

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO - CTC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Fernanda Paulino Colella

MELHORAMENTO DE MATERIAIS APLICADOS À FLOCULAÇÃO COM LASTRO
EM UM SISTEMA ACTIFLO[®] DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Florianópolis

2021

Fernanda Paulino Colella

MELHORAMENTO DE MATERIAIS APLICADOS À FLOCULAÇÃO COM LASTRO
EM UM SISTEMA ACTIFLO[®] DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Eng.
Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da
Universidade Federal de Santa Catarina como requisito
para a obtenção do título de Bacharel em Eng. Sanitária
e Ambiental

Orientadora: Prof.^a Maria Elisa Magri

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Colella, Fernanda
MELHORAMENTO DE MATERIAIS APLICADOS À FLOCULAÇÃO COM
LASTRO EM UM SISTEMA ACTIFLO® DE TRATAMENTO DE ÁGUA /
Fernanda Colella ; orientadora, Maria Elisa Magri, 2021.
49 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental,
Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Clarificação da
água. 3. ACTIFLO®. 4. Floculação com Lastro. 5.
Poliacrilamida aniônica. I. Magri, Maria Elisa. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

Fernanda Paulino Colella

MELHORAMENTO DE MATERIAIS APLICADOS À FLOCULAÇÃO COM LASTRO
EM UM SISTEMA ACTIFLO® DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheira Sanitarista e Ambiental e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental

Florianópolis, 11 de maio de 2021.

Prof.^a Maria Elisa Magri, Dr.^a
Coordenadora do Curso
Universidade Federal de Santa Catarina

Banca Examinadora:

Prof.^a Maria Elisa Magri, Dr.^a
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof., Dr.
Bruno Segalla Pizzolatti
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr.^a
Thyara C. Martins Nonato
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus amados pais, meus grandes exemplos e incentivadores.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Paulo e Cristina, por sempre me incentivarem na busca pelos meus sonhos e objetivos. Por terem me encorajado a continuar em todos os momentos difíceis ao longo desta graduação e por nunca me permitirem desistir, hoje sou muito grata por isso. Mas quero principalmente agradecer por estarem ao meu lado e me apoiarem com carinho e amor incondicional em todos os momentos da minha vida, vocês são tudo de mais importante para mim.

Agradeço aos membros da minha família, que contribuíram para me tornar quem sou hoje, me proporcionando carinho, aprendizados e princípios. Gostaria de agradecer também aos meus amigos, Ayumi, Fabiola, Paulo e Silvana que me acompanham desde o início e foram essenciais para eu ter chego até aqui. E um agradecimento especial ao meu namorado, Felipe, por sempre me incentivar a buscar minha melhor versão, por me acalmar nos momentos de nervosismo e por todo seu carinho e amor.

À Universidade Federal de Santa Catarina, ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental e seus professores, agradeço pelos inúmeros aprendizados, vivências e oportunidades de crescimento. Sem dúvidas foram cruciais no meu desenvolvimento pessoal e profissional. Finalizo este ciclo com novos olhares para as dificuldades que encontro em meu caminho, outras perspectivas para o futuro e muito mais respeito pelo meio ambiente.

Gostaria também de manifestar meu agradecimento especial a Prof.^a Maria Elisa Magri, que me deu suporte quando eu estava em intercâmbio na França e precisei bastante de sua ajuda para meu contrato de estágio. Professora, não é a toa que todos têm tanto carinho por você, toda sua dedicação e preocupação com os alunos faz a diferença! Obrigada por ter aceitado esta pesquisa realizada na França como modelo para meu Trabalho de Conclusão de Curso, por ser minha orientadora e partilhar seus conhecimentos comigo para construção e melhoria do mesmo.

Por fim, agradeço ao Professor Dr. Bruno Segalla Pizzolatti e a engenheira Dr.^a Thyara C. Martins Nonato, por aceitarem o convite para compor a minha banca avaliadora e por fornecerem suas considerações e recomendações.

A todos que fizeram parte da minha formação e contribuíram para a conclusão desta trajetória, sou muito grata!

“Do mesmo modo que o metal enferruja com a ociosidade e a água parada perde sua pureza, assim a inércia esgota a energia da mente.”

