem por finalidade impedir que partículas de material de solo fino migrem para a camada de drenagem, causando entupimento ou redução da capacidade de drenagem (ASTM, 2014). Budel (2014) afirma que partículas, húmus e materiais orgânicos são retidos pelo filtro e estão, portanto, disponíveis para as plantas. Esta camada é de muita importância para a qualidade final da água e são preferivelmente compostas por manta geotêxtil ou outros tecidos, como verificado na Figura 5 (A).

Segundo Lira (2017), o objetivo do substrato é dar sustentação à vida das plantas durante um longo período de tempo, funcionando como reservatório de umidade, suportando drenagem eficiente durante eventos de chuva e protegendo os componentes do sistema de telhado verde. Na Figura 5 (B) verifica-se a instalação desta camada. Daldegan (2017) afirma que nesta camada convencionalmente é utilizada a terra vegetal, ou terra preta adubada.

Na camada superficial se localizam as plantas, responsáveis por manter o sistema vivo e pela sua eficiência; esta camada está representada pela Figura 5 (C). Contudo, as plantas dependem

de condições específicas para se desenvolverem, sendo importante escolher espécies adaptadas ao clima, regime de chuvas, vento, insolação e ainda de porte adequado (BUDEL, 2014). Após a instalação desta camada, o telhado verde se encontra pronto para uso, como visto na Figura 5 (D).

Figura 5: Montagem de telhados verdes convencionais: (a) Manta geotêxtil sobre argila expandida; (b) Solo sobre manta geotêxtil; (c) Vegetação sobre camada de substrato; (d) Telhado verde instalado.



Fonte: Ecodhome (2014)

2.4 Benefícios dos telhados verdes

Segundo Berndtsson (2010), em todas as cidades do mundo tem-se uma abundância de área de telhado. Transformar estes telhados em telhados verdes, cobrindo-os com solo e vegetação, iria contribuir para a obtenção de diversos benefícios, como: redução das ilhas de calor, diminuição de alagamentos, melhorias de aspectos financeiros, maior eficiência energética, melhorias no conforto acústico e térmico da edificação e aumento da biodiversidade urbana e do contato com a natureza. A seguir, apresenta-se de forma detalhada cada benefício citado.

i) Redução das ilhas de calor

A ocorrência de temperaturas urbanas mais altas em comparação com as áreas suburbanas e rurais adjacentes se dá devido ao fenômeno da ilha de calor e também à inegável mudança climática. Para contrabalançar o fenômeno, tecnologias importantes de mitigação têm sido desenvolvidas e propostas. Entre elas, o uso de telhados verdes se apresenta como uma alternativa muito promissora, apresentando um potencial de mitigação relativamente alto da ilha de calor (SANTAMOURIS, 2014).

Catuzzo (2013) realizou uma análise comparativa com medições de temperatura e umidade relativa do ar para um telhado verde intensivo e outro de concreto, localizados na cidade de São Paulo-SP. Verificou que o telhado verde demora mais a aquecer e a resfriar, o que mantém a temperatura do ar mais constante e agradável. Neste estudo, a maior variação da temperatura do ar entre os dois telhados foi de 5,3 °C e, da umidade foi de 15,7%. A pesquisa concluiu que a utilização dos telhados verdes reduz as temperaturas e eleva a umidade do ar no microclima, enquanto que o telhado de concreto eleva a temperatura e reduz a umidade do ar significativamente.

ii) Diminuição de alagamentos

De acordo com Berndtsson (2010), um dos efeitos da urbanização é o aumento da área de superfícies impermeáveis, que causa diminuição da infiltração e aumento do escoamento superficial e do estresse na infraestrutura de águas pluviais existente, gerando os alagamentos. No entanto, quando um telhado verde é instalado, uma porção da água retida será drenada e uma parcela correspondente à capacidade de retenção de água do solo será mantida. A água retida irá evaporar ou ser usada pelas plantas. É a água evapotranspirada que explica a redução observada do volume de escoamento dos telhados verdes.

Ainda segundo Berndtsson (2010), existem diversos fatores que influenciam na capacidade de retenção de água do telhado verde e na dinâmica do escoamento, sendo eles: número e espessura das camadas do telhado verde, tipo de materiais utilizados, declive, posição do telhado (por exemplo sombreado ou não) direção do telhado, duração do período seco, estação/clima (temperatura do ar, condições do vento, umidade), características do evento de chuva (intensidade e duração). Sendo assim, os valores numéricos que descrevem o desempenho dos

telhados verdes no que diz respeito à redução de alagamentos não podem ser comparados diretamente, uma vez que os fatores relativos ao desempenho do telhado verde raramente são os mesmos em diferentes estudos.

Ercolani et al. (2018) e Lee et al. (2013) afirmam que a capacidade de retenção de água de um telhado verde é inversamente proporcional à magnitude do evento de chuva ocorrido, tendo maior eficácia em precipitações inferiores a 20mm.

Santos et al. (2013) estudaram dois telhados verdes com 4 m² cada e vegetações distintas (*Melocactus macrodiscus* - popularmente conhecida como coroa-de-frade; e *Cynodium dactylum* - mais conhecida como grama-de-burro) na região de Pernambuco. Neste estudo utilizou-se um simulador de chuva construído utilizando-se tubulação rosqueável de ½”, aspersores de irrigação, manômetro de pressão hidráulica e bomba centrífuga de ½ CV. Tendo sido adotados 2 eventos de precipitação de 30 minutos, com intensidades de 42 mm/h e 79 mm/h. Os resultados demonstraram o atraso na ocorrência do pico do escoamento superficial, sendo no experimento 1 o atraso da ordem de 11 min em ambos os telhados, e no experimento 2 de 10 min para o telhado de *Melocactus macrodiscus* e de 11 min para o telhado com *Cynodium dactylum*. Verificaram ainda uma redução no escoamento superficial entre 15% e 30% do total precipitado quando comparados a uma cobertura de telhas cerâmicas.

Oliveira (2009) comparou as vazões de pico do escoamento entre um telhado de fibrocimento e um telhado verde testados em uma área de 31,5 m² localizada no Rio de Janeiro-RJ, realizando uma simulação de chuva através de um sistema de irrigação por gravidade com microtubos com intensidade de 8,77 mm/h com duração de 13 minutos, onde verificou que o pico da vazão no telhado de fibrocimento aconteceu 5 minutos após o início da precipitação, enquanto que no telhado verde ele só ocorreu após 13 minutos. Já para uma simulação com precipitação de intensidade de 42mm/h e mesma duração, os picos de vazão aconteceram aos 5 e aos 11 minutos, respectivamente.

Além disso, o telhado verde oferece a possibilidade de se captar e reutilizar as águas pluviais para diversos fins, como irrigação de jardins, lavagem de carros, descarga em bacias sanitárias, conforme pesquisa realizada em edifício escolar verde na cidade de Recife-PE (PEIXOTO et al., 2016).

iii) Benefícios financeiros

De acordo com Rangel, Aranha e Silva (2015), as coberturas verdes apresentam a possibilidade de geração de renda, a partir do cultivo de plantas ornamentais, medicinais e temperos domésticos, podendo ainda profissionalizar e empregar pessoas.

Segundo Nascimento (2015), a agricultura urbana é praticada por diversas faixas populacionais, englobando a população que procura exercer uma atividade secundária que permita combater o ócio e obter rendimento extra. Estima-se que, se suficientemente planejados, 25% das necessidades alimentares urbanas poderiam ser produzidas em telhados verdes (WALDBAUM, 2008).

Além disso, tem-se também a valorização dos imóveis. Kats (2010) afirma que em edifícios comerciais sustentáveis nos Estados Unidos, a taxa de ocupação é 5% maior, o ganho com aluguel cresce 35% e o valor do imóvel aumenta em 64%, em comparação com os convencionais.

iv) Eficiência energética

Ferraz (2012) realizou um estudo térmico comparativo em São Paulo-SP, entre uma cobertura cerâmica e uma cobertura verde, e verificou que nas condições de verão analisadas, a edificação com cobertura verde conseguiu atingir as condições que a NBR 16401 (ABNT, 2008) considera como de conforto, sem necessidade de condicionamento artificial; já a edificação com cobertura cerâmica, sob as mesmas condições, apontou a necessidade de condicionamento artificial para atingir os mesmos resultados.

Coma et al. (2016) concluíram que telhados verdes extensivos são uma boa alternativa para economia de energia durante os períodos de verão, pois neste estudo, realizado na região da Catalunha (Espanha), houve uma redução de 2,2% a 16,7% no consumo energético de condicionamento para conforto térmico nos sistemas de telhado verde, quando comparado ao sistema composto de laje de concreto.

Um estudo comparativo, realizado por Vecchia (2005) em São Paulo-SP, mostra que os telhados verdes apresentam menor amplitude térmica (9,2 °C), sendo três vezes menor que os

demais sistemas tradicionais estudados, os quais transformam grande parte da energia solar em calor, conforme Tabela 2. Em telhados verdes isto não ocorre, fazendo com que haja diminuição da necessidade do uso de equipamentos para resfriar o ambiente.

Tabela 2: Comparativo de temperaturas superficiais internas de acordo com sistema de cobertura

	Temperaturas Superficiais Internas			Amplitude térmica
	Máxima	Média	Mínima	
Telha Cerâmica	50.9	32.9	8.5	42.5
Telha de Aço Galvanizado	57.8	35.9	9.5	48.4
Telha de fibrocimento	48.6	25.6	9.5	39.1
Laje de concreto	45.0	31.8	11.5	33.4
Telhado verde	26.7	22.1	17.5	9.2
Temperatura do ar (Externa)	34.0	27.1	12.7	21.4

Fonte: Vecchia (2005)

v) Melhorias no conforto acústico e térmico da edificação

Em relação às melhorias no conforto acústico, Aguiar e Fedrizzi (2010) verificaram a existência de amortecimento dos ruídos quando se emprega telhados verdes. O solo, as plantas e o ar possuem o efeito de isolante ao som. O substrato tende a bloquear frequências mais baixas de som e as plantas as frequências mais altas.

No que diz respeito ao conforto térmico, Chen (2006) revela que tanto telhados vegetados intensivos quanto extensivos trazem benefícios térmicos ao ambiente urbano, reduzindo a temperatura das superfícies, resfriando o ar ambiente, reduzindo a radiação refletida e o fluxo de calor pelo telhado.

Hui e Chan (2008) realizaram estudo em Hong Kong com uso de câmera de infravermelho, onde verificou-se a diferença de temperatura entre dois sistemas de coberturas verdes modulares e uma laje de concreto convencional (Figura 6). Os resultados obtidos indicam até 13°C de diferença entre a superfície das coberturas verdes e a superfície da cobertura convencional.

Figura 6: Foto com câmera de infravermelho evidenciando diferença de temperatura entre a cobertura de concreto e o telhado verde



Fonte: Hui e Chan (2008)

Bevilacqua et al. (2016) em pesquisa realizada no sul da Itália revela que os telhados verdes são mais frios em cerca de 12 °C em comparação com os telhados convencionais, de acordo com as medições da temperatura média da superfície no verão. Mesmo no inverno, a diferença de temperatura entre os telhados convencionais e verdes é notável, em quase 4 °C.

Kozmhinsky (2018) comparou o índice de desconforto térmico em telhado verde em relação a uma laje coberta por piso cerâmico na cidade de Recife-PE, tendo verificado que no mês de janeiro de 2017 a temperatura máxima para o ambiente gramado foi de 27,8 °C, enquanto que no ambiente com piso cerâmico foi de 31,1 °C, indicando que a cobertura vegetal ameniza o desconforto térmico.

Segundo Moraes e Roriz (2005), do total de irradiação solar que incide sobre uma cobertura verde, 60% é absorvida pelas plantas, 27% são refletidos para a atmosfera e apenas 13% são transmitidos para as camadas abaixo do telhado.

vi) Biodiversidade urbana e contato com a natureza

Os telhados verdes têm um potencial para proporcionar um espaço verde atraente nas áreas do centro, onde o espaço verde no solo é limitado ou simplesmente inexistente (BERNDTSSON, 2010). Além disso, de acordo com Ngan (2004), os telhados verdes atraem invertebrados, como abelhas, besouros, borboletas, mariposas, minhocas e caracóis, e vertebrados como aves. A biodiversidade pode ser encorajada pela maximização da diversidade estrutural, variando a

profundidade do solo, usando solos nativos e permitindo o crescimento de espécies de plantas que servem de hospedeiras para larvas e de alimento para insetos.

Grinde e Patil (2009) afirmam que o contato visual com a natureza tem impactos na saúde e bem-estar, gerando benefícios emocionais, fisiológicos, sociais e cognitivos. De acordo com Heerwagen (2006), os benefícios do contato com a natureza já foram verificados em uma variedade de configurações, incluindo locais de trabalho, hospitais, ambientes urbanos e experimentos laboratoriais.

A exemplo, tem-se um estudo realizado com 23 pacientes pós-cirúrgicos, que mostrou que aqueles internados em quartos contendo janela com vista para paisagem natural tiveram recuperação mais rápida, tomaram analgésicos em menor quantidade e obtiveram relatórios mais favoráveis do setor de enfermagem, quando comparados aos pacientes internados em quartos com janelas voltadas para paredes de alvenaria (ULRICH, 1984).

Lee et al. (2015) realizou estudo com 150 estudantes universitários, onde estes deveriam realizar um teste no computador, tendo um intervalo de 40 segundos entre as atividades. Um grupo observou um telhado verde, enquanto que outro grupo observou uma cobertura de concreto durante o intervalo de tempo citado, e em seguida prosseguiram realizando as atividades do teste. Os resultados revelaram que os estudantes que olharam para o telhado verde recuperaram a atenção de forma mais rápida, apresentaram respostas mais consistentes e tiveram mais questões respondidas. O estudo sugere que os micro-intervalos verdes podem ajudar funcionários de empresas, por exemplo, a aumentar sua produtividade durante o dia de trabalho, proporcionando intervalos de reforço para o cérebro.

2.5 Legislações envolvendo telhados verdes

Os governos em muitos países estão cada vez mais conscientes de sua responsabilidade em garantir a sustentabilidade nos ambientes urbanos, no entanto, isso requer que as empresas que executem projetos de construção civil desenvolvam estratégias e planos de ação que contribuam para o desenvolvimento sustentável nas cidades (AARSETH et al., 2017).

Kats (2010) também concorda que a transformação do ambiente construído em um ambiente sustentável requer apoio federal visando a transformação do projeto padrão em um projeto sustentável para quase todas as novas construções e a maioria das modernizações. Diante disso, verifica-se a importância da atuação do governo neste âmbito.

2.5.1 No mundo

O uso de telhados verdes já é comum em países, como: Alemanha, Áustria, Japão, Canadá, Dinamarca, Suíça, Estados Unidos e França. Alguns governos dão inclusive incentivos para a construção de telhados ecológicos; outros, obrigam sua instalação. (DOTTO; DOTTO; SILVA, 2017)

De acordo com a *International Green Roof Association* (IGRA, 2017), estão entre os incentivos oferecidos internacionalmente pelos governos: custeamento de percentual dos gastos para implementação do telhado; diminuição de taxas de serviço relacionados a abastecimento e esgotamento sanitário (no caso de reutilização de águas pluviais); aumento do coeficiente de aproveitamento (a empresa poderá aumentar a área construída do projeto caso instale o telhado verde); abatimentos em taxas relacionadas a licenças de construção, ou até mesmo empréstimos a serem pagos com a economia de energia e água provenientes da instalação do telhado.

Segundo Ngan (2004), desde 1960 a Alemanha investe em pesquisas sobre telhados verdes, e por isso é reconhecida como líder mundial nesta tecnologia, tanto do ponto de vista teórico como prático. Até 2008, mais de 80 cidades da Alemanha (mais de 50% do total) já ofereciam incentivos para a construção dos telhados ecológicos. Treze dessas cidades já permitiam uma redução entre 50% e 80% das taxas de serviço público para empresas privadas que incorporaram telhados verdes. Vinte e nove dessas cidades já forneciam subsídios monetários diretos para a incorporação de telhados verdes (MEHTA et al., 2008).

Nakamura e Yuba (2016) realizaram uma análise comparativa entre guias de telhados verdes da Alemanha, Canadá, Austrália e Hong Kong (Quadro1), chegando à conclusão que o guia alemão *Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau* (FLL, 2008) é o mais abrangente e possui uma base de dados mais completa, realizada a partir de diversos testes ao longo dos últimos anos, fazendo com que ele seja considerado um dos mais importantes guias sobre projeto, construção e manutenção de telhados verdes do mundo.

Quadro 1: Comparativo de Guias de Telhados Verdes

Conteúdos identificados	Alemanha	Canadá	Austrália	Honk Kong
Definição de cobertura verde	X	X	X	X
Propósito do guia	X	X	X	X
Guias e normas existentes	X	X		X
Benefícios dos sistemas de cobertura verdes	X	X	X	X
Barreiras/obstáculos para a implantação de coberturas verdes				X
Tipos de cobertura verde	X	X	X	X
Abrangência da aplicabilidade das coberturas verdes (condições de clima)	X	X	X	X
Funções das coberturas verdes e efeitos benéficos	X	X	X	X
Aptidão para certificação ambiental		X		X
Implicações de carregamento nas estruturas	X	X	X	X
Inclinação da cobertura	X	X	X	X
Projeto arquitetônico e executivo da cobertura e adaptações (em reforma)	X	X	X	X
Detecção de vazamentos	X	X	X	X
Proteção contra acidentes/mecanismos de segurança	X	X		X
Impermeabilização das bases para coberturas verdes	X	X	X	X
Proteção contra penetração das raízes	X	X	X	X
Cuidados com a instalação de proteção mecânica para a impermeabilização	X			
Drenagem de água do sistema (drenos e tubulações)	X	X	X	X
Retenção d'água para vegetação	X	X	X	X
Armazenamento de água para usos diversos	X	X	X	X
Filtragem de água (mantas drenantes)	X	X	X	X
Papel e composição do substrato	X	X	X	X
Seleção de plantas	X	X	X	X
Formas de plantio	X	X	X	X
Aptidão para agricultura e produção de alimentos		X	X	X
Compatibilidade entre os materiais	X			X
Compat. ambiental (lixiviação, emissões, disposição/reciclagem, poluição)	X			
Grau de tolerância das plantas, fitotoxicidade	X			
Ação do vento	X	X	X	X
Ação do fogo	X	X	X	X
Proteção contra deslizamentos e cisalhamentos da cobertura verde	X			
Elementos construtivos (feitos no local ou pré-fabricados)	X			X
Áreas transitáveis sobre a cobertura verde	X			X
Instalação de mobiliário (pérgolas, treliças, iluminação, etc.)	X		X	
Integração de painéis solares e outras tecnologias na cobertura verde		X	X	X
Irrigação	X	X	X	X
Fertilização	X	X	X	X
Proteção contra erosão	X	X		X
Gestão do projeto (contexto produtivo, administrativo e legislativo)			X	X
Papel dos profissionais		X		
Garantias	X	X		
Conservação e manutenção	X	X	X	X
Testes e inspeções	X			X
Considerações de custos		X	X	X
Estudos de caso		X	X	X

Fonte: Nakamura e Yuba (2016)

Nos Estados Unidos, a primeira cidade a ter uma legislação que requer telhados verdes é San Francisco (2016), que estabelece de 15% a 30% da área de cobertura voltada para a instalação de telhados verdes ou placas fotovoltaicas, ou ambos (SNOW, 2016).

O governo de Copenhague, na Dinamarca decretou que todos os projetos de edificações privadas e públicas contendo cobertas com menos de 30 graus de inclinação devem incluir telhados verdes, independente da sua área (COPENHAGEN, 2015). A lei também se aplica a edifícios existentes, que devem sofrer retrofit com ajuda de custo fornecida pelo governo (WILKINSON; DIXON, 2016).

Em Basileia, na Suíça, desde 2002 todos os novos empreendimentos com telhados planos devem instalar telhados verdes com no mínimo 10 cm de espessura na camada de substrato e utilização de plantas nativas (KAZMIERCZAK; CARTER, 2010).

Existem exemplos fora da Europa, como Toronto, no Canadá, que obriga todos os edifícios com mais de 2.000 m² de área construída, a ter um percentual entre 20% e 60% da área de cobertura revestida por telhado verde (TORONTO, 2013). Já Tóquio, no Japão, requer desde 2001 no mínimo 20% de telhado verde em edifícios com mais de 1.000 m² de área construída (TOKYO, 2001).

Na América do Sul observa-se que a cidade de Córdoba, na Argentina, possui uma legislação que estabelece entre 40% e 60% como sendo a mínima porcentagem de telhado verde permitida para todos os edifícios residenciais e industriais com mais de 400m² e 600m², respectivamente, de área de cobertura (CÓRDOBA, 2016).

2.5.2 No Brasil

No Brasil, são identificados 200 mil metros quadrados de telhados verdes instalados por ano, valor este inferior a estimativa de alguns países europeus, que chega a 3,3 milhões de metros quadrados (LEMOS; KAUSKALE, 2017).

Ainda de acordo com os citados autores, no Brasil ainda não existe nenhuma norma técnica ou guia indicado pelas autoridades federais para a construção de telhados verdes, desprovendo os

consumidores e os profissionais da área de orientação adequada. Contudo, algumas cidades e estados brasileiros já possuem legislações que incentivam ou obrigam a utilização do sistema.

O estado de Santa Catarina criou em 2007 um programa estadual de incentivo à adoção de telhados verdes por meio da Lei Nº 14.243 (SANTA CATARINA, 2007). Já no Piauí, foi decretada em 2016 a lei Nº 6888 (PIAUI, 2016), que obriga a adoção de práticas e métodos sustentáveis nas obras executadas pelo Estado do Piauí ou com recursos financeiros vinculados ao tesouro estadual. Dentre as diretrizes que devem ser aplicadas sempre que possível, está inserida a instalação de telhados verdes.

