

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

VINICIUS CARVALHO GUERRA

**BIOFILTRO CONTENDO AGREGADOS RECICLADOS DE CERÂMICA
VERMELHA COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL DE TRATAMENTO DE
ÁGUAS CINZAS**

Guaratinguetá

2025



VINICIUS CARVALHO GUERRA

**BIOFILTRO CONTENDO AGREGADOS RECICLADOS DE CERÂMICA
VERMELHA COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL DE TRATAMENTO DE
ÁGUAS CINZAS**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Isabel Cristina de Barros Trannin

Guaratinguetá

2025

G934b Guerra, Vinicius Carvalho
Biofiltro contendo agregados reciclados de cerâmica vermelha como alternativa sustentável de tratamento de águas cinzas / Vinicius Carvalho Guerra - Guaratinguetá, 2025.
69 f : il.
Bibliografia: f. 65-69

Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025.

Orientadora: Profª. Drª. Isabel Cristina de Barros Trannin

1. Água - reúso. 2. Agregados (Materiais de construção). 3. Sustentabilidade. 4. Materiais cerâmicos. I. Título.

CDU 628:179.2

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595


VINICIUS CARVALHO GUERRA

Biofiltro contendo agregados reciclados de cerâmica vermelha como alternativa sustentável de tratamento de águas cinzas


Trabalho de Graduação apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Câmpus de Guaratinguetá, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Data da defesa: 14/11/2025


Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 ISABEL CRISTINA DE BARROS TRANNIN
Data: 07/01/2026 13:20:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Isabel Cristina de Barros Trannin
Orientadora – FEG/UNESP

Documento assinado digitalmente
 VICTOR ARRUDA FERRAZ DE CAMPOS
Data: 09/01/2026 10:20:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Victor Arruda Ferraz de Campos
FEG/UNESP

Documento assinado digitalmente
 JAQUELINE ARICE GAUDENCIO DA SILVA
Data: 07/01/2026 11:37:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

M.Sc. Jaqueline Arice Gaudencio da Silva
Doutoranda do PPGE – FEG/UNESP

Guaratinguetá – SP

Este trabalho é dedicado à minha família. A vocês, que sempre acreditaram em meu potencial e me inspiraram a ir mais longe, minha eterna gratidão. Que este esforço seja um reflexo do carinho e incentivo que recebi ao longo de cada passo desta jornada.

AGRADECIMENTOS

Ao chegar ao final desta etapa da minha vida acadêmica, sinto a necessidade de reconhecer e agradecer a todas as pessoas e instituições que, de alguma forma, tornaram essa conquista possível.

Agradeço primeiramente aos meus pais e aos meus irmãos, minha base, que estiveram ao meu lado em todos os momentos, oferecendo apoio incondicional e a oportunidade de estudar. Sem vocês, essa conquista não seria possível. Obrigado por sempre acreditarem em mim e por me motivarem a seguir em frente, mesmo nos momentos mais difíceis.

À minha professora orientadora, Isabel Trannin, expresso minha profunda gratidão pelo suporte, dedicação e paciência ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. É inspirador acompanhar sua inteligência, entusiasmo e disposição para ajudar, e sou muito grato por todo o aprendizado que tive ao seu lado.

Ao meu grande amigo e colega de curso, Gabriel, que tornou minha trajetória universitária mais leve e divertida. Levo comigo todas as experiências que compartilhamos, que foram muitas e inesquecíveis, e que tornaram os desafios da faculdade mais fáceis de enfrentar.

À República Vamointão, que foi muito mais que um lar durante minha jornada acadêmica. Lá aprendi lições valiosas, construí amizades que levarei para a vida toda e encontrei apoio em todos os momentos, tornando o dia a dia da faculdade mais leve e especial.

A minha vó, Dona Neusa, que não está mais presente entre nós, mas cuja os ensinamentos e amor me acompanharam em toda a jornada

Ao meu tio, Ranulfo, que me apresentou à engenharia civil e sempre me guiou com conselhos valiosos. Sua influência e incentivo despertaram minha paixão pela profissão e me ajudaram a trilhar o caminho que me trouxe até aqui.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte desta jornada, deixo meus sinceros agradecimentos. Cada gesto de apoio, palavra de incentivo e momento compartilhado contribuíram para que esta vitória se tornasse possível.

RESUMO

Este trabalho avaliou a viabilidade técnica e ambiental do uso de agregados reciclados de cerâmica vermelha (ARCV) como substitutos de agregados naturais (AN) no filtro biológico do Sistema BioÁgua Familiar (SBF), destinado ao tratamento descentralizado de águas cinzas em áreas rurais. Foram construídos dois protótipos de biofiltros utilizando tubos de PVC, um com AN e outro com ARCV, e analisadas quanto aos parâmetros físico-químicos e microbiológicos antes e após o tratamento. Os resultados indicaram que o sistema com ARCV apresentou desempenho técnico promissor com eficiência superior ao filtro convencional na clarificação e estabilização do pH, embora ambos os sistemas ainda demandem etapas complementares de desinfecção para atender integralmente à NBR 16783/2019 e legislações correlatas. A substituição dos agregados naturais pelos reciclados demonstrou potencial de redução de impactos ambientais e custos, além de favorecer a economia circular. Os resultados evidenciam a aplicabilidade do ARCV em biofiltros, contribuindo para soluções sustentáveis de saneamento e para o reúso seguro de água na irrigação agrícola.

PALAVRAS-CHAVE: Sistema BioÁgua Familiar; Biofiltração; Reuso de águas; Cerâmica vermelha; Sustentabilidade.

ABSTRACT

This study evaluated the technical and environmental feasibility of using recycled red ceramic aggregates (ARCV) as substitutes for natural aggregates (AN) in the biological filter of the BioÁgua Familiar System (SBF), intended for decentralized greywater treatment in rural areas. Two prototype biofilters made of PVC were built, one with AN and the other with ARCV, and the greywater quality was analyzed before and after treatment for physicochemical and microbiological parameters. The ARCV system showed promising technical performance, with higher efficiency in water clarification and pH stabilization compared to the conventional filter, although both systems still require complementary disinfection steps to fully meet NBR 16783/2019 and related regulations. The use of recycled aggregates demonstrated potential to reduce environmental impacts and costs, promoting circular economy practices. The results highlight the applicability of ARCV in biofilters, contributing to sustainable sanitation solutions and safe water reuse for agricultural irrigation.

KEYWORDS: BioÁgua Familiar System; Biofiltration; Water reuse; Red ceramic; Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de separação das águas cinzas no sistema hidráulico.....	23
Figura 2 – Águas cinzas na caixa de gordura sendo conduzidas ao SBF.....	28
Figura 3 – Esquema simplificado da distribuição das camadas dos componentes do Sistema Bioágua Familiar.....	31
Figura 4 – Esquema simplificado do funcionamento do Sistema BioÁgua Familiar.....	32
Figura 5 – Fluxograma das etapas desenvolvidas neste trabalho de graduação.....	43
Figura 6 – Preparação dos agregados reciclados de cerâmica vermelha.....	45
Figura 7 – Materiais filtrantes utilizados no Sistema BioÁgua Familiar.....	45
Figura 8 - Sistema BioÁgua Familiar e sistema alternativo com ARCV.....	46
Figura 9 - Pré-testes realizados com os agregados cerâmicos.....	47
Figura 10 – Coleta e preparo das águas cinzas para tratamento nos biofiltros.....	48
Figura 11 – Amostragem e preparação do Cambissolo distrófico coletado nas dependências do Câmpus da FEG/UNESP.....	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Variabilidade da qualidade de águas cinzas de diferentes origens.....	21
Quadro 2 – Usos potenciais da água cinza tratada e exigências de qualidade.....	24
Quadro 3 – Principais características dos sistemas de tratamento de água cinza.....	25
Quadro 4 – Objetivos e benefícios do Sistema Bioágua Familiar (SBF).....	26
Quadro 5 – Cronologia e etapas da expansão do SBF.....	27
Quadro 6 - Vantagens e Requisitos para Replicação do SBF.....	36
Quadro 7 - Limites para reuso de água não potável em irrigação.....	49
Quadro 8 - Métodos e equipamentos utilizados nas análises das amostras de água	50
Quadro 9 – Parâmetros de qualidade da água cinza bruta e após filtração e limites normativos para reuso.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físicas e custo de materiais filtrantes.....	37
Tabela 2 - Composição estimada dos RCD por tipo de material.....	38
Tabela 3 – Aplicação da água tratada pelo Sistema BioÁgua Familiar e pelos sistemas alternativos contendo agregados reciclados de concreto e de cerâmica vermelha.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AN	Agregado Natural
ANA	Agencia Nacional das Águas
ARCV	Agregado Reciclado de Cerâmica Vermelha
CE	Condutividade elétrica
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
N	Nitrogênio
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NMP	Número Mais Provável
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
OD	Oxigênio Dissolvidao
P	Fósforo
RCD	Resíduos da Construção Civil e Demolição
SBF	Sistema BioÁgua Familiar
SDT	Sólidos dissolvidos totais
SST	Sólidos Suspensos Totais
TFSA	Taxa de Filtração em Superfície Aparente
UFC	Unidades Formadoras de Colônia
UNT	Unidade Nefelométrica de Turbidez
UV	Ultravioleta

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	OBJETIVO.....	15
1.1.1	Objetivo geral.....	15
1.1.2	Objetivos específicos.....	15
1.2	ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	ÁGUAS CINZAS E SEU POTENCIAL DE REUSO.....	18
2.1.1	Parâmetros físicos, químicos e biológicos de águas cinzas	18
2.1.2	Possibilidades de reuso de águas cinzas	20
2.2	SISTEMA BIOÁGUA FAMILIAR (SBF).....	23
2.2.1	Componentes e funcionamento do Sistema Bioágua Familiar	25
2.2.2	Eficiência e qualidade da água tratada pelo Sistema BioÁgua Familiar	30
2.2.3	Manutenção e replicabilidade do Sistema BioÁgua Familiar.....	31
2.3	A CERÂMICA VERMELHA.....	33
2.3.1.	Resíduos de cerâmica vermelha na construção civil	34
2.3.2	Benefícios Ambientais do Reaproveitamento da Cerâmica Vermelha	36
2.4	LEGISLAÇÃO BRASILEIRA RELACIONADA AO REUSO DE ÁGUAS CINZAS.....	37
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	40
3.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	41
3.2	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	41
3.3	MATERIAIS.....	41
3.3.1	Agregados reciclados de cerâmica vermelha (ARCV).....	41
3.3.2	Outros materiais filtrantes	42
3.4	MONTAGEM DOS SISTEMAS BIOFILTRANTES.....	42

3.4.1	Configuração dos filtros	42
3.4.2	Suporte e alimentação dos Sistemas.....	43
3.5	PRÉ-TESTES E PREPARAÇÃO DOS SISTEMAS FILTRANTES.....	44
3.6	AMOSTRAGEM E PREPARAÇÃO DAS ÁGUAS CINZAS.....	45
3.7	AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS SISTEMAS FILTRANTES.....	45
3.8	MÉTODOS DE ANÁLISES.....	46
3.9	EFEITO DA ADIÇÃO DAS ÁGUAS CINZAS TRATADAS NO PH DO SOLO.....	49
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
4.1	AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS SISTEMAS FILTRANTES.....	50
4.1.1	Análise dos parâmetros físicos	51
4.1.2	Análise dos parâmetros físico-químicos.....	52
4.1.3	Análise dos parâmetros biológicos	54
4.2	AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA DOS SISTEMAS FILTRANTES.....	55
4.3	SUSTENTABILIDADE DO SBF COM USO DE AGREGADOS REICLADOS.....	56
4.3.1	Caracterização e potencial técnico do agregado reciclado de cerâmica.....	57
4.3.2	Aspectos ambientais e econômicos do reaproveitamento	57
4.3.3	Convergência com os princípios da sustentabilidade no SBF	58
4.3.4	Contribuição sistêmica e perspectivas de aplicação	58
4.3.5	Efeito da aplicação das águas cinzas tratadas sobre o pH do solo	59
4.4	LIMITAÇÕES NORMATIVAS E RECOMENDAÇÕES PARA REUSO AGRÍCOLA.....	60
5.	CONCLUSÕES.....	63
	REFERÊNCIAS.....	65

1. INTRODUÇÃO

A crescente escassez de água potável, intensificada pelo avanço da urbanização acelerada e pelas mudanças climáticas, tem exigido soluções inovadoras e sustentáveis para a gestão dos recursos hídricos.

Estimativas recentes de instituições de referência mundial, como a Organização das Nações Unidas (ONU); o Programa Conjunto de Monitoramento para Água, Saneamento e Higiene (JMP), coordenado pela Organização Mundial da Saúde (OMS) e pelo Fundo das Nações Unidas para a Infância (UNICEF); e o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), apontam que metade da população global enfrenta restrições no acesso à água ao menos uma vez por ano, e que mais de 2 bilhões de pessoas vivem sob escassez hídrica crônica (ONU, 2022; JMP, 2023; IPCC, 2022). A crise climática tem agravado esses impactos, afetando desproporcionalmente populações vulneráveis e aprofundando desigualdades sociais, econômicas e ambientais.

Diante desse cenário, o reúso de águas cinzas, provenientes de lavatórios, chuveiros, tanques e lavadoras de roupas, surge como uma alternativa promissora para reduzir o consumo de água potável e minimizar os impactos ambientais do lançamento de esgoto doméstico sem tratamento adequado. Segundo Bazarella (2005), as águas cinzas representam de 60% a 70% do volume total de esgoto doméstico e, quando tratadas, podem ser reutilizadas em atividades não potáveis, como irrigação de jardins, lavagem de pisos e descargas sanitárias. Contudo, para garantir a segurança do reúso, é necessário empregar tecnologias eficientes na remoção de contaminantes físicos, químicos e biológicos, como surfactantes, nutrientes e microrganismos patogênicos.

Entre as principais técnicas utilizadas no tratamento de águas cinzas estão os filtros biológicos, *wetlands* construídos, tanques sépticos seguidos de filtros anaeróbios e sistemas de filtração com materiais naturais ou reciclados. A escolha da tecnologia depende da composição da água, do volume gerado, da área disponível e dos custos de implantação e manutenção. Nesse contexto, os sistemas descentralizados de tratamento ganham destaque por sua capacidade de atender comunidades com infraestrutura limitada, promovendo maior autonomia e redução de impactos ambientais.

No Brasil, destaca-se o Sistema Bioágua Familiar (SBF), uma tecnologia social de baixo custo e fácil manutenção, originalmente desenvolvida para o semiárido nordestino. O sistema

permite o tratamento e reuso de águas cinzas em atividades agrícolas, contribuindo para a segurança hídrica, alimentar e ambiental (Gouveia, 2018). No entanto, o uso de agregados naturais no filtro biológico implica custos elevados e impactos ambientais associados à extração de matérias-primas. A substituição desses materiais por agregados reciclados de resíduos da construção civil (RCD), como os provenientes de tijolos cerâmicos, apresenta-se como uma alternativa inovadora, sustentável e de menor custo, alinhada aos princípios da economia circular.

Apesar da relevância e potencial do reuso de águas cinzas, o Brasil ainda carece de uma legislação nacional específica para regulamentar o reuso direto não potável. Neste aspecto, a NBR 16.783/2019 estabelece diretrizes ao uso de fontes alternativas de água não potável em edificações. Por outro lado, a Lei Federal nº 14.546/2023 reforça a importância do reuso, desde que haja tratamento adequado, evidenciando a urgência de soluções técnicas acessíveis, especialmente para comunidades em situação de vulnerabilidade socioeconômica.

Nesse contexto, este trabalho de graduação propõe a avaliação da viabilidade técnica e ambiental da substituição dos agregados naturais por agregados reciclados de cerâmica vermelha (ARCV) no filtro biológico do SBF. A proposta busca promover uma solução acessível, de fácil construção, economicamente viável e ambientalmente adequada, voltada a populações em regiões de escassez hídrica ou não atendidas por redes públicas.

O uso de ARCV pretende aliar o aproveitamento de resíduos da construção civil e demolição (RCD) à purificação da água, contribuindo simultaneamente para a gestão de dois problemas ambientais relevantes: o desperdício de água e o descarte inadequado de RCD. Além de fornecer dados sobre o desempenho técnico desses materiais no tratamento das águas cinzas, este estudo poderá subsidiar diretrizes técnicas e políticas públicas voltadas ao reuso seguro da água.

Essa iniciativa está em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU, especialmente os ODS 2 (Fome zero e agricultura sustentável), 6 (Água potável e saneamento), 11 (Cidades e comunidades sustentáveis), 12 (Consumo e produção responsáveis) e 13 (Ação contra a mudança global do clima), reforçando seu potencial impacto social, ambiental e científico.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver e avaliar um protótipo de biofiltro, baseado no modelo do Sistema BioÁgua Familiar (SBF), utilizando agregados reciclados de cerâmica vermelha (ARCV) em substituição total aos agregados naturais, de modo a analisar sua eficiência no tratamento de águas cinzas domésticas e sua contribuição para a sustentabilidade do sistema.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Preparar os agregados reciclados de cerâmica vermelha (ARCV) a partir da trituração de telhas cerâmicas, com posterior peneiramento em frações correspondentes à areia média lavada, brita 1 e brita 2, e homogeneização granulométrica, para composição das camadas filtrantes, que substituirão os agregados naturais utilizados no Sistema BioÁgua Familiar.
2. Construir um protótipo de biofiltro baseado no modelo do Sistema BioÁgua Familiar (SBF) tradicional e outro substituindo totalmente os agregados naturais por ARCV nas camadas filtrantes.
3. Comparar a eficiência do biofiltro alternativo com a do SBF tradicional na remoção de poluentes de águas cinzas domésticas, avaliando parâmetros físico-químicos e microbiológicos relevantes para o reuso da água em irrigação agrícola, analisando as diferenças de desempenho e o comportamento hidráulico
4. Discutir os benefícios ambientais e de sustentabilidade associados ao uso de ARCV, considerando o reaproveitamento de resíduos da construção e demolição (RCD), a redução da extração de recursos naturais e o potencial de aplicação em contextos de escassez hídrica.
5. Propor recomendações para o aprimoramento do Sistema BioÁgua Familiar, com base nos resultados obtidos, visando sua replicabilidade e aplicação em comunidades rurais e urbanas com baixa infraestrutura.