Leonardo Da Vinci

RESUMO

O setor de produção e distribuição de água potável deve atender a requisitos cada vez mais restritivos em relação à concentração de resíduos provenientes da poliacrilamida aniônica na água. Esta contaminação residual ocorre devido à aplicação deste polímero como floculante no processo de tratamento da água. Tais restrições são estabelecidas em função de sua caracterização nociva e cancerígena quando diluído na água. Visando atender a essas demandas, novas pesquisas vêm sendo desenvolvidas no mundo, buscando materiais modificados com desempenho superior aos utilizados atualmente. Um sistema clarificador de água desenvolvido pela empresa Veolia chamado ACTIFLO[®] apresenta a técnica de floculação com lastro como parte de seu processo. A floculação com lastro consiste na formação de flocos mais robustos e com maior peso específico. Estas características do floco conferem ao processo alta taxa de decantação. Sistemas ACTIFLO[®] são compactos, apresentam menor custo de implantação e operação, e fornecem água para abastecimento com alta qualidade. Neste contexto, este trabalho buscou avaliar um material formado pela combinação do agente de lastro (microareia GA39) e pelo floculante poliacrilamida aniônica (PAM AN934). Este material foi desenvolvido com o intuito de suprir ou reduzir a dosagem contínua do floculante PAM AN934 no sistema ACTIFLO[®]. O processo consiste em depositar partículas de ferro sobre os grãos de GA39 e em seguida adicionar PAM AN934 a esta mistura. Posteriormente, a pesquisa eliminou a etapa de depósito de ferro e a poliacrilamida foi adicionada diretamente aos grãos de microareia GA39. Diversas amostras foram produzidas a partir da variação da concentração dos reagentes, da temperatura e do tempo de secagem. As amostras foram então submetidas a testes de jarros com a finalidade de comparar seus desempenhos em redução da turbidez. Este parâmetro físico foi selecionado como fator comparativo por ser facilmente mensurado e preciso, em função do elevado volume de ensaios elaborados. As amostras com depósito de ferro apresentaram baixa eficiência na remoção de turbidez, fornecendo valores equivalentes ou acima de 5 UT. No entanto, as amostras em que o polímero foi adicionado diretamente à GA39 forneceram desempenho ótimo em remoção da turbidez (0,45 UT), visto que a água bruta apresenta 2,5 UT e permitiram redução em 81% da concentração de PAM AN934 adicionada à água. A possibilidade da produção de um material eficiente formado pela combinação agente de lastro e floculante representa avanço no processo de clarificação da água.

Palavras-chave: Clarificação da água. ACTIFLO[®]. Floculação com lastro. Microareia GA39. Poliacrilamida aniônica.

ABSTRACT

The field of production and distribution of drinking water must meet increasingly restrictive demands in relation to the concentration of residues from anionic polyacrylamide in water. This residual contamination occurs due to the application of this polymer as a flocculant in the water treatment process. Such restrictions are due to its harmful and carcinogenic characterization when diluted in water. Aiming to meet these demands, Veolia launched the search of modified materials with superior performance than those currently used. A water clarifying system developed by Veolia called ACTIFLO[®] presents the ballasted flocculation technique as part of its process. The ballasted flocculation consists on the formation of more robust flocs with a higher specific weight. These characteristics provides a higher decantation rate to the process. ACTIFLO[®] systems are compact, have a lower cost of implementation and operation, and produce water for supply with high quality. In this context, this work seeks to develop a material formed by the combination of the ballast agent and the polyacrylamide flocculant. This material is developed in order to supply or reduce the continuous dosage of the flocculant PAM AN934 in the ACTIFLO[®] system. The procedure performed in this study initially consists of depositing iron particles on GA39 grains and then adding PAM AN934 to this mixture. The second phase of the research eliminated the iron deposition step and the polyacrylamide was added directly to the GA39 microsand grains. Several samples were produced by varying the concentration of the reagents, the drying time and temperature. The samples are then subjected to jar tests in order to compare their performance in terms of turbidity abatement. This physical parameter was selected as a comparative factor because it is easily measured and accurate, due to the high volume of tests developed. Samples with iron deposits showed low efficiency in removing turbidity. However, with the samples which the polymer was added directly, optimum performance was achieved in terms of turbidity abatement (0.45 UT) with an 81% reduction in the concentration of PAM AN934 added to the water. The possibility of producing a material containing a ballast agent combined with the flocculant represents an advance in the water clarification process.