Na cidade de São Paulo, o decreto 55.994/2015 afirma que os telhados verdes e jardins verticais podem ser utilizados como medida de compensação ambiental em construções urbanas, podendo compensar danos causados, por exemplo, pela intervenção em Área de Preservação Permanente (APP) (SÃO PAULO, 2015).

A primeira e única lei no Brasil que de fato impõe a instalação de telhados verdes entrou em vigor na cidade de Recife em 2015. A Lei Ordinária Nº 18.112 (RECIFE, 2015) obriga a aplicação de telhados verdes em edificações habitacionais multifamiliares com mais de quatro pavimentos e não-habitacionais com mais de 400m² de área de cobertura. Segundo a lei, as edificações contendo áreas de lazer situadas em lajes de piso devem conter no mínimo 60% da cobertura composta por telhados verdes; já as edificações contendo áreas de lazer em pavimento de cobertura, devem conter pelo menos 30% de telhado verde.

Ao comparar a lei do município de Recife com outras leis que também obrigam a instalação deste sistema, percebe-se a deficiência da mesma em alguns aspectos, conforme Quadro 2. Para que um telhado verde cumpra suas diversas funções e apresente os benefícios citados anteriormente no tópico 2.3, faz-se necessário o cumprimento de diretrizes mínimas, que já são consideradas em outras cidades como, por exemplo, Toronto e San Francisco.

Além das leis contidas no Quadro 2, as cidades de Tóquio (Japão), Linz (Áustria), e Basileia e Zurique (Suíça) também já tornaram a implantação de coberturas vegetais obrigatória em determinados tipos de construções.

Quadro 2: Comparativo de Leis que tornam Obrigatória a Instalação de Cobertas Verdes

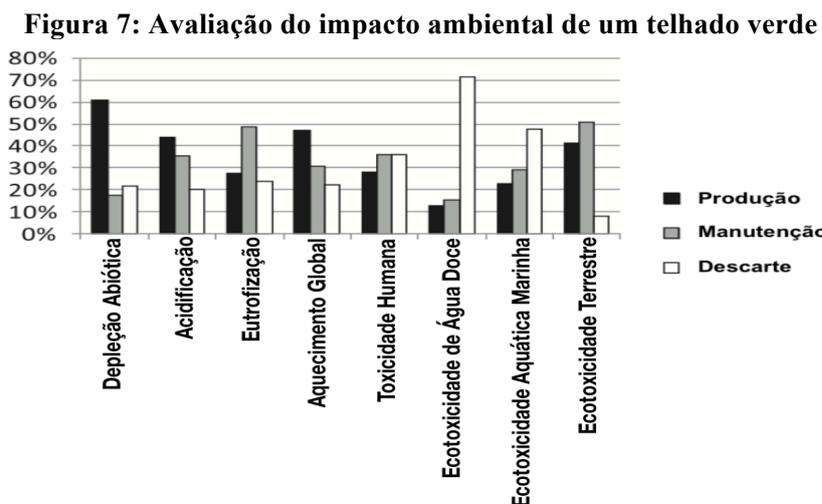
	Recife (2015)	Toronto (2013)	Copenhagen (2015)	San Francisco (2016)	Córdoba (2016)
Requisitos Básicos					
Válida a partir	12/01/2015	30/01/2010	2010	01/01/2017	07/07/2016
Área Construída Mínima que a lei se aplica (m ²)	400m ²	2000m ²	-	2000 pés ²	400m ² (residenciais) 600m ² (industriais) na coberta
Cobertura Mínima do Telhado	30 ou 60%	20-60%	-	15% - 30%	40%-60%
Aspectos abrangidos					
Definição de telhado verde	X	X	X	X	X
Tipos de telhado verde	X	X	X	X	X
Funções de um telhado verde	X	X	X	X	X
Inclinação da cobertura		X			X
Camadas do telhado verde		X	X	X	X
Cargas Gravitacionais nas estruturas		X		X	X
Estabilidade da inclinação		X		X	X
Extravasores		X		X	X
Elevação do vento		X		X	
Segurança contra incêndios		X		X	
Ocupação e segurança		X		X	X
Impermeabilização		X		X	X
Drenagem		X		X	
Retenção de água	X	X		X	X
Desempenho da vegetação		X		X	X
Seleção do substrato		X		X	
Seleção da vegetação	X	X		X	X
Irrigação		X		X	X
Plano de manutenção		X		X	X

Fonte: Autor

2.6 Materiais usados em telhados verdes

A maioria dos projetos de telhados verdes ainda são baseados em materiais convencionais, que em alguns casos não são ecológicos, como as membranas geotêxtis de polipropileno ou poliéster, os módulos de polietileno ou poliestireno, o betume ou as membranas de PVC (VILA et al., 2012).

Peri et al. (2012) concluíram que a fase de produção de um telhado verde, quando comparada com as fases de manutenção e descarte, resulta em uma maior pressão sobre o meio ambiente em termos de potencial de depleção abiótica (uso de recursos minerais e fósseis), potencial de acidificação (produção de poluentes acidificantes como gases contendo enxofre) e potencial de aquecimento global (liberação de dióxido de carbono, óxido nítrico e gás metano), como exposto na Figura 7.



Fonte: Peri et al. (2012)

Os telhados verdes geralmente contêm polímeros em todas as suas camadas (com exceção de substrato e vegetação), e é essencial que sejam explorados materiais que possam substituir o uso destes compósitos, visando a maior sustentabilidade dos sistemas (BIANCHINI; HEWAGE, 2011); sendo, portanto, o uso e reuso de materiais descartados um passo obrigatório na construção sustentável.

Segundo Eksi e Rowe (2016), o uso de materiais reciclados deve ser incentivado em telhados verdes, desde que não haja o comprometimento das propriedades do substrato que dá suporte às plantas, de modo que o telhado ainda possa fornecer os benefícios ecossistêmicos pelos quais

são conhecidos. Sendo assim, o substrato reciclado deve fornecer as propriedades químicas e físicas necessárias para propiciar o crescimento da vegetação, deve ser leve para se manter dentro da capacidade estrutural de um edifício, deve reter nutrientes e ser poroso o suficiente para permitir a drenagem, mantendo a capacidade de retenção de água adequada.

A aplicação bem-sucedida de materiais reciclados em telhados verdes é benéfica tanto para o desenvolvimento dos telhados verdes quanto para a indústria da reciclagem, permitindo a troca de elementos convencionalmente utilizados por materiais que seriam provavelmente descartados, gerando custos ambientais e financeiros, de acordo com Chen, Kang e Lin (2018).

Neste sentido, há pesquisas que apresentam este tipo de abordagem, a exemplo de Vila et al. (2012), que realizaram um estudo comparativo onde empregaram pozolana (material convencional) e três diferentes tamanhos de fragmentos de borracha de pneu reciclada (0,8-2,5 mm, 2-3,5 mm e 2-7 mm) na camada drenante de um telhado verde, onde avaliaram parâmetros de condutividade hidráulica, taxa de infiltração e infiltração cumulativa por meio de ensaio de permeabilidade de carga constante. Neste estudo, 18 módulos de 0,17 m² foram instalados na cidade de Lérida (Espanha), sendo alguns deles contendo vegetação (de dois diferentes tipos) e outros sem conter vegetação, visando a determinação da capacidade de retenção de água do sistema, conforme a Figura 8.

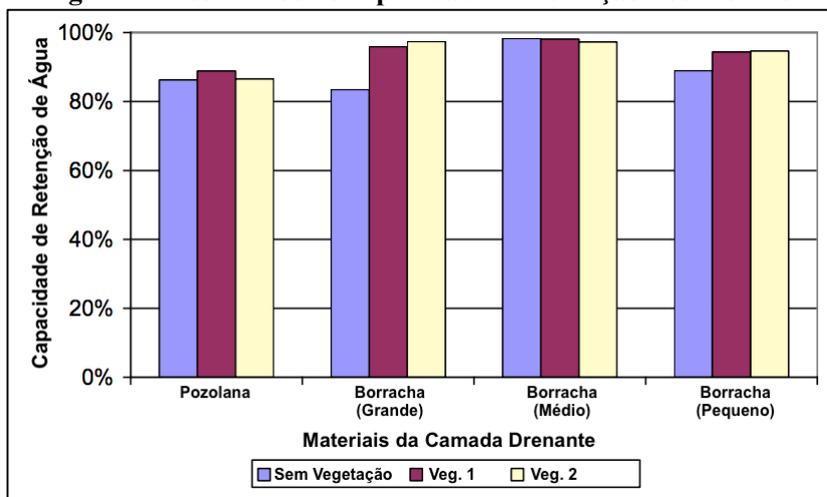
Figura 8: Módulos de 0,17m² instalados em lérida, espanha



Fonte: Vila et al. (2012)

Conforme os autores, independente do tamanho dos fragmentos de borracha, todos os módulos apresentaram densidade mais baixa que a pozolana, além de melhores níveis de aeração e drenagem. Com relação à retenção de água, dados da Figura 9 mostram que todos os tamanhos de fragmentos de borracha apresentaram resultados entre 3 e 12% maiores quando comparados aos da pozolana, exceto pelo tamanho grande (2-7 mm) sem vegetação.

Figura 9: Resultados de capacidade de retenção dos módulos



Fonte: Vila et al. (2012)

Araújo et al. (2013) avaliaram um modelo de telhado verde de 100 cm de largura, 71 cm de comprimento e 120 cm de altura, contendo módulo fabricado a partir de resíduos de indústria de couro na cidade de Londrina - PR, conforme a Figura 10. Os autores constataram uma redução de volume médio no sistema de drenagem de 46,4%, acarretando no retardo do efeito de pico de uma precipitação extrema.

Figura 10: Módulos de resíduos de couro



Fonte: Araújo et al. (2013)

Martins e Pinto (2015) efetuaram um estudo comparativo entre modelos de telhado verde existentes no mercado e outro contendo garrafas PET desenvolvido pelos autores. O modelo de garrafas PET estudado continha 7cm de altura, e em seu interior possuía manta geotêxtil, 5 cm de Solo São Pedro e Grama Esmeralda. A análise comparativa entre os modelos evidenciou a superioridade do modelo reciclado com garrafas PET, que se mostrou mais favorável no que diz respeito à carga sobre a estrutura; apresentando uma média de 56,5 kg/m² de massa adicional

à estrutura. Segundo Tomaz (2003), os valores encontrados usualmente variam de 70 kg/m² a 170 kg/m² e segundo IGRA (2015) variam entre 60 kg/m² a 500 kg/m².

A aplicação de materiais reciclados é uma tendência no desenvolvimento de coberturas verdes, no entanto, grande parte dos estudos citados se concentraram nos efeitos sobre o crescimento das plantas, mas não nos efeitos sobre a qualidade da água escoada através do sistema. Os substratos demonstraram influenciar a qualidade da água obtida; portanto, o uso de materiais reciclados deve considerar os efeitos não apenas nas plantas, mas também na qualidade da água após passar pelas camadas do telhado (CHEN; KANG; LIN, 2018).

2.7 Medição da performance de telhados verdes

A grandeza do efeito dos telhados verdes sobre a redução do escoamento das águas pluviais depende da espessura do substrato do solo, da capacidade do solo de reter água, da idade do telhado, da vegetação escolhida, da inclinação do telhado, do tamanho do evento de precipitação ou da distribuição de precipitações durante os períodos de estudo. Sendo assim, a análise da quantidade da água de chuva retida pelo sistema é uma forma de se medir a performance do mesmo (BERNDTSSON, 2010).

Ferreira e Moruzzi (2007) reiteram a afirmação de que uma das formas de se avaliar a eficiência de um telhado verde é por meio do acompanhamento dos aspectos referentes a qualidade e a quantidade da água. Todorov et al. (2018) afirmam que a avaliação da qualidade de água escoada de telhados verdes permite a aplicação do reuso de água como alternativa sustentável aos sistemas convencionais de telhados.

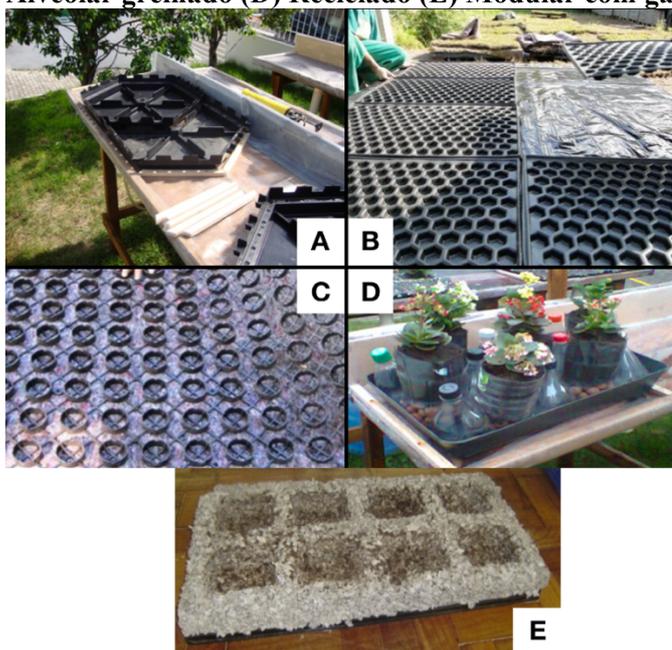
Teixeira (2013) afirma que as coberturas verdes podem se comportar como fonte de nutrientes, compostos e partículas para a água; no entanto, elas também podem se comportar como depósitos de contaminantes existentes na água de chuva, ou seja, pode ocorrer a melhoria ou piora da qualidade da água ao passar pelas coberturas verdes. Chen, Kang e Lin (2018) reiteram que sem o nível adequado de cuidado, a água escoada de telhados verdes pode conter poluentes e se tornar uma nova fonte de poluição não pontual em áreas urbanas.

Nesse sentido, Gregoire e Clausen (2011) realizaram um estudo em Connecticut (EUA) de parâmetros de qualidade e quantidade de água retida em um telhado verde modular extensivo

de 248 m², contendo 334 módulos de 1,2x0,6x10,2m (Largura x Espessura x Comprimento). O estudo durou 12 meses e os autores concluíram que o telhado verde estudado foi efetivo na redução do escoamento das águas pluviais, já que reteve 51,4% da precipitação. Além disso, o modelo estudado foi efetivo também na redução do carregamento de poluentes para a maioria dos contaminantes da qualidade da água, onde mais de 90% das concentrações totais dos metais Cu, Hg e Zn estavam na forma dissolvida.

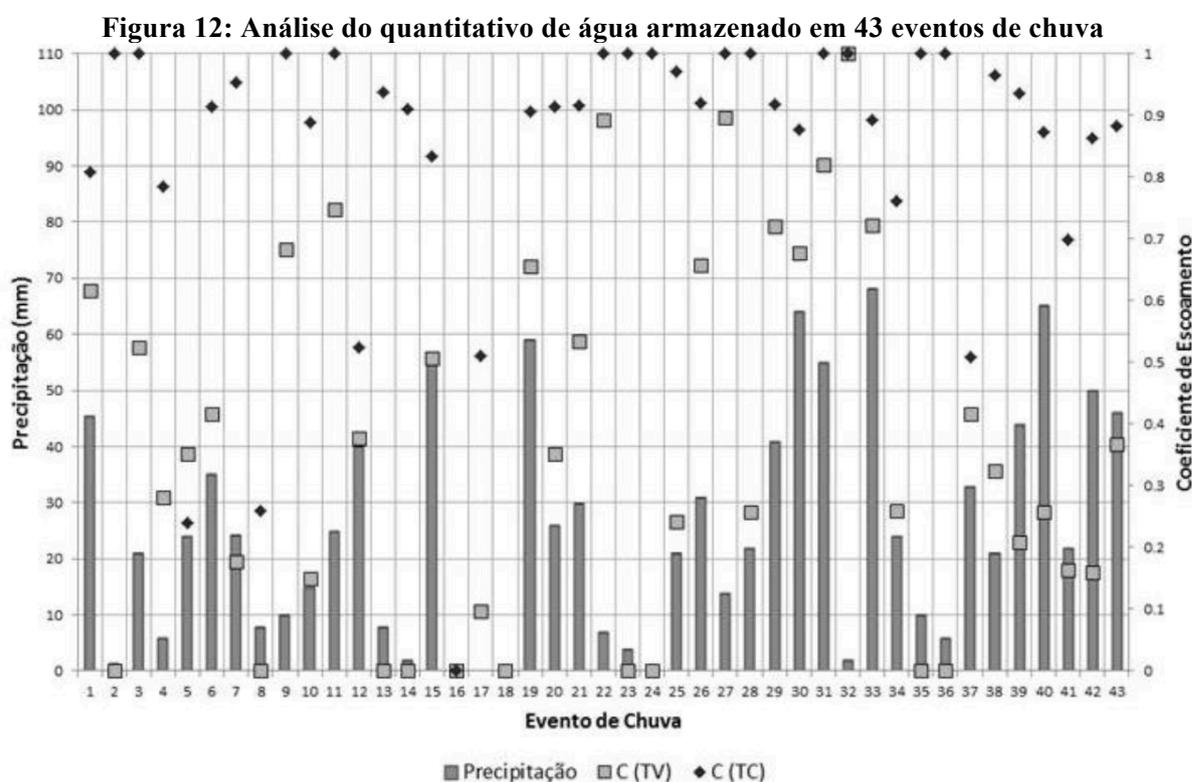
Jobim (2013) realizou estudo comparativo entre 5 diferentes tipos de telhados verdes (hexagonal, alveolar simples, alveolar grelhado, reciclado e modular com galocha), exibidos na Figura 11 e testados com e sem argila expandida. Neste caso, o sistema de telhado verde mais eficiente foi o modular com galocha com argila expandida, onde foi possível reduzir, em média, 88,1% do escoamento pluvial. Para o mesmo sistema sem a argila expandida, a redução média foi de 82,8%. O sistema hexagonal foi o segundo melhor sistema, com redução média no escoamento que variou entre 79,8% e 60,7%, para o substrato com argila e sem argila, respectivamente. Os sistemas alveolares simples e grelhado produziram resultados muito semelhantes, com reduções médias no escoamento que variaram de 61 a 59% para o sistema com argila e sem argila. O sistema reciclado feito com garrafas PET foi o menos eficiente, com redução do escoamento da ordem de 22%.

Figura 11: Diferentes modelos de módulos estudados (A) Hexagonal (B) Alveolar simples (C) Alveolar grelhado (D) Reciclado (E) Modular com galocha



Fonte: Jobim (2013)

Tassi et al. (2014) analisaram 43 eventos de chuva durante 17 meses (entre outubro de 2010 e julho de 2012) sobre uma superfície de telhado verde (TV) e uma superfície de fibrocimento (TC) de aproximadamente 6 m² cada; sendo o telhado verde deste estudo composto por módulos de EVA (Acetato-Vinilo de Etileno – material emborrachado muito utilizado em solados de sapatos) reciclado moído e aglomerado com cimento Portland. Verifica-se na Figura 12 que para os eventos 2, 8, 13, 14, 18, 23, 35 e 36, o telhado verde armazenou todo o volume precipitado. O estudo concluiu ainda que em média, apenas 38% do volume total de chuva que incidiu no telhado verde resultou em escoamento, contra 87% do telhado convencional, promovendo uma redução dos volumes escoados da ordem de 56%.



Fonte: Tassi et al. (2014)

Razzaghmanesh, Beecham e Kazemi (2014) também realizaram estudo que analisou a quantidade e qualidade da água de 4 diferentes telhados verdes de 14,4 metros quadrados (sendo 2 intensivos e 2 extensivos) instalados sobre uma edificação de 22 andares em Adelaide (Austrália) entre setembro de 2011 e junho de 2012. Verificaram que os níveis de pH, turbidez, nitrato, fosfato e potássio foram maiores na água coletada dos telhados intensivos, com relação aos extensivos. A performance superior do telhado extensivo no quesito de redução de poluentes foi atribuída provavelmente ao volume reduzido de solo, pois gera menor quantidade de poluentes. Foi percebida também uma maior concentração de poluentes nas amostras

retiradas no início da pesquisa em relação às amostras obtidas ao final do período de estudo. Os autores atribuem a melhoria destes parâmetros de qualidade à acomodação do sistema e também ao escoamento de poluentes junto às águas pluviais.

Beecham e Razzaghmanesh (2015) realizaram outro estudo com 16 diferentes protótipos de telhados verdes instalados na cidade de Adelaide (Austrália), alternando inclinação (1° e 25°), altura do substrato (100mm e 300mm), tipo de substrato (tipo A – fragmentos de tijolo vermelho, fibra de coco e compostos orgânicos; tipo B - compostagem de casca de pinheiro; e tipo C - combinação de 50% do tipo B com a adição de 50% de composto orgânico), e tipo de vegetação (Margaridas, *Apiculatum* e *Crassifolium*); conforme Figura 13. Cinco chuvas (entre 11 e 56 mm) foram coletadas e parâmetros de quantidade e qualidade da água foram analisados. Os resultados mostraram que os modelos vegetados retiveram entre 52% e 95% da água, enquanto que os modelos sem vegetação retiveram entre 31% e 65%. Em termos de qualidade da água, tanto os sistemas com e sem vegetação atuaram como fontes poluidoras, sendo as concentrações de poluentes maiores nos protótipos não vegetados.