1.2 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado de forma a abordar, de maneira sistemática e fundamentada, a viabilidade do uso de agregados reciclados de cerâmica vermelha (ARCV) como substituto dos agregados naturais utilizados no Sistema de BioÁgua Familiar (SBF) no tratamento descentralizado de águas cinzas domésticas. Para a condução de uma linha de raciocínio lógica em busca de alcançar os objetivos almejados no presente estudo, a estrutura da pesquisa foi definida como descrito a seguir.

No capítulo 1, a introdução apresenta de forma sucinta, o contexto geral da pesquisa, destacando a relevância do desenvolvimento de técnicas que permitam o reuso de águas cinzas e o aproveitamento de resíduos da construção civil, frente à crescente demanda por soluções inovadoras sustentáveis. Também destaca a relevância deste estudo, como incentivo à implementação dos objetivos de desenvolvimento sustentável da Agenda 2030 da ONU. Além disso, são apresentados os objetivos (geral e específicos) e a estruturação do trabalho.

No capítulo 2, é apresentada uma revisão da literatura técnica e científica relacionada ao reuso de águas cinzas, à eficiência de sistemas de biofiltração e ao aproveitamento de agregados reciclados, especialmente de cerâmica vermelha, buscando fundamentar a proposta experimental e orientar a seleção dos materiais e métodos. Também são explorados os aspectos relacionados ao desenvolvimento sustentável, com um enfoque na necessidade de tratar as águas cinzas para aumentar a segurança hídrica e diminuir os riscos ambientais e os custos com tratamentos de esgoto, considerando que grande parte do esgoto doméstico é constituído por águas cinzas, que apresenta elevado potencial de aproveitamento em atividades que não exigem potabilidade.

No capítulo 3, é apresentado de forma detalhada, o planejamento experimental, incluindo a caracterização dos materiais utilizados na composição dos sistemas de filtragem avaliados, contendo agregados naturais e reciclados, bem como os critérios para a instalação dos sistemas de biofiltração (SBF), os procedimentos de coleta e análise das amostras de águas cinzas, e os parâmetros físico-químicos e microbiológicos avaliados. A metodologia foi desenvolvida para garantir a reprodutibilidade e a confiabilidade dos dados obtidos.

No capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nas análises comparativas entre os sistemas de biofiltração de águas cinzas domésticas, comparando o SBF contendo agregados naturais e reciclados. Os resultados são interpretados considerando a

literatura revisada, a eficiência dos materiais no tratamento das águas cinzas, bem como seus potenciais benefícios ambientais. A discussão é feita buscando esclarecer os impactos da substituição dos agregados naturais por reciclados de cerâmica vermelha e os limites observados na aplicação desta proposta.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões, buscando sintetizar os principais achados do estudo em resposta aos objetivos propostos, destacando as contribuições do trabalho para a sustentabilidade hídrica e para a gestão de resíduos da construção e demolição (RCD), bem como o desempenho técnico do biofiltro contendo agregados reciclados de cerâmica vermelha.

No capítulo 6 são apresentadas recomendações para trabalhos futuros, tendo como base as limitações deste estudo e as possibilidades identificadas, com sugestão de linhas de pesquisa futuras que possam ampliar e aprofundar a aplicação da tecnologia desenvolvida, incluindo investigações de longo prazo, adaptações em escala maior e testes em diferentes contextos ambientais e sociais.

Ao final do trabalho, são apresentadas todas as referências utilizadas na construção teórica e metodológica da pesquisa, de acordo com as normas acadêmicas vigentes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ÁGUAS CINZAS E SEU POTENCIAL DE REUSO

Água cinza é o termo utilizado para se referir à água que já foi utilizada para determinado uso e que não possui contribuição de efluentes provenientes de vasos sanitários. Ela pode ser gerada em residências ou em qualquer tipo de edificação, como escolas, escritórios, comércios, entre outros. Segundo Jefferson *et al.* (1999), Eriksson *et al.* (2002) e Bazzarella (2005), trata-se da água residuária originada do uso de lavatórios, chuveiros, banheiras, pias de cozinha, máquinas de lavar roupas e tanques.

Entretanto, é importante ressaltar que, para alguns autores, como Nolde (1999) e Christova-Boal *et al.* (1996), o efluente proveniente das pias de cozinha não é considerado água cinza, pois apresenta grande quantidade de poluentes, especialmente óleos e gorduras.

As águas cinzas representam uma parte significativa do volume total de esgoto doméstico gerado. Segundo Gray e Becker (2002), citados por Bazzarella (2005), aproximadamente 60% a 70% do esgoto doméstico gerado em uma residência é composto por águas cinzas oriundas de chuveiros, lavatórios, máquinas de lavar roupas, tanques e pias. Essa proporção pode variar conforme os hábitos dos moradores, a presença ou não de dispositivos economizadores de água e o uso de diferentes fontes de abastecimento.

Dentre essa significativa parcela, os maiores volumes são provenientes das pias, dos ralos dos banheiros e da lavanderia (como o ralo de saída da máquina de lavar roupas). Essa expressiva representatividade de volume torna o aproveitamento das águas cinzas uma estratégia eficaz para a redução do consumo de água potável e da geração de esgoto sanitário, especialmente em áreas urbanas.

2.1.1 Parâmetros físicos, químicos e biológicos de águas cinzas

A caracterização físicos, química e microbiológica das águas cinzas é de extrema importância para o desenvolvimento de sistemas de tratamento eficientes e seguros. Os parâmetros químicos mais relevantes incluem a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), a Demanda Química de Oxigênio (DQO), o pH, os sólidos totais, suspensos e dissolvidos, além de compostos nutrientes como nitrogênio e fósforo. O Quadro 1 apresenta a variabilidade típica

desses parâmetros em águas cinzas provenientes de diferentes fontes doméstica, com base em dados da literatura.

Quadro 1 – Variabilidade da qualidade de águas cinzas de diferentes origens

Parâmetro	Chuveiro	Lavadora de roupas	Pia de Cozinha	Faixa Típica
DBO (mg/L)	30 – 150	50 – 250	150 – 300	50 – 300
DQO (mg/L)	100 – 300	150 – 500	300 – 600	200 – 500
SST (mg/L)	20 – 80	50 – 120	80 – 150	40 – 150
pH	6,5 – 8,0	6,0 – 8,5	6,2 – 7,5	6,5 – 8,5
Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	10 ² – 10 ³	10 ³ – 10 ⁴	10 ⁴ – 10 ⁵	10 ² – 10 ⁵

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2005), Jesus *et al.* (2013) e Nogueira *et al.* (2014)

Segundo Moreira e Pires (2009), a DBO das águas cinzas pode variar na faixa de 50 e 300 mg/L, os valores de DQO chegam até 500 mg/L, especialmente quando há presença de detergentes, sabões e óleos provenientes de pias e lavanderias. Esses compostos químicos aumentam a matéria orgânica presente no efluente e exigem tratamentos especiais para a sua remoção. Os sólidos suspensos totais (SST) também se destacam, podendo atingir concentrações de até 150 mg/L (Nogueira *et al.*, 2014), o que pode aumentar o risco de entupimento em sistemas de filtragem se não forem adequadamente tratados.

O pH das águas cinzas geralmente varia de 6,5 a 8,5, conforme apontado por Jesus *et al.* (2013), o que afeta diretamente nos processos de coagulação, floculação e na atividade microbológica dos sistemas de tratamento. Quanto aos nutrientes, de acordo com a NBR 13969 (ABNT, 1997), o nitrogênio e o fósforo presentes nas águas cinzas, mesmo que em menores concentrações do que nas águas negras, podem contribuir para a eutrofização de corpos d'água, caso o efluente tratado seja descartado sem o monitoramento da qualidade e atendimento à Resolução Conama n° 430/2011.

Do ponto de vista microbiológico, pode-se destacar a presença de coliformes totais e termotolerantes. Apesar de a água cinza não conter efluentes oriundos de vasos sanitários, a contaminação fecal ainda pode ocorrer por meio da lavagem de roupas íntimas, fraldas de bebê ou superfícies contaminadas. Segundo Von Sperling (2005), “a presença de coliformes termotolerantes em águas cinzas pode atingir valores superiores a 10⁴ NMP/100 mL, exigindo, portanto, processos de desinfecção antes do reuso”. Nesse sentido, o monitoramento

microbiológico constante torna-se essencial, especialmente em sistemas destinados à irrigação, lavagem de pisos ou descargas sanitárias.

Portanto, a água cinza pode ter a sua composição e parâmetros variados de acordo com a sua origem (chuveiro, pia de cozinha, lavadora de roupas) e com os hábitos dos usuários, como por exemplo o uso de produtos de limpeza e a frequência de uso dos dispositivos de economia de água. Portanto, compreender sua composição e seus parâmetros é fundamental para criar tecnologias adequadas de tratamento, em especial aquelas que utilizam materiais filtrantes alternativos e sustentáveis, como os agregados reciclados de cerâmica vermelha, foco presente deste trabalho.

Esses aspectos ressaltam a importância de um monitoramento contínuo da qualidade das águas cinzas e da adoção de tratamentos adequados, principalmente quando se considera sua reutilização. Considerando essas características, o próximo passo é entender quais são os usos mais adequados para as águas cinzas tratadas, conforme seu nível de qualidade e as exigências normativas.

2.1.2 Possibilidades de reuso de águas cinzas

O reuso de águas cinzas tem se mostrado uma alternativa eficaz e ambientalmente inteligente diante do cenário crescente de escassez hídrica, especialmente em regiões onde o índice de chuvas é baixo e o acesso ao saneamento é precário. Esse tipo de água, proveniente de lavatórios, chuveiros, tanques e máquinas de lavar roupas, pode representar entre 50% e 80% do esgoto gerado em uma residência, segundo dados de Sella (2011). Aproveitar esse volume para usos não potáveis é uma forma prática de reduzir a demanda por água potável, aliviar a pressão sobre os mananciais e contribuir para a sustentabilidade hídrica no ambiente urbano e rural.

Além da economia de água, o reuso de águas cinzas também implica em menor geração de esgoto bruto, o que reduz a carga lançada nos corpos hídricos e os custos com o tratamento convencional. A implantação desses sistemas pode ser prevista ainda na fase de projeto hidráulico da edificação ou, quando necessário, por meio de adaptações em construções já existentes. Nesses casos, é possível criar redes separadas que direcionam a água cinza para unidades de tratamento e, posteriormente, para o armazenamento.

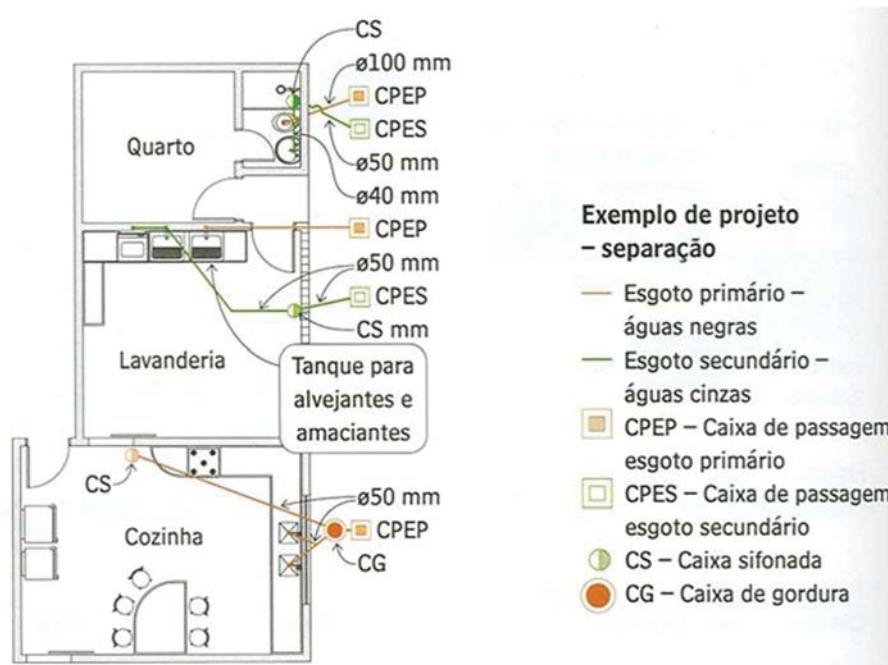
No entanto, esse processo exige atenção especial aos critérios técnicos e normativos. A norma brasileira NBR 13.969/97, por exemplo, determina que a rede de água de reuso deve ser

fisicamente distinta da rede de água potável e claramente identificada, seja por cor específica da tubulação, rótulos ou sinalização. Essas medidas são fundamentais para evitar contaminações acidentais e garantir a segurança sanitária dos usuários. A adesão às normas técnicas e às regulamentações locais é um passo indispensável para que os sistemas de reuso sejam tecnicamente viáveis, seguros e aceitos pela sociedade.

A Figura 1 ilustra um modelo de separação de águas cinzas no sistema hidráulico residencial. A água cinza tratada, embora imprópria para consumo humano direto, apresenta condições favoráveis para reutilização em atividades que não exigem alta qualidade, como lavagem de pisos e veículos, irrigação de áreas verdes, e descarga de vasos sanitários (DOMBROSKI *et al.*, 2022; COSTA *et al.*, 2022). A aplicação na irrigação, em especial, tem se mostrado altamente vantajosa, pois permite:

- Reutilizar um volume expressivo de efluente;
- Aproveitar nutrientes presentes na água;
- Reduzir a demanda por fertilizantes;
- Evitar o lançamento de esgoto no ambiente natural.

Figura 1 – Esquema de separação das águas cinzas no sistema hidráulico



Fonte: Viggiano (2005) apud Sella (2011).

O Quadro 2 apresenta as potencialidades de reuso de águas cinzas após serem tratadas e as principais exigências quanto aos padrões de qualidade para os diferentes usos.

Quadro 2 – Usos potenciais da água cinza tratada e exigências de qualidade

Uso Potencial	Requisitos Mínimos de Qualidade	Riscos e Cuidados
Irrigação de hortas e pomares	Baixa DBO e DQO; ausência de coliformes fecais; sólidos suspensos removidos	Evitar contato direto com partes comestíveis; utilizar irrigação por gotejamento
Lavagem de pisos e calçadas	Ausência de sólidos em suspensão; baixa turbidez	Evitar respingos em áreas com alimentos ou pessoas
Descarga de vasos sanitários	Sem sólidos e gordura; baixa turbidez; DBO moderada	Manter tubulação separada da rede potável e devidamente identificada
Lavagem de veículos	Água clara, sem sólidos abrasivos ou odor	Evitar contato direto com o operador, especialmente sem EPI
Irrigação de gramados e paisagismo	Sólidos e DBO controlados; ausência de coliformes em áreas públicas	Evitar uso em horários de maior circulação de pessoas
Produção de concreto (uso técnico)	Ausência de óleos/gorduras; pH controlado; baixa DQO e presença mínima de matéria orgânica	Garantir compatibilidade com a cura do concreto e desempenho estrutural

Fonte: Adaptado da NBR 13.969 (ABNT, 1997); Hespanhol (2003); FIESP (2005).

Para viabilizar o reúso, diversos sistemas de tratamento descentralizados têm sido empregados, com ênfase em soluções de baixo custo, fácil operação e manutenção, especialmente em áreas rurais ou comunidades isoladas. A escolha do sistema ideal depende da qualidade da água cinza a ser tratada, do volume gerado, dos usos pretendidos para a água tratada e da disponibilidade de recursos. Os sistemas mais utilizados incluem:

- *Filtros de areia e brita*: atuam por processos físicos, retendo partículas em suspensão e parte da matéria orgânica. São simples, mas exigem manutenção regular para evitar entupimentos.
- *Filtros anaeróbios e tanques sépticos*: promovem a digestão da matéria orgânica por microrganismos em ambiente sem oxigênio. Eficientes na remoção de DBO e DQO, mas podem necessitar de pós-tratamento para desinfecção.
- *Jardins filtrantes (wetlands construídos)*: sistemas que simulam zonas úmidas naturais, utilizando plantas aquáticas (macrófitas) como elemento ativo na purificação. As plantas absorvem nutrientes e promovem a oxigenação, enquanto os microrganismos associados às raízes degradam os poluentes. São eficientes, esteticamente agradáveis e de baixo custo operacional, mas exigem área disponível.
- *Vermifiltros*: Filtros biológicos inovadores que utilizam a presença de minhocas detritívoras, como *Eisenia foetida*, para decompor sólidos orgânicos e promover a aeração natural do substrato (COSTA *et al.*, 2022). As minhocas fragmentam a matéria orgânica e criam galerias,

melhorando a percolação e a eficiência do tratamento. São sistemas de alta eficiência, baixo odor e com produção de húmus de minhoca como subproduto valioso.

- *Sistemas modulares físico-biológicos*: Soluções flexíveis e adaptáveis a diferentes realidades, podendo integrar diversas etapas como filtragem, decantação, aeração e desinfecção (por UV ou cloração, por exemplo). Permitem a personalização do tratamento conforme a necessidade de qualidade da água para o reúso.

O Quadro 3 apresenta as principais características de sistemas descentralizados de tratamento de águas cinzas utilizados como solução de baixo custo.