Keywords: Water clarification. ACTIFLO[®]. Ballasted flocculation. Microsand GA39. Anionic polyacrylamide.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- O processo ACTIFLO [®]	20
Figura 2- Localização da cidade de Gahard.	22
Figura 3- Processo Filtraflo [®] Carb.	24
Figura 4- Amostras de AreiaFe 1/100 após aquecimento, calcinação e lavagem, respectivamente.	27
Figura 5- MEV e EDX confirmando a presença de fragmentos de ferro (Spot 1) na superfície de SiO ₂ (Spot 2).	27
Figura 6- Comparação entre o comportamento das AreiaFe (linha azul) e a GA39 pura (linha laranja).....	28
Figura 7- Aglomerados formados nas AreiaFe 1/100 e 1/500, respectivamente.	31
Figura 8- Banco Jar Test.	35
Figura 9- Procedimento do ensaio dos testes de jarro.	35
Figura 10- Representação gráfica dos resultados de turbidez do Grupo 1.	41
Figura 11- Representação gráfica dos resultados de turbidez do Grupo 2.	42
Figura 12- Representação gráfica dos resultados de turbidez do Grupo 3.	43
Figura 13- Representação gráfica dos resultados de turbidez do Grupo 5.	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Procedimento de produção das amostras de GA39 com FeCl ₃ até a secagem.	31
Quadro 2- Caracterização qualitativa da água em cada ciclo de lavagem.	38
Quadro 3- Concentração de ferro total presente na água de lavagem.	39
Quadro 4- Detalhamento da massa de ferro remanescente nas amostras produzidas.	39
Quadro 5- Resultados de turbidez dos testes de jarros do Grupo 1 de amostras.....	40
Quadro 6- Resultados de turbidez dos testes de jarros do Grupo 2 de amostras.....	41
Quadro 7- Resultados dos testes de jarros comparativos do Grupo 4 de amostras. ...	44
Quadro 8- Resultados dos testes de jarros comparativos do Grupo 5 de amostras. ...	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características físicas GA39.	30
Tabela 2- Detalhamento da composição das amostras AreiaFe 1/100 e 1/500.	30
Tabela 3- Amostras de AreiaFe com depósito de polímero e seus procedimentos de secagem.	33
Tabela 4- Amostras de AreiaFe com variação da massa de polímero adicionada.	33
Tabela 5- Produção de novas amostras AreiaFe 1/100 com PAM AN934.	34
Tabela 6- Amostras de GA39 pura com depósito de PAM AN934.	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Actiareia Microareia GA39

AreiaFe Combinação de Actiareia com depósito de ferro

CAG Carvão Ativado Granular

EDX Espectroscopia de Raios X por Dispersão em Energia

ETA Estação de Tratamento de Água

Fe Ferro

FeCl₃ Cloreto de Ferro

Fe₂O₃ Óxido de Ferro

FeOOH Oxihidróxido de Ferro

G Gradiente de Velocidade

M Molar

MEV Microscopia Eletrônica de Varredura

UT Unidade de Turbidez Nefelométrica

OMS Organização Mundial da Saúde

PAM Poliacrilamida aniônica

UV Radiação Ultravioleta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL.....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	TRATAMENTO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO	17
3.2	PROCESSO DE CLARIFICAÇÃO DA ÁGUA.....	17
3.2.1	Floculação.....	17
3.2.2	Floculação com Lastro	18
3.3	O SISTEMA ACTIFLO®	19
3.3.1	Funcionamento do ACTIFLO®	20
3.3.2	Aplicações do ACTIFLO®	21
4	METODOLOGIA.....	22
4.1	LOCALIZAÇÃO DA ETA DE GAHARD.....	22
4.2	ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE GAHARD.....	22
4.2.1	Sequência de Tratamento da ETA de Gahard.....	23
4.2.1.1	<i>ACTIFLO® Softening.....</i>	23
4.2.1.2	<i>Filtraflo® Carb</i>	23
4.2.1.3	<i>Filtros de Areia e de CAG</i>	24
4.2.1.4	<i>Desinfecção.....</i>	25
4.3	MACRO PROJETO ACTIMAX.....	25
4.4	ESTUDO BASE PARA OS EXPERIMENTOS	26
4.5	MODIFICAÇÃO DA SUPERFÍCIE DA ACTIAREIA	29
4.5.1	Modificação da Actiareia com Cloreto de Ferro	29
4.5.1.1	<i>Reagentes e Materiais Utilizados</i>	29
4.5.1.2	<i>Procedimento de Modificação da Actiareia com Cloreto de Ferro.....</i>	30

4.5.2	Adição de Polímero às Amostras de AreiaFe	32
4.5.2.1	<i>Reagentes e Materiais Utilizados</i>	32
4.5.2.2	<i>Procedimento de Adição do Polímero</i>	32
4.5.3	Jar Tests Comparativos das Amostras de AreiaFe	34
4.5.3.1	<i>Método de Ensaio</i>	34
4.5.3.2	<i>Descrição dos Testes de Jarros Efetuados</i>	36
4.5.4	Adição de Polímero à Actiareia	36
4.5.4.1	<i>Reagentes e Materiais Utilizados</i>	36
4.5.4.2	<i>Procedimento de Adição do Polímero</i>	37
4.5.4.3	<i>Testes de jarro comparativos</i>	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1	CARACTERIZAÇÃO QUALITATIVA DAS AMOSTRAS PRODUZIDAS	38
5.2	AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DAS AMOSTRAS PRODUZIDAS	40
5.2.1	Amostras de microareia GA39 com adição de FeCl₃ e PAM AN934	40
5.2.2	Amostras de microareia GA39 com adição de PAM AN934	44
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	46
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