Figura 13: Estudo comparativo entre 16 protótipos de telhados verdes

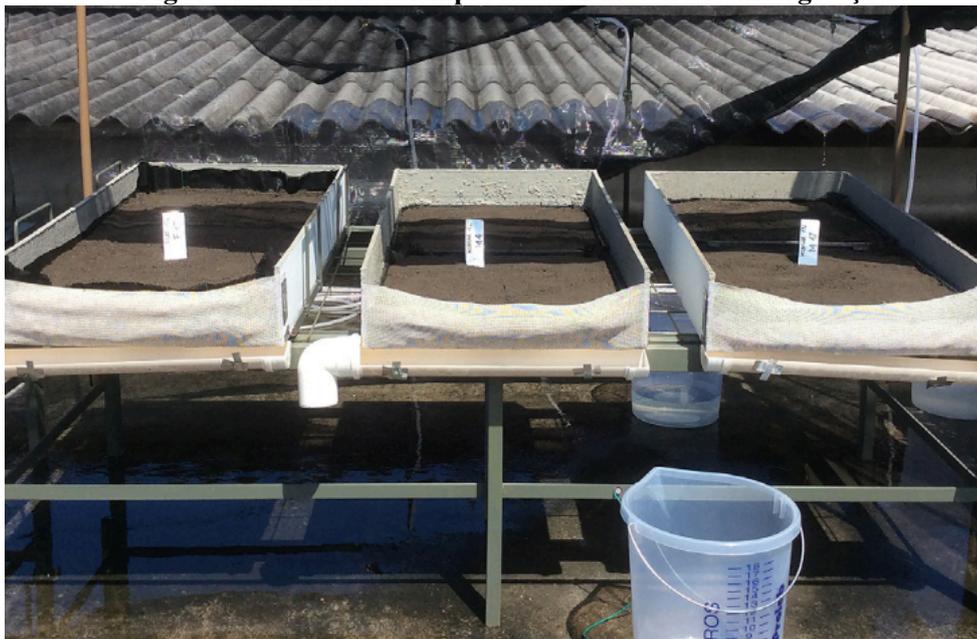


Fonte: Beecham e Razzaghmanesh (2015)

Loiola, Mary e Silva (2018) realizaram estudo comparativo visando testar o potencial de retenção de água de três modelos de módulos de telhados verdes estando estes previamente úmidos ou secos, e também com ou sem camada de vegetação. Este estudo foi realizado no Rio de Janeiro – RJ, com simulador de chuva de intensidade de 155 mm/h, onde o módulo de 2,5 cm de altura quando testado estando previamente seco e contendo vegetação foi capaz de reter

até 85,43% da água. Os módulos estudados tiveram dimensões de 0,50x0,50 m (Largura x Comprimento) e alturas de 2,5 cm, 4,0 cm e 7,5 cm. Os protótipos foram agrupados em unidades contendo 2 módulos cada, conforme Figura 14. O pior cenário em termos de retenção de água (7,5 cm com vegetação e previamente molhado), obteve ainda assim resultados acima de 30% de redução do escoamento superficial para todas as condições testadas.

Figura 14: Unidades compostas de 2 módulos sem vegetação



Fonte: Loiola, Mary e Silva (2018)

Verifica-se, portanto, que a análise da quantidade e da qualidade da água retida por telhados verdes é uma técnica amplamente difundida, já tendo sido testada, inclusive, para avaliar e comparar a eficiência de materiais reciclados com relação a materiais convencionais para uso em camadas destes sistemas.

2.8 Parâmetros de qualidade da água proveniente de telhados verdes

O principal problema associado ao emprego de sistemas de reaproveitamento de água consiste na garantia da qualidade da água coletada, o que implica em conhecer as características físicas, químicas e microbiológicas da água coletada e os parâmetros de qualidade para a água não potável, de modo a definir o sistema de tratamento mais adequado, além de um plano de monitoramento contínuo (TEXEIRA, 2013).

A NBR 15527 (ABNT, 2007) indica os requisitos para o aproveitamento de água de chuva de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis adotados, cujos parâmetros e valores podem ser visualizados na Tabela 3. Sendo assim, a água retida pelos telhados verdes que apresentarem os valores mínimos indicados pela norma poderão ser utilizadas em, por exemplo, em descargas de bacias sanitárias, irrigação de gramados e plantas ornamentais, lavagem de veículos, limpeza de calçadas e ruas, limpeza de pátios, espelhos d'água e usos industriais.

Tabela 3: Parâmetros de qualidade de água da chuva para usos restritivos não potáveis

Parâmetro	Análise	Valor
Coliformes totais	Semestral	Ausência em 100 mL
Coliformes termotolerantes	Semestral	Ausência em 100 mL
Cloro residual livre*	Mensal	0,5 a 3,0 mg/L
Turbidez	Mensal	<2,0 uT**, para usos menos restritivos <5,0 uT
Cor aparente (caso não seja utilizado nenhum corante, ou antes da sua utilização)	Mensal	<15 uH***
pH	Mensal	6,0 a 8,0 no caso de tubulação de aço carbono ou galvanizado
*No caso de serem utilizados compostos de cloro para desinfecção		
** uT é a unidade de turbidez		
*** uH é a unidade Hazen		

Fonte: NBR 15527 (ABNT, 2007)

Teixeira (2013) analisou nove coberturas experimentais, sendo oito coberturas verdes e uma cobertura convencional (com telhas cerâmicas). Os telhados verdes estudados tinham variação de camada drenante (georrede ou manta drenante), de substrato (silte-arenoso ou areia siltosa), e de vegetação (grama esmeralda, carpete dourado, rosinha do sol, onze horas, rosa de pedra, cacto margarida, grama amendoim, evolvulus ou lantana branca). Quando comparados os resultados obtidos com a NBR 15527 (ABNT, 2007), verificou-se que apenas os valores da turbidez e do pH foram atendidos pelas amostras de água drenada pelas coberturas verdes e convencional.

Budel (2014) realizou estudo comparativo contendo telhado convencional (telhado inclinado em 50% com telhas de concreto planas contendo 65 m²) e um telhado verde de 77 m² composto de argila expandida, manta geotêxtil, terra preta e grama esmeralda instalado 3 meses antes da primeira coleta. No caso do telhado verde, 2 pontos de coleta foram utilizados: um deles na cisterna (imediatamente após o escoamento) e outro em torneira após passagem por sistema com filtros instalados um após o outro, um de 200 micra e outro de 50 micra. Foi verificado que todas as amostras atenderam aos requisitos de pH, nenhuma atendeu aos requisitos de

coliformes totais e termotolerantes, e apenas o telhado convencional atendeu aos requisitos de turbidez, conforme a Tabela 4.

Tabela 4: Comparativo de resultados obtidos com NBR 15527 (2007)

Parâmetro	Valor Norma	Telhado convencional		Telhado verde Cisterna		Telhado verde Torneira	
		Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
pH	06/ago	5,3	6,7	6,3	7,4	6,2	7,5
Turbidez	<5 UNT	0,02	3,22	0,55	9,1	4,25	18,5
Coliformes totais	0	<18	4.900	<18	7.900	0	35.000
Coliformes termotolerantes	0	0	<18	0	45	0	280

Fonte: Budel, 2014

Gimenes (2017) também analisou os parâmetros de qualidade da água da NBR 15527 (ABNT, 2007). O referido estudo contemplou um telhado convencional (telhas metálicas/fibrocimento) e um telhado verde (composto de argila expandida, manta geotêxtil, areia lavada, húmus, fertilizante, casca de pinus e bromélias) instalados no Rio de Janeiro-RJ. Neste estudo nenhum dos telhados testados atendeu aos requisitos mínimos da NBR 15527 (ABNT, 2007) de coliformes totais (a norma requer ausência de coliformes totais, e ambos apresentaram resultado positivo para este grupo de bactérias). Além disso, as amostras provenientes do telhado verde também não atenderam aos requisitos mínimos de turbidez (obtendo média de 37,1 uT, sendo 5 uT o máximo permitido pela norma) e cor aparente (média de 901 uH, sendo 15 o máximo permitido pela norma). No entanto, a autora afirma que tais desconformidades poderiam ser resolvidas com tratamentos simples, como caixa de areia e cloração.

A seguir uma breve descrição dos parâmetros de qualidade de água de chuva especificados pela NBR 15527 (ABNT, 2007).

2.8.1 Coliformes totais e termotolerantes

As bactérias do grupo coliforme são consideradas os principais indicadores de contaminação fecal. O grupo coliforme é formado por um número de bactérias que inclui os generos *Klebsiella*, *Escherichia*, *Serratia*, *Erwenia* e *Enterobactéria* (BUDEL, 2014).

De acordo com a Fundação Nacional de Saúde (2004), denomina-se de bactérias do grupo

coliforme bacilos gram-negativos, em forma de bastonetes, aeróbios ou anaeróbios facultativos que fermentam a lactose a 35-37°C, produzindo ácido, gás e aldeído em um prazo de 24-48 horas.

O grupo dos coliformes totais inclui gêneros que não são de origem exclusivamente fecal, o reconhecimento deste fato levou ao desenvolvimento de métodos de enumeração de um subgrupo de coliformes denominados fecais (coliformes termotolerantes), os quais são diferenciados dos coliformes totais pela sua capacidade de fermentar a lactose em temperatura elevada (44,5 °C) (CETESB, 2018).

2.8.2 Cloro residual livre

De acordo com a Fundação Nacional de Saúde (2004), o cloro é um produto químico utilizado na desinfecção da água, sendo os produtos mais utilizados: hipoclorito de cálcio, cal clorada, hipoclorito de sódio e cloro gasoso. Após a desinfecção, a água deve conter um teor mínimo de cloro residual livre de 0,5 mg/L, sendo obrigatória a manutenção de, no mínimo, 0,2 mg/L em qualquer ponto da rede de distribuição.

O método de desinfecção da água para reuso fica a critério do projetista, podendo-se utilizar derivados de cloro, aplicação de raio ultravioleta, ozônio, entre outros. Em aplicações onde é necessário um residual desinfetante, deve-se usar derivado de cloro (BUDEL, 2014).

2.8.3 Turbidez

A turbidez de uma amostra de água é o grau de atenuação de intensidade que um feixe de luz sofre ao atravessá-la (esta redução se dá por absorção e espalhamento, uma vez que as partículas que provocam turbidez nas águas são maiores que o comprimento de onda da luz branca), devido à presença de sólidos em suspensão, tais como partículas inorgânicas (areia, silte, argila) e de detritos orgânicos, algas e bactérias, plâncton em geral, etc (CETESB, 2013).

Segundo Solderholm (2011), a turbidez pode ser causada por alto nível de oxigênio na água ou por partículas em suspensão, que causam um efeito turvo na água, podendo ser tratada com filtração mecânica.

2.8.4 Cor aparente

De acordo com Gimenes (2017), a cor é um parâmetro estético, que se dá pela presença de micropartículas em suspensão, não apresentando riscos à saúde. A cor verdadeira consiste na determinação de cor em amostras sem turbidez (por exemplo: após filtração ou centrifugação) e a cor aparente consiste na determinação de cor em amostras com turbidez (com material coloidal ou em suspensão). Ainda segundo a autora, a espectrofotometria é normalmente utilizada como técnica de medição.

2.8.5 pH

O pH (ou potencial hidrogeniônico) determina se a água é ácida ou alcalina. É um parâmetro que deve ser acompanhado para melhorar os processos de tratamento e preservar as tubulações contra corrosões ou entupimentos (BUDEL, 2014).

Segundo Gimenes (2017), a água da chuva já é ligeiramente ácida devido a uma pequena quantidade de dióxido de carbono (CO₂) dissolvido na atmosfera, com um pH próximo de 5,6 tornando-se corrosivo. Ainda segundo a autora, águas com pH mais baixo (ácidas) tendem a ser mais agressivas e corrosivas, e as com pH mais elevado (básicas) tendem a formar incrustações. No Brasil chuvas com pH inferior a 5,0 são consideradas ácidas.

Geralmente, com um pH inferior a 5,5, muitos nutrientes tornam-se muito solúveis e são facilmente lixiviados do perfil do solo, enquanto em níveis mais altos de pH, os nutrientes se tornam insolúveis e as plantas não podem extraí-los prontamente (BEECHAM; RAZZAGHMANESH, 2015).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Apresenta-se o programa de investigação experimental adotado na pesquisa, que aborda sobre os materiais reciclados e convencionais empregados, assim como os métodos, que compreendem ensaios de laboratório e de campo, utilizados para avaliar a eficiência dos materiais reciclados em telhados verdes.

3.1 Programa de investigação

O programa de investigação da pesquisa está dividido em 5 etapas, conforme Figura 15. Na primeira etapa foi realizada uma revisão bibliográfica sistemática acerca dos temas relacionados aos telhados verdes, aos materiais convencionalmente utilizados para compor este sistema no Brasil, aos possíveis itens reciclados que poderiam ser incorporados ao sistema e aos estudos de casos sobre medição da performance deste tipo de telhado.

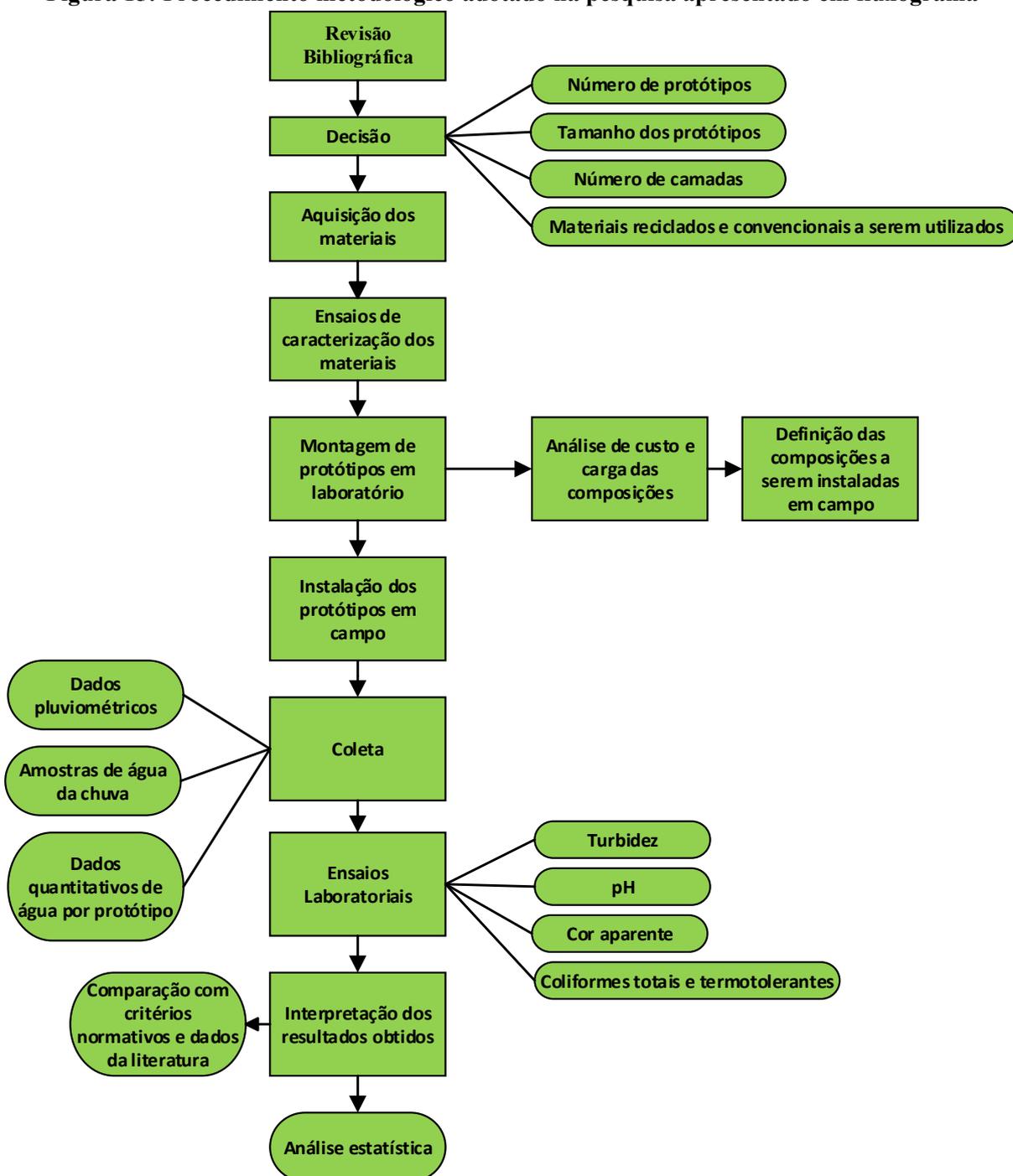
A segunda etapa constituiu a decisão do número de protótipos, tamanho dos módulos, número de camadas, além da seleção dos materiais reciclados e convencionais a serem empregados em suas camadas. Ainda nesta etapa, os materiais necessários foram adquiridos e passaram por ensaios de caracterização.

Na terceira etapa, os protótipos foram montados no laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade de Pernambuco, possibilitando o preenchimento das planilhas de custo e carga. Esta fase é finalizada quando os protótipos da composição, que obtiveram os melhores resultados de custo e carga, são levados juntamente com os protótipos convencionais para campo para a instalação em estrutura apropriada para coletar toda a água da chuva, que passar por cada um dos módulos.

A quarta etapa inclui a coleta de dados pluviométricos por meio de pluviômetro instalado no local. Nesta etapa também verificou-se a quantidade de água retida em cada protótipo a partir de seus respectivos recipientes de coleta. As amostras foram levadas para análise dos parâmetros de qualidade, discriminados na NBR 15527 (ABNT, 2007), em laboratório conveniado.

Na quinta e última etapa foram desenvolvidas a análise estatística e interpretação dos resultados obtidos para quantidade e qualidade da água, sendo estes confrontados com os critérios normativos e dados obtidos na literatura.

Figura 15: Procedimento metodológico adotado na pesquisa apresentado em fluxograma



Fonte: Autor

3.2 Materiais

Foram definidas no estudo 03 composições de telhado verde, cada uma apresentando diferentes materiais para cada camada. A primeira variação de telhado verde é denominada Composição Convencional (CC), possuindo materiais convencionalmente utilizados em todas as suas camadas, conforme tópico 2.3 do referencial teórico. A segunda e terceira variações, denominadas, respectivamente, Composição Reciclada 1 (CR1) e Composição Reciclada 2 (CR2), possuem materiais reciclados em todas as camadas, sendo estes definidos com base em estudos da literatura assim como pela disponibilidade dos mesmos na região.

Os materiais necessários para a confecção dos protótipos foram adquiridos em armazéns de construção, lojas de paisagismo/jardinagem e por meio de contato telefônico com empresas especializadas em telhados verdes em todo o território nacional, tendo sido alguns deles doados por parte de empresas.

A Tabela 5 apresenta resumidamente os materiais selecionados, a quantidade de material necessária para a montagem de cada protótipo (de dimensões 50 x 50 cm) e suas correspondentes camadas de telhado verde. Em seguida, tem-se o detalhamento de cada composição de protótipo investigado.

Tabela 5: Composição dos materiais empregados nos protótipos de telhado verde

Identificação	Suporte	Dreno	Filtro	Substrato
CC	Módulo de PEBD/PEAD (1 unidade)	Argila Exp. (4 kg)	Manta Geotêxtil (0,25 m ²)	Terra Vegetal (4 kg)
CR1	Módulo de chapas de embalagem Tetra Pak reciclada (1 unidade)	RCD (9 kg)	Poliéster Reciclado (0,25 m ²)	Lodo (4 kg)
CR2	Módulo de PEAD Reciclado (1 unidade)	-	Filamentos de Garrafa Pet (0,25 m ²)	Pó da Casca do Coco (3,5 kg)

Legenda:

PEAD - Polietileno de Alta Densidade

PEBD - Polietileno de Baixa Densidade

RCD - Resíduo da Construção e Demolição

Fonte: Autor

i) Composição Convencional (CC)

A camada de suporte da CC é composta de módulo constituído de Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) e Polietileno de Alta Densidade (PEAD) virgens, visualizado na Figura 16. Este produto é fabricado por empresa especializada em telhados verdes, cuja dimensão é 50 x 50 x 8 cm (Largura x Comprimento x Espessura).

Figura 16: Módulo de PEBD/PEAD virgem para composição convencional



Fonte: Autor

Na camada drenante foi utilizada a argila expandida (Figura 17), que é um agregado cerâmico leve, com forma arredondada e um núcleo alveolar, produzido pela queima de argila natural a temperaturas de 1100 - 1200 °C em forno rotativo. Foi selecionado o tipo 3222, que possui diâmetro entre 22 e 32mm. O produto foi adquirido em saco de 50L (18 kg) em empresa de paisagismo/jardinagem.

Figura 17: Argila expandida (A) Embalagem de 18kg adquirida; (B) Aspecto visual do produto



Fonte: Plantei Garden Center (2019)

A camada de filtro da CC é composta de manta geotêxtil, que é um não tecido permeável, cuja matéria-prima é o poliéster. É comercializada em armazéns de construção, fornecida por metro quadrado ou em rolos, conforme a Figura 18.

Figura 18: Manta geotêxtil



Fonte: Bidim Geotêxteis (2019)

Na camada de substrato, foi utilizada a terra vegetal (Figura 19), que se trata de solo natural misturado com restos de folhas, caules e gravetos já estabilizados. O material foi adquirido em loja de paisagismo/jardinagem, em sacos de 20 kg.

Figura 19: Terra vegetal



Fonte: Autor

ii) Composição Reciclada 1 (CR1)

A composição reciclada 1 contém módulo em formato de caixote sem tampa, desenvolvido pela autora, e constituído de chapas de embalagens Tetra Pak prensadas, adquiridas em loja de materiais de construção. O módulo possui dimensões de 50 x 50 x 8 cm (Largura x Comprimento x Espessura) e conta com 2 divisórias, onde estão localizados 24 furos para permitir o escoamento da água. Este módulo experimental foi confeccionado em marcenaria

local e os furos (de 8mm de diâmetro) foram feitos com furadeira no laboratório antes da montagem das camadas subjacentes, conforme Figura 20.