Quadro 3 – Principais características dos sistemas de tratamento de água cinza

Sistema de Tratamento	Remoção da DBO (%)	Custo (R\$) aproximado	Manutenção	Aplicação
Vermifiltro	80–90%	3.000–4.000	Semestral	Rural
Filtro de areia	60–70%	1.500–2.500	Baixa	Urbana
Wetland construído	75–90%	4.000–5.000	Média	Rural
Tanque séptico + filtro	50–75%	2.000–3.000	Média	Diversa

Fontes: Sella (2011), Costa *et al.* (2022) e Dombroski *et al.* (2022).

Além da eficiência técnica, esses sistemas contribuem para a descentralização do saneamento, favorecendo regiões sem acesso a redes públicas de esgoto. A adoção de tecnologias apropriadas também estimula a gestão participativa e comunitária dos recursos hídricos, associando educação ambiental à prática cotidiana.

Dentre essas soluções, destaca-se uma tecnologia social desenvolvida especialmente para o semiárido brasileiro, que vem se consolidando como referência em reúso agrícola e será detalhada a seguir, o Sistema Bioágua Familiar (SBF).

2.2 SISTEMA BIOÁGUA FAMILIAR (SBF)

O Sistema BioÁgua Familiar (SBF) é uma tecnologia social desenvolvida com o objetivo de promover o tratamento e o reúso de águas cinzas em comunidades rurais, com foco especial nas regiões semiáridas do Brasil. Criado no âmbito do Projeto Dom Hélder Câmara, em parceria com a Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA) e organizações da sociedade civil

como a ATOS, o SBF foi concebido para enfrentar simultaneamente os desafios do saneamento básico, da escassez hídrica e da insegurança alimentar nas populações do semiárido nordestino.

A proposta da tecnologia vai além do tratamento físico-químico da água, ao incorporar elementos de educação ambiental, agroecologia, nutrição e autonomia produtiva das famílias agricultoras. O sistema permite o reúso direto da água cinza, anteriormente lançada nos quintais, como fonte para irrigação de áreas produtivas familiares, promovendo a produção de hortaliças, frutas, plantas medicinais e forragem para pequenos animais. Isso contribui diretamente para a segurança alimentar, a geração de renda e o fortalecimento de práticas sustentáveis nos territórios onde é implementado.

No Quadro 4 são apresentados os principais objetivos e benefícios do Sistema Bioágua Familiar (SBF), considerando aspectos ambientais, sociais, econômicos e educacionais.

Quadro 4 – Objetivos e benefícios do Sistema Bioágua Familiar (SBF)

Dimensão	Benefício Gerado
Ambiental	Redução da poluição no solo; reúso da água cinza; ciclagem de nutrientes.
Social	Melhoria das condições sanitárias e da qualidade de vida das famílias rurais.
Econômica	Redução no consumo de água potável e fertilizantes; produção de alimentos para autoconsumo e venda.
Educacional	Promoção de educação ambiental e agroecológica nas comunidades.

Fonte. Santiago e Jalfim (2015); Santos *et al.* (2016); Barroso *et al.* (2023).

Segundo Santos *et al.* (2016), o Programa Bioágua aumenta o acesso à água nas residências, viabilizando uma produção constante de alimentos mesmo durante períodos de estiagem. Além disso, o sistema é compatível com os princípios da agroecologia, por valorizar recursos locais, promover o manejo sustentável do solo e estimular a biodiversidade agrícola. Na prática, a adoção do SBF tem permitido que comunidades tradicionalmente excluídas das políticas de saneamento e agricultura possam se tornar protagonistas do seu próprio desenvolvimento socioambiental.

Dessa forma, o SBF se consolidou como uma alternativa viável, replicável e de baixo custo, que integra saneamento ecológico e produção de alimentos de forma sinérgica. Sua simplicidade operacional e sua eficácia técnica permitem que seja operado pelas próprias famílias, promovendo um processo de empoderamento local e de convívio sustentável com o

semiárido, conforme reforçado no manual elaborado pela AVSI Brasil em parceria com a Enel Green Power. No Quadro 5 são apresentadas a cronologia e as etapas de expansão do SBF.

Quadro 5 – Cronologia e etapas da expansão do SBF

Fase	Período	Descrição
Pesquisa Básica	2009–2013	Desenvolvimento do modelo com 3 famílias.
Expansão Monitorada	2013–2015	Implantação de 200 unidades (20 monitoradas em água, solo e alimentos).
Expansão Ampliada	Pós-2015	Disseminação para outras comunidades no RN, CE e BA.

Fonte: Santiago e Jalfim (2015).

2.2.1 Componentes e funcionamento do Sistema Bioágua Familiar

O Sistema Bioágua Familiar (SBF) é uma tecnologia social estruturada para tratar e reutilizar a água cinza em propriedades rurais, principalmente nas regiões semiáridas do Brasil. Seu funcionamento baseia-se em princípios simples, eficazes e de baixo custo, que permitem à própria família beneficiada participar de sua implantação, manejo e manutenção, com apoio técnico de organizações ou instituições públicas. O sistema é projetado para operar por gravidade, sem necessidade de energia elétrica, o que o torna ainda mais acessível para comunidades em situação de vulnerabilidade socioeconômica (Santiago; Jalfim, 2015, AVSI, 2021).

A concepção do sistema considera o fluxo completo da água cinza desde sua geração nas residências, proveniente de chuveiros, pias e lavanderias, até sua reutilização final na irrigação de quintais produtivos. A primeira etapa do SBF é a coleta da água cinza, que deve ser separada da rede de esgoto (águas negras), que inclui vasos sanitários, e conduzida por um tubo de entrada até uma caixa de gordura (Figura 2). Nessa unidade inicial, são removidos os resíduos sólidos e materiais graxos, protegendo os componentes seguintes do sistema contra entupimentos e excesso de carga orgânica (AVSI, 2021). Após a caixa de gordura, a água segue para o filtro biológico, que representa o núcleo da tecnologia. Este filtro, com aproximadamente 1,5 m de largura e 1,0 m de altura, é construído com camadas sobrepostas de materiais filtrantes e substratos vivos que atuam na purificação da água por mecanismos físicos e biológicos.

Figura 2 – Águas cinzas na caixa de gordura sendo conduzidas ao SBF.



Fonte: Gouveia (2019).

Componentes do sistema Bioágua Familiar

A tecnologia de reuso de água servida a partir do Sistema Bioágua Familiar consiste no processo de filtragem por mecanismos de impedimento físico e biológico dos resíduos presentes na água cinza, sendo a matéria orgânica biodegradada por uma população de microrganismos e minhocas, da espécie *Eisenia foetida*, conhecidas como minhocas vermelhas da Califórnia ou, simplesmente, minhocas californianas, que realizam a digestão e a absorção da matéria orgânica retida na água e a retirada de seus principais poluentes (Poblete, 2010). A água de reuso é utilizada num sistema fechado de irrigação destinado à produção de hortaliças, frutas, plantas medicinais e outros tipos de alimentos.

A produção de água cinza nos domicílios varia de acordo com o tamanho da família, oferta de água e outros fatores. No entanto, pode-se considerar a água cinza dos domicílios proveniente do chuveiro, lavatório, pia de cozinha, tanque ou máquina de lavar, com exceção da água do vaso sanitário. Esta água tratada pode ser reutilizada na produção agrícola, o que está sendo realizado pelo Bioágua Familiar, formado pelos seguintes componentes:

- ***Filtro***: unidade de fluxo descendente com área superficial 1,77 m², dotado de duas camadas de material orgânico (húmus e serragem de madeira) e duas camadas de material inorgânico (cascalho e seixo rolado), distribuídas em uma profundidade de um metro. Para o desenho do sistema é importante observar que um filtro tem capacidade de tratamento de até 400 litros de água cinza por dia. Assim esta referência serve para desenhar sistemas com diferentes ofertas de água. Por exemplo, um domicílio que oferta um volume de 1.200 litros de água cinza por dia deve ter três filtros. O filtro deve ser coberto para evitar a incidência direta de sol e chuva.
- ***Tanque de Reuso***: sistema de armazenamento com capacidade de 1.770 litros;

- Sistema de Irrigação: é importante que o sistema de irrigação seja por gotejamento, no qual nem o operador, nem as plantas têm contato direto com a água. Para tanto, é recomendado o uso de motobomba e mangueiras de polietileno de gotejamento. O dimensionamento hidráulico deve ser feito por um profissional habilitado em projetar sistemas de irrigação por gotejamento.

Funcionamento do sistema BioÁgua Familiar

- Filtragem da água: A água servida é distribuída uniformemente sobre a superfície do Filtro com uma população de, aproximadamente, 1 Kg de minhocas da espécie *Eisenia foetida*. Em função de seus hábitos alimentares, as minhocas influenciam as transformações da matéria orgânica em decomposição (Papini; Andréa, 2004). As minhocas promovem o revolvimento e a aeração do material do seu *habitat*, bem como a digestão da matéria orgânica, transformando-a em húmus. A biodegradação da matéria orgânica é exercida pelos microrganismos existentes no intestino das minhocas, que transformam os nutrientes em formas mais facilmente assimiláveis pelas plantas (Reichert; Bidone, 2000). O tempo de filtragem é rápido, não permitindo a ocorrência de mau cheiro decorrente de condições prolongadas de saturação e anaerobiose. Para início do funcionamento é necessário apenas preencher o sistema com as camadas filtrantes. As rasas de madeira devem ser trocadas a cada doze meses e o húmus a cada seis meses.

- Reservatório de reuso: tem a função de receber e armazenar a água de reuso, sendo acoplado ao sistema de irrigação. O reservatório deve ser fechado para evitar que a incidência direta da luz solar e não permitir a proliferação de algas, que alteram a qualidade da água e comprometem o sistema de bombeamento, além de evitar a proliferação de larvas do *Aedes aegypti*, entre outros.

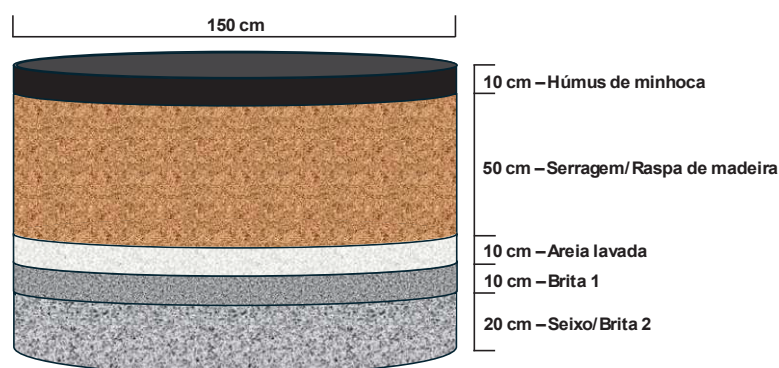
- Sistema de irrigação: é acionado diariamente por motobomba e o tempo de irrigação obedecerá às necessidades hídricas das culturas implantadas, de acordo com as condições climáticas da região. Neste sentido, na época chuvosa deve-se utilizar a água de reuso para descarga nas árvores que compõem a cerca-viva, para evitar o transbordamento do reservatório de reuso, bem como o excesso de água nos canteiros; ao mesmo tempo em que se intensifica a produção de forragem para alimentação animal e biomassa para a adubação verde da área cultivada.

- Área de cultivo: O sistema Bioágua Familiar é bastante eficiente para o cultivo de hortaliças folhosas, tubérculos e frutíferas diversas. Estes cultivos são próprios dos quintais produtivos

das famílias agricultoras. A área de cultivo deverá ser dimensionada de acordo com a disponibilidade de água e o plano de produção de alimento da família. É recomendável cercar a área com tela para evitar a entrada de animais domésticos, principalmente das aves do quintal. O manejo do solo e das culturas deve seguir os princípios da Agroecologia. Assim, toda a produção é realizada sem o uso de agrotóxicos, que apresentam possibilidades de gerar prejuízos à saúde humana e no ambiente, principalmente em sistemas irrigados, podendo causar poluição dos corpos d'água (Gliessman, 2000). A água de reuso já oferta boa quantidade de nutrientes, que são complementados por práticas simples como a adubação verde e húmus de minhoca, entre outros. O aparecimento de pragas e doenças é raro, mas quando ocorre pode ser facilmente controlado com o manejo da área, com a rotação de cultura, uso de plantas repelentes, protetores naturais etc. A grande diversidade de espécies desenvolvendo-se simultaneamente em policultivos, ajuda na prevenção de pragas evitando sua proliferação (Altieri, 2004). Recomenda-se o uso de cerca-viva composta por gliricídea (*Gliricidia sepium*) para diminuir o efeito do vento na evapotranspiração. Para complementar a eficiência da cerca viva, a cobertura morta é uma importante aliada. Quanto maior a diversificação do sistema de cultivo, maior será a eficiência do uso da terra, sua resistência ao aparecimento de pragas e doenças e sua capacidade de atender à demanda familiar por alimentos em quantidade e qualidade.

A configuração do SBF é apresentada na Figura 3 e consiste de uma manilha de concreto de 150 cm de diâmetro x 100 cm de altura, preenchida com as seguintes camadas filtrantes, da base para o topo: 20 cm de brita 2 (seixos de até 32 mm); 10 cm de brita 1 (até 19 mm); 10 cm de areia média lavada; 50 cm de serragem/raspa de madeira; 10 cm de húmus de minhoca contendo 1 kg de minhocas da espécie *Eisenia foetida* (Gouveia, 2018).

Figura 3 – Esquema simplificado da distribuição das camadas dos componentes do Sistema Bioágua Familiar

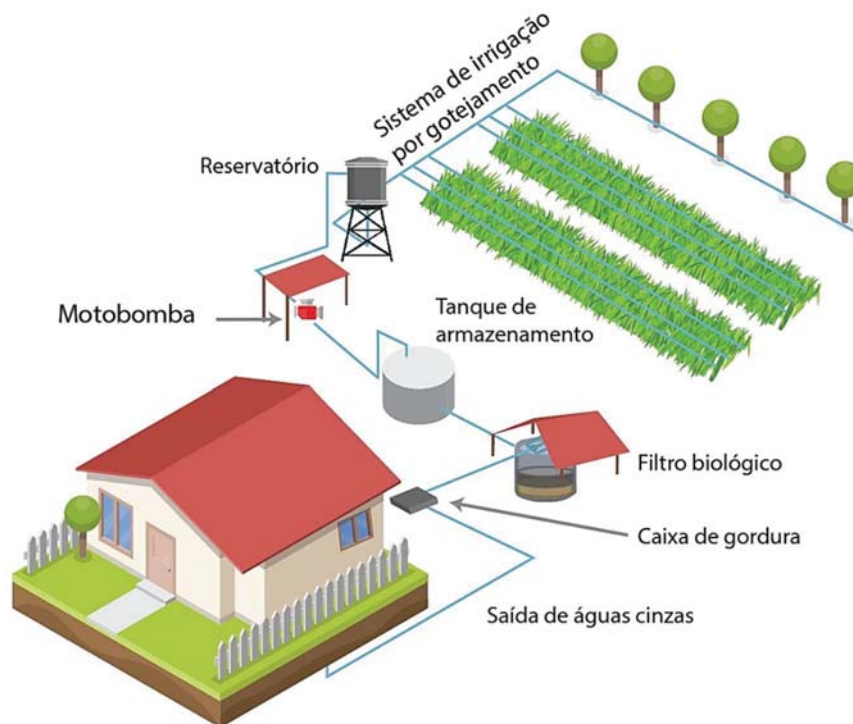


Fonte: Adaptada de Gouveia (2018).

Nesta configuração, as minhocas desempenham um papel essencial na decomposição da matéria orgânica e na aeração do substrato, garantindo a estabilidade biológica do sistema e o filtro é coberto para manter a umidade e evitar a exposição direta à luz solar. Depois de passar pelo filtro, a água tratada é conduzida para um reservatório de reuso, com as mesmas dimensões do filtro, onde é armazenada até ser utilizada na irrigação.

Como pode ser observado na Figura 4, a irrigação dos quintais é feita por meio de um sistema de gotejamento, que aplica a água diretamente na base das plantas, para evitar o contato com as partes comestíveis e reduzir os riscos sanitários. Esse tipo de irrigação é considerado uma barreira adicional de segurança, sendo recomendado para o uso agrícola de efluentes tratados, conforme diretrizes da Organização Mundial da Saúde e da Resolução Coema nº 02/2017 (Barroso *et al.*, 2023)

Figura 4 – Esquema simplificado do funcionamento do Sistema BioÁgua Familiar



Fonte: Adaptado de Barroso *et al.* (2023).

A instalação do SBF nas propriedades leva em consideração a quantidade de água cinza gerada pelas famílias. Estudos apontam que a produção diária em domicílios rurais do semiárido pode variar entre 200 e 500 litros, o que é suficiente para irrigar uma área produtiva de aproximadamente 300 m². Nessas áreas, os agricultores cultivam hortaliças, frutíferas, plantas medicinais, forragem para pequenos animais e espécies agroecológicas diversas (Santiago;

Jalfim, 2015). Em algumas versões mais completas do sistema, são integrados também viveiros de mudas, minhocários e espaços de compostagem, fortalecendo a lógica da produção sustentável e da fertilização orgânica do solo.

A implantação do sistema tem caráter educativo e participativo, baseado na metodologia “aprender fazendo”, na qual os moradores constroem e operam o sistema com orientação técnica (Gouveia, 2019). Esse modelo fortalece a apropriação da tecnologia pelas comunidades, amplia o conhecimento sobre reúso de água e estimula o manejo sustentável dos recursos naturais disponíveis localmente (Santos *et al.*, 2016).