1 INTRODUÇÃO

O abastecimento de água, enquanto serviço necessário à manutenção da vida humana está inserido no conceito de saneamento básico, definido pela Organização Mundial da Saúde como o gerenciamento dos fatores físicos que podem exercer efeitos nocivos ao homem, prejudicando seu bem-estar físico, mental e social. Portanto, o saneamento engloba um conjunto de ações sobre o meio ambiente onde a população está inserida, objetivando fornecer condições de salubridade que protejam sua saúde (HELLER e PÁDUA, 2006). Segundo a Organização Mundial da Saúde, em 2017, 29% da população mundial não apresentava acesso a um serviço de água potável com gestão segura. Além disso, estima-se que em 2025 metade da população mundial estará vivendo em áreas com escassez de água (UNICEF e OMS, 2019).

Neste contexto, em que fica evidenciada a carência em relação ao abastecimento de água tratada e a alarmante escassez futura deste recurso natural, a indústria de tratamento de água vem há anos atuando na pesquisa e desenvolvimento de soluções para tais problemáticas. A Veolia Water Technologies desenvolveu, nos anos 90, o sistema de clarificação da água denominado ACTIFLO[®]. Esse sistema é compacto, ocupa menos de 10% do volume construtivo requerido por estações convencionais e, conseqüentemente, apresenta um custo de implantação reduzido (PLUM et al., 1998).

O grande diferencial do sistema ACTIFLO[®] consiste na aplicação da técnica de floculação com lastro. A floculação com lastro é um processo de clarificação avançado capaz de tratar o excesso de partículas coloidais e suspensas em águas naturais (QASIM et al., 2020). Esta técnica faz uso de microareia e polímero juntos para aumentar o peso dos flocos formados e a taxa na qual eles sedimentam, mudando drasticamente a mecanismo de coagulação-floculação-decantação (DESJARDINS et al., 2002).

As águas superficiais contêm cada vez mais substâncias de difícil tratamento. Novas partículas flutuantes, resíduos de medicamentos diluídos, crescente concentração de fósforo e a presença de algas na água, vêm apresentando-se como obstáculos no tratamento de água (LEE et al., 2014; PLUM et al., 1998). Além disso, polieletrólitos orgânicos como a poliácridamida (PAM) são comumente usados na indústria da água atuando como floculante. No entanto, potenciais efeitos adversos à saúde podem surgir com o uso de PAM devido à presença de traços de monômeros de acrilamida, considerados tóxicos e cancerígenos (LAPOINTE e BARBEAU, 2017).

Diante destas adversidades, este trabalho almejou modificar qualitativamente os grãos da microareia utilizada na floculação com lastro do sistema ACTIFLO[®] com o objetivo de tornar estas partículas mais eficientes no processo de clarificação da água. Igualmente, esta modificação objetivou tornar viável a adesão da poliacrilamida diretamente aos grãos da microareia possibilitando cessar a dosagem contínua de polímero na água sob a forma diluída.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar um processo que promova a alteração das características químicas da superfície de contato dos grãos de microareia GA39 empregada na técnica de floculação com lastro do sistema ACTIFLO[®] para o tratamento de água de abastecimento, visando reduzir a concentração de polímero adicionada à água e melhorar a eficiência do processo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Validar o protocolo de depósito de ferro sobre os grãos de microareia GA39 desenvolvido na Universidade McGill, no Canadá.
- Avaliar a eficiência das amostras de microareia GA39 modificadas em termos de abatimento de turbidez da água através de ensaios de Jar Tests comparativos.
- Promover a redução ou suspensão da dosagem contínua de PAM AN934 durante o processo de floculação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 TRATAMENTO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO

Segundo Pavanelli (2001), os sólidos dissolvidos na forma ionizada, compostos orgânicos dissolvidos, matéria em suspensão, como microrganismos e coloides, e gases dissolvidos representam as principais impurezas encontradas em águas superficiais. Sob o ponto de vista tecnológico, de acordo com Di Bernando e Dantas (2005), a água com qualquer qualidade pode teoricamente ser transformada em água com padrões de potabilidade e consequente consumo. No entanto, os custos e técnicas empregadas podem inviabilizar o uso de determinado curso d'água como fonte de abastecimento. Existe uma relação intrínseca envolvendo a qualidade da água e a técnica correta a ser utilizada para que o tratamento eficiente seja alcançado.