Figura 20: Módulo de chapas de Tetra Pak



Fonte: Autor

A camada drenante de CR1 é constituída de agregados reciclados de Resíduo da Construção e Demolição (RCD), obtidos em usina de reciclagem localizada em Camaragibe-PE e denominado ser do tipo cinza. Segundo a NBR 15116 (ABNT, 2004), o resíduo coletado corresponde ao Agregado de Resíduo de Concreto (ARC), pertencente à classe A , conforme a Resolução 307 do CONAMA(2002), composto na sua fração graúda, de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas, vide Figura 21.

Figura 21: Agregado reciclado de RCD



Fonte: Autor

A composição de um agregado reciclado de RCD é bastante variável. Na usina de reciclagem, onde os agregados foram coletados, os resíduos são provenientes de diferentes obras de construção e/ou demolição da Região Metropolitana de Recife, portando, com propriedades físicas, mecânicas e químicas variadas. Desta forma, fez-se necessária a caracterização do material por meio de ensaios de laboratório, descritos no item 3.3.1.

Na camada de filtro da CR1, foi utilizada uma manta geotêxtil do tipo não tecido, verificada na Figura 22, fabricada a partir de fibras de poliéster reciclado, fornecido em peças de 1,40 x 1,45 m e adquirido em armazém de construção.

Figura 22: Manta de poliéster reciclado



Fonte: Autor

Para a camada de substrato de CR1, foi utilizado o lodo proveniente de uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), localizada em Suape – PE, sendo proveniente de esgoto sanitário e industrial. Ressalta-se que a composição de lodo de ETE é altamente variável, visto que a estação de tratamento recebe diariamente efluentes provenientes de diversos locais, contendo assim as mais variadas composições, podendo inclusive apresentar agentes patógenos e substâncias nocivas à saúde. Sendo assim, também faz-se necessário caracterizar o material por meio de análise físico-química, indicadas no item 3.3.1.

iii) Composição Reciclada 2 (CR2)

A camada de suporte da composição reciclada 2 é composta de módulo de Polietileno de alta densidade (PEAD) 100% reciclado (Figura 22), fornecido por empresa especializada em telhados verdes, com dimensões de 50 cm x 50 cm x 7,5 cm (Largura x Comprimento x Espessura). Este tipo de módulo foi utilizado também em Loiola, Mary e Silva (2018).

Figura 23: Módulo de PEAD reciclado



Fonte: Autor

De acordo com as especificações do fabricante, a geometria do módulo utilizado na CR2 faz com que o mesmo não necessite de camada drenante; sendo assim, a camada de filtro deve ser aplicada diretamente sobre o módulo.

Na camada de filtro da CR2, utilizou-se uma manta de drenagem apropriada para jardinagem composta por milhares de filamentos contínuos de material sintético proveniente da reciclagem de garrafas PET, fornecida em embalagens individuais de 107 cm x 200 cm, verificada na Figura 24.

Figura 24: Manta de drenagem composta por filamentos de garrafa PET



Fonte: Bidim Geotêxteis (2019)

A camada de substrato foi constituída de pó da casca do coco (Figura 25), produzido em Recife-PE, que é caracterizado por ser o material residual do processamento da casca de coco maduro para obtenção da fibra longa. Este material já tem sido amplamente utilizado como substrato agrícola e é obtido a partir de uma sequência de operações, compreendendo as etapas de dilaceração, moagem, classificação, lavagem e secagem. Este produto foi adquirido diretamente com o fornecedor, em sacos de 20kg.

Figura 25: Pó da casca do coco



Fonte: Autor

3.3 Métodos

3.3.1 Caracterização dos Materiais

Os materiais usados na composição dos protótipos CC e CR1, no caso a argila expandida (camada drenante de CC), agregados reciclados de RCD (camada drenante de CR1) e o lodo de ETE (camada de substrato de CR1), foram submetidos a ensaios de caracterização, a fim de verificar a adequabilidade dos mesmos para as funções indicadas.

No caso da argila expandida e do agregado reciclado de RCD, foi realizado ensaio de granulometria por peneiramento, segundo a NBR 7181 (ABNT, 1984), utilizando-se 5 kg de material. Na Figura 26 verifica-se a quantidade de material retida por peneira. Sua granulometria foi comparada à da argila expandida do tipo 3222 (utilizada para fins paisagísticos), que segundo o fabricante é de 22 a 32 mm.

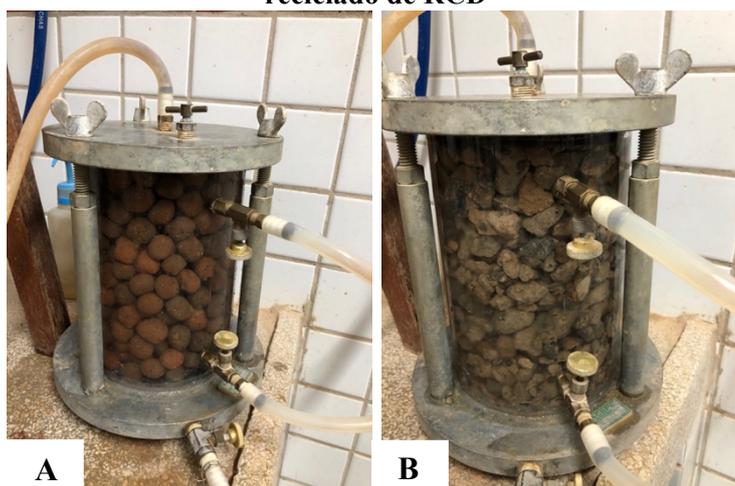
Figura 26: Ensaio de granulometria por peneiramento com o RCD



Fonte: Autor

Foi também realizado o ensaio de permeabilidade de carga constante, de acordo com a NBR 13292 (ABNT, 1995), tendo seus resultados calculados de acordo com a Lei de Darcy, Figura 26. Foi também determinado o peso específico seco de cada material durante a preparação do ensaio de permeabilidade.

Figura 27: Permeâmetro de carga constante: (A) Argila expandida; (B) Agregado reciclado de RCD



Fonte: Autor

Com relação ao lodo de ETE, foi realizada uma análise físico-química no Laboratório de Química Ambiental de Solos do Departamento de Agronomia da Universidade Federal Rural de Pernambuco, onde verificou-se o potencial fertilizante, o teor de matéria orgânica e teores de elementos tóxicos para humanos ou para o ecossistema (Cd, Pb, Ni, Cr, Ba, Hg, As, Sb, V, Se, Mo e Co).

3.3.2 Montagem dos protótipos de telhado verde

A montagem dos protótipos de telhado verde se deu em duas etapas. Na primeira etapa, executada no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade de Pernambuco, foi montada

uma unidade de cada composição (CC, CR1 e CR2), contendo cada uma 0,25 m² de área (Figura 28), para verificação de custos e cargas dos protótipos.

Figura 28: Montagem dos protótipos em laboratório (Etapa 1)



Fonte: Autor

Foram verificados a quantidade e o peso de cada material necessário para preencher as diferentes camadas dos protótipos, através da pesagem individualizada em uma balança de precisão de 5g (modelo LS20 - Marte). Em seguida, com base no custo unitário de cada material, obtido durante a etapa de aquisição, determinou-se o custo total por metro quadrado de cada protótipo. Após a montagem completa dos 3 protótipos, procedeu-se uma nova pesagem em balança de precisão (Figura 29), desta vez sendo pesados os protótipos prontos.

A etapa 1 foi concluída com a definição da composição de protótipo reciclado, que obteve os melhores resultados, em termos de custos e cargas, sendo a partir de então denominada de CR para as etapas seguintes da pesquisa.

Figura 29: Pesagem dos protótipos em balança de precisão



Fonte: Autor

Na etapa 2, foram montados mais 10 protótipos de telhado verde em laboratório, totalizando 6 da composição convencional (CC) e 6 da composição reciclada (CR), já que os protótipos montados na etapa 1 também foram aproveitados (2 unidades). Após a montagem, os 12 protótipos foram adequadamente embalados e transportados para a instalação em campo, descrita no item 3.3.3.

3.3.3 Instalação dos protótipos em campo e coleta de amostras de água

A instalação dos protótipos em campo se deu em terreno localizado no Bairro de Boa Viagem em Recife-PE, coordenadas geográficas $-8^{\circ}10'88''$ de latitude e $-34^{\circ}89'31''$ de longitude, conforme a Figura 30.

Figura 30: Localização de terreno onde foram instalados os protótipos



Fonte: Google Earth (2018)

Os 12 protótipos, cada um com área de 0,25 m², foram instalados a 90 cm do solo, sobre bancadas de madeira (Figura 18); sendo uma bancada para os 6 protótipos da CC, e a outra para os 6 protótipos da CR. Cada protótipo foi dotado de sistema de captação de águas pluviais individualizado, capaz de reter toda a água que caísse sobre as superfícies dos protótipos.

O sistema de captação individualizado foi montado, utilizando-se baldes de 13 L (contendo furos de 5 cm de diâmetro nas tampas) e sacolas plásticas formando funil entre o módulo e o balde, Figura 31. As sacolas foram fixadas nos módulos com fita adesiva de alumínio, envolvendo todo o perímetro.

Figura 31: Estrutura de apoio para os protótipos contendo sistema de captação individualizado

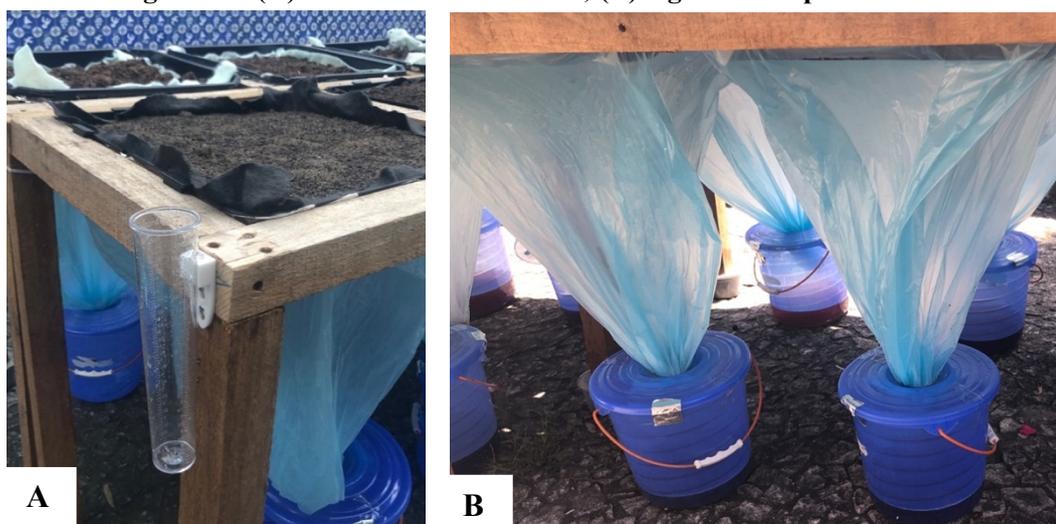


Fonte: Autor

Após o primeiro evento de chuva (de 36 mm), ocorrido em 15/02/2019, todos os protótipos instalados em campo foram pesados, para obtenção de carga saturada, por protótipo e por metro quadrado, tendo em vista a importância destes dados para fins estruturais de uma edificação.

Do primeiro evento de chuva a água retida foi descartada. Para os eventos de chuvas seguintes, ocorridos entre 16/02/2019 e 01/04/2019, foram considerados apenas aqueles com indicação mínima de 10 mm, conforme registro no pluviômetro instalado (Figura 32 A). Este critério também foi usado em Budel (2014). No total, foram 06 eventos de chuvas considerados para a avaliação dos telhados verdes investigados, totalizando-se 72 amostras de água coletadas no sistema de captação dos protótipos, as quais eram medidas em recipiente graduado (Figura 32 B), semelhante a Garrido Neto (2016).

Figura 32: (A) Pluviômetro instalado; (B) Água retida pelo sistema



Fonte: Autor

Após a medição quantitativa, as amostras de água da chuva de cada protótipo foram vertidas em recipientes individualizados, autoclavados e identificados, conforme a Figura 33. Depois de cada coleta, todo o sistema de coleta passou por lavagem e secagem, preparando-o para um novo evento de chuva.

Figura 33: Recipientes de coleta identificados



Fonte: Autor

3.3.4 Ensaios de caracterização de amostras de água coletadas

As 72 amostras de água coletadas foram levadas para o Laboratório do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, onde foram realizados os ensaios dispostos na Tabela 6, a fim de obter-se os parâmetros de qualidade de água da chuva para usos restritivos não potáveis, conforme NBR 15527 (ABNT, 2007). O ensaio de cloro residual livre

não foi realizado porque não foram utilizados compostos de cloro para desinfecção (a água coletada foi analisada sem nenhum tipo de tratamento).

Tabela 6: Resumo dos ensaios laboratoriais realizados

Parâmetro	Norma	Equipamento	Imagem Correspondente
Coliformes Totais	L5.202(CETESB, 2018)	-	Figuras 34 e 35
Coliformes Termotolerantes	L5.202(CETESB, 2018)	-	Figura 36
Turbidez	NTS 008 (SABESP, 1999)	Turbidímetro ORION AQ3010	Figura 37
Cor Aparente	2120 (SMEWW, 1992)	Espectrofotômetro Spectroquant Pharo300	Figura 38
pH	4500 H+ (SMEWW, 1999)	Medidor de pH de bancada TecnoPON mPA210	Figura 39

Fonte: Autor

A seguir um detalhamento dos ensaios realizados nas amostras de água coletadas nos protótipos de telhados verdes.

Coliformes Totais e Termotolerantes

A determinação do número mais provável (NMP) de coliformes totais e termotolerantes foi efetuada a partir de aplicação da técnica de tubos múltiplos, descrita na L5.202 (CETESB, 2018). Para este ensaio foram utilizados: Caldo Lauril Triptose - CLT (concentração simples); Caldo Lactosado com Verde Brilhante e Bile a 2% - CLVBB; e Caldo Escherichia coli – EC.

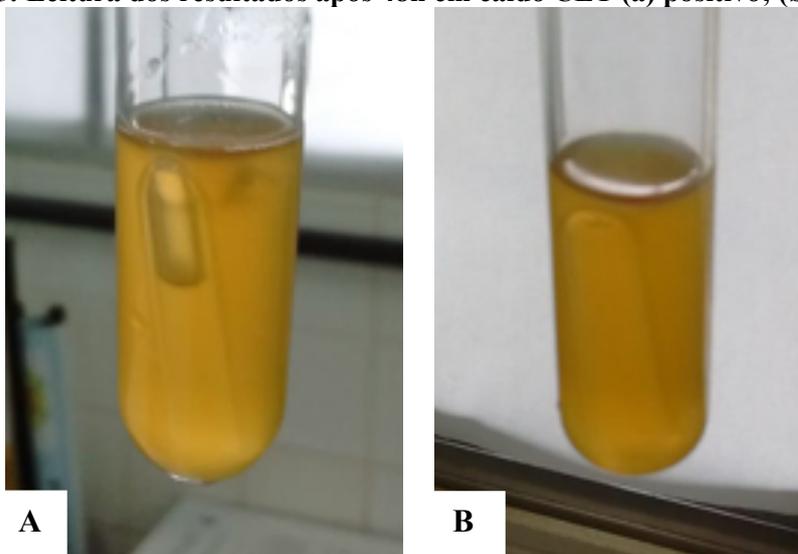
Amostras de 10 ml, 1 ml e 0,1 ml da água foram inoculadas em tubos de ensaio contendo CLT (conforme Figura 34), sendo 5 tubos para cada concentração. Segundo a norma L5.202 (CETESB, 2018). Após 48h em estufa, a verificação da presença de gás no tubo de Durham, decorrente da fermentação da lactose contida no meio de cultura CLT, indica a presença de bactérias do grupo coliforme (Figura 35 (A)), caso não haja a presença de bolhas, o resultado é negativo (Figura 35(B)). A utilização do CLVBB se deu para reduzir a possibilidade de falsos-positivos, decorrentes da atividade de bactérias esporuladas e de bactérias Gram-positivas fermentadoras da lactose.

Figura 34: Inoculação das amostras em caldo clt



Fonte: Autor

Figura 35: Leitura dos resultados após 48h em caldo CLT (a) positivo; (b) negativo



Fonte: Autor

Por fim, a inoculação das amostras para o meio EC seguida de banho maria a $44,5 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ durante 24 ± 2 horas (Figura 36), permite a diferenciação e detecção das bactérias do tipo termotolerantes ou *E. coli* (bactérias de origem exclusivamente fecal, capazes de fermentar a lactose em temperaturas elevadas).

Figura 36: Amostras em banho maria a $44,5 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$



Fonte: Autor

Turbidez

No caso do ensaio de turbidez, o mesmo foi realizado utilizando-se o turbidímetro do modelo Orion AQ 3010 conforme a NTS 008 (SABESP, 1999). As amostras em temperatura ambiente foram colocadas em cubetas, que são inseridas no equipamento para leitura (após calibragem), conforme Figura 37. Os resultados são exibidos no visor do equipamento na unidade de medida NTU, sendo esta equivalente na proporção 1:1 à unidade de medida uT disposta na NBR 15527 (ABNT, 2007).

Figura 37: Turbidímetro modelo ORION AQ 3010.



Fonte: Autor

Cor aparente

Para o ensaio de cor aparente, utilizou-se o espectrofotômetro Spectroquant Pharo300, conforme Figura 38. O procedimento também inclui a calibragem do equipamento com posterior colocação das amostras em cubeta limpa, que deve ser inserida no equipamento. Após poucos segundos, o resultado pode ser lido no visor do equipamento. Caso o valor ultrapasse 100 uH, o equipamento apresenta a mensagem >100.

Figura 38: Espectrofotômetro Spectroquant Pharo300 utilizado para o ensaio de cor aparente

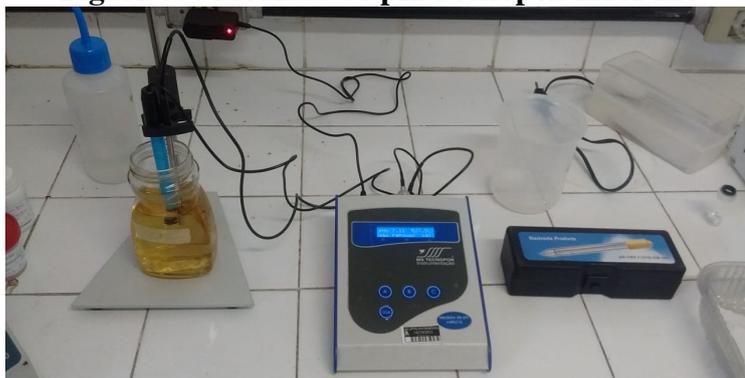


Fonte: Autor

pH

O ensaio de pH foi realizado empregando-se o medidor de pH de bancada modelo Tecnon mPA 210 (Figura 39). Para este ensaio foram utilizadas soluções tampão de pH 4 e pH 7 visando a calibragem do equipamento. Após a calibragem, o eletrodo deve ficar mergulhado em cada uma das amostras até que o medidor de pH se estabilize, fornecendo assim o valor de pH da amostra.

Figura 39: Medidor de pH Tecnon mPA 210



Fonte: Autor

3.3.5 *Análise dos dados*

Os dados de quantidade de água da chuva, bem como os obtidos em todos os ensaios laboratoriais realizados com amostras de água coletadas dos protótipos, foram organizados em planilhas de Excel, possibilitando-se o cálculo de média, desvio padrão, coeficiente de variação e intervalo de confiança (com nível de confiança de 95%).

O comparativo entre os intervalos de confiança obtidos para cada chuva das amostras provenientes das duas variações de composição analisadas (CC e CR) permite verificar se existe superioridade de algum dos protótipos nos parâmetros avaliados.

Em seguida, foram elaborados gráficos de regressão por meio do método dos Mínimos Quadrados (MMQ) a fim de explorar e inferir a relação estatística do volume de água precipitado com a quantidade de água absorvida pelos protótipos e com os parâmetros de qualidade da água avaliados.

Os resultados obtidos foram comparados entre si (composição reciclada x composição convencional) e também confrontados com os critérios normativos estipulados pela NBR 15527 (ABNT, 2007), e dados obtidos na literatura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

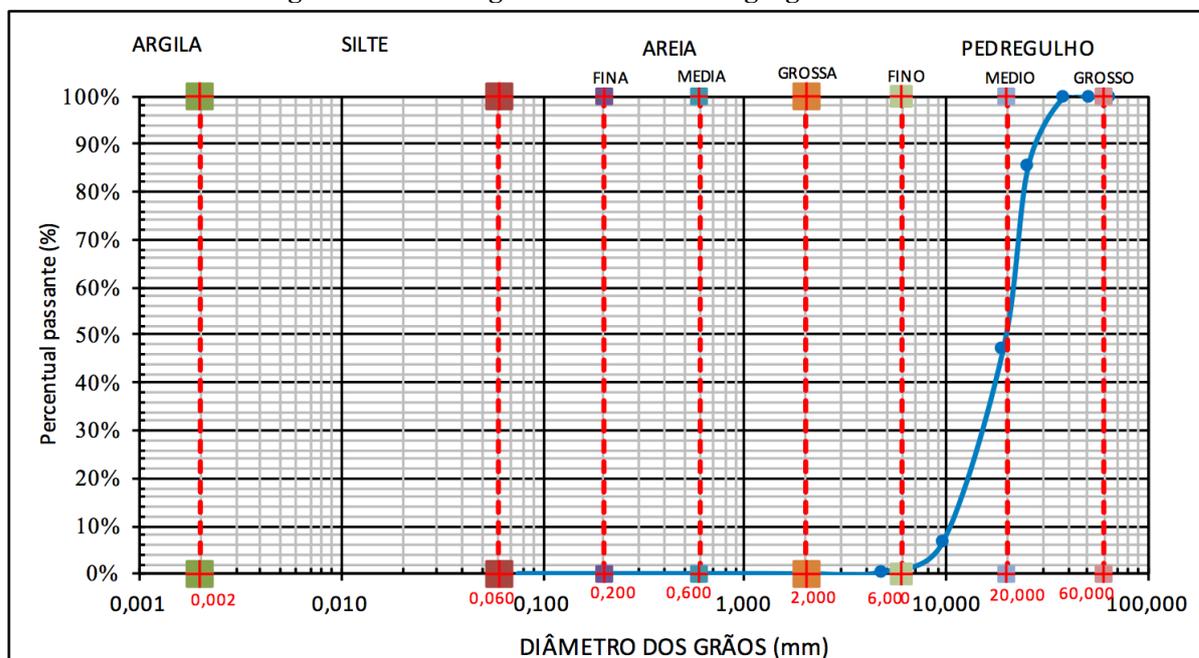
Trata-se da apresentação e análise de resultados de caracterização de alguns materiais utilizados nas camadas dos protótipos; do levantamento de custos, carga seca e saturada de cada composição; quantidade de água de chuva retida pelos protótipos; aspectos microbiológicos (coliformes totais e termotolerantes) e físico-químicos (pH, cor aparente e turbidez) da água escoada pelos telhados verdes estudados. Ao longo da discussão, os resultados são comparados com a literatura e normativas específicas.