Dessa forma, o SBF não apenas representa uma solução viável para o saneamento ecológico, mas também se consolida como uma ferramenta de apoio à segurança alimentar, à geração de renda e à preservação ambiental no meio rural. Ao transformar um resíduo em insumo produtivo, o sistema materializa o conceito de economia circular e de convivência inteligente com o semiárido.

2.2.2 Eficiência e qualidade da água tratada pelo Sistema BioÁgua Familiar

Diversos estudos têm demonstrado que o SBF apresenta desempenho satisfatório na remoção de contaminantes físicos, químicos e microbiológicos das águas cinzas, tornando o efluente apto para o reúso agrícola. Neste aspecto, Barroso *et al.* (2023), em pesquisa realizada nos municípios cearenses de Potiretama e Tabuleiro do Norte, avaliaram 14 unidades do SBF entre os anos de 2018 e 2020, e constataram redução significativa de coliformes termotolerantes e ovos de helmintos, atendendo aos limites estabelecidos pela Resolução Coema nº 02/2017. Os autores também observaram que o sistema foi eficiente na estabilização do pH e na redução da condutividade elétrica, o que garante maior segurança para o uso da água tratada na irrigação localizada e realizada por gotejamento, sem prejuízos à saúde das plantas ou dos consumidores.

Em estudo semelhante, Queiroz (2022) desenvolveu um sistema simplificado de tratamento de águas cinzas em zona rural, utilizando materiais como cerâmica, areia, carvão, raspas de madeira e britas. Os resultados obtidos indicaram que os valores de pH, turbidez, sólidos suspensos e oxigênio dissolvido estavam dentro dos limites considerados seguros para o reúso na agricultura e silvicultura, o que reforça a viabilidade do uso de substratos naturais ou reaproveitados em filtros físicos-biológicos.

Comparações com outros sistemas também apontam para a eficiência dos modelos descentralizados de baixo custo. Sousa *et al.* (2023) testaram um sistema composto por caixa

de gordura, fossa séptica, tanques anaeróbios e aeróbios, seguidos de pântano filtrante, e relataram remoções superiores a 90% para os principais indicadores de poluição fecal e carga orgânica. Feitosa (2016), ao avaliar um sistema composto por filtros orgânicos e radiação ultravioleta, obteve excelentes resultados de desinfecção, porém observou a formação de biofilme em gotejadores, alertando para a importância da manutenção preventiva nos sistemas de irrigação com águas de reúso.

No caso do SBF, além da eficiência sanitária, o tratamento não compromete a produtividade agrícola. Dados da Embrapa Semiárido (2023) mostram que cultivos irrigados com água tratada pelo sistema, especialmente palma forrageira, apresentaram incremento significativo na produção em comparação com cultivos irrigados com água convencional, devido à presença de nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio no efluente. Esses elementos são essenciais para o desenvolvimento das plantas e acabam funcionando como uma forma de fertirrigação orgânica integrada ao processo de reúso.

Tais evidências reforçam que o SBF não apenas atende aos requisitos legais de qualidade da água para reúso agrícola, mas também gera benefícios agrônômicos e ambientais relevantes. Sua capacidade de transformar um efluente potencialmente poluente em um insumo produtivo insere essa tecnologia no contexto da economia circular, da agricultura sustentável e do saneamento ecológico em áreas rurais.

2.2.3 Manutenção e replicabilidade do Sistema BioÁgua Familiar

Um dos aspectos mais relevantes do SBF é a capacidade de se manter funcional com intervenções técnicas mínimas, tornando-o altamente adequado para uso contínuo em comunidades rurais e regiões com acesso limitado a infraestrutura de saneamento. A manutenção do sistema é considerada simples e pode ser realizada pelas próprias famílias beneficiadas, desde que recebam capacitação adequada no momento da instalação. Essa característica operacional reforça o papel do SBF como tecnologia social, pautada na autogestão e na autonomia das comunidades.

A rotina de manutenção inclui a limpeza periódica da caixa de gordura, a inspeção visual do filtro biológico e do sistema de irrigação por gotejamento, além da eventual substituição de parte do substrato filtrante e do húmus após longos períodos de uso. As minhocas da espécie *Eisenia foetida*, conhecidas como vermelhas da Califórnia, ou simplesmente californianas, são essenciais ao funcionamento biológico do filtro, e se adaptam bem ao sistema, desde que

mantidas em condições adequadas de umidade, temperatura e disponibilidade de matéria orgânica (AVSI, 2021; Barroso *et al.*, 2023). Esses cuidados são simples, mas indispensáveis para garantir a continuidade da eficiência do tratamento.

A replicabilidade do SBF está diretamente relacionada à sua adaptabilidade às condições locais, ao uso de materiais disponíveis na própria região e à participação ativa da comunidade no processo de implantação. Santiago e Jalfim (2015) destacam que a metodologia de "aprender fazendo" utilizada na construção dos sistemas, junto à formação de multiplicadores locais, é um fator-chave para o sucesso da expansão da tecnologia em diferentes territórios. Essa abordagem fortalece os vínculos entre os saberes técnicos e populares, promovendo o empoderamento das famílias e a valorização do conhecimento tradicional.

De acordo com os dados do Projeto Bioágua Brasil, coordenado por universidades e organizações da sociedade civil, o sistema já foi implantado em centenas de propriedades no semiárido nordestino, alcançando diferentes estados e realidades socioprodutivas (Santiago; Jalfim, 2015). A experiência demonstrou que, uma vez capacitada, a própria comunidade é capaz de construir novos sistemas, realizar manutenções e disseminar o conhecimento adquirido, criando redes de cooperação e autonomia tecnológica.

Barroso *et al.* (2023) reforçam que o baixo custo de implantação (cerca de R\$ 3.500 a R\$ 4.000 por unidade) e a possibilidade de construir o sistema com mão de obra local e materiais simples são fatores que ampliam sua viabilidade econômica. Quando comparado a soluções convencionais de esgotamento sanitário, o SBF apresenta vantagens em termos de retorno ambiental, social e produtivo, sendo considerado uma tecnologia replicável tanto em áreas rurais isoladas quanto em contextos periurbanos.

Além disso, o sistema pode ser ajustado de acordo com a demanda hídrica das famílias e as características do terreno, o que o torna versátil para diferentes escalas e culturas agrícolas. Embrapa Semiárido (2023) ressalta que sua integração a práticas agroecológicas, como compostagem, viveiros de mudas e rotação de culturas, potencializa os benefícios ambientais e econômicos, contribuindo para o fortalecimento da agricultura familiar e a resiliência hídrica em regiões semiáridas.

Assim, a simplicidade da operação, a baixa demanda por manutenção especializada e a alta capacidade de adaptação conferem ao SBF não apenas eficiência técnica, mas também viabilidade social e ambiental. Sua replicabilidade depende, sobretudo, do fortalecimento de políticas públicas que reconheçam o valor das tecnologias sociais no enfrentamento da

desigualdade no acesso ao saneamento e no estímulo à produção sustentável de alimentos no meio rural. O Quadro 6 apresenta as principais vantagens e os requisitos para a replicação do Sistema BioÁgua Familiar, considerando aspectos econômicos, necessidades para a manutenção, a possibilidade de uso de materiais locais, autonomia da comunidade, adaptação a diferentes contextos, e a integração com práticas agroecológicas.

Quadro 6 - Vantagens e Requisitos para Replicação do SBF

Aspecto	Descrição
Baixo custo de implantação	Custo estimado entre R\$ 3.500 e R\$ 4.000 por unidade, sem necessidade de infraestrutura complexa.
Facilidade de manutenção	Requer apenas limpeza periódica da caixa de gordura e cuidados básicos com o filtro e irrigação.
Uso de materiais locais	Filtro pode ser montado com seixos, areia, madeira e húmus disponíveis na região.
Autonomia da comunidade	Comunidade participa da construção e é capacitada para operar e replicar o sistema.
Adaptação a diferentes realidades	Sistema pode ser ajustado ao volume de água disponível e ao espaço produtivo das propriedades.
Integração a práticas agroecológicas	Permite uso de compostagem, rotação de culturas e viveiros, fortalecendo a sustentabilidade agrícola.

Fonte: Adaptado de Santiago e Jalfim (2015), AVSI (2021), Barroso *et al.* (2023); Embrapa (2023).

2.3 A CERÂMICA VERMELHA

A cerâmica vermelha é um dos materiais mais utilizados na construção civil, principalmente na forma de tijolos, blocos e telhas. Sua ampla aplicação está associada à disponibilidade de matéria-prima (argila), ao baixo custo de produção e às características físico-mecânicas adequadas para elementos estruturais e de vedação. Trata-se de um material fabricado a partir da queima de argilas plásticas em temperaturas entre 800°C e 1000°C, resultando em um produto poroso, rígido e com boa resistência mecânica (Silva; Marques, 2021).

Do ponto de vista químico, a cerâmica vermelha é composta predominantemente por sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃) e óxidos de ferro (Fe₂O₃), que conferem a coloração avermelhada característica. Também estão presentes em menores proporções os óxidos de cálcio, magnésio, potássio e sódio. A presença desses óxidos influencia diretamente na plasticidade da argila, a fusibilidade e o comportamento térmico durante a queima (Oliveira *et al.*, 2020).

Entre as propriedades físicas mais relevantes para seu uso como material filtrante, destacam-se a porosidade, a granulometria após trituração e a durabilidade em ambientes úmidos. A porosidade média dos fragmentos cerâmicos varia de 20% a 35%, dependendo do

processo de fabricação original e da forma de trituração. Essa característica permite boa retenção de sólidos em suspensão e facilita a circulação da água, sendo comparável a materiais como brita e carvão ativado em sistemas de filtração física (Silva; Marques, 2021).

Tabela 1 - Propriedades físicas e custo de materiais filtrantes

Propriedade	Cerâmica Vermelha Reciclada	Brita	Areia
Porosidade (%)	20 - 35	< 5	<10
Densidade (g/cm ³)	1,6 – 2,2	2,5 – 2,7	2,4 – 2,6
Custo Estimado (R\$/m ³)	50 - 80	90 - 120	70 - 100

Fonte: Adaptada de Silva; Marques (2021); Oliveira *et al.* (2020) e Santos *et al.* (2019).

A granulometria dos resíduos cerâmicos pode ser ajustada de acordo com a finalidade do filtro, variando desde partículas grossas (semelhantes à brita nº 1) até partículas finas utilizadas como camada de polimento. Além disso, o material apresenta boa estabilidade dimensional e resistência à degradação química, o que o torna adequado para uso prolongado em sistemas de tratamento de águas cinzas e esgoto doméstico (Santos *et al.*, 2019).

Estudos recentes têm indicado que o desempenho da cerâmica vermelha como meio filtrante é satisfatório em termos de remoção de turbidez, sólidos suspensos e carga orgânica, com vantagens associadas à sua abundância como resíduo e ao baixo custo de obtenção. Essas propriedades reforçam o interesse em sua aplicação em sistemas alternativos e descentralizados de saneamento, como o SBF, onde sua inserção pode agregar eficiência técnica e sustentabilidade ambiental ao projeto.

2.3.1. Resíduos de cerâmica vermelha na construção civil

A cerâmica vermelha, amplamente utilizada na forma de blocos, tijolos e telhas, representa uma significativa parcela dos resíduos de construção e demolição (RCD) gerados no Brasil. Estima-se que esse tipo de resíduo corresponde, em média, a cerca de 30% do total dos RCD produzidos nas cidades brasileiras (Cabral *et al.*, 2009). Essa elevada proporção se deve, sobretudo, à fragilidade do material durante o manuseio, transporte e assentamento, além das perdas naturais nos processos de demolição e reformas. Ainda segundo os autores, os resíduos de cerâmica vermelha, juntamente com restos de concreto e argamassa, podem chegar a compor mais de 60% de todo o volume de RCD gerado no país.

Tabela 2 - Composição estimada dos RCD por tipo de material.

Tipo de Resíduo	Percentual estimado (%)
Cerâmica vermelha (tijolos, blocos, telhas)	30
Concreto	25
Argamassa	20
Madeira	5
Metais	2
Plásticos	1
Outros (gesso, vidro, solo, etc.)	17

Fonte: Adaptada de Cabral *et al.* (2009).

Esse cenário se agrava diante do fato de que grande parte dos resíduos cerâmicos ainda é descartada de forma inadequada, contribuindo para o assoreamento de cursos d'água, degradação de áreas urbanas e sobrecarga de aterros sanitários. No entanto, sua composição predominantemente mineral e sua forma fragmentada tornam a cerâmica vermelha um resíduo com alto potencial de reaproveitamento, seja como agregado reciclado em obras de infraestrutura, seja como componente funcional em sistemas de tratamento de água.

Delduque (2014) destaca que o reaproveitamento de blocos cerâmicos quebrados, além de ser uma estratégia de mitigação de impactos ambientais associados à mineração de areia e brita, também contribui para a redução do volume de resíduos sólidos descartados e para a economia circular. A autora defende que os fragmentos de cerâmica vermelha, quando devidamente processados (britagem, peneiramento e secagem), adquirem características físicas semelhantes às dos materiais filtrantes convencionais, o que os torna viáveis para aplicação em sistemas de filtração em pequena escala.

Além disso, há vantagens logísticas e econômicas relevantes: os resíduos cerâmicos geralmente estão disponíveis nos próprios canteiros de obra ou em áreas urbanas próximas, o que reduz custos com transporte e aquisição de insumos. Em seu estudo experimental, Delduque (2014) mostrou que o uso da cerâmica britada como leito filtrante, combinado com carvão antracito, apresentou eficiência superior à areia na remoção de turbidez, alcançando até 99,27% de eficiência global nos melhores ensaios.

Dessa forma, os resíduos de cerâmica vermelha se consolidam como uma alternativa promissora para o desenvolvimento de tecnologias de tratamento de água de baixo custo e baixo impacto ambiental, sobretudo em regiões onde os materiais tradicionais são escassos ou economicamente inviáveis. Seu reaproveitamento representa não apenas uma solução técnica,

mas também uma ação estratégica dentro dos princípios da sustentabilidade e do manejo adequado dos resíduos da construção civil.

2.3.2 Benefícios Ambientais do Reaproveitamento da Cerâmica Vermelha

A reutilização da cerâmica vermelha como material filtrante representa uma alternativa concreta para enfrentar dois grandes desafios contemporâneos: o volume crescente de resíduos da construção civil e a busca por soluções descentralizadas e sustentáveis no tratamento de águas residuais. Em um cenário no qual a indústria da construção é responsável por uma significativa geração de resíduos sólidos urbanos, a cerâmica vermelha surge como um dos componentes mais abundantes e, paradoxalmente, ainda pouco valorizados do ponto de vista da economia circular (Cabral *et al.*, 2009).

Ao ser reaproveitada em sistemas de saneamento, como filtros físicos-biológicos para tratamento de águas cinzas, a cerâmica reciclada não apenas substitui materiais convencionais como brita e areia, cuja extração impacta diretamente o meio ambiente, como também contribui para a redução da pressão sobre os aterros sanitários, a mitigação da extração mineral e a valorização de resíduos considerados inertes (Delduque, 2014). Trata-se, portanto, de uma aplicação que integra objetivos ambientais, econômicos e sociais, com grande potencial de replicabilidade em áreas urbanas e rurais.

Além do aspecto ambiental, o uso da cerâmica reciclada em tecnologias sociais de saneamento descentralizado fortalece a autonomia das comunidades locais e promove o uso de recursos disponíveis em sua própria realidade territorial. Sua incorporação em projetos como o Sistema Bioágua Familiar amplia a viabilidade técnica dessas soluções e reforça sua aderência aos princípios da agroecologia, da autogestão e da inovação popular (Embrapa, 2023).

Dessa forma, o aproveitamento da cerâmica vermelha como meio filtrante vai além de uma alternativa técnica: é uma escolha estratégica. Representa a convergência entre sustentabilidade, acessibilidade e eficiência. Ao integrar essa proposta em sistemas de tratamento e reúso de água, é possível transformar um resíduo amplamente descartado em insumo essencial para a regeneração ambiental, a segurança hídrica e a produção de alimentos, abrindo caminho para soluções mais justas, resilientes e adaptadas às realidades locais (Santos; Costa; Leite, 2019).

2.4 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA RELACIONADA AO REUSO DE ÁGUAS CINZAS

O Brasil ainda não tem uma lei única que trate especificamente do reuso de águas cinzas. O que existe atualmente é um conjunto de normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) e legislações que, quando combinadas, dão a base para que esses sistemas sejam projetados e operados de forma segura.

Quanto às normas da ABNT, a NBR 16783 (ABNT, 2019) estabelece critérios e procedimentos para usos de fontes alternativas de água não potável em edificações. Também determina limites para os parâmetros físicos, químicos e biológicos de qualidade da água para reuso em fins não potáveis, como irrigação de jardins, lavagem de pisos ou descarga de vasos sanitários, que incluem: pH entre 6 e 9; turbidez máxima de 5 NTU; DBO até 20 mg/L e presença de *E. coli* abaixo de 200 NMP/100 mL.

Esta norma também destaca que cada sistema precisa ter projeto, operação e monitoramento bem definidos. Outra norma relacionada é a NBR 15527 (ABNT, 2019), que embora determine requisitos para o aproveitamento de água de chuva de coberturas para fins não potáveis, faz recomendações úteis para usos semelhantes aos das águas cinzas.