4.1 Caracterização de materiais de composição dos protótipos

4.1.1 Adequação do RCD à camada drenante

Na Figura 40 verifica-se a curva granulométrica do agregado reciclado de RCD, onde percebe-se que aproximadamente 50% do material contém grãos entre 20 mm e 40 mm, sendo compatível com a argila expandida do tipo 3222 (22 a 32 mm de diâmetro).

Figura 40: Curva granulométrica do agregado de RCD



Fonte: Autor

Os valores de peso específico seco (γ_d) de amostras de argila expandida e agregados reciclados de RCD, materiais constituintes da camada drenante das composições convencional (CC) e reciclada (CR1), respectivamente, estão indicados na Tabela 7. Pode-se observar que o

agregado reciclado de RCD possui peso específico seco 67 % superior ao da argila expandida, interferindo diretamente na carga dos protótipos sobre a estrutura de suporte.

Tabela 7: Peso específico seco

Material	γ_d (kN/m ³)
Agregado reciclado de RCD	11,24
Argila Expandida	4,04

Fonte: Autor

A respeito da condutividade hidráulica (k, permeabilidade), os materiais apresentaram valores semelhantes, levando-se em consideração a potência verificada. A Tabela 8 apresenta os valores de k obtidos através da Lei de Darcy.

Tabela 8: Condutividade hidráulica

Material	k (cm/s)
Agregado reciclado de RCD	$1,61 \times 10^1$
Argila Expandida	$1,45 \times 10^1$

Fonte: Autor

De acordo com Ortigão (1995), solos que apresentem condutividade hidráulica maior que 10^{-3} , são considerados altamente permeáveis. Sendo assim, verifica-se que os valores de condutividade hidráulica obtidos tanto pelo agregado reciclado de RCD quanto pela argila expandida se enquadram na categoria de permeabilidade alta, mostrando-se adequados para utilização em camada drenante de telhado verde.

4.1.2 Adequação do lodo à camada de substrato

O laudo físico-químico do lodo, contido na Tabela 9, indica que o material apresenta potencial fertilizante e de condicionador, dado seu pH neutro, além de bons teores de elementos nutrientes de plantas (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu e Mn). O lodo em questão possui ainda considerável teor de matéria orgânica (quando comparado a esterco animais e fertilizantes orgânicos) e teores de elementos tóxicos para humanos ou para o ecossistema (Cd, Pb, Ni, Cr, Ba, Hg, As, Sb, V, Se, Mo e Co) abaixo dos preconizados como permissíveis pela resolução em vigor para lodos (CONAMA, 2006). Sendo assim, o lodo apresenta uma composição química viável para aplicação em telhados verdes como substrato.

Tabela 9: Análise físico-química do lodo

Parâmetro	Resultados Obtidos	Parâmetro	Resultados Obtidos
pH (água 1:2,5)	7,0	Cu (mg/kg)	135,23
N total (g/kg)	21,5	Ni (mg/kg)	49,08
Carbono (g/kg)	326,7	Pb (mg/kg)	29,20
Matéria orgânica (g/kg)	563,2	Cr (mg/kg)	50,40
Relação C/N-total	15,2	Ba (mg/kg)	523,65
P (g/kg)	16,75	Sb (mg/kg)	2,38
K (g/kg)	2,27	Co (mg/kg)	121,45
Na (g/kg)	2,64	Mo (mg/kg)	5,13
Ca (g/kg)	29,34	Mn (mg/kg)	382,08
Mg (g/kg)	2,38	V (mg/kg)	18,55
Al (g/kg)	22,15	Ag (mg/kg)	2,48
Fe (g/kg)	24,27	Hg (mg/kg)	1,80
Zn (g/kg)	7,89	As (mg/kg)	1,31
Cd (mg/kg)	0,20	Sc (mg/kg)	0,33

Fonte: Laboratório de Química Ambiental de Solos da UFRPE

4.2 Levantamento de custos dos protótipos

Durante a montagem dos protótipos, para levantamento de custos, foi necessária a pesagem individualizada de cada material componente. O custo total por metro quadrado (R\$/m²) das composições convencional e recicladas encontram-se na Tabela 10. Pode-se verificar que os protótipos reciclados (CR1 e CR2) têm custo total, em média, 21%, inferior ao protótipo convencional, e ainda que CR2 é a composição que apresenta menor custo.

Tabela 10: Custos das composições estudadas por m²

Tipo	Substrato	Filtro	Dreno	Suporte
CC	Terra Vegetal	Manta Geotêxtil	Argila Expandida	PEBD/PEAD Virgem
	R\$22,40 (16 kg)	R\$9,00 (1m ²)	R\$26,00 (16 kg)	R\$101,50 (4 unid.)
Custo Total: R\$158,90				
CR1	Lodo	Poliéster Reciclado	RCD	Embalagem Tetra Pak Reciclada
	R\$2,08 (16 kg)	R\$13,45 (1 m ²)	R\$1,26 (36 kg)	R\$112,90 (4 unid.)
Custo Total: R\$129,69				
CR2	Pó da Casca do Coco	Filamentos de Garrafa Pet	-	PEAD Reciclado
	R\$18,62 (14 kg)	R\$11,45 (1m ²)	-	R\$96,00 (4 unid.)
Custo Total: R\$120,79				

Fonte: Autor

Para a função módulo, o PEAD reciclado (CR2) apresentou o custo mais baixo dentre as opções utilizadas. Na camada drenante, o agregado reciclado de RCD (CR1) foi 95,15% mais econômico que a argila expandida: para a camada de filtro, o material convencional (CC) apresentou-se em média 89% mais barato; e por fim, a camada de substrato composta de lodo (CR1) foi a que apresentou o menor custo, devido ao fato de ser fornecida em grande quantidade (tonelada) diretamente da ETE.

No caso da CR2, como o fabricante do módulo de PEAD reciclado instrui que não é necessário o uso de material para drenagem, a mesma apresentou vantagem competitiva no comparativo de custos. No entanto, observa-se que mesmo se fosse acrescido o agregado reciclado de RCD nesta composição, a mesma continuaria sendo a mais econômica dentre as estudadas.

O custo de um telhado verde extensivo no Brasil varia entre R\$100,00 e R\$150,00 por metro quadrado, de acordo com Boni (2015), sendo assim, apenas a composição CC estaria fora deste intervalo, excedendo em R\$8,90 o limite superior estipulado pelo citado autor.

Já conforme Costa (2018), o custo encontrado para uma composição de telhado verde modular, contendo as mesmas camadas das composições estudadas (módulo, dreno, filtro e substrato), corresponde a R\$178,40/m², valor que excede os custos de todas as composições testadas da pesquisa.

Ressalta-se ainda, que os custos (R\$/m²) obtidos na Tabela 10, poderiam ser ainda mais baixos, caso a compra fosse realizada considerando-se uma área maior de telhado verde, já que, parte dos fornecedores, oferece descontos para compras em grandes quantidades.

4.3 Estimativa de carga exercida pelos protótipos

4.3.1 *Carga seca*

A estimativa da carga seca de cada protótipo está apresentada na Tabela 11. O protótipo CR2 apresenta o menor valor de carga dentre as composições estudadas, representando 55,16% de redução com relação a CC e 73,4% a CR1, esta última também composta de elementos reciclados. Tal resultado se deve ao fato de não se ter a camada drenante, no caso de CR2, e também à questão da geometria do módulo que compõe o CR1, que faz com que o mesmo

requiera uma quantidade maior de material, já que não possui a mesma quantidade de reentrâncias no fundo.

Tabela 11: Carga dos protótipos (condição seca)

Carga Média	CC	CR1	CR2
Por módulo	9,4 kg	15,845 kg	4,215 kg
Por m ²	37,6 kg	63,38 kg	16,86 kg

Fonte: Autor

4.3.2 *Carga saturada*

Considerando-se aspectos de custo e carga seca, dentre as composições recicladas, a CR2 foi selecionada para ser instalada em campo, juntamente com a composição convencional CC, já que apresentou valores inferiores em ambos os aspectos.

A carga média das composições CC e CR, quando saturadas, está apresentada na Tabela 12, onde verifica-se que o protótipo reciclado obteve valor 53 % inferior ao convencional. Salienta-se que os valores de carga saturada para os dois casos se encontram abaixo do mínimo previsto, para o metro quadrado de telhado verde extensivo, pela IGRA (2015), sendo este na faixa de 60 kg/m² a 150 kg/m².

Tabela 12: Cargas médias das composições de referência quando saturadas

Carga Média	CC	CR
Por módulo	10,085 kg	4,735 kg
Por m ²	40,34 kg	18,94 kg

Fonte: Autor

Jobim (2013) realizou também um estudo contendo protótipos convencionais e um modelo reciclado, no qual constatou a cargas seca de 35,83 kg/m² e saturada de 41,71 kg/m² (dados válidos para os protótipos em que o mesmo empregou argila expandida para camada drenante). Verifica-se que a carga saturada obtida na CR da presente pesquisa representa em torno de 45 % da carga saturada encontrada por Jobim (2013) para o protótipo reciclado por ele analisado.

4.4 Quantidade da água coletada

4.4.1 *Volume precipitado por evento de chuva*

Os valores de volume precipitado verificados entre 16/02/2019 e 01/04/ 2019 foram obtidos a partir de pluviômetro instalado em campo cujos valores encontram-se na Tabela 13.

Tabela 13: Volume de chuvas durante o período de avaliação dos protótipos

Chuva	Data	Volume
Descarte	16/02/2019	-
1	06/03/2019	35 mm
2	13/03/2019	45 mm
3	18/03/2019	56 mm
4	26/03/2019	10 mm
5	28/03/2019	26mm
6	01/04/2019	66 mm

Fonte: Autor

4.4.2 *Quantidade de água individualizada*

Os valores médios do quantitativo de água infiltrada por protótipo e por metro quadrado, bem como o percentual retido estão indicados na Tabela 14. Verifica-se que a composição reciclada, no melhor cenário, foi capaz de reter em média 90,97 % do total precipitado para uma chuva de 10 mm (chuva 4). O resultado menos satisfatório se deu para a composição convencional em uma chuva de 66 mm (chuva 6), na qual a mesma foi capaz de reter, em média, 29,23 % do volume precipitado.

Na Tabela 14, verifica-se ainda o que os valores de desvio padrão ficaram entre 0,12 para a CR na chuva 4 e 7,88 para a CC na chuva 2. Em 4 das 6 chuvas, o desvio padrão da CR ficou abaixo do CC, demonstrando assim maior uniformidade entre os volumes infiltrados por CR nestes eventos. Os coeficientes de variação apresentam-se entre 4,45% e 26,25% (valor baixo), com excessão do CC nas chuvas 2 e 4, apresentando 36,48% e 53,01%.

Tabela 14: Quantidade média de água contida no sistema de coleta dos protótipos

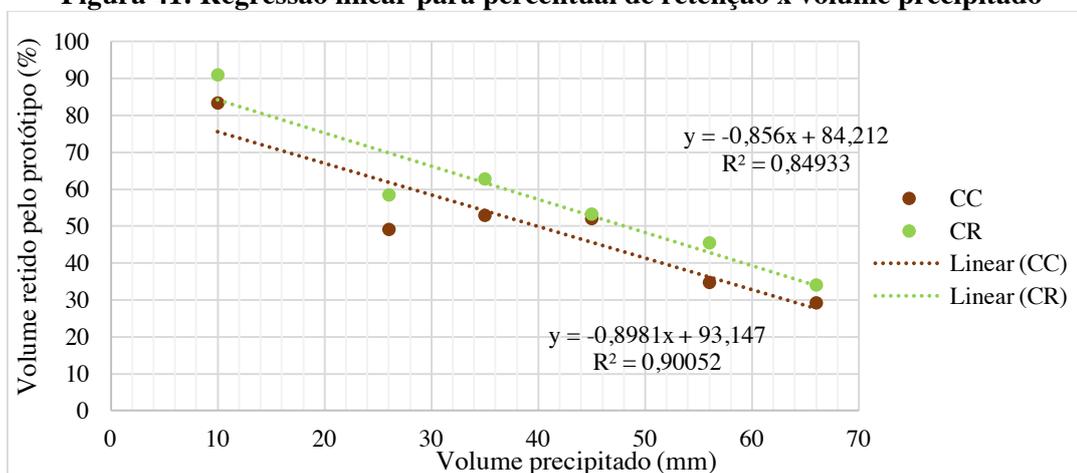
Evento	Número de Amostras	Composição	Vol. Médio Infiltrado por Protótipo (L)	Vol. Médio Infiltrado por m ² (L/m ²)	Desvio Padrao	Coef. de variação (%)	Percentual retido médio (%)
Chuva 1 (35 mm)	6	Convencional	4,12	16,48	4,24	25,73	52,90
	6	Reciclada	3,25	13,00	3,20	24,62	62,86
Chuva 2 (45 mm)	6	Convencional	5,40	21,6	7,88	36,48	52,00
	6	Reciclada	5,25	21,00	5,40	25,71	53,33
Chuva 3 (56 mm)	6	Convencional	9,12	36,5	3,68	10,08	34,82
	6	Reciclada	7,62	30,5	3,52	11,54	45,54
Chuva 4 (10 mm)	6	Convencional	0,41	1,66	0,88	53,01	83,43
	6	Reciclada	0,22	0,90	0,12	13,33	90,97
Chuva 5 (26 mm)	6	Convencional	3,30	13,22	2,08	15,73	49,17
	6	Reciclada	2,705	10,82	2,84	26,25	58,40
Chuva 6 (66 mm)	6	Convencional	11,68	46,71	2,08	4,45	29,23
	6	Reciclada	10,88	43,53	2,12	4,87	34,04

Fonte: Autor

Loiola, Mary e Silva (2018) realizaram estudo utilizando o mesmo módulo reciclado da CR, com chuva simulada de 18 mm, onde verificaram a média de 59 % de retenção no caso do protótipo sem vegetação, sendo esta composição similar à do presente estudo.

Uma regressão linear dos dados de percentual de retenção de água versus volume precipitado está mostrada na Figura 41, onde observa-se que, para uma chuva de 18 mm, a CR apresentaria cerca de 77% de retenção, considerando-se o coeficiente de determinação ($R^2 = 0,84933$). Tal resultado mostra-se compatível com o obtido por Loiola, Mary e Silva (2018). Observa-se ainda que quanto maior o volume precipitado, menor é o volume retido pelo protótipo.

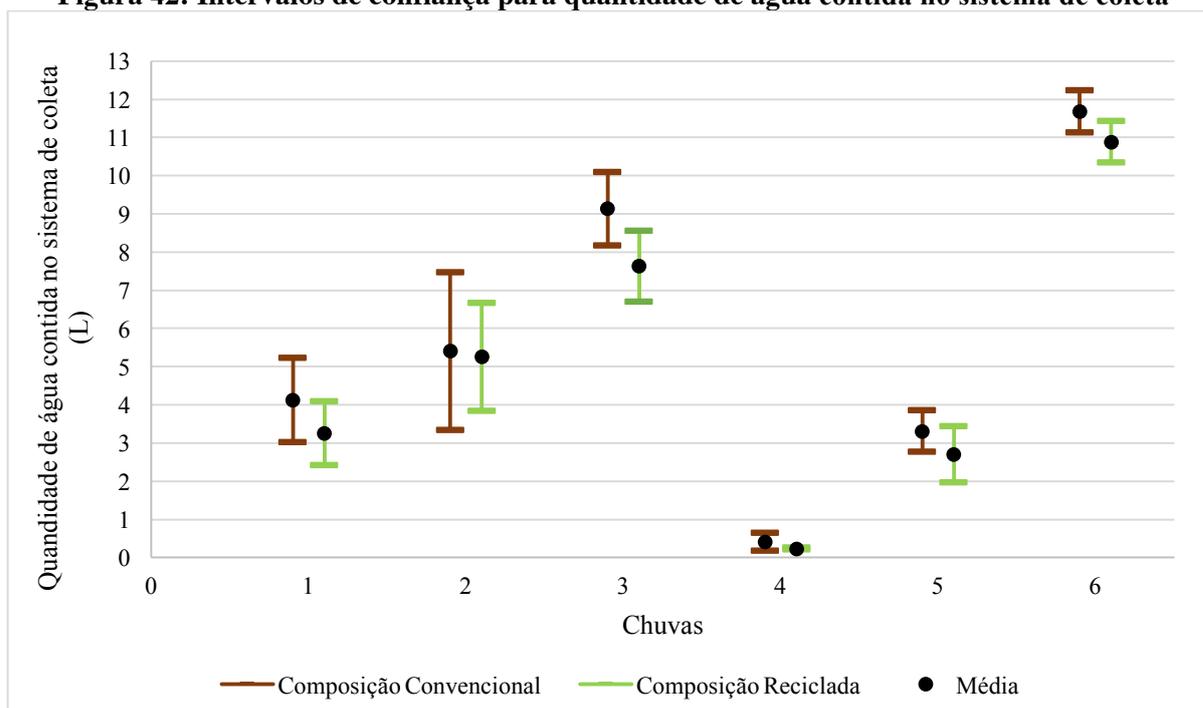
Figura 41: Regressão linear para percentual de retenção x volume precipitado



Fonte: Autor

Com base na análise de intervalos de confiança para quantidade de água contida no sistema de coleta dos protótipos, Figura 42, verifica-se que existe intersecção entre os intervalos de confiança das composições CC e CR, em todos os eventos de chuva estudados. Desta forma, no que diz respeito à quantidade de água infiltrada pelas duas composições analisadas, pode-se considerar que não houve diferença significativa entre seus comportamentos.

Figura 42: Intervalos de confiança para quantidade de água contida no sistema de coleta



Fonte: Autor

4.5 Aspectos microbiológicos de qualidade da água

4.5.1 Coliformes totais

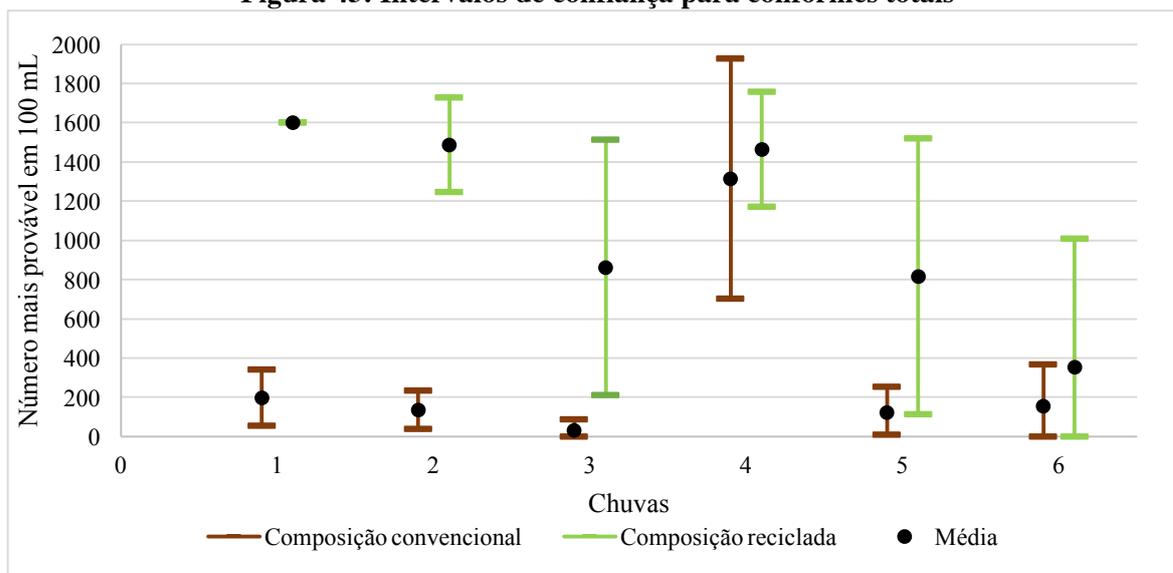
Os resultados obtidos para coliformes totais constam na Tabela 15, onde verifica-se que em nenhum dos eventos de chuva houve ausência nas médias das amostras de água analisadas. O menor valor de média observado se deu para a chuva 3 (56 mm) no protótipo convencional (CC) enquanto que o maior valor se deu na chuva 1 (35 mm) para CR, no qual todas as amostras apresentaram o valor de 1601 na contagem de coliformes, não tendo assim desvio padrão nem coeficiente de variação. O desvio padrão apresenta-se menor para CC em 4 das 6 chuvas, mostrando maior uniformidade entre os dados de coliformes totais obtidos por CC nestes eventos. Já o coeficiente de variação mostrou-se menor para CR em todas as chuvas analisadas, com exceção da chuva 6.

Tabela 15: Dados de coliformes totais

Coliformes Totais						
Evento	Volume precipitado (mm)	Composição	Número de Amostras	Média (NMP/100ml)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
Chuva 1	35	Convencional	6	197,17	135,98	68,97
		Reciclada	6	1601,00	0	0
Chuva 2	45	Convencional	6	136,33	92,97	68,20
		Reciclada	6	1487,33	277,94	18,69
Chuva 3	56	Convencional	6	31,07	53,62	172,61
		Reciclada	6	863,33	619,99	71,81
Chuva 4	10	Convencional	6	1314,8	584,20	44,43
		Reciclada	6	1464,60	277,94	18,98
Chuva 5	26	Convencional	6	122,50	107,51	87,76
		Reciclada	6	816,50	668,95	81,93
Chuva 6	66	Convencional	6	154,33	203,49	131,85
		Reciclada	6	354,50	623,00	175,74

Fonte: Autor

Comparando-se os resultados dos intervalos de confiança das composições CC e CR, representados na Figura 43, observa-se a superioridade da composição convencional referente à qualidade da água, no quesito coliformes totais nos eventos de chuvas 1, 2 e 3. A partir do quarto evento de chuva, os resultados de coliformes totais das composições convencional e reciclada podem ser considerados equivalentes, pois existe interceptação entre os limites de confiança obtidos.

Figura 43: Intervalos de confiança para coliformes totais

Fonte: Autor

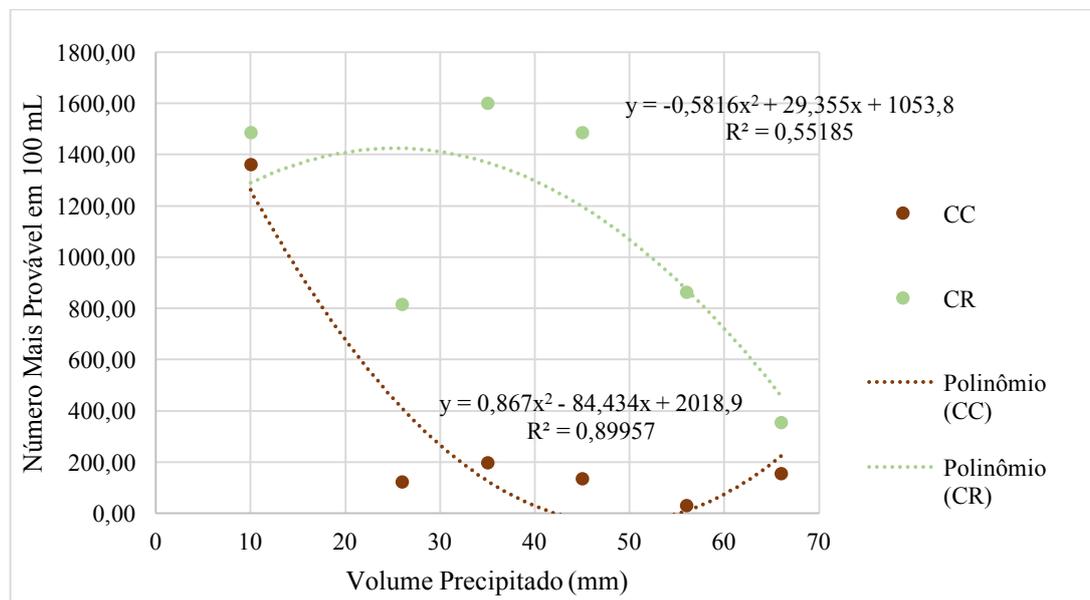
A NBR 15527 (ABNT, 2007) estipula que deve haver ausência de bactérias do grupo coliformes, no entanto, apenas para a CC, no evento de chuva 6, em uma das 6 amostras

coletadas, apresentou-se ausência de coliformes totais, não sendo este comportamento representativo.

Gimenes (2017) obteve uma média de 2333 NMP/100ml para amostras de água provenientes do telhado verde por ela estudado (descrito no tópico 2.7), fazendo com que seus resultados também não se adequassem à NBR 15527 (ABNT, 2007).

No que se refere à linha de tendência dos valores de coliformes totais das composições estudadas, determinada por meio de regressão, contida na Figura 44, verifica-se que para volumes precipitados maiores que os estudados, os resultados da CR de contagem do grupo coliformes tendem a apresentar ausência; já para a CC, os mínimos valores de coliformes totais devem ocorrer em evento de chuva com volume precipitado de aproximadamente 50 mm. O coeficiente de determinação da CC demonstra que a curva é representativa para 89,9% dos dados, sendo considerado um bom ajuste. O R^2 da CR demonstra ajuste para 55,2% dos dados.

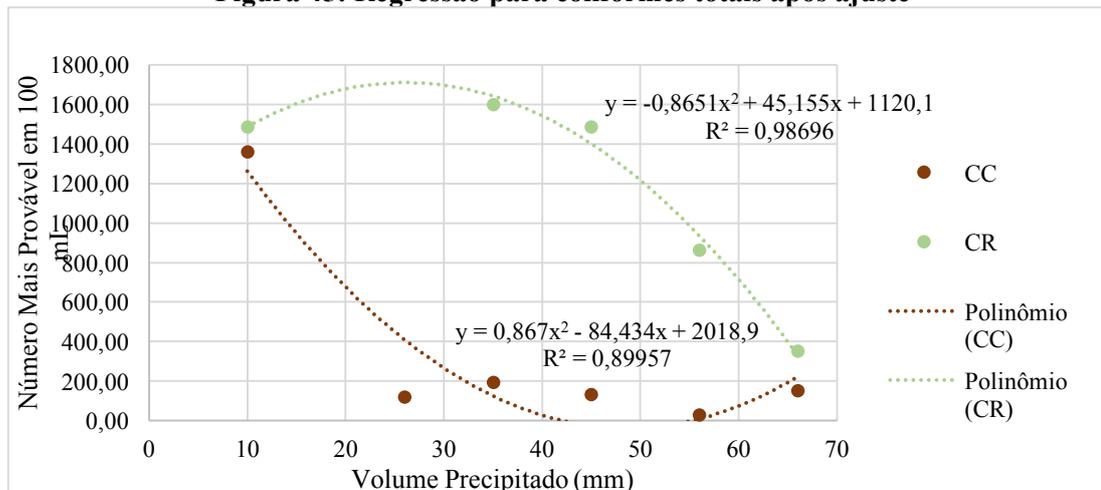
Figura 44: Regressão para coliformes totais



Fonte: Autor

Na Figura 44 observa-se que o ponto referente à chuva de 26mm na CR apresenta-se distante da curva apresentada, demonstrando-se como um outlier. Retirando-se este ponto da análise, obtém-se o R^2 ajustado para mais de 98% dos dados, (conforme a Figura 45) sendo considerado um excelente ajuste.

Figura 45: Regressão para coliformes totais após ajuste



Fonte: Autor

4.5.2 Coliformes termotolerantes

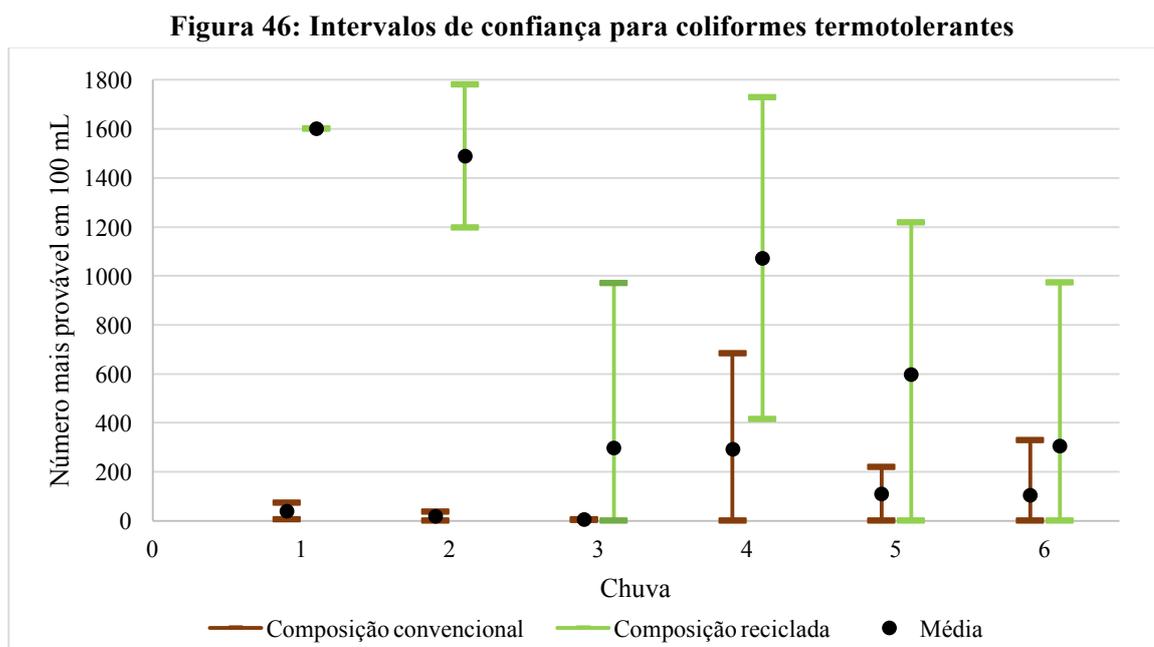
Os dados de tendência central (média) e as medidas de dispersão (desvio padrão e coeficiente de variação) para os coliformes termotolerantes das amostras de água coletadas são mostrados na Tabela 16. Neste caso, observa-se que o menor valor médio se deu na chuva 3 (56 mm) para a CC (4,02). Na chuva 1 (35 mm), as 6 amostras do tipo CR apresentaram presença de coliformes em todos os 15 tubos utilizados no ensaio, caracterizando o resultado >1600 (considerado 1601 neste estudo para fins de análise estatística). O desvio padrão mostrou-se baixo para as 3 primeiras chuvas na CC, em especial para a chuva 3 (sendo igual a 1,87). Com excessão da chuva 1, o desvio padrão da CC apresentou-se menor que o da CR.

Tabela 16: Dados de coliformes termotolerantes

Coliformes Termotolerantes						
Evento	Volume precipitado (mm)	Composição	Número de Amostras	Média (NMP/100 ml)	Desvio Padrão	Coef. de Variação (%)
Chuva 1	35	Convencional	6	39,47	32,12	81,39
		Reciclada	6	1601,00	0,00	0,00
Chuva 2	45	Convencional	6	18,72	17,30	92,45
		Reciclada	6	1487,50	278,02	18,69
Chuva 3	56	Convencional	6	4,02	1,87	46,48
		Reciclada	6	297,32	639,74	215,17
Chuva 4	10	Convencional	6	292,80	372,09	127,08
		Reciclada	6	1072,17	625,98	58,38
Chuva 5	26	Convencional	6	108,33	105,63	97,51
		Reciclada	6	597,50	591,37	98,97
Chuva 6	66	Convencional	6	103,50	214,02	206,78
		Reciclada	6	303,50	637,12	209,93

Fonte: Autor

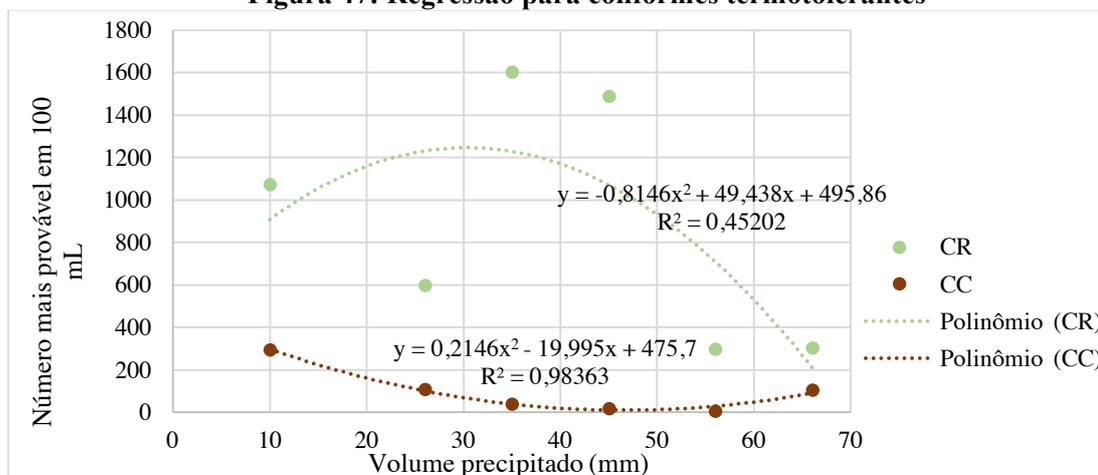
Os intervalos de confiança obtidos para coliformes termotolerantes estão exibidos na Figura 46. Nos eventos de chuvas 1 e 2, houve superioridade nos resultados obtidos no protótipo convencional (CC) para este indicador, enquanto que a partir da chuva 3, os dados podem ser considerados equivalentes, existindo assim, interseção entre os intervalos de confiança.



Fonte: Autor

No que diz respeito à adequação dos valores de coliformes termotolerantes obtidos à NBR 15527 (ABNT, 2007), assim como nos resultados dos coliformes totais, nenhuma das composições apresentou ausência de bactérias nas seis chuvas estudadas. Observando-se o gráfico de regressão contido na Figura 46, verifica-se que seu comportamento se assemelha ao dos coliformes totais, verificados na Figura 47.

Observa-se ainda na Figura 47, que novamente o coeficiente de determinação da CC representa um bom ajuste, enquanto que o da CR demonstra baixa representatividade, neste caso para apenas 45,2% dos dados. Mesmo retirando-se o outlier (ponto referente à chuva 5 da CR), conforme o procedimento realizado também para os coliformes totais, não se obteve ajuste satisfatório (acima de 80%).

Figura 47: Regressão para coliformes termotolerantes

4.6 Aspectos físico-químicos de qualidade da água

4.6.1 Turbidez

A Tabela 17 apresenta os valores médios de turbidez obtidos nas 6 chuvas, onde observa-se que em 4 das 6 chuvas, as médias obtidas pela composição reciclada foram menores que os da composição convencional, sendo os menores valores da CR obtidos nas duas últimas chuvas (1,82 uT e 1,26 uT). Os valores de desvio padrão apresentaram os maiores valores na chuva 3, bem como os coeficientes de variação.

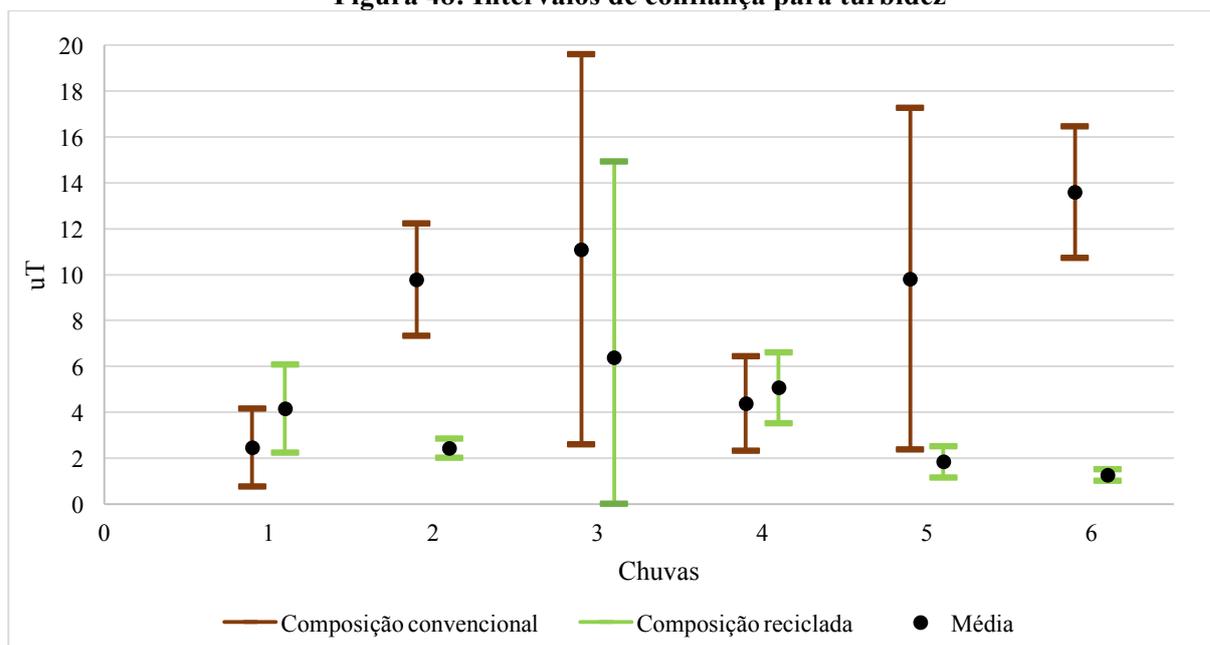
Tabela 17: Dados de turbidez

Turbidez						
Evento	Volume precipitado (mm)	Composição	Número de Amostras	Média (uT)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
Chuva 1	35	Convencional	6	2,46	1,62	65,83
		Reciclada	6	4,15	1,83	44,06
Chuva 2	45	Convencional	6	9,77	2,32	23,79
		Reciclada	6	2,42	0,39	16,21
Chuva 3	56	Convencional	6	11,09	8,11	73,15
		Reciclada	6	6,37	8,15	128,00
Chuva 4	10	Convencional	6	4,37	1,98	45,20
		Reciclada	6	5,05	1,47	29,22
Chuva 5	26	Convencional	6	9,80	7,09	72,35
		Reciclada	6	1,82	0,64	35,10
Chuva 6	66	Convencional	6	13,58	2,73	20,08
		Reciclada	6	1,26	0,23	18,54

Fonte: Autor

Os intervalos de confiança da turbidez (a 95% de significância) da água coletada de CC e CR, durante os seis eventos de chuva, estão mostrados na Figura 48. Para as chuvas 2 e 6, a composição reciclada apresentou resultados de turbidez menores do que os apresentados pela composição convencional. Nas demais chuvas, houve interceptação entre os limites de confiança, portanto, para estes volumes de precipitação, o comportamento de CC e CR são considerados equivalentes.

Figura 48: Intervalos de confiança para turbidez

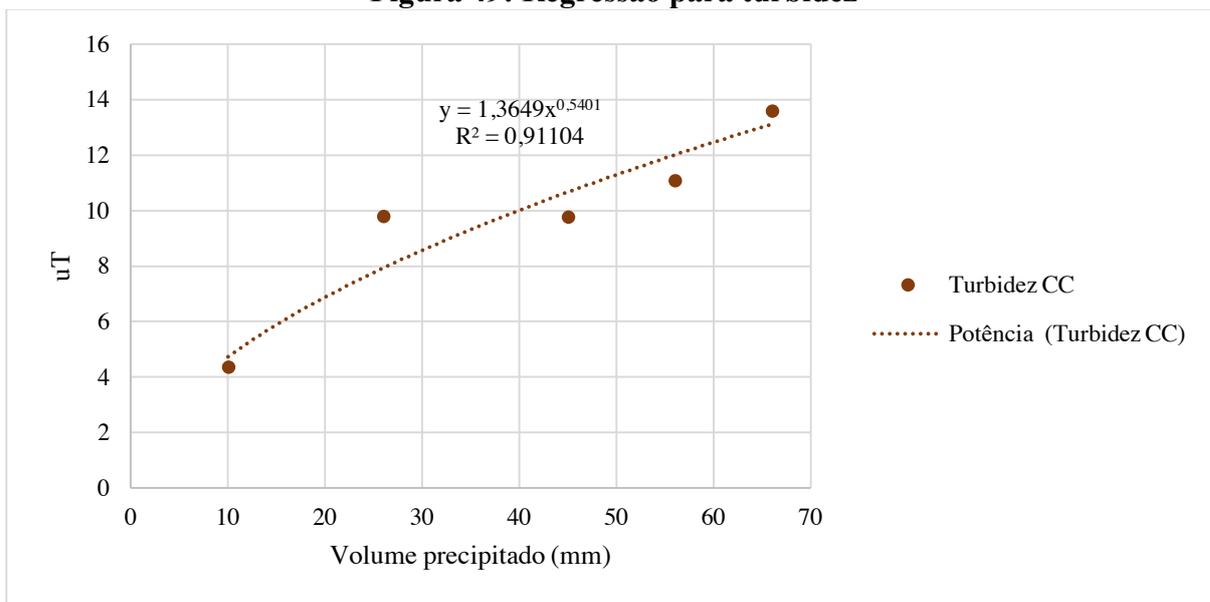


Fonte: Autor

Com relação à NBR 15527 (ABNT, 2007), o limite máximo estipulado para usos menos restritivos é de 5 uT, sendo assim, a CC obteve valor dentro do limite apenas na chuva 1, e a CR obteve resultados satisfatórios nas chuvas 2, 5 e 6.

A Figura 49 apresenta o gráfico de regressão para os valores médios de turbidez analisados em razão do volume precipitado (retirando-se o ponto referente à chuva 1, conforme procedimento adotado para coliformes totais), para a composição convencional (CC), onde verifica-se que a turbidez possui tendência crescente conforme o volume precipitado aumenta. No caso do CR, nenhuma curva estudada (exponencial, polinomial, logarítmica ou linear) obteve ajuste suficientemente representativo, mesmo retirando-se o ponto mais distante da curva.

Figura 49: Regressão para turbidez



Fonte: Autor

4.6.2 Cor aparente

Nos ensaios de determinação de cor aparente da água coletada das composicoes CC e CR, em função das limitações do equipamento (espectrofotômetro Spectroquant Pharo300) usado, para medições superiores a 100 uH, todos os resultados quantitativos nos eventos de chuvas 1 a 5 apresentaram a mensagem >100 no visor do mesmo. No entanto, nestes casos, foi possível avaliar o aspecto visual das amostras de água, que se mostrou progressivamente mais claro, como pode-se observar nas Figuras 50 a 53.