No campo das legislações ambientais, a Resolução Conama nº 430/2011 trata dos padrões de lançamento de efluentes, considerando as diferentes classes dos rios. A Resolução Conama nº 503/2021 define critérios e procedimentos para o reuso agrícola e florestal em sistemas de fertirrigação, de efluentes provenientes de indústrias de alimentos, bebidas, laticínios, frigoríficos e graxarias, estabelecendo padrões para parâmetros como pH (5,0 – 9,0), óleos minerais até 20 mg/L; óleos vegetais e gorduras animais até 50 mg/L, parâmetros e valores máximos estabelecidos na Resolução Conama nº 430/2011, art. 16, II, exceto aqueles de interesse agrônômico (boro total, cobre dissolvido, ferro dissolvido, manganês dissolvido, nitrogênio amoniacal total e zinco total). Para fins de balanço de massa, Razão de Adsorção de Sódio - RAS e Porcentagem de Sódio Trocável - PST, a caracterização do efluente deve abranger também os seguintes parâmetros: Na, P, K, Ca, Mg e Al, além de coliformes (1000 NMP/100mL em culturas consumidas cruas e cuja parte comestível tenha contato com o solo e 10000 NMP/100mL para pastagens e outras culturas).

Mesmo não sendo desenvolvidas especificamente para águas cinzas, essas resoluções fornecem informações sobre os cuidados a serem adotados. Além disso, a Lei nº 14.546/2023,

que atualizou o marco do saneamento, passou a reconhecer oficialmente o reuso de águas como prática a ser incentivada.

Como não existe uma normatização federal específica para águas cinzas, muitos estados e municípios criaram suas próprias normas. Em São Paulo, por exemplo, a Cetesb e a Resolução Conjunta da Secretaria de Estado da Saúde e Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente (SES/SIMA) estabeleceram regras para o reuso urbano, incluindo exigências de monitoramento.

No Estado do Ceará, a Resolução COEMA nº 02/2017, estabelece em seu capítulo 3, condições e padrões para reuso direto de água não potável para fins de irrigação paisagística, lavagem de logradouros públicos e veículos, desobstrução de tubulações, construção civil, edificações e combate de incêndio dentro da área urbana; e para produção agrícola e cultivo de florestas plantadas em áreas rurais. Para o parâmetro coliformes termotolerantes o limite é de até 1000 UFC/100 mL, para águas não potáveis usadas para fins de irrigação paisagística e de culturas que não são consumidas cruas ou que as partes comestíveis não tenham contato com a água; enquanto para culturas a serem consumidas cruas e cuja parte consumida tenha contato direto com a água de irrigação, não deve ser detectado.

Outros estados, como Rio de Janeiro, Paraná e Rio Grande do Sul, também publicaram normas próprias, em maioria, voltadas para agricultura ou uso industrial. Em nível municipal, Niterói (RJ) e Distrito Federal são alguns exemplos de municípios que criaram regulamentações específicas para reuso de águas cinzas em edificações.

Além das normas oficiais, também existem guias e manuais que auxiliam na prática de reuso de águas cinzas. Neste sentido, a Federação das Indústrias do Estado de São Paulo - FIESP, em parceria com o Sindicato da Indústria da Construção Civil - SINDUSCON e com a Agência Nacional de Águas e Saneamento - ANA, editou o manual de conservação e reuso da água em edificações (SAUTCHUK *et al.*, 2005). Este manual estabeleceu padrões de qualidade para as diferentes classes de água de reuso para fins não-potáveis, em função das atividades realizadas nas edificações, sendo a Classe 3 destinada à irrigação de áreas verdes e rega de jardins.

A Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC), o Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB) e até documentos internacionais, como os da United States Environmental Protection Agency (USEPA), também oferecem orientações sobre tecnologias, parâmetros de qualidade e medidas de segurança.

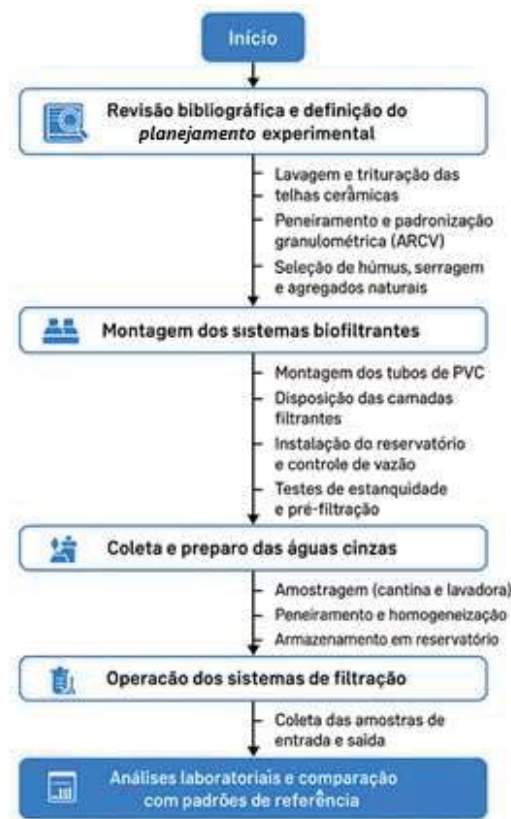
Isso mostra que quando se pretende implantar um sistema de reuso de águas cinzas é preciso estar atento para esse conjunto de referências, que compreende as normas da ABNT, as resoluções do Conama, a legislação estadual/municipal e os manuais e guias técnicos. Só assim é possível garantir que a água cinza tratada seja usada de forma segura, tanto para as pessoas quanto para o meio ambiente.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo descreve, de forma detalhada, os materiais empregados e os procedimentos experimentais adotados para o desenvolvimento do estudo, com o objetivo de assegurar a reprodutibilidade e a confiabilidade dos resultados obtidos.

O trabalho foi executado em diferentes etapas, apresentadas de forma resumida no fluxograma da Figura 5 e descritas a seguir. O estudo baseou-se no modelo do Sistema BioÁgua Familiar (SBF), desenvolvido pela Embrapa, para permitir o tratamento e reuso de águas cinzas domésticas na irrigação agrícola, em regiões do Semiárido brasileiro, com adaptações na configuração do sistema, pela utilização de tubo de PVC e pela incorporação de agregados reciclados de cerâmica vermelha (ARCV) em substituição aos agregados naturais (AN) utilizados originalmente. O objetivo foi analisar os efeitos desta substituição na eficácia do tratamento de águas cinzas domésticas e seus benefícios na sustentabilidade do sistema.

Figura 5 – Fluxograma das etapas desenvolvidas neste trabalho de graduação



Fonte: Autor.

3.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Inicialmente, foi realizada uma revisão da literatura sobre o reuso de águas cinzas, com ênfase na legislação aplicável, visto que o Brasil ainda não possui norma federal específica sobre o tema. Por isso, foram consultadas normas da ABNT, resoluções do CONAMA, legislações estaduais, guias técnicos e manuais, bem como bases científicas como Web of Science, Scopus e Google Acadêmico, utilizando as palavras-chave “reuso de águas cinzas”, “tratamento de águas cinzas”, “materiais filtrantes de águas cinzas”, “filtros biológicos de águas cinzas” e “agregados reciclados em filtros”.

3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Com base na revisão bibliográfica, definiu-se o delineamento experimental tomando como referência, o Sistema BioÁgua Familiar (SBF), desenvolvido pela Embrapa, que utiliza os agregados naturais (AN), brita nº 2, brita nº 1 e areia média lavada. No sistema alternativo proposto neste estudo, esses materiais foram substituídos por agregados reciclados de cerâmica vermelha (ARCV), a fim de tornar o processo mais sustentável e promover o reaproveitamento de resíduos da construção e demolição (RCD).

3.3 MATERIAIS

3.3.1 Agregados reciclados de cerâmica vermelha (ARCV)

Os ARCV foram obtidos a partir da trituração de quatro telhas de cerâmica vermelha remanescentes de reforma residencial (Figura 6). Após a lavagem em água corrente, as telhas foram trituradas com marreta e peneiradas para padronização granulométrica, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2021), nas frações correspondentes a:

- brita nº 2 (20 - 32 mm);
- brita nº 1 (9,5 - 19 mm);
- areia média (0,6–2 mm).

Figura 6 – Preparação dos agregados reciclados de cerâmica vermelha



Fonte: Autor.

3.3.2 Outros materiais filtrantes

Também foram utilizados húmus de minhoca, proveniente do minhocário do Laboratório de Análises Químicas e Biológicas da FEG/UNESP, e serragem de Pinus, adquirida comercialmente, 100% natural e sem aditivos químicos (Figura 7). Os agregados naturais utilizados no sistema referência (SBF), brita nº 1 e brita nº 2, foram fornecidos pela empresa Serveng Mineradora, localizada em Aparecida (SP) e a areia média lavada foi adquirida em uma loja de materiais de construção de Guaratinguetá (SP).

Figura 7 – Materiais filtrantes utilizados no Sistema BioÁgua Familiar



Fonte: Autor.

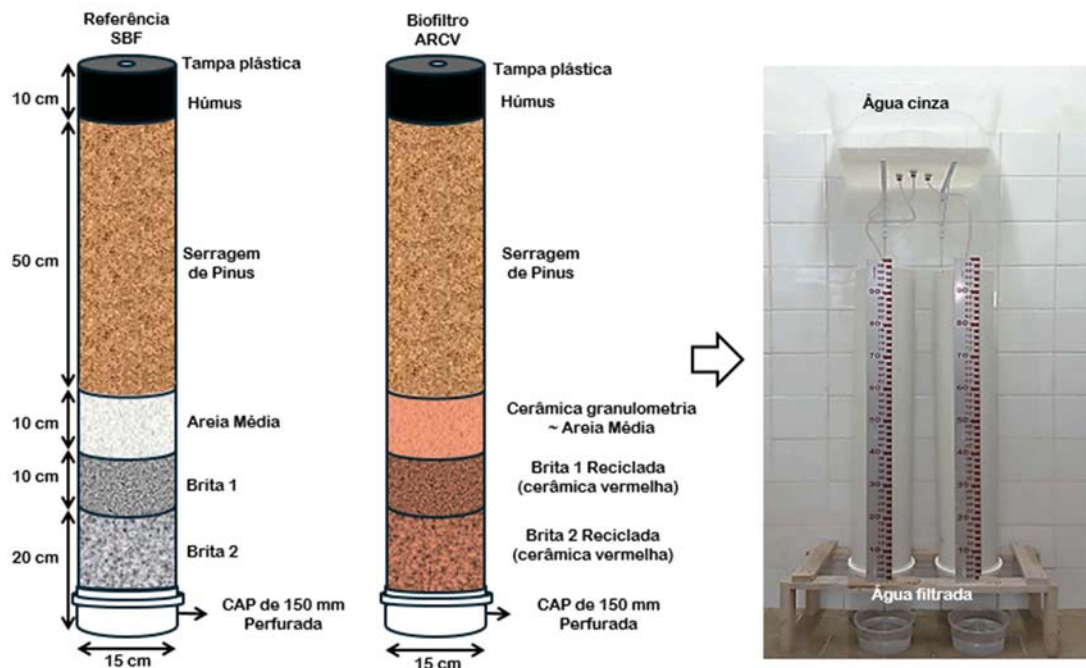
3.4 MONTAGEM DOS SISTEMAS BIOFILTRANTES

3.4.1 Configuração dos filtros

A Figura 8 apresenta um esquema dos sistemas filtrantes construídos, adaptando a metodologia de Gouveia (2018) pela substituição das manilhas de concreto por tubos de PVC de 150 mm de diâmetro e 1 m de altura. Cada tubo foi fechado na base com uma CAP perfurada, permitindo o escoamento do efluente tratado, e recebeu na parte superior uma tampa plástica

com orifício central, destinada à conexão da mangueira de alimentação de água cinza. A configuração do Sistema BioÁgua Familiar (referência) compreendeu, da base para o topo: 20 cm de brita nº 2; 10 cm de brita nº 1; 10 cm de areia média lavada; 50 cm de serragem de *Pinus*; 10 cm de húmus de minhoca. No sistema alternativo, as camadas de agregados naturais foram substituídas por ARCV em granulometrias equivalentes.

Figura 8 – Sistema BioÁgua Familiar e sistema alternativo com ARCV



Fonte: Autor.

3.4.2 Suporte e alimentação dos Sistemas

Os tubos foram apoiados sobre uma estrutura de madeira, garantindo a estabilidade dos sistemas e a altura adequada para a coleta da água filtrada.

A água cinza foi armazenada em uma caixa de PVC de 20 L, fixada à parede por duas mãos francesas, funcionando como reservatório de alimentação, por meio de três engates rápidos acoplados em sua base, vedados com silicone e conectados a mangueiras de condução da água aos sistemas filtrantes.

Em cada mangueira de alimentação, foi instalado um conta-gotas para controle da vazão, conforme princípios estabelecidos nas normas ABNT NBR 12216, NBR 13969 e NBR 15527, que tratam de taxas de filtração e eficiência operacional em sistemas de tratamento de águas e

efluentes e recomendam fluxo lento e uniforme para aumentar a eficiência e a estabilidade do processo de filtração.

Depois de preencher os sistemas com os materiais filtrantes, foi adicionado um litro de água de torneira e um litro de água de osmose reversa em cada unidade, com o objetivo de verificar se havia vazamentos nas conexões das CAPs, nos engates rápidos e nas mangueiras de alimentação. Em seguida, aplicou-se mais um litro de água purificada por osmose reversa para realizar uma limpeza inicial, removendo possíveis impurezas e partículas em suspensão que pudessem interferir na qualidade da filtração.

3.5 PRÉ-TESTES E PREPARAÇÃO DOS SISTEMAS FILTRANTES

Antes de iniciar o processo de filtração, foram realizados pré-testes para avaliar o desempenho e estanqueidade dos materiais filtrantes individualmente, em recipientes de alumínio com base perfurada. Estes pré-testes permitiram verificar possíveis alterações de volume, colmatção, desenvolvimento de fluxo preferencial e estabilidade granulométrica. Para a realização desta análise, foram utilizados três litros de água de torneira, aplicados em três etapas consecutivas. Em cada etapa, foi adicionado um litro de água e registrado o volume retido pelo sistema filtrante, até que se observasse a estabilização do processo, caracterizada pela saída de água filtrada com coloração semelhante à da água de alimentação (Figura 9).

Figura 9 – Pré-testes realizados com os agregados cerâmicos



Fonte: Autor.

Posteriormente, os sistemas completos foram lavados, adicionando um litro de água de torneira por unidade, para detecção de possíveis vazamentos nas conexões das CAPs acopladas às bases dos tubos e nos engates rápidos e mangueiras de alimentação e, em seguida, foi aplicado um litro de água purificada por osmose reversa, a fim de remover impurezas e partículas em suspensão, que poderiam interferir na qualidade da filtração.

3.6 AMOSTRAGEM E PREPARAÇÃO DAS ÁGUAS CINZAS

As águas cinzas utilizadas foram compostas por 50% de amostra coletada na caixa de gordura das pias da cantina da Faculdade de Engenharia e Ciências, câmpus de Guaratinguetá (FEG/UNESP) e 50% proveniente do primeiro ciclo de lavagem de uma lavadora de roupas doméstica, no qual foi empregado sabão líquido da marca “OMO Lavagem Perfeita”. Este sabão líquido é composto por tensoativos aniônicos, como o linear alquil benzeno sulfonato de sódio e alquil éter sulfato de sódio, além de enzimas, branqueador óptico, fragrância, corante, espessantes, coadjuvantes, agente anti-redepositante, conservantes e água. Ele também contém ajustadores de pH e tamponantes para controlar a acidez, e a formulação inclui tensoativos biodegradáveis.

Após coleta, as amostras de águas cinzas foram peneiradas para remoção de sólidos grosseiros, misturadas e homogeneizadas para garantir uniformidade das características físico-químicas e biológicas e a reprodutibilidade dos ensaios e foram armazenadas temporariamente no reservatório de alimentação até o início do processo de filtragem (Figura 10).

Figura 10 – Coleta e preparo das águas cinzas para tratamento nos biofiltros



* a, b, c: Coleta e preparo das amostras de águas cinzas na caixa de gordura das pias da cantina da FEG/Unesp; d, e, f: Coleta e preparo das amostras de águas cinzas da lavadora de roupas; g: Mistura das amostras de águas cinzas (v/v); h: Armazenamento das águas cinzas para alimentação dos sistemas filtrantes.

Fonte: Autor.

3.7 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS SISTEMAS FILTRANTES

O Sistema BioÁgua Familiar foi concebido pela Embrapa, para possibilitar o reuso de águas cinzas na irrigação agrícola em regiões do semiárido. Neste contexto, a eficiência dos sistemas foi avaliada pela comparação dos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos das

amostras de água antes e após a filtração, considerando os limites de qualidade da água não potável para reuso em irrigação paisagística ou agrícola, estabelecidos por diferentes instituições (Quadro 7).

Quadro 7 - Limites para reuso de água não potável em irrigação

Parâmetro	Limites para reuso em irrigação			
	NBR 16.783 ¹	CONAMA n° 503 ²	FIESP/ANA SINDUSCON (2005) ³	COEMA n° 2 ⁴
pH	6 a 9	5 a 9	6 a 9	6,0 a 8,5
DBO _{5,20} (mg/L)	≤ 20	-	≤ 20	-
Turbidez (UNT)	≤ 5	-	≤ 5	-
Coliformes Termotolerantes (NMP/100mL)	não detectável ou < 200	1000 (cultura consumida crua); 10000 (outras)	< 200	< 5000 ou < 1000 irrigação paisagística
Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L)	-	-	≤ 20	-
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) (mg/L)	< 2000	-	450 - 1500	-
Condutividade Elétrica (µS/cm)	< 3200	-	-	< 3000
Cl ₂ Residual (mg/L)	0,5 a 5,0 (recomendável 0,5 a 2,0)	-	-	-
N Total (mg/L)	-	-	5-30	-

¹ NBR 16.783/2019: Uso de fontes alternativas de água não potável em edificações;

² CONAMA 503/2021 - Cap. 3: Condições e padrões de reuso de efluentes em fertirrigação;

³ FIESP/SINDUSCON/ANA (2005) - Águas de Classe 3: Reuso de águas cinzas tratadas em irrigação;

⁴ COEMA n° 2/2017 - Reuso de efluentes em irrigação paisagística.