Figura 50: Amostras coletadas da chuva 1



Fonte: Autor

Figura 51: Amostras coletadas da chuva 3

Fonte: Autor

Figura 52: Amostras coletadas da chuva 4

Fonte: Autor

Figura 53: Amostras coletadas da chuva 6

Fonte: Autor

Razzaghmanesh, Beecham e Kazemi (2014) também verificaram em seus estudos uma melhoria nos aspectos de qualidade da água conforme o tempo, atribuindo tal acontecimento à acomodação do sistema e também ao escoamento de poluentes junto às águas pluviais.

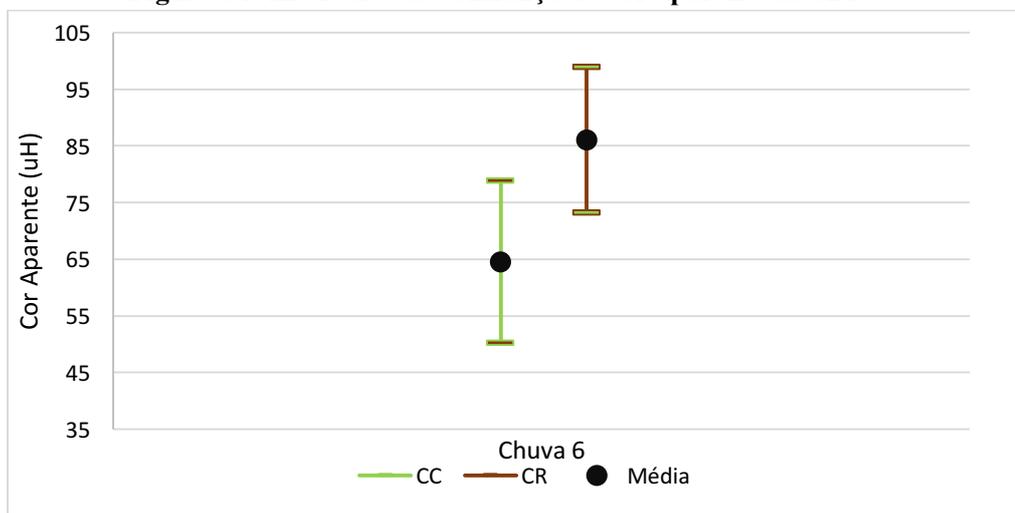
Na chuva 6, o equipamento foi capaz de detectar os valores de cor aparente de 8 das 12 amostras analisadas, dispostos na Tabela 18. Analisando-se o intervalo de confiança dos 4 resultados provenientes de cada composição, para uma chuva de 66 mm, não se pode afirmar que existe superioridade de nenhuma das duas composições analisadas no que diz respeito a cor aparente, conforme Figura 54.

Tabela 18: Amostras coletadas da chuva 6

Composição	Cor Aparente (uH)
CR1	>100
CR2	91,5
CR3	77,8
CR4	94,3
CR5	>100
CR6	80,6
CC1	>100
CC2	57,5
CC3	57,3
CC4	76,1
CC5	>100
CC6	67,3

Fonte: Autor

Figura 54: Intervalos de confiança da cor aparente da chuva 6



Fonte: Autor

Salienta-se ainda, que os valores de cor aparente para as todas as amostras analisadas nas composições, nos seis eventos de chuvas, não atenderam aos critérios da NBR 15527 (ABNT, 2007), que limita este valor em 15 uH.

4.6.3 pH

Os valores médios de pH obtidos a partir das 6 chuvas analisadas variam entre 6,45 e 7,44, conforme Tabela 19, caracterizando o comportamento neutro de todas as amostras. O desvio padrão apresenta-se baixo, tendo todos os valores abaixo de 0,5.

Tabela 19: Dados de pH

pH						
Evento	Volume precipitado (mm)	Composição	Número de Amostras	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
Chuva 1	35	Convencional	6	7,44	0,26	3,48
		Reciclada	6	6,80	0,36	5,29
Chuva 2	45	Convencional	6	7,35	0,16	2,20
		Reciclada	6	6,75	0,48	7,11
Chuva 3	56	Convencional	6	7,29	0,25	3,50
		Reciclada	6	6,83	0,21	3,08
Chuva 4	10	Convencional	6	7,34	0,21	2,80
		Reciclada	6	6,59	0,15	2,22
Chuva 5	26	Convencional	6	7,31	0,22	3,02
		Reciclada	6	6,45	0,24	3,72
Chuva 6	66	Convencional	6	7,42	0,10	1,37
		Reciclada	6	7,18	0,22	3,11

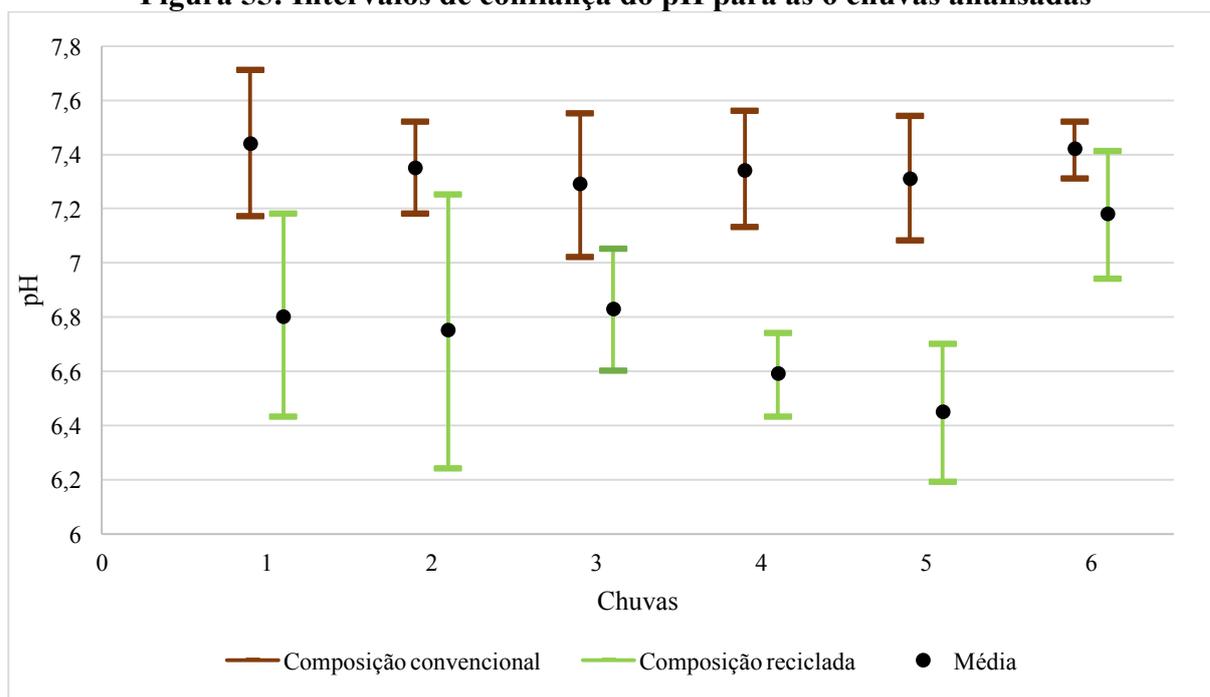
Fonte: Autor

A NBR 15527 (ABNT, 2007) estipula que os valores de pH devem estar entre 6 e 8 para que a água seja considerada apropriada para reuso. Em todas as amostras recolhidas, de todas as chuvas analisadas, os valores de pH obtidos se mantiveram dentro da faixa estabelecida pela norma.

Gimenes (2017) obteve para o telhado verde, descrito no tópico 2.7, o pH médio de 6,69, no entanto, este apresentou valores mínimos e máximos de 5,17 e 8,16, respectivamente, estando estes fora do limite permitido pela NBR 15527 (ABNT, 2007).

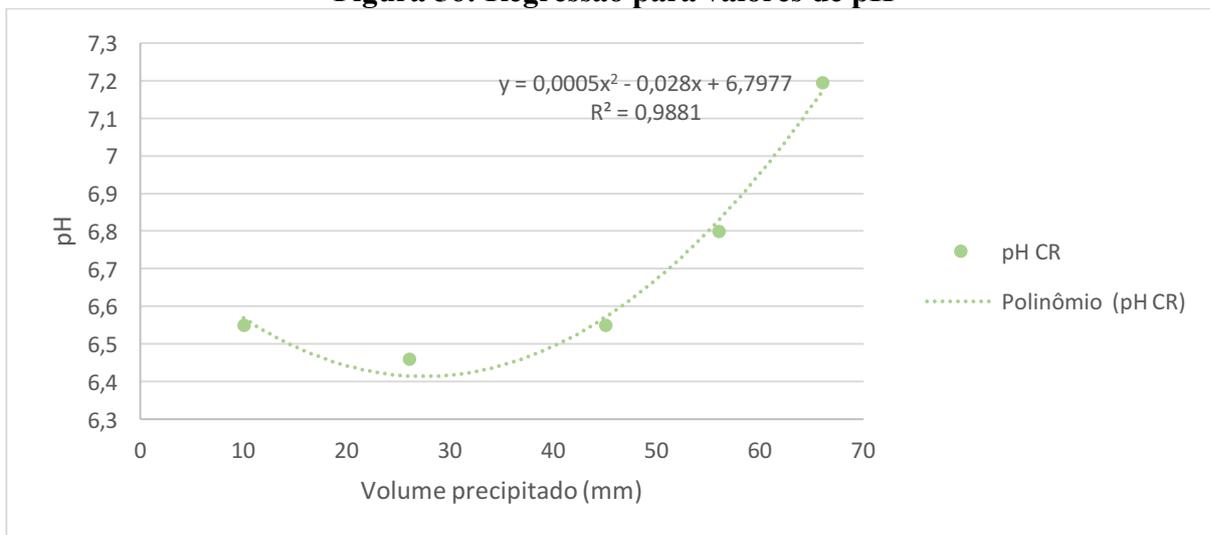
Para as chuvas 4 e 5, de 10 mm e 26 mm, respectivamente (sendo estas as duas chuvas com menor volume dentre as analisadas), pode-se afirmar que a composição do tipo recicladas (CR) apresentam comportamento mais ácido (pH mais baixo) quando comparadas às composições do tipo convencional (CC). Para as demais chuvas, o comportamento do pH dos dois tipos de composição pode ser considerado equivalente, já que há interceptação entre os intervalos de confiança obtidos, conforme Figura 55.

Figura 55: Intervalos de confiança do pH para as 6 chuvas analisadas



Fonte: Autor

A Figura 56 apresenta a equação do polinômio proveniente da regressão realizada com os valores médios de pH obtidos em 5 das 6 chuvas (em razão da retirada do outlier – chuva 1) para a Composição Reciclada (CR) em razão do volume precipitado. A linha de tendência, representativa para 98,8% dos dados, indica que para volumes de chuva mais intensos, o pH tende a se apresentar cada vez mais básico (aumento do pH). No caso do CC, nenhuma curva estudada (exponencial, polinomial, logarítmica ou linear) obteve ajuste suficientemente representativo, mesmo retirando-se um outlier.

Figura 56: Regressão para valores de pH

Fonte: Autor

5 CONCLUSÕES

5.1 Principais conclusões

A prática de telhados verdes no Brasil ainda não está adequadamente difundida, foi necessário, portanto, recorrer a empresas localizadas em outras cidades brasileiras (fornecedores dos produtos) para obter os elementos mais específicos de telhados verdes, a exemplo dos módulos.

Com relação à instalação dos protótipos em campo, a estrutura de suporte construída se mostrou satisfatória, já que durante todo o período da pesquisa se manteve erguida, mesmo estando exposta ao ar livre. O sistema de coleta de água escoada também se mostrou eficiente, não tendo sido perdida nenhuma amostra por motivos adversos.

No que diz respeito aos custos, os dois tipos de composição compostos por elementos reciclados obtiveram um custo médio de 21% inferior, quando comparados com a composição convencional. Sendo assim, o uso dos elementos reciclados estudados apresentou-se como uma alternativa para a minimização de custos em sistemas de telhado verde.

O uso de elementos reciclados, em comparação aos materiais convencionais usados em telhados verdes, pode proporcionar carga seca (por metro quadrado instalado) inferior ou superior, a depender dos materiais empregados. O uso de módulo de PEAD reciclado, manta de filamentos de garrafa PET e pó de casca de coco, permitiu uma redução de carga seca em aproximadamente 55 %, comparada à composição convencional. Esta mesma composição reciclada, instalada em campo, apresentou-se com carga saturada abaixo da composição convencional, em 53 %. Quanto à comparação dos dados obtidos com dados da literatura, tanto a composição convencional quanto reciclada mostraram-se adequadas.

O protótipo reciclado apresentou maiores valores de retenção de água de chuva em campo quando comparado ao convencional. Reteve 90% do volume de água da chuva precipitado, para um evento de chuva equivalente a 10 mm, enquanto que o convencional reteve 83%. Para um

evento de chuva de 66 mm, os valores retidos foram 34% e 29%, respectivamente. Verificou-se ainda uma relação inversamente proporcional da quantidade de água absorvida com a quantidade precipitada; comportamento semelhante aos dados da literatura sobre o tema.

No que se refere aos parâmetros microbiológicos, observou-se que as composições convencional e reciclada apresentaram resultados equivalentes para os parâmetros de coliformes totais e termotolerantes, para os três últimos eventos de chuva analisados (10 mm, 26 mm e 66 mm), demonstrando que após a acomodação do sistema (primeiras chuvas), o comportamento das duas composições é semelhante.

Sobre os parâmetros físico-químicos (turbidez, cor aparente e pH), observou-se que a composição reciclada apresentou resultados equivalentes ou superiores à composição convencional.

Comparando-se os resultados de qualidade da água com os limites estabelecidos pela norma de reúso da água de chuva de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis, NBR 15527 (ABNT, 2007), verificou-se que o parâmetro de pH foi o único que obteve resultados considerados aceitáveis pela norma para todas as chuvas analisadas. No parâmetro turbidez, a composição convencional obteve valor dentro do limite da norma na chuva de 35 mm, e a composição reciclada obteve resultados satisfatórios nas chuvas de 45 mm, 26 mm e 66 mm. Os parâmetros de cor aparente, coliformes totais e termotolerantes apresentaram resultados fora dos limites da norma em todas as chuvas analisadas.

Verificou-se, portanto, que o telhado verde contendo elementos reciclados apresentou comportamento superior ao modelo convencional nos quesitos de custo, carga e retenção de água. Após a acomodação do sistema, os resultados dos parâmetros microbiológicos apresentaram-se equivalentes. No que diz respeito aos parâmetros físico-químicos, o telhado verde reciclado não apresentou comportamento inferior para nenhum dos parâmetros estudados.

Sendo assim, os referidos materiais reciclados devem ter uso incentivado para telhados verdes, tendo em vista que apresentam comportamento equivalente ou superior ao modelo convencional em todos os quesitos investigados. Ademais, os telhados verdes contendo elementos reciclados apresentam como benefícios extras: a preservação de recursos naturais e

o reaproveitamento de materiais que seriam descartados (gerando custos econômicos e ambientais).

5.2 Sugestões para futuras pesquisas

Para pesquisas futuras, recomenda-se analisar os mesmos parâmetros dispostos na NBR 15527 (ABNT, 2007), em protótipos de telhado verde convencional e reciclado, após passagem das amostras pela etapa de tratamento.

Indica-se também analisar a viabilidade técnica e econômica de outros tipos de materiais reciclados que possam ser utilizados como componentes de telhados verdes, reduzindo a demanda por matéria prima natural.

Recomenda-se o acréscimo da camada de vegetação nas composições estudadas para a verificação de alterações significativas nos resultados de custo, carga, quantidade e qualidade da água escoada.

Em futuras pesquisas, sugere-se ainda a comparação do conforto acústico e térmico em edificações contendo composições convencionais e recicladas de telhados verdes.

REFERÊNCIAS

- AARSETH, W. et al. Project sustainability strategies: A systematic literature review. **International Journal Of Project Management**, Trondheim, Norway, v. 35, n. 6, p.1071-1083, ago. 2017.
- ARAÚJO, A. P. C. S. et al. Aproveitamento de Água Pluvial em Sistema Modular de Telhado Verde com Aplicação em Sistemas de Drenagem Urbana. In: INTEGRATING CLEANER PRODUCTION INTO SUSTAINABILITY STRATEGIES, 4., 2013, São Paulo. **Anais...** . São Paulo: Ix International Workshop, 2013. p. 1 - 5.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR15527**: Água de chuva - Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis - Requisitos. Rio de Janeiro: -, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401**: Instalações de Ar Condicionado – Sistemas Centrais e Unitários. Parte 1: Projetos das Instalações. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de janeiro, 1984.
- AGUIAR, C.; FEDRIZZI, B. Telhados verdes na habitação de interesse social. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE SUSTENTABILIDADE E HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL, 1., 2010, Porto Alegre. **Anais...** . Porto Alegre: PUCRS, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E2777**: Standard Guide for Vegetative (Green) Roof Systems. West Conshohocken: Astm International, 2014.
- BEECHAM, S.; RAZZAGHMANNESH, M.. Water quality and quantity investigation of green roofs in a dry climate. **Water Research**, [s.l.], v. 70, p.370-384, mar. 2015. Elsevier BV.
- BEVILACQUA, P. et al. Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 122, p.63-79, jun. 2016. Elsevier BV.
- BERNDTSSON, J. C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. **Ecological Engineering: The Journal of Ecosystem Restoration**, Lund, v. 36, n. 4, p.351-360, abr. 2010.
- BIANCHINI, F.; HEWAGE, K. How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. **Building And Environment**, [s.l.], v. 48, p.57-65, fev. 2012. Elsevier BV.
- BIDIM GEOTÊXTEIS. **Geotêxtil não tecido**. 2019. Disponível em: <<http://www.bidimgeotexteis.com.br/?gclid=CjwKCAjw2cTmBRAVEiwA8YMgzSAppiWfa>>

yhR1W3GqtXGwEqLrB2XveL8WcJleYMrEbD3VXpPXP07SBoC1bEQAvD_BwE>.
Acesso em: 05 jan. 2019.

BUDEL, M. A. **Estudo Comparativo da Qualidade da Água de Chuva Coletada em Cobertura Convencional e em Telhado Verde**. 2014. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

CÂMARA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Guia de Sustentabilidade na Construção**. Belo Horizonte: Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais, 2008. 60 p.

CATUZZO, H. **Telhado verde: impacto positivo na temperatura e umidade do ar: O caso da cidade de São Paulo**. 2013. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia Física, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

CHEN, Y. **The Intervention of plants in the conflicts between buildings and climate: A case study in Singapore**. Tese (doutorado) - Department of Building, National University of Singapore, 2006.

CHEN, C.; KANG, S.; LIN, J. Effects of recycled glass and different substrate materials on the leachate quality and plant growth of green roofs. **Ecological Engineering**, [s.l.], v. 112, p.10-20, mar. 2018. Elsevier BV.

CITY OF TORONTO GREEN ROOF TECHNICAL ADVISOR GROUP. **Toronto Green Roof Construction Standard: Supplementary Guidelines**. Toronto: Office Of The Chief Building Official, 2010. Disponível em: <www.toronto.ca/greenroofs>. Acesso em: 05 out. 2017.

COMA, J. et al. Thermal assessment of extensive green roofs as passive tool for energy savings in buildings. **Renewable Energy**, v. 85, p.1106-1115, 2016.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **L5.202: Coliformes totais, coliformes termotolerantes e Escherichia coli - Determinação pela Técnica de Tubos Múltiplos**. São Paulo: CETESB, 2018.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **NTS 008: Turbidez - Método de Ensaio**. São Paulo: -, 1999.

Conselho Nacional Do Meio Ambiente - CONAMA. 2002. **Resolução Conama No 307, de 29 de Agosto de 2006**. Disponível em: <www.mma.conama.gov.br/conama> Acesso em 15/10/2018.

Conselho Nacional Do Meio Ambiente - CONAMA. 2006. **Resolução Conama No 375, de 05 de Julho de 2002**. Disponível em: <www.mma.conama.gov.br/conama> Acesso em 21/12/2018.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL (Brasil). **Aspectos da Construção Sustentável no Brasil e Promoção de Políticas Públicas: Subsídios para a Promoção da Construção Civil Sustentável**. São Paulo, 2014.

COPENHAGEN. **Green roofs Copenhagen**. Copenhagen, Dinamarca, 2015.

COSTA, Suzana Bezerra. **Levantamento de Custo E Benefícios para a Implantação de um Sistema de Telhado Verde na Cobertura Impermeabilizada de uma Edificação Vertical**. 2018. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiania, 2018.

CÓRDOBA. Ordenanza nº 12548, de 2016. **Lex**. Córdoba, Argentina, 2016.

DALDEGAN, E. **Como construir um telhado verde em 7 passos**. 2017. Disponível em: <<https://engenhariaconcreta.com/como-construir-um-telhado-verde-em-7-passos/>>. Acesso em: 25 fev. 2019.

DILLY, D. P. A. **Tratado sobre o sistema de telhado verde extensivo para coberturas planas em edificações de pequeno e médio porte**. 2016. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016.

DOTTO, B. R.; DOTTO, D. M. R.; SILVA, V. M. Políticas públicas e arquitetura sustentável: a utilização de telhados verdes. **Espacios**, Porto Alegre, v. 38, n. 36, p.19-26, mar. 2017.

DREHER, A. R.; JACOSKI, C. A.; MEDEIROS, R. de. Conceitos de bioclimatologia e sustentabilidade aplicados a fase de projeto em habitações de interesse social. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, Três Corações, v. 14, n. 1, p. 145-159, jan./jul. 2016.

ECODHOME (Brasil). **Passo-a-passo para fazer um telhado verde (com custos)**. 2014. Disponível em: <<http://www.ecodhome.com.br/>>. Acesso em: 31 maio 2018.