Fonte: Adaptada de Sautchuk *et al.* (2005); Coema (2017); ABNT (2019) e Conama (2021)

3.8 MÉTODOS DE ANÁLISES

As amostras de água cinza foram coletadas antes e após a passagem pelos sistemas filtrantes com objetivo de avaliar a eficiência dos tratamentos, utilizando-se parâmetros físicos, químicos e microbiológicos. As análises foram realizadas logo após a coleta das amostras filtradas, para evitar alterações nos resultados, com exceção dos parâmetros que exigem etapas específicas de reação química, como DBO e DQO, e seguiram as metodologias do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2023), apresentadas no Quadro 8.

Quadro 8 - Métodos e equipamentos utilizados nas análises das amostras de água

Parâmetro	Unidade	Método de Ensaio / Equipamento	Referência
pH	----	Leitura direta em pHmetro digital Digimed	APHA 4500-H ⁺ B
Temperatura	°C	Termossensor acoplado ao pHmetro	APHA 2550 B
Oxigênio dissolvido (OD)	mg/L	Oxímetro digital com sonda polarográfica	APHA 4500-O G
Condutividade elétrica (CE)	µS/cm	Condutímetro portátil calibrado com solução padrão KCl	APHA 2510 B
Turbidez	UNT	Turbidímetro portátil calibrado com solução padrão	APHA 2130 B

(continua)

(conclusão)

Sólidos dissolvidos totais (SDT)	mg/L	Relação com condutividade elétrica	APHA 2540 C
Sólidos sedimentáveis	mL/L	Cone Imhoff – sedimentação por 1 h	APHA 2540 F
Cloro residual total	mg/L	Método colorimétrico em fotômetro multiparamétrico	APHA 4500-Cl G
Coliformes totais e <i>E. coli</i>	UFC/100 mL	Método enzimático (substrato cromogênico/fluorogênico)	APHA 9223 B
Fósforo total (P)	mg/L	Método do ácido ascórbico em fotômetro multiparamétrico	APHA 4500-P E
Nitrogênio total (N)	mg/L	Digestão e determinação colorimétrica	APHA 4500-Norg C
Nitrato (NO ₃ ⁻)	mg/L	Método do ácido salicílico em fotômetro multiparamétrico	APHA 4500-NO ₃ ⁻ E
Nitrito (NO ₂ ⁻)	µg/L	Método diazotização em fotômetro multiparamétrico	APHA 4500-NO ₂ ⁻ B
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO _{5,20})	mg/L	Incubação por 5 dias a 20 °C	APHA 5210 B
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	mg/L	Digestão ácida com dicromato de potássio (150 °C/2 h)	APHA 5220 D
Resíduo total	mg/L	Secagem em estufa	APHA 2540 B

Fonte: Autor.

Os parâmetros analisados permitem avaliar a qualidade da água e sua adequação ao reúso agrícola. O pH indica o grau de acidez ou alcalinidade, influenciando a absorção de nutrientes pelas plantas. A temperatura interfere na solubilidade do oxigênio e na atividade biológica. O oxigênio dissolvido (OD) reflete o equilíbrio ecológico da água, enquanto a condutividade elétrica (CE) e os sólidos dissolvidos totais (SDT) indicam a concentração de sais, relacionada à salinidade e à possível toxicidade às plantas.

A turbidez e os sólidos sedimentáveis mostram a presença de partículas que podem entupir sistemas de irrigação. O cloro residual é importante para o controle microbiológico, mas seu excesso pode ser prejudicial às culturas. A presença de coliformes totais e *E. coli* indica contaminação fecal e necessidade de tratamento. Já os nutrientes fósforo (P), nitrogênio (N), nitrato (NO₃⁻) e nitrito (NO₂⁻) são essenciais em pequenas quantidades, porém o excesso pode causar contaminação e eutrofização. As análises de DBO₅ e DQO avaliam a carga orgânica, refletindo o potencial de poluição, e o resíduo total representa a soma dos sólidos presentes, que em grandes quantidades pode afetar o solo e as plantas.

Cada parâmetro listado no Quadro 8 foi analisado segundo os procedimentos normalizados pelo APHA (2023), como descrito a seguir.

pH: Leitura direta em pHmetro digital da marca Digimed: o eletrodo de vidro mede a atividade de H⁺ na amostra de água, após calibração usual em pelo menos dois pontos (normalmente pH 4 e pH 7), conforme o método 4500-H⁺ B do APHA.

Temperatura (°C): Medida por termossensor acoplado ao pHmetro ou outro termômetro digital apropriado. Registra a temperatura da amostra no momento da medição, conforme o método 2550 B do APHA, importante porque muitos parâmetros dependem da temperatura.

Oxigênio dissolvido (OD) (mg L⁻¹): Utiliza-se um oxímetro digital com sonda polarográfica. O método 4500-O G do APHA define procedimentos para calibração, correção de temperatura, turbulência, saturação e leitura em amostras.

Condutividade elétrica (CE) (μS cm⁻¹): Medida com condutivímetro portátil, previamente calibrado com solução padrão de KCl, conforme método 2510 B do APHA. A CE indica a salinidade ou carga iônica da água, fator relevante para irrigação.

Turbidez (UNT): realizada com turbidímetro portátil, calibrado com padrão (formazina), conforme método 2130 B do APHA. A turbidez interfere na penetração de luz na água, devido aos sólidos em suspensão, que afetam a irrigação.

Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) (mg L⁻¹): Neste caso, a medição é efetuada por relação com condutividade elétrica, conforme método 2540 C do APHA. Embora o método tradicional seja secagem em estufa, para eficiência e compatibilidade com rotina pode usar-se estimativa via condutividade e fator empírico ajustado.

Sólidos sedimentáveis (mL L⁻¹): Utilização de cone de Imhoff para sedimentação durante 1 h, conforme método 2540 F do APHA. Mede-se o volume de partículas que se depositam, importante para avaliar a carga de material que pode assentar nos filtros ou solo.

Cloro residual total (mg L⁻¹): Método colorimétrico em fotômetro multiparamétrico, conforme método 4500-Cl G do APHA. Verifica-se a presença de cloro livre ou combinado, útil para indicar desinfecção ou residual em água de reúso.

Coliformes totais e Escherichia coli (UFC/100 mL): Método enzimático (substrato fluorogênico), conforme método 9223 B do APHA. Essa técnica permite detecção rápida de contagem de coliformes e *E. coli* em amostras, sendo indispensável para avaliar o risco microbiológico quando o reúso da água se destina a irrigação.

Fósforo total (P) (mg L⁻¹): Determinação pelo método do ácido ascórbico em fotômetro multiparamétrico, conforme método 4500-P E do APHA. Mede-se a cor desenvolvida após digestão, representando o P solúvel e particulado disponível na água.

Nitrogênio total (N) ($mg L^{-1}$): Realizada pela digestão da amostra e determinação colorimétrica do azoto orgânico/mineral, conforme método 4500-Norg C do APHA. Esse parâmetro avalia a carga de nitrogênio que pode impactar solos e plantas ou lixiviação.

Nitrato (NO_3^-) ($mg L^{-1}$): Método do ácido salicílico em fotômetro multiparamétrico, conforme 4500- NO_3^- E do APHA. Avalia a fração de NO_3^- presente, relevante para controle da qualidade da água e risco de percolação.

Nitrito (NO_2^-) ($\mu g L^{-1}$): Método de diazotização em fotômetro multiparamétrico, conforme método 4500- NO_2^- B do APHA. Nitrito é indicador de nitrificação incompleta ou contaminação recente, sendo crítico em águas de reuso.

Demanda Bioquímica de Oxigênio ($DBO_{5,20}$) ($mg L^{-1}$): Método de incubação por 5 dias a 20 °C, conforme 5210 B do APHA. A amostra é diluída, inoculada se necessário, e incubada sob condições controladas; a diferença de oxigênio entre o início e o final da incubação indica a carga de matéria orgânica biodegradável.

Demanda Química de Oxigênio (DQO) ($mg L^{-1}$): Método de digestão ácida com dicromato de potássio a ~150 °C por 2 h, conforme 5220 D do APHA. Esse método quantifica a carga total de matéria orgânica oxidável (biodegradável + não-biodegradável) da amostra.

Resíduo total ($mg L^{-1}$): Secagem em estufa conforme método 2540 B do APHA: a amostra foi evaporada e o resíduo seco pesa-se para avaliação de sólidos totais dissolvidos ou suspensos.

3.9 EFEITO DA ADIÇÃO DAS ÁGUAS CINZAS TRATADAS NO PH DO SOLO

Para avaliar o efeito da adição das águas cinzas tratadas sobre o pH do solo, foi utilizado um Cambissolo distrófico, coletado nas dependências do câmpus da FEG/Unesp, na camada reativa, de 0 a 50 cm de profundidade. Como pode ser observado na Figura 11, após a coleta, o solo foi preparado por meio da retirada de raízes e outras impurezas, sendo posteriormente seco ao ar (TFSA), destorroado e passado em peneira com malha de 2 mm. O solo peneirado foi homogeneizado e armazenado em recipientes plásticos limpos de um litro até o momento da análise, realizada após 24 dias de incubação com doses crescentes de águas cinzas tratadas (0, 50, 100 e 200 mL) provenientes do sistema alternativo com agregados reciclados de cerâmica vermelha (ARCV), em comparação com o Sistema BioÁgua Familiar (SBF), utilizado como referência.

Figura 11 - Amostragem e preparação do Cambissolo distrófico coletado nas dependências do Câmpus da FEG/UNESP



Fonte: Autor.

A determinação do pH do solo seguiu a metodologia da Embrapa (2017), que estabelece as condições para medição do pH em suspensão solo-água, utilizando pHmetro de bancada da marca Digimed, devidamente calibrado. Para cada determinação, foi preparada uma suspensão solo-água na proporção 1:2,5 (m/v), utilizando 10 g de solo seco e 25 mL de água purificada por osmose reversa. A mistura foi agitada por 30 minutos, garantindo a homogeneização e o equilíbrio entre as fases sólida e líquida e, após o repouso de 15 minutos, a leitura foi realizada sobre a fase líquida sobrenadante.

O valor do pH foi registrado quando a leitura do equipamento se manteve constante por pelo menos 30 segundos. Após cada amostra, o eletrodo foi lavado para evitar contaminação cruzada entre suspensões. Todas as determinações foram realizadas em triplicata, sendo o resultado final expresso como a média aritmética das leituras obtidas. Os valores de pH determinados foram utilizados para avaliar o efeito da adição dos diferentes volumes de águas cinzas tratadas (50, 100 e 200 mL) provenientes do sistema com agregados reciclados de cerâmica vermelha (ARCV), em comparação com o solo sem tratamento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS SISTEMAS FILTRANTES

O Quadro 9 apresenta os resultados dos parâmetros físicos, químicos e biológicos da água cinza antes e após a filtração pelos dois sistemas avaliados, o Sistema Bioágua Familiar (SBF), utilizado como referência, e o sistema alternativo desenvolvido com agregados reciclados de cerâmica vermelha (ARCV).

Para avaliar a eficiência dos dois sistemas filtrantes, os valores dos parâmetros de qualidade da água obtidos foram confrontados com os limites estabelecidos pelas principais normas e legislações brasileiras referentes ao reuso de águas não potáveis, especialmente para fins de irrigação (NBR 16783/2019; CONAMA 503/2021; COEMA 02/2017; FIESP/ANA/SINDUSCON, 2005).

4.1.1 Análise dos parâmetros físicos

A temperatura da água manteve-se estável após a filtração, variando entre 21 e 22 °C, valor compatível com as condições ambientais locais e sem impacto significativo sobre o desempenho do sistema ou a adequação ao reuso.

Em relação à turbidez, a água cinza bruta apresentou valor de 223 NTU. Após o tratamento, observou-se aumento para 309 NTU no SBF, o que pode estar relacionado à remobilização de partículas finas do meio filtrante ou à saturação das camadas filtrantes. O sistema com ARCV promoveu redução significativa da turbidez para 58 NTU, indicando maior eficiência na clarificação e retenção de sólidos suspensos. Apesar dessa melhora, o valor permanece muito acima do limite de 5 NTU estabelecido pela NBR 16783 (ABNT, 2019) e pelo manual da FIESP/SINDUSCON/ANA (2005), o que evidencia a necessidade de etapas complementares de polimento, como filtração lenta, adsorção em carvão ativado ou microfiltração (PROSAB, 2016).

Ambos os sistemas eliminaram completamente materiais flotantes e sólidos sedimentáveis, um resultado positivo e relevante para o reuso em sistemas de irrigação, pois reduz o risco de entupimentos em tubulações e emissores e demonstra eficiência na separação físico-mecânica de partículas grosseiras.

Quadro 9 – Parâmetros de qualidade da água cinza bruta e após filtração e limites normativos para reuso

Parâmetro	Água cinza	SBF (referência)	ARCV (alternativo)	Limite normativo	Referência	Análise comparativa
Temperatura (°C)	22,8	21,2	21,3	≤ 40	NBR 16783	Estável em ambos
pH	5,54	6,26	6,75	6,0–9,0	NBR 16783; FIESP (2005)	Ambos atendem
Turbidez (NTU)	223	309	58	≤ 5	NBR 16783; FIESP (2005)	SBF aumentou (ressuspensão de partículas); ARCV reduziu, mas ainda acima do limite.
Sólidos sedimentáveis (mL/L)	2	0	0	≤ 1	COEMA 2/2017	Ambos atenderam; completa remoção

(Continua)

(Conclusão)

Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	170	1100	3210	≤ 3200	NBR 16783; COEMA 2/2017	SBF dentro do limite; ARCV no limiar superior - risco de salinização.
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	102	720	1610	≤ 2000 (NBR 16783); 450–1500 (FIESP)	NBR 16783; FIESP (2005)	Ambos em conformidade com a NBR; ARCV pouco acima do recomendado pela FIESP.
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	1,2	0,00	0,00	nd*	---	Ausência de OD indica consumo pela matéria orgânica e necessidade de aeração do sistema
DBO _{5,20} (mg/L)	160	170	160	≤ 20	NBR 16783; FIESP (2005)	Muito acima do limite; filtração física isolada não remove matéria orgânica.
Cloro residual total (mg/L)	0,00**	0,02	0,68	0,5–2,0	NBR 16783	ARCV dentro da faixa; SBF sem Cl residual.
Nitrogênio total (mg/L)	4,5	7,0	25	≤ 30	CONAMA n° 503/2021	Ambos atendem; aumento no ARCV indica liberação de compostos nitrogenados.
Fósforo total (mg/L)	0,38	0,00	1,15	≤ 2	CONAMA 503/2021	Dentro dos limites; Valor no ARCV pode ser benéfico para fertirrigação.
Nitrato (mg/L)	25	30	30	≤ 45	CONAMA 503/2021	Dentro do limite; indica oxidação parcial da amônia.
Nitrito ($\mu\text{g}/\text{L}$)	70	85	96	≤ 1000	CONAMA 503/2021	Dentro do limite; presença moderada.
Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	$2,4 \times 10^5$	$1,6 \times 10^5$	$1,2 \times 10^5$	≤ 200	NBR 16783; FIESP (2005) USEPA (2012)	Elevadas concentrações em ambos; requer desinfecção complementar.

* nd = não determinado; **Não detectado, provável demanda instantânea de cloro por surfactantes; matéria orgânica dissolvida; alcalinidade e dureza alta da água cinza.

Fonte: Adaptado das normas ABNT NBR 16783:2019; CONAMA n° 503/2021; COEMA n° 02/2017; FIESP/SINDUSCON/ANA (2005); USEPA (2012).

4.1.2 Análise dos parâmetros físico-químicos

Os parâmetros químicos apresentaram variações expressivas entre os sistemas. A condutividade elétrica (CE) aumentou de 170 $\mu\text{S}/\text{cm}$ na água cinza bruta para 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no SBF e 3210 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no sistema alternativo com ARCV, valor que ultrapassa ligeiramente o limite máximo de 3200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ definido pela NBR 16783 (ABNT, 2019) e pela Resolução COEMA n° 02/2017, sugerindo risco potencial de salinização do solo quando utilizado em reuso agrícola contínuo. Esse aumento pode estar associado à lixiviação de sais e íons residuais, como carbonatos, sulfatos e cloretos, presentes nos agregados cerâmicos reciclados (OLIVEIRA *et al.*, 2021).

Os sólidos dissolvidos totais (SDT), estimados a partir da condutividade, seguiram a mesma tendência da CE, atingindo 1610 mg/L no sistema com ARCV, valor que permanece dentro do limite máximo de 2000 mg/L, estabelecido pela NBR 16783, embora acima da faixa recomendada pelo manual da FIESP/SINDUSCON/ANA (2005) de 450–1500 mg/L. Esses resultados indicam que, apesar de o sistema alternativo apresentar boa estabilidade físico-química, há necessidade de lavagem prévia do material filtrante para minimizar a liberação de sais solúveis e estabilizar a qualidade da água filtrada.

O pH da água cinza bruta apresentou caráter levemente ácido (5,54), o que foi corrigido após a passagem pelos filtros, resultando em valores de 6,26 para o SBF e 6,75 para o sistema com ARCV. Ambos os valores se enquadram na faixa recomendada pelas normas NBR 16783 (ABNT, 2019) e FIESP/ANA/SINDUSCON (2005), que preveem pH entre 6 e 9 para águas de reuso. O comportamento mais alcalino no sistema alternativo sugere um possível efeito tamponante dos agregados cerâmicos reciclados, provavelmente associado à presença de compostos minerais alcalinos, como óxidos e carbonatos residuais do processo de queima (Souza *et al.*, 2020), o que contribui para a neutralização da acidez.