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

ERCOLANI, G. et al. Evaluating performances of green roofs for stormwater runoff mitigation in a high flood risk urban catchment. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 566, p.830-845, nov. 2018. Elsevier BV

FERRAZ, I. L. **O desempenho térmico de um sistema de cobertura verde em comparação ao sistema tradicional de cobertura com telha cerâmica**. 2012. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

FERREIRA, C. A.; MORUZZI, R. B. Considerações Sobre a Aplicação do Telhado Verde para Captação de Água de Chuva em Sistemas de Aproveitamento para Fins não Potáveis. In: ENCONTRO NACIONAL E ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE

EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 1., 2007, Campo Grande. **Anais...**. Campo Grande: -, 2007. p. 1027 - 1036.

FORSCHUNGSGESELLSCHAFT LANDSCHAFTSENTWICKLUNG
LANDSCHAFTSBAU E. V. **FLL: Guideline for the Planning, Execution and Upkeep of Green-Roof Sites.** Bonn, Germany: The Roof-greening Working Group, 2008.

FRIEDMAN, A. Design strategies for integration of green roofs in sustainable housing. **Vitruvio - International Journal Of Architectural Technology And Sustainability**, [s.l.], n. 1, p.57-65, 29 dez. 2015. Universitat Politecnica de Valencia.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Manual prático de análise de água.** Brasília: Ministério da Saúde, 2004. 146 p.

GARRIDO NETO, P. S. **Telhados verdes como técnica compensatória em drenagem urbana na cidade do Rio de Janeiro:** Estudo experimental e avaliação de sua adoção na bacia do rio Joana a partir do uso de modelagem matemática. 2016. 344 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

GIMENES, J. C. **Captação e aproveitamento de água de chuva:** estudo experimental da qualidade de água de um telhado verde e de um telhado convencional. 2017. 102 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro, 2017.

GREEN ROOF TECHNOLOGY. **Green Roof Systems.** Disponível em: <<http://www.greenrooftechnology.com/greenroof-system>>. Acesso em: 06 out. 2017.

GREGOIRE, B. G.; CLAUSEN, J. C. Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality. **Ecological Engineering**, Storrs, Connecticut, v. 37, n. 6, p.963-969, jun. 2011.

GRINDE, B.; PATIL, G. Biophilia: Does Visual Contact with Nature Impact on Health and Well-Being?. **International Journal Of Environmental Research And Public Health**, [s.l.], v. 6, n. 9, p.2332-2343, 31 ago. 2009. MDPI AG.

HEERWAGEN J. H. Investing In People: The Social Benefits of Sustainable Design. **Rethinking Sustainable Construction**, Sarasota, FL, p.01-03, set. 2006.

HUI, S. C. M.; CHAN, H. Development of modular green roofs for high-density urban cities. In: World Green Roof Congress, 2008, London. **Anais...** 2008. p. 1-12

INSTITUTO CIDADE JARDIM. **Políticas de incentivo para telhados verdes:** ferramenta para o design de cidades sustentáveis. 2014. Elaborado por Sérgio Rocha. Disponível em: <<https://institutocidadejardim.wordpress.com/2014/05/14/green-roof-policies-tools-for-encouraging-sustainable-design/>>. Acesso em: 21 dez. 2018.

INSTITUTO DE PESQUISAS EM INFRAESTRUTURA VERDE E ECOLOGIA URBANA (INVERDE) (Rio de Janeiro) (Org.). **Construção Sustentável.** 2009. Disponível em: <<https://inverde.wordpress.com/construcao-sustentavel/>>. Acesso em: 25 ago. 2018.

INTERNATIONAL GREEN ROOF ASSOCIATION. **Incentives: Green Roof Policy Toolkit**. 2017. Disponível em: <http://www.igra-world.com/green_roof_city_network/policy_toolkit/incentives.php>. Acesso em: 25 set. 2018.

INTERNATIONAL GREEN ROOF ASSOCIATION (IGRA.) **A Quick Guide to Green Roofs**. 2015. Disponível em: <<http://www.igra-world.com/>>. Acesso em: 25 out. 2017.

JOBIM, A. L. **Diferentes tipos de telhados verdes no controle quantitativo da água pluvial**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2013.

KATS, G. **Greening our built environment: costs, benefits and strategies**. Washington, Dc: Island Press, 2010.

KAZMIERCZAK, A.; CARTER, J. **Adaptation to climate change using green and blue infrastructure: A database of case studies**. 2010. Desenvolvida por The University of Manchester. Disponível em: <http://orca.cf.ac.uk/64906/1/Database_Final_no_hyperlinks.pdf>. Acesso em: 13 set. 2018.

KOZMHINSKY, M. **Avaliação de Fatores Climatológicos no telhado Verde de Edificação no Bairro do Recife**. 2018. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2018.

KOZMHINSKY, M. et al. A Indicação de Telhados Verdes nas novas Edificações de Caruaru - PE. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA DIVERSIDADE DO SEMI-ÁRIDO, 1., 2016, Campina Grande. **Anais...** . Campina Grande: Realize, 2016.

LEE, J. Y. et al. Quantitative analysis on the urban flood mitigation effect by the extensive green roof system. **Environmental Pollution**, [s.l.], v. 181, p.257-261, out. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2013.06.039>.

LEE, K. et al. 40-second green roof views sustain attention: The role of micro-breaks in attention restoration. **Journal Of Environmental Psychology**, [s.l.], v. 42, p.182-189, jun. 2015. Elsevier BV.

LEMOS, A. L. B. F.; KAUŁKALE, L. Factors Influencing Green Roof Development in Recife, Brazil. **Baltic Journal Of Real Estate Economics And Construction Management**, [s.l.], v. 5, n. 1, p.146-159, 27 nov. 2017. Walter de Gruyter GmbH.

LIRA, J. S. M. M. **Depleção abiótica e potencial de aquecimento global no ciclo de vida de telhado verde comparativamente a um telhado convencional**. 2017. 120 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

LOIOLA, C.; MARY, W.; SILVA, L. P. Hydrological performance of modular-tray green roof systems for increasing the resilience of mega-cities to climate change. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], jan. 2018. Elsevier BV.

MARTINE, G.; ALVES, J. E. D. Economia, sociedade e meio ambiente no século 21: tripé ou trilema da sustentabilidade? **Revista Brasileira de Estudos de População**, São Paulo, v. 32, n. 3, p.1-2, dez. 2015.

MARTINS, L. S.; PINTO, J. S. Avaliação Quali-quantitativa de Telhado Verde Extensivo em Escala Piloto. **DisciplinarumScientia**, Santa Maria, v. 17, n. 2, p.245-257, dez. 2015.

MASSACHUSETTS METROPOLITAN AREA PLANNING COUNCIL. **Massachusetts Low Impact Development Toolkit: Infiltration Trenches And Dry Wells**. Massachusetts: Arc Of Innovation, 2005.

MEHTA, K. et al. **Green Roofs: An in-depth look at the public and private Green Roof Initiatives and the application of them to Ithaca and the local area**. 2008. Cornell University. Disponível em: <https://courses.cit.cornell.edu/crp384/2008reports/03Green_Roofs.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2018.

MORAIS, C; RORIZ, M. Temperatura em protótipo de edificação com cobertura ajardinada. São Carlos, SP. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO/ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO – ENCAC/ELACAC. **Anais...** Maceió, Alagoas, 2005, p.1258

NAKAMURA, P.; YUBA, A. N. Comparação entre guias de coberturas verdes. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, Porto Alegre. **Anais...** São Paulo: Antac, 2016. p. 2225 - 2234.

NASCIMENTO, C. M. L. **Avaliação das relações chuva vazão em telhados verdes Modulares sob Chuva Simulada Induzida**. 2015.128 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Ambiental, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

NGAN, G. **Green Roof Policies: Tools for Encouraging Sustainable Design**. Vancouver: Landscape Architecture Canada Foundation, 2004. 49 p.

OLIVEIRA, E. W. N. **Telhados verdes para habitações de interesse social: retenção das águas pluviais e conforto térmico**. 2009. 87 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

PEIXOTO, C. V. et al. Avaliações de Concepção, Reaproveitamento de Recursos Naturais e Eficiência Energética do Projeto de Edifício Escolar Verde no Município de Recife-PE. In: CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS, 2., 2016, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: UFPB, 2016.

PEIXOTO, C. V. **Telhado Verde com utilização de Lodo Proveniente de Estação de Tratamento de Efluentes e Resíduos da Construção e Demolição**. 2016. 17 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, 2016.

PERI, G. et al. Embedding “substrate” in environmental assessment of green roofs life cycle: evidences from an application to the whole chain in a Mediterranean site. **Journal Of Cleaner Production**, Palermo, Italy, v. 35, p.274-287, nov. 2012.

PIAUI. Lei nº 6888, de 06 de outubro de 2016. Dispõe sobre a obrigatoriedade da adoção de práticas e métodos sustentáveis na construção civil e dá outras providências. **Lex**. Teresina, PI.

PLANTEI GARDEN CENTER. **ARGILA EXPANDIDA 50 LITROS BIOPLANTHION**. 2019. Disponível em: <https://www.plantei.com.br/argila-expandida-50-litros-bioplantion?parceiro=3092&gclid=CjwKCAjw2cTmBRAVEiwA8YMgzUx1pXKE1G9HhTQ3eHIzWYjgnXKKQT4g-XqCWMjbSbpcuIG31xpQpxoCZFsQAvD_BwE>. Acesso em: 05 jan. 2019.

RANGEL, A. C. L. C.; ARANHA, K. C.; SILVA, M. C. B. C. Os telhados verdes nas políticas ambientais como medida indutora para a sustentabilidade. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, [s.l.], v. 35, p.397-409, 24 dez. 2015. Universidade Federal do Parana.

RAZZAGHMANESH, M.; BEECHAM, S.; KAZEMI, F. Impact of green roofs on stormwater quality in a South Australian urban environment. **Science Of The Total Environment**, Adelaide, australia, v. 470-471, p.651-659, fev. 2014.

RECIFE (Município). Lei Ordinária nº 18.112/2015, de 13 de janeiro de 2015. Dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do telhado verde, e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das Águas Pluviais Para A Rede de Drenagem e Dá Outras Providências. **Lex**. Recife, PE.

RINCÓN, L. et al. Environmental performance of recycled rubber as drainage layer in extensive green roofs. A comparative Life Cycle Assessment. **Building And Environment**, Lleida, Spain, v. 74, p.22-30, abr. 2014.

ROCHA, S. **Telhados verdes contribuem fortemente para certificação de construções sustentáveis**. 2017. Instituto Cidade Jardim. Disponível em: <<http://institutocidadejardim.com.br/2017/04/12/telhados-verdes-contribuem-fortemente-para-certificacao-de-construcoes-sustentaveis/>>. Acesso em: 14 abr. 2018.

SAN FRANCISCO. **Planning, Green Building Codes** – better roof requirements, including living roofs. San Francisco, California, 2016.

SANTAMOURIS, M. Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. **Solar Energy**, [S.l.], v. 103, p.682-703, maio 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>.

SANTA CATARINA (Estado). Lei nº 14.243, de 11 de setembro de 2007. Dispõe sobre a implementação de sistemas de maturação através da criação de telhados verdes em espaços urbanos de Santa Catarina.. **Lex**. Florianópolis, SC.

SANTOS, Pedro Tyaquiã da Silva et al. Telhado verde: desempenho do sistema construtivo na redução do escoamento superficial. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p.161-174, mar. 2013.

SÃO PAULO. Decreto nº 55.994, de 10 de março de 2015. INTRODUZ ALTERAÇÕES NO ARTIGO 4º DO DECRETO Nº 53.889, DE 8 DE MAIO DE 2013, QUE REGULAMENTA O TERMO DE COMPROMISSO AMBIENTAL - TCA.

SNOW J. **Green Roofs Take Root Around the World**. 2016. National Geographic. Disponível em: <<http://news.nationalgeographic.com/2016/10/san-francisco-green-roof-law/>>. Acesso em: 27 set. 2018.

SOLDERHOLM, B. **Plumbing systems & design**. Disponível em: <<http://psdmagazine.com/20110616Pipeline>> . Acesso em: ago. 2018.

STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WASTE WATER. **2120**: Color. United States: American Public Health Association, 1992.

STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WASTE WATER. **4500H+**: pH Value. United States: American Public Health Association, 1999.

STOVIN, V. The potential of green roofs to manage Urban Stormwater. **Water And Environment Journal**, [s.l.], v. 24, n. 3, p.192-199, 12 maio 2009. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1747-6593.2009.00174.x>.

TEOTÓNIO, I.; SILVA, C. M.; CRUZ, C. O. Eco-solutions for urban environments regeneration: The economic value of green roofs. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 199, p.121-135, out. 2018. Elsevier BV.

TOMAZ, P. **Aproveitamento de água da chuva para áreas urbanas e fins não potáveis**. 2. ed. São Paulo: Navegar, 2003.

TASSI, R. et al. Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais. **Ambiente Construído**, [s.l.], v. 14, n. 1, p.139-154, mar. 2014.

TEIXEIRA, P. C. **Qualidade da água drenada por coberturas verdes para fins de aproveitamento em edifício**. 2013. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Unicamp, Campinas, 2013.

THE INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION (South Africa). **Agenda 21 for Sustainable Construction in Developing Countries**: A discussion document. Pretoria: CSIR Building And Construction Technology, 2002.

TODOROV, D. et al. Water quality function of an extensive vegetated roof. **Science Of The Total Environment**, [s.i.], v. 625, p.928-939, jan. 2018.

TOKYO. **Tokyo Plan 2000**. Tokyo, Japan, 01 abr. 2001. Tokyo, Bureau of Environment (Tokyo Metropolitan Government).

TORONTO (Município). **Green Roofs: MUNICIPAL CODE**. Toronto, Canada, 11 out. 2013.

ULRICH, R. S. View through a window may influence recovery from surgery. **American Association For The Advancement Of Science**, p.420-422, 1984.

VECCHIA, F. Cobertura Verde Leve (CVL): Ensaio Experimental. In: ENCAC-ELACAC. **Anais...** . Maceió, 2005. p. 2146 - 2155.

VELAZQUEZ, L. S. Modular GreenRoof Technology: An Overview of Two Systems. In: ANNUAL GREENING ROOFTOPS FOR SUSTAINABLE COMMUNITIES CONFERENCE, 1., 2003, Chicago. **Proceedings...** . Chicago: Greenroofs.com, 2003.

VILA, A. et al. Use of rubber crumbs as drainage layer in experimental green roofs. **Building And Environment**. v. 48, p.101-106, fev. 2012.

WALDBAUM, H.. Green roof for urban agriculture. What is required to support their implementation in the UK. **Advanced Environmental and Energy Studies**. University of East London, School of Computing and Technology. 154 p. 2008.

WILKINSON, S.; DIXON, Tim (Ed.). **Green Roof Retrofit: Building Urban Resilience**. Sussex, Uk: Wiley-blackwell, 2016.

WILLES, J. A. **Tecnologias em telhados verdes extensivos: meios de cultura, caracterização hidrológica e sustentabilidade do sistema**. 2014. 69 f. Tese (Doutorado) - Curso de Fitotecnia, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2014.

APÊNDICE

CHUVA 1

COLIFORMES TOTAIS (Nº de positivos (0-5))		COLIFORMES TERMOTOLERANTES (Nº de positivos (0-5))		PH		TURBIDEZ(mtu)		COR APARENTE (Gráf. 2-100)		COLIFORMES TOTAIS (NMP/100ml)	
CR1	CR2	CR3	CR4	CR5	CR6	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5	CR6
5	5	5	5	5	5	6,35	2,87	>100	>100	1601	250
(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)	6,77	2,93	>100	>100	1601	350
5	5	5	5	5	5	6,81	4,76	>100	>100	1601	350
(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	7,32	1,96	>100	>100	1601	84
5	5	5	5	5	5	6,49	6,35	>100	>100	1601	79
(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)	7,08	6,05	>100	>100	1601	70
5	5	5	5	5	5	7,81	5,53	>100	>100	1601	31
(10ml)	(10ml)	(10ml)	(10ml)	(10ml)	(10ml)	7,20	2,06	>100	>100	1601	23
(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)	7,31	1,70	>100	>100	1601	23
5	5	5	5	5	5	7,54	1,65	>100	>100	1601	79
(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	7,61	2,79	>100	>100	1601	1,8
5	5	5	5	5	5	7,15	1,00	>100	>100	1601	79
(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	7,15	1,00	>100	>100	1601	23
5	5	5	5	5	5						
(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)						
5	5	5	5	5	5						
(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)						

CHUVA 2

COLIFORMES TOTAIS (Nº de positivos (0-5))		COLIFORMES TERMOTOLERANTES (Nº de positivos (0-5))		PH		TURBIDEZ(mtu)		COR APARENTE (Gráf. 2-100)		COLIFORMES TOTAIS (NMP/100ml)	
CR1	CR2	CR3	CR4	CR5	CR6	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5	CR6
5	5	5	5	5	5	6,78	2,72	>100	>100	1600	220
(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)	6,47	2,01	>100	>100	1601	70
4	4	4	4	4	4	6,47	2,92	>100	>100	1601	79
(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	7,69	2,07	>100	>100	920	120
5	5	5	5	5	5	6,63	2,13	>100	>100	1601	280
(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)	6,44	2,65	>100	>100	1601	49
5	5	5	5	5	5	7,37	7,88	>100	>100	1601	49
(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	7,13	11,51	>100	>100	1601	3,6
5	5	5	5	5	5	7,42	12,06	>100	>100	1601	1,7
(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	7,44	12,06	>100	>100	1601	13
5	5	5	5	5	5	7,55	7,48	>100	>100	1601	22
(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)	7,18	7,61	>100	>100	1601	23
3	3	3	3	3	3						
(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)						
5	5	5	5	5	5						
(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)						
5	5	5	5	5	5						
(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)						
5	5	5	5	5	5						
(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)	(1ml)						
5	5	5	5	5	5						
(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)	(0,1ml)						

CHUVA 3

COLIFORMES TOTAIS (Nº de positivos (0-5))		COLIFORMES TERMOTOLERANTES (Nº de positivos (0-5))		PH		TURBIDEZ(mtU)		COR APARENTE (Grdf. 2-100)		COLIFORMES TOTAIS (NMP/100ml)	
CR1	(10ml)	5	CC1	(10ml)	5	CR1	7,11	CR1	2,47	CR1	1600
-	(0,1ml)	3	-	(1ml)	5	CR2	7,00	CR2	1,78	CR2	1600
-	(0,1ml)	4	-	(0,1ml)	4	CR3	6,74	CR3	1,65	CR3	280
CR2	(10ml)	5	CC2	(10ml)	4	CR4	6,86	CR4	1,71	CR4	920
-	(0,1ml)	0	-	(1ml)	1	CR5	6,53	CR5	8,50	CR5	240
-	(0,1ml)	4	-	(0,1ml)	2	CR6	6,71	CR6	22,10	CR6	540
CR3	(10ml)	5	CC3	(10ml)	4	CC1	7,61	CC1	13,27	CC1	1600
-	(1ml)	4	-	(1ml)	0	CC2	7,22	CC2	18,80	CC2	1600
-	(0,1ml)	0	-	(0,1ml)	0	CC3	7,13	CC3	20,00	CC3	8,1
CR4	(10ml)	5	CC4	(10ml)	2	CC4	7,28	CC4	11,52	CC4	120
-	(1ml)	5	-	(1ml)	1	CC5	7,54	CC5	1,89	CC5	47
-	(0,1ml)	3	-	(0,1ml)	0	CC6	6,93	CC6	1,06	CC6	6,8
CR5	(10ml)	5	CC5	(10ml)	0	CR5	6,93	CR5	1,06	CR5	6,8
-	(1ml)	5	-	(1ml)	1	CR6	6,93	CR6	1,06	CR6	2
-	(0,1ml)	0	-	(0,1ml)	0						4,5
CR6	(10ml)	5	CC6	(10ml)	3						4,5
-	(1ml)	5	-	(1ml)	0						2
-	(0,1ml)	2	-	(0,1ml)	0						1,8

CHUVA 4

COLIFORMES TOTAIS (Nº de positivos (0-5))		COLIFORMES TERMOTOLERANTES (Nº de positivos (0-5))		PH		TURBIDEZ(mtU)		COR APARENTE (Grdf. 2-100)		COLIFORMES TOTAIS (NMP/100ml)	
CR1	(10ml)	5	CC1	(10ml)	5	CR1	6,48	CR1	4,41	CR1	1601
-	(0,1ml)	5	-	(1ml)	5	CR2	6,86	CR2	4,43	CR2	1601
-	(0,1ml)	5	-	(0,1ml)	5	CR3	6,46	CR3	3,52	CR3	170
CR2	(10ml)	5	CC2	(10ml)	5	CR4	6,54	CR4	7,10	CR4	920
-	(1ml)	5	-	(1ml)	5	CR5	6,56	CR5	4,13	CR5	1601
-	(0,1ml)	5	-	(0,1ml)	5	CR6	6,63	CR6	6,69	CR6	1601
CR3	(10ml)	5	CC3	(10ml)	5	CC1	7,44	CC1	8,63	CC1	1601
-	(1ml)	5	-	(1ml)	5	CC2	7,30	CC2	4,29	CC2	1601
-	(0,1ml)	4	-	(0,1ml)	3	CC3	7,00	CC3	3,16	CC3	350
CR4	(10ml)	5	CC4	(10ml)	5	CC4	7,43	CC4	3,71	CC4	1601
-	(1ml)	5	-	(1ml)	4	CC5	7,61	CC5	4,45	CC5	920
-	(0,1ml)	3	-	(0,1ml)	1	CC6	7,28	CC6	5,69	CC6	170
CR5	(10ml)	5	CC5	(10ml)	5						40
-	(1ml)	5	-	(1ml)	5						84
-	(0,1ml)	5	-	(0,1ml)	2						920