Em relação à demanda bioquímica de oxigênio (DBO_{5,20}), observou-se pouca variação entre a água cinza bruta e as filtradas, mantendo-se elevada em ambos os sistemas (161–170 mg/L), valores muito superiores ao limite de 20 mg/L exigido para reuso não potável pela NBR 16783 (ABNT, 2019) e pelo manual da FIESP/ANA/SINDUSCON (2005). Isso demonstra que a filtração física isolada é insuficiente para remoção de matéria orgânica biodegradável, sendo necessária a implementação de uma etapa biológica complementar, como reator anaeróbio, zona de raízes ou biofiltro aerado (VON SPERLING, 2014).

O cloro residual total apresentou valores distintos entre os sistemas, sendo de 0,02 mg/L, praticamente nulo no SBF e de 0,68 mg/L no sistema com ARCV, mantendo-se dentro da faixa recomendada, de 0,5–2,0 mg/L pela NBR 16783, indicando maior persistência do desinfetante residual e, portanto, melhor potencial de controle microbiológico.

Os teores de nutrientes também apresentaram variação relevante. O nitrogênio total aumentou de 4,5 mg/L na água bruta para 7 mg/L no SBF e 25 mg/L no ARCV, enquanto o fósforo total passou de 0,38 mg/L na água bruta para 0 mg/L no SBF e 1,15 mg/L no ARCV. Esses resultados sugerem liberação de compostos nitrogenados e fosfatados pelo meio cerâmico, possivelmente devido à lixiviação de resíduos do processo de fabricação ou fragmentos de argila e esmalte. Embora indesejável para reuso urbano, esse acréscimo pode representar um benefício agrônômico quando o reuso for destinado à fertirrigação controlada, conforme reconhece a Resolução CONAMA nº 503/2021.

Os valores de nitrato (até 30 mg/L) e nitrito (15–96 µg/L) indicam processos de oxidação parcial da matéria orgânica e amônia, compatíveis com ambientes com oxigênio dissolvido limitado. Esses compostos devem ser monitorados, para evitar o acúmulo de nitrogênio oxidado no solo e contaminação de águas subterrâneas, pois quando presentes em excesso podem gerar impactos ao meio ambiente e à saúde pública.

4.1.3 Análise dos parâmetros biológicos

Os resultados microbiológicos indicaram a presença de coliformes termotolerantes após a filtração em ambos os sistemas, evidenciando que o processo de filtração física, isoladamente, não foi suficiente para eliminar microrganismos patogênicos. De acordo com os limites estabelecidos pela NBR 16783 (ABNT, 2019), pela FIESP/ANA/SINDUSCON (2005) e pela COEMA 02/2017, o efluente tratado destinado à irrigação deve apresentar ausência de coliformes ou valores inferiores a 200 NMP/100 mL, exigindo, portanto, a adoção de uma etapa de desinfecção complementar, como cloração, ozonização ou radiação ultravioleta (USEPA, 2012).

A persistência de coliformes reforça que os sistemas de filtração, convencional e alternativo, atuam predominantemente na remoção física de sólidos e turbidez, mas não garante segurança microbiológica plena, sendo indispensável integrar um tratamento secundário ou terciário, para garantir a conformidade com os padrões sanitários.

Estes resultados indicam que, embora os sistemas filtrantes, tenham promovido melhoria nos parâmetros físico-químicos das águas cinzas, a qualidade final ainda não atende integralmente aos padrões exigidos para reúso não potável. A persistência de valores elevados de DBO, turbidez e coliformes, associada à ausência de oxigênio dissolvido e à baixa concentração de cloro residual, demonstra a necessidade de etapas complementares de polimento e desinfecção para assegurar a segurança microbiológica e a estabilidade da água tratada.

Do ponto de vista prático, a água tratada poderia ser empregada em usos restritos, como irrigação ornamental e lavagem de pisos, desde que submetida ao controle de salinidade e manutenção preventiva dos sistemas de irrigação, pois a condutividade elétrica e os sólidos dissolvidos totais apresentaram valores elevados. As aplicações mais sensíveis, como irrigação de hortaliças, lavagem de alimentos ou usos com contato humano, não são recomendadas sem a inclusão de processos adicionais de tratamento, como desinfecção química (hipoclorito), radiação ultravioleta (UV) ou filtração complementar com carvão ativado ou membranas.

A água cinza bruta composta por efluentes de lavadora de roupas e de pias da cantina, ricos em surfactantes, gorduras e sais dissolvidos, aumentam a demanda de oxigênio e de cloro, dificultando a remoção de matéria orgânica e interferem na eficiência da filtração. Além disso, a presença de partículas coloidais e finas explica a turbidez residual, mesmo após o tratamento.

Para aprimorar o desempenho dos sistemas, é necessário adotar etapas complementares, como decantação, coagulação-floculação e filtração de polimento, seguidas de desinfecção e monitoramento contínuo da qualidade da água, conforme os critérios da NBR 16783/2019. Essas medidas podem elevar significativamente a eficiência dos filtros e ampliar as possibilidades de reuso seguro.

Antes da aplicação prática, contudo, é indispensável observar os requisitos legais e de gestão. A NBR 16783/2019 estabelece que os parâmetros de qualidade variam conforme o uso final, e que o projeto deve contemplar documentação técnica, rotinas de manutenção e medidas de segurança para evitar contaminação cruzada. Além das normas nacionais, regras estaduais e municipais, como as resoluções da CETESB e da SES/SIMA no Estado de São Paulo, podem exigir licenciamento, controle microbiológico rigoroso e relatórios periódicos de operação. Portanto, o uso de águas cinzas tratadas apresenta potencial ambiental e técnico relevante, especialmente quando associado a tecnologias de baixo custo e materiais reciclados. No entanto, a viabilidade real do reuso depende da adequação normativa, da integração de barreiras sanitárias complementares e da gestão operacional contínua, garantindo tanto o desempenho do sistema quanto a segurança dos usuários e do ambiente.

4.2 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA DOS SISTEMAS FILTRANTES

Os resultados obtidos indicam que, embora nenhum dos sistemas avaliados atenda plenamente aos requisitos da NBR 16783 (ABNT, 2019) e das legislações correlatas, o sistema contendo agregados reciclados de cerâmica vermelha (ARCV) apresentou desempenho mais promissor em comparação ao Sistema Bioágua Familiar (SBF). Essa superioridade foi observada, principalmente, na redução da turbidez, na estabilização do pH e na preservação do cloro residual, além de conferir ao efluente características potencialmente benéficas para reuso agrícola, como o acréscimo moderado de nutrientes.

O SBF apresentou bom desempenho na remoção de sólidos sedimentáveis, atendendo às exigências da Resolução COEMA nº 02/2017, porém mostrou baixa eficiência de clarificação e elevação da turbidez após a filtração, possivelmente devido à ressuspensão de partículas ou formação de biofilme no leito filtrante. Além disso, observou-se ausência de oxigênio

dissolvido e redução total do cloro residual, comprometendo a qualidade sanitária do efluente tratado.

O sistema ARCV, por sua vez, destacou-se pela melhor correção do pH, pela expressiva redução da turbidez e pela manutenção do cloro residual dentro da faixa recomendada para reuso não potável, conforme FIESP/SINDUSCON/ANA (2005) e NBR 16783. Contudo, apresentou aumento da condutividade elétrica e liberação de nutrientes, possivelmente em razão da dissolução de íons provenientes dos materiais cerâmicos. Embora tais valores permaneçam dentro dos limites normativos, devem ser monitorados para evitar riscos de salinização em aplicações agrícolas contínuas.

Os valores elevados de DBO, turbidez e coliformes termotolerantes em ambos os sistemas confirmam a necessidade de etapas complementares de polimento e desinfecção, como carvão ativado, cloração controlada ou processos oxidativos avançados, de modo a garantir a conformidade com os padrões microbiológicos e de matéria orgânica estabelecidos para o reuso seguro da água. Esse comportamento é coerente com o esperado para sistemas de filtração de fluxo descendente, cuja principal função é a retenção física de sólidos e o pré-tratamento do efluente.

Dessa forma, o sistema alternativo com ARCV pode ser considerado tecnicamente viável como etapa de pré-tratamento em arranjos modulares de reuso de águas cinzas, especialmente em contextos rurais ou de baixa infraestrutura, voltados à irrigação de áreas verdes ou culturas não alimentícias. Além de promover melhor desempenho físico-químico, o uso de materiais reciclados contribui para a valorização de resíduos da construção civil, o que reforça seu potencial como tecnologia sustentável e de baixo custo para a gestão descentralizada da água.

Os resultados obtidos reforçam a importância de se considerar o reuso de águas cinzas sob uma abordagem integrada, que contemple simultaneamente aspectos técnicos, ambientais, normativos e de segurança sanitária, conforme estabelece a Lei nº 14.546/2023, que reconhece e incentiva o reuso de águas cinzas como prática essencial à sustentabilidade hídrica no Brasil. A complementação da filtração com processos físicos, biológicos e oxidativos é, portanto, recomendada como estratégia para aprimorar o desempenho dos sistemas filtrantes e viabilizar o reuso seguro e responsável da água em contextos de escassez hídrica.

4.3 SUSTENTABILIDADE DO SBF COM USO DE AGREGADOS RECICLADOS

A substituição total dos agregados naturais por agregados reciclados de cerâmica vermelha no Sistema BioÁgua Familiar representa uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente estratégica para o aprimoramento de tecnologias sociais voltadas ao tratamento descentralizado de águas cinzas. Essa substituição promove não apenas a redução da extração de recursos naturais não renováveis, como areia e brita, mas também a valorização de resíduos da construção e demolição, contribuindo diretamente para os objetivos de sustentabilidade, economia circular e segurança hídrica.

4.3.1 Caracterização e potencial técnico do agregado reciclado de cerâmica

A cerâmica vermelha é amplamente empregada na construção civil sob a forma de tijolos, blocos e telhas, devido ao seu baixo custo de produção, abundância de matéria-prima e boas propriedades físico-mecânicas (Silva; Marques, 2021). Produzida pela queima de argilas plásticas entre 800°C e 1000°C, resulta em um material rígido, poroso e quimicamente estável, composto majoritariamente por sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxidos de ferro (Fe_2O_3), com menores teores de cálcio, magnésio, potássio e sódio (Oliveira *et al.*, 2020).

Após o processamento, envolvendo trituração, peneiramento e homogeneização granulométrica, os fragmentos cerâmicos adquirem características semelhantes às dos agregados convencionais, com porosidade média entre 20% e 35% e densidade de 1,6 a 2,2 g/cm^3 , o que favorece a retenção de sólidos suspensos, a percolação da água e a adesão de biofilmes em sistemas biofiltrantes (Santos *et al.*, 2019). Além disso, o baixo custo, que varia de R\$ 50,00 a R\$ 80,00 por metro cúbico e a disponibilidade local do material reforçam seu potencial como insumo sustentável em sistemas de tratamento de baixo custo, especialmente em comunidades rurais.

4.3.2 Aspectos ambientais e econômicos do reaproveitamento

A cerâmica vermelha reciclada constitui um dos principais componentes dos resíduos de construção e demolição, representando cerca de 30% do volume total de RCD gerado no Brasil (Cabral *et al.*, 2009). Esse percentual expressivo, aliado ao descarte ainda predominantemente inadequado, amplia a necessidade de soluções que promovam a gestão sustentável desses resíduos.

O reaproveitamento desse material como agregado filtrante, em substituição à areia e à brita, mitiga impactos associados à extração mineral, reduz o volume de resíduos destinados a aterros e favorece a reintrodução de materiais inertes na cadeia produtiva, alinhando-se aos princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei nº 12.305/2010; e à Lei nº 14.546/2023, que incentiva o reuso de águas como prática de sustentabilidade hídrica.

De acordo com Delduque (2014), o aproveitamento de blocos e telhas cerâmicas quebradas em sistemas filtrantes apresenta viabilidade técnica e ambiental, com desempenho satisfatório na remoção de turbidez e sólidos suspensos, podendo superar o desempenho de leitos tradicionais de areia em até 99% de eficiência em condições controladas. Além de reduzir a pressão sobre recursos naturais, o uso de ARCV fortalece cadeias locais de reciclagem, gera economia de insumos e estimula práticas de economia circular no setor da construção.

4.3.3 Convergência com os princípios da sustentabilidade no SBF

No contexto do SBF, tecnologia social desenvolvida pela Embrapa Semiárido, o uso de ARCV como meio filtrante contribui diretamente para a sustentabilidade técnica e socioambiental do sistema. O SBF é projetado para tratar e reusar águas cinzas domésticas em irrigação de cultivos e jardins, promovendo autonomia hídrica e segurança alimentar em comunidades rurais (Embrapa, 2023).

A incorporação de agregados reciclados fortalece os pilares dessa tecnologia, reduzindo os custos de implantação, ampliando a durabilidade dos filtros e aproximando o sistema dos princípios da agroecologia e da inovação popular. Além disso, o caráter local e de fácil obtenção dos resíduos cerâmicos favorece a replicabilidade do sistema em regiões de baixa infraestrutura, onde a disponibilidade de materiais convencionais pode ser limitada.

4.3.4 Contribuição sistêmica e perspectivas de aplicação

A substituição dos agregados naturais por ARCV agrega valor ambiental e funcional ao SBF, promovendo benefícios que vão além da eficiência técnica do filtro. Do ponto de vista sistêmico, a prática favorece:

- a redução do passivo ambiental urbano, ao desviar resíduos cerâmicos de aterros e encostas;
- a diminuição da pegada ecológica do sistema, ao evitar a extração e o transporte de minerais;
- a viabilidade econômica, por meio do uso de insumos locais e de baixo custo;

- a resiliência hídrica e social, ao possibilitar soluções descentralizadas e de gestão comunitária da água.

Essa abordagem reflete uma mudança de paradigma no saneamento: do modelo linear e centralizado, dependente de insumos industriais, para um modelo circular, descentralizado e ecológico, no qual resíduos se convertem em recursos e o tratamento de águas se integra às dinâmicas locais de produção e sustentabilidade (Santos; Costa; Leite, 2019).

Portanto, a adoção de ARCV no Sistema Bioágua Familiar não representa apenas uma inovação técnica, mas uma estratégia de transição ecológica, capaz de articular gestão de resíduos, conservação de recursos naturais e reuso de águas, consolidando-se como prática sustentável e replicável em contextos de escassez hídrica e vulnerabilidade socioambiental.

4.3.5 Efeito da aplicação das águas cinzas tratadas sobre o pH do solo

A Tabela 3 mostra os resultados do pH do Cambissolo distrófico após a aplicação de diferentes volumes de água cinza tratada pelo sistema com agregados reciclados de cerâmica vermelha (ARCV). O solo original apresentou pH de 5,84, o que indica uma condição levemente ácida, comum em Cambissolos distróficos, caracterizados pela baixa saturação por bases e acidez natural elevada.

Tabela 3 – Aplicação da água tratada pelo Sistema BioÁgua Familiar e pelos sistemas alternativos contendo agregados reciclados de concreto e de cerâmica vermelha

Adição de Água tratada (mL)	pH do solo		
	Solo sem tratamento	Agregados Naturais	Agregados Reciclados
		SBF	ARCV
0	5,84	---	---
50	---	5,77	5,17
100	---	5,27	5,10
200	---	4,93	4,93

* Solo: Cambissolo distrófico coletado no campus da FEG; SBF: Sistema BioÁgua Familiar (Referência); ARCV: Agregados reciclados de cerâmica vermelha; ARC: Agregados reciclados de concreto.

Fonte: Autor.

Com a aplicação da água tratada pelo sistema ARCV, observou-se uma leve redução do pH do solo, que passou de 5,17 na dose de 50 mL para 4,93 na dose de 200 mL. Esse comportamento está relacionado ao pH naturalmente ácido da água filtrada pelo sistema (em torno de 6,75) e também à presença de óxidos de ferro e alumínio nos fragmentos cerâmicos,

que podem reagir no solo e favorecer processos de acidificação. Além disso, compostos orgânicos e traços de matéria orgânica presentes nas águas cinzas podem liberar íons hidrogênio (H^+) durante o processo de incubação, contribuindo para a queda gradual do pH.

Mesmo com essa redução, o efeito do sistema ARCV foi moderado, indicando que a água filtrada pelos agregados cerâmicos apresenta maior estabilidade química e menor potencial de acidificação do que se esperaria em sistemas mais agressivos. Isso pode estar ligado à capacidade dos fragmentos cerâmicos de promover uma filtração mais estável e um equilíbrio melhor da composição química da água.

De forma geral, o reúso da água tratada pelo sistema ARCV pode ser considerado seguro, desde que haja acompanhamento periódico do pH e das condições do solo. Em solos neutros ou levemente alcalinos, esse efeito tende a ser até benéfico, ajudando a manter a reação do solo próxima da faixa ideal para o desenvolvimento das plantas. Já em solos naturalmente ácidos, como os Cambissolos distróficos, o uso contínuo dessa água pode acentuar a acidez e reduzir a disponibilidade de nutrientes importantes, como cálcio, magnésio e fósforo (Malavolta, 2006). Nesses casos, o ideal é associar o uso da água tratada com práticas de correção da acidez, como a calagem, garantindo o equilíbrio da fertilidade e a boa atividade biológica do solo.

4.4 LIMITAÇÕES NORMATIVAS E RECOMENDAÇÕES PARA REUSO AGRÍCOLA

Como no Brasil, ainda não existe uma lei federal específica que regulamente de modo exclusivo o reúso de águas cinzas domésticas para irrigação, essa prática exige cuidadosa atenção à ABNT NBR 16783/2019, que estabelece critérios para o uso de fontes alternativas de água não potável em edificações e define parâmetros mínimos de qualidade para que a água tratada seja usada de forma segura em atividades como irrigação de jardins, descargas sanitárias ou lavagem.

Adicionalmente, a Resolução CONAMA 503/2021 orienta sobre critérios e procedimentos para o reúso agrícola e florestal de efluentes industriais, embora não seja específica para águas cinzas domésticas. Em nível estadual ou municipal existem regulamentações mais direcionadas, por exemplo, no Estado do Ceará, a Resolução COEMA 02/2017 estabelece condições para reúso direto de água não potável para irrigação paisagística em áreas urbanas, determinando limites para coliformes termotolerantes até 1000 UFC/100 mL para irrigações paisagísticas e outros parâmetros.

A aplicação destes limites normativos ao reuso de águas cinzas requer não apenas a verificação dos valores numéricos obtidos, mas também a consideração de fatores técnicos, agronômicos e sanitários que condicionam o uso seguro da água tratada. Ainda que os parâmetros atendam aos limites normativos, a viabilidade real do reuso depende de condições complementares, como a composição química da água de entrada, como presença de sabões, detergentes, óleos, micropoluentes, a carga de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, o tipo de solo e o método de irrigação empregado.

A infiltração, salinização e potencial de eutrofização devem ser monitorados, pois a percolação de nutrientes pode afetar a qualidade dos aquíferos. Além disso, em sistemas descentralizados, como os estudados, a ausência de infraestrutura de monitoramento e controle pode comprometer a segurança sanitária do reuso, exigindo etapas adicionais de polimento e desinfecção antes do uso agrícola.

Assim, ao aplicar os limites normativos para avaliar o desempenho dos sistemas filtrantes, é imprescindível definir o uso pretendido da água tratada, por exemplo, irrigação paisagística, de culturas não alimentares ou de consumo, e verificar se os parâmetros alcançados permitem esse uso com margem de segurança. Os resultados deste estudo demonstram que, embora o sistema com agregados reciclados de cerâmica vermelha apresente avanços significativos na qualidade da água, a conformidade plena com os requisitos normativos depende da integração de processos adicionais de tratamento e desinfecção, garantindo segurança sanitária e sustentabilidade ambiental no reuso.

Diante desse panorama, em projetos de reuso de águas cinzas em irrigação no Brasil recomenda-se:

- Referenciar a NBR 16783 (ABNT, 2019) como base mínima para qualidade da água não potável (pH, turbidez, DBO, coliformes), reconhecendo que pode haver necessidade de valores mais restritivos conforme a cultura irrigada e o usuário final.
- Verificar legislações estaduais/municipais específicas de reuso de águas cinzas ou efluentes, por exemplo, COEMA 02/2017, e garantir o cumprimento desses requisitos locais.
- Projetar o sistema considerando os usos finais da água, como irrigação de áreas verdes, culturas alimentares, descarga de vasos sanitários, e definir os níveis de tratamento e desinfecção adequados a esse uso.
- Implementar etapas de tratamento que incluam filtração física, estabilidade microbiológica e desinfecção residual, além de assegurar monitoramento contínuo dos parâmetros críticos, como DBO, coliformes, turbidez, nutrientes, para garantir conformidade e segurança.

- Considerar o contexto local, incluindo escassez hídrica, disponibilidade de tecnologia e recursos financeiros, aceitação comunitária e operação/manutenção simples.
- Documentar e monitorar não apenas os aspectos técnicos, mas também os impactos ambientais e econômicos, como economia de água potável, redução de carga de efluentes, reutilização de resíduos e sustentabilidade do sistema, conforme boas práticas de economia circular.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho atingiu os objetivos de desenvolver um protótipo de biofiltro baseado no modelo do Sistema BioÁgua Familiar (SBF), respeitando as proporções e configurações hidráulicas recomendadas, utilizando agregados reciclados de cerâmica vermelha (ARCV) em substituição aos agregados naturais e de avaliar sua eficiência no tratamento de águas cinzas domésticas e sua contribuição para a sustentabilidade do sistema.

Ambos os sistemas filtrantes apresentaram valores elevados de DBO e coliformes termotolerantes, além de ausência de oxigênio dissolvido, evidenciando a necessidade de etapas complementares de polimento e desinfecção para assegurar a conformidade microbiológica e o reuso seguro da água.

Embora nenhum dos sistemas tenha atendido integralmente aos limites estabelecidos pela NBR 16783 (ABNT, 2019) e pelas Resoluções CONAMA e COEMA para reuso não potável, o sistema alternativo com ARCV apresentou melhor desempenho, destacando-se pela maior eficiência na clarificação, estabilização do pH e preservação do cloro residual, configurando-se como solução tecnicamente promissora para o tratamento descentralizado de águas cinzas.

A substituição dos agregados naturais por ARCV demonstrou potencial para reduzir a demanda por recursos naturais, valorizar resíduos da construção e demolição (RCD) e diminuir o impacto ambiental associado à disposição desses materiais. Além disso, o sistema alternativo apresenta baixo custo, facilidade construtiva e aplicabilidade em contextos descentralizados, alinhando-se aos princípios da economia circular e da sustentabilidade hídrica preconizados pela Lei nº 14.546/2023.

Com base nas evidências experimentais obtidas, recomenda-se a integração do biofiltro alternativo com ARCV a etapas adicionais de tratamento, como camadas de carvão ativado, processos oxidativos ou cloração controlada, a fim de elevar a eficiência na remoção de matéria orgânica e de microrganismos patogênicos. Estas melhorias podem viabilizar a replicabilidade do sistema em comunidades rurais e urbanas de baixa infraestrutura, ampliando sua aplicabilidade para o reuso de águas cinzas em irrigação de áreas verdes e cultivos não alimentícios.

De modo geral, conclui-se que o biofiltro com ARCV é tecnicamente viável como etapa de pré-tratamento de águas cinzas domésticas, apresentando vantagens em termos de eficiência física, custo reduzido e sustentabilidade ambiental. Apesar das limitações observadas na remoção de matéria orgânica e microrganismos, o sistema representa uma alternativa

promissora e de baixo impacto ambiental para o tratamento descentralizado de efluentes domésticos, especialmente em regiões com escassez hídrica.

O reuso de águas cinzas ainda é um campo em expansão, com crescente interesse científico, necessitando de padronização tecnológica e de estudos aplicados a contextos de baixo custo e infraestrutura descentralizada.

As informações obtidas neste trabalho reforçam a importância de se desenvolver soluções integradas de reuso de águas cinzas, que associem inovação tecnológica, gestão sustentável de resíduos e conformidade normativa, contribuindo para o avanço das práticas de reúso seguro da água no contexto brasileiro.

REFERÊNCIAS

- APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 10. ed. Washington: American Public Health Association, 2012. Disponível em: <https://webstore.ansi.org/standards/awwa/AWWAC65202>. Acesso em: 12 set. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12216**: projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13969**: tanques sépticos: unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos: projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15527**: água de chuva: aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16783**: uso de fontes alternativas de água não potável em edificações: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- BARROSO, A. A. F. *et al.* Qualidade das águas cinza geradas pelo sistema Bioágua familiar para reúso agrícola no Ceará. **Irriga**, Botucatu, v. 28, n. 3, p. 592–601, 2023. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/4707/3535>. Acesso em: 03 maio 2025.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 92, p. 89–92, 16 mai. 2011. Disponível em: <https://www legisweb.com.br/legislacao/?id=114770>. Acesso em: 10 abr. 2025.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2021. Dispõe sobre critérios e padrões de reúso agrícola e florestal de efluentes. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 92, p. 89–92, 13 abr. 2011. Disponível em: <https://www legisweb.com.br/legislacao/?id=114770>. Acesso em: 10 abr. 2025.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 503, de 22 de novembro de 2021. Estabelece as diretrizes e critérios para o reúso direto não potável de efluentes tratados. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 223, p. 123–125, 25 nov. 2021. Disponível em: <https://www legisweb.com.br/legislacao/?id=114770>. Acesso em: 10 abr. 2025.
- CABRAL, A. E. B. *et al.* Influence of the type of recycled aggregate from construction and demolition waste on the module of deformation of recycled aggregate concrete. **IBRACON Structures and Materials Journal**, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 171–192, 2008. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/riem/a/dQWNJzXhYBZQJpMjnzCP3Yq/?lang=pt>. Acesso em: 06 maio 2025.

CEARÁ. Conselho Estadual do Meio Ambiente (COEMA). Resolução nº 02, de 02 de fevereiro de 2017. Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras, revoga as Portarias SEMACE nº 154/2002 e nº 111/2011, e altera a Portaria SEMACE nº 151/2002. **Diário Oficial do Estado do Ceará**, Fortaleza, 21 fev. 2017. Disponível em: <https://www.semace.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/46/2019/09/COEMA-02-2017.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2025.

COSTA, R. L. *et al.* Tratamento de água cinza para reúso agrícola no semiárido do Rio Grande do Norte. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Natal, v. 27, n. 5, p. 1031–1040, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/CfRPxRyYSYYZsB4x979WfWz/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 24 maio 2025.

DELDUQUE, J. A. M. **Avaliação do desempenho da cerâmica vermelha como meio filtrante para água**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Agrárias, Montes Claros, 2014. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6806/3/CM_COEAM_2014_2_21.pdf. Acesso em: 07 abr. 2025.

DELDUQUE, M. C. **Reaproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha em sistemas de filtração para tratamento de efluentes domésticos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Goiás, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/84107>. Acesso em: 07 abr. 2025.

DOMBROSKI, S. A. G. *et al.* Sistema simplificado para tratamento de água cinza em escala familiar. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27., 2013, Goiânia. **Anais [...]**. Goiânia: ABES, 2013. Disponível em: <https://www.boletimdosaneamento.com.br/wp-content/uploads/2022/09/tratamento-de-agua-cinza-escala-familiar.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa Solos, 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>. Acesso em: 13 maio 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Biofiltro reaproveita água doméstica para produção de alimentos e forragem**. 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/72619509/biofiltro-reaproveita-agua-domestica-para-producao-de-alimentos-e-forragem>. Acesso em: 1 nov. 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema Bioágua Familiar: tecnologia social para reúso de águas cinzas**. Brasília: Embrapa, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1156018/bioagua-familiar-reuso-de-aguas-cinzas-para-producao-de-alimentos>. Acesso em: 4 mar. 2025.

FEITOSA, A. P. **Avaliação de sistema de tratamento da água cinza e reúso da água no semiárido brasileiro**. 2016. Tese (Doutorado em Manejo de Solo e Água) – Universidade Federal do Semi-Árido, Mossoró, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/items/43e8da1f-75a1-4596-94cf-3fdf2df95323>. Acesso em: 14 maio 2025.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - FIESP; SINDUSCON-SP; ANA. **Manual de conservação e reúso da água em edificações**. São Paulo: Federação das Indústrias do Estado de São Paulo; Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo; Agência Nacional de Águas, 2005. Disponível em: <https://smastr16.blob.core.windows.net/municipioverdeazul/2011/11/ManualConservacaoReusoAguaEdificacoes.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2025.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - FIESP; SINDUSCON-SP; ANA. **Manual para utilização de águas residuárias em sistemas prediais e urbanos**. São Paulo: Federação das Indústrias do Estado de São Paulo; Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo; Agência Nacional de Águas, 2005. Disponível em: https://www.cimentoitambe.com.br/wp-content/uploads/2020/09/manual_agua-compactado.pdf. Acesso em: 21 jun. 2025.

GOUVEIA, A. R. **Manual de uso e manutenção do sistema de bioágua: projeto Enel compartilha infraestrutura: Bioágua familiar**. Salvador: AVSI Brasil, 2019. Disponível em: <https://www.avsi.org.br/wp-content/uploads/2020/12/GUIA-DO-SISTEMA-BIOA%CC%81GUA-FAMILIAR.pdf>. Acesso em: 26 maio 2025.

JESUS, M. S. *et al.* Caracterização de águas cinzas geradas em edificações residenciais. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro v. 18, n. 4, p. 357–364, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/Jg63d5wnN6Wr94BpqqNRgGP/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 14 maio 2025.

LIMA, A. S. *et al.* Caracterização e classificação dos resíduos de construção civil da cidade de Fortaleza (CE). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p. 169–176, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/YT8cTwjz46YT6SMFprKtYTf/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 06 jun. 2025

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Editora UFV, 2006. Disponível em: <https://www.editoraufv.com.br/manual-de-nutricao-mineral-de-plantas-1-edicao/>. Acesso em: 18 set. 2025.

MOREIRA, M. T. *et al.* A utilização de águas cinzas como forma de reúso no meio urbano. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p. 105–114, 2009. Disponível em: https://www.abes-dn.org.br/wp-content/uploads/2023/07/RESA-NT_v3n2_i-v.pdf. Acesso em: 20 jun. 2025.

NOGUEIRA, S. F. *et al.* Qualidade das águas cinzas geradas em uma residência unifamiliar. **Revista Ambiente & Água**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 3, p. 558–569, 2014. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/ric/article/view/76192>. Acesso em: 14 jul. 2025.

- OLIVEIRA, L. A. *et al.* Avaliação das propriedades físicas e químicas de resíduos de cerâmica vermelha para uso como agregado reciclado. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 4, p. e-12541, 2020. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/ceramica-vermelha>. Acesso em: 15 jul. 2025.
- OLIVEIRA, L. F. S. *et al.* Avaliação de agregados reciclados de cerâmica vermelha para uso em sistemas de tratamento de efluentes. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 26, p. 1–12, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/DkRynRJfxQDpRK9qpTqfz4S/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 10 set. 2025.
- PROGRAMA DE PESQUISA EM SANEAMENTO BÁSICO – PROSAB. **Reúso de águas cinzas e aproveitamento de águas pluviais**. Rio de Janeiro: ABES, 2016. Disponível em: https://abes-dn.org.br/pdf/ESA_NT_V2n3_DOI_compressed.pdf. Acesso em: 10 ago. 2025.
- QUEIROZ, L. R. **Sistema de tratamento de água cinza doméstica de baixo custo na zona rural de São Miguel/RN**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/items/2254f55d-a588-44ba-b58b-9a7ffc6e4b25>. Acesso em: 20 jun. 2025.
- SANTIAGO, F. S. *et al.* **Bioágua Familiar**: reúso de água cinza para produção de alimentos no Semiárido. Recife: Projeto Dom Helder Camara, 2012. Disponível em: <https://bibliotecasemiarios.ufv.br/jspui/bitstream/123456789/3361/1/Texto%20completo.pdf>. Acesso em: 18 set. 2025.
- SANTIAGO, M. F. *et al.* **Reúso da água domiciliar para produção de alimentos no semiárido**. Recife: Diálogos do Pensar, 2015. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10568/97723>. Acesso em: 14 maio 2025.
- SANTOS, C. F. *et al.* A contribuição da Bioágua para a segurança alimentar e sustentabilidade no Semiárido Potiguar brasileiro. **Sustentabilidade em Debate**, Janduí, v. 7, p. 100–113, 2016. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/sust/article/view/16171>. Acesso em: 14 maio 2025.
- SANTOS, C. M. dos. *et al.* Desempenho de resíduos de cerâmica vermelha como material filtrante para águas residuais. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 317–328, 2019. Disponível em: <https://revistas.unilasalle.edu.br/index.php/Rbca/article/view/124>. Acesso em: 14 abr. 2025.
- SANTOS, F. C. *et al.* Soluções descentralizadas e sustentáveis para o tratamento de águas residuais no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Natal, v. 24, p. 1–14, 2019. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/41139>. Acesso em: 14 abr. 2025.
- SAUTCHUK, C. *et al.* **Conservação e reúso da água em edificações**: manual. São Paulo: ANA; FIESP; SINDUSCON-SP; Prol Editora Gráfica, 2005. Disponível em: <https://smastr16.blob.core.windows.net/municipioverdeazul/2011/11/ManualConservacaoReusoAguaEdificacoes.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2025.

SELLA, M. B. **Reúso de águas cinzas: avaliação da viabilidade da implantação do sistema em residências**. 2011. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/34521/000789725.pdf>. Acesso em: 2 out. 2025.

SILVA, J. P. *et al.* Propriedades físicas e potencial de reaproveitamento de resíduos cerâmicos na construção civil. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 4, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/TftSvKgJjGPdwYZnXKf7LTS/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 15 maio 2025.

SILVA, R. R. da. *et al.* Propriedades físico-químicas de materiais cerâmicos reciclados para uso em engenharia sanitária. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 3, p. 473–480, 2021. Disponível em: <https://bibliotecatede.uninove.br/handle/tede/1157>. Acesso em: 13 maio 2025.

SOUSA, J. S. C. de. *et al.* Reuso de água cinza com sistema de tratamento simplificado. **Jornada de Iniciação Científica e Extensão**, São Paulo, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ifsertao-pe.edu.br/ojs2/index.php/jince/article/view/869>. Acesso em: 2 jun. 2025.

SOUZA, A. L. *et al.* Desempenho de materiais cerâmicos reciclados em sistemas de filtração descentralizada. **Revista Engenharia Ambiental**, São Paulo, v. 17, n. 3, p. 115–126, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/items/c2c52028-737d-4ece-b010-1f1313bb116d>. Acesso em: 12 jun. 2025.

TECHNE. Sistema de reúso de águas cinzas: soluções para o consumo consciente. **Revista Techne**, São Paulo, 2014. Disponível em: <https://techne.pini.com.br>. Acesso em: 28 ago. 2025.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014. Disponível em: https://www.academia.edu/39149408/Introdu%C3%A7%C3%A3o_%C3%A0_qualidade_das_%C3%A1guas_e_ao_tratamento_de_esgotos. Acesso em: 15 set. 2025.