3.2 PROCESSO DE CLARIFICAÇÃO DA ÁGUA

A clarificação da água compreende uma sequência de processos de separação resultantes da manutenção das condições físico-químicas da água. Tal manutenção inicia com a adição de coagulantes e permite a eliminação dos sólidos em suspensão por sedimentação (MACEDO, 2007). A clarificação resulta na remoção de turbidez, cor e, de forma secundária, matéria orgânica natural. Este processo ocorre em quatro etapas distintas: coagulação, floculação, decantação e filtração (HELLER & PADUA, 2006).

3.2.1 Floculação

A floculação corresponde a um processo essencialmente físico e, segundo Freire et al. (2000), processos físicos apesar de não resultarem na degradação ou eliminação dos contaminantes, permitem a depuração dos mesmos e são de extrema importância para o bom desempenho das etapas seguintes do tratamento.

Na floculação, partículas mais volumosas, denominadas flocos, são formadas a partir do contato entre as espécies hidrolisadas durante a coagulação e as impurezas da água. Este é

um processo considerado de curta duração na sequência de tratamento da água e depende da quantidade de impurezas, do pH e da temperatura (MACEDO, 2007).

É comum a adição de um reagente químico durante o processo de floculação, denominado agente floculante, que tem como objetivo formar flocos mais robustos e densos, facilitando sua decantação (LEE et al., 2014). Segundo Radoiu et al. (2004), a utilização de floculantes não somente melhora a formação dos flocos como também pode reduzir o consumo de coagulantes e aumentar a capacidade de produção da estação de tratamento.

Polímeros sintéticos orgânicos são os agentes floculantes mais empregados no tratamento de água e, normalmente, são derivados de matérias-primas não renováveis, como os floculantes poliméricos. Dentre os mais utilizados, destacam-se aqueles a base de poliacrilamida (PAM), ácido poliacrílico, poli (cloreto de dialil dimetil amônio) e poliamina (SINGH et al., 2000).

3.2.2 Floculação com Lastro

O processo convencional de clarificação engloba as etapas de coagulação, floculação e sedimentação. De acordo com Lapointe e Barbeau (2018), estes processos representam um alto custo na indústria de tratamento de água em função da demanda de uma grande área para implantação e do elevado tempo de detenção hidráulico requerido.

Segundo Qasim et al. (2020), a floculação com lastro vem rapidamente ganhando atenção devido ao seu potencial em atingir elevadas velocidades de sedimentação superficial (≥ 100 m/h) dos flocos agregados, resultando em alta eficiência de clarificação. Esta tecnologia faz uso da injeção de grãos de lastro de grandeza microscópica durante a etapa de agregação dos flocos. Grãos de lastro comumente utilizados são as microareias. O aumento do tamanho e do peso específico dos flocos, ocasionados por esta técnica, acelera a velocidade de sedimentação. Os flocos gerados são então chamados de flocos de lastro.

A floculação com lastro envolve simultâneos e dinâmicos mecanismos como a agregação das partículas, fragmentação, remineralização, deposição e eventual ressuspensão, sendo assim um processo considerado complexo. As causas e efeitos de cada um dos mecanismos supracitados resultam na velocidade de sedimentação dos flocos de lastro (GARGALLO et al., 2018; LI. et al., 2019).

Os flocos de lastro apresentam características divergentes dos flocos comuns. Os flocos lastreados são compostos por um agregado híbrido, em que parte corresponde a frações

porosas provenientes do coagulante e parte é composta pelas partículas sólidas de microareia (QASIM et al., 2020).

Thompson et al.(2005) afirmam que a floculação com lastro é capaz de otimizar o processo de coagulação sem afetar a qualidade do floco, otimizando a remoção de compostos orgânicos e aumentando a probabilidade de atendimento aos padrões de qualidade da água. Outra vantagem deste processo citada por Thompson et al. (2005), é o aumento significativo da velocidade de sedimentação dos flocos, o qual acarreta maiores taxas de carregamento superficial. Estas taxas elevadas de carregamento superficial permitem plantas de clarificação menores, o que reduz custo e tempo de implantação. Ainda, a floculação com lastro possibilita a rápida resposta às mudanças na qualidade da água bruta a ser tratada. Isto ocorre devido ao curto tempo de detenção durante a floculação com lastro e a capacidade de alterar rapidamente a dosagem de substâncias influentes, como coagulante, microareia e polímero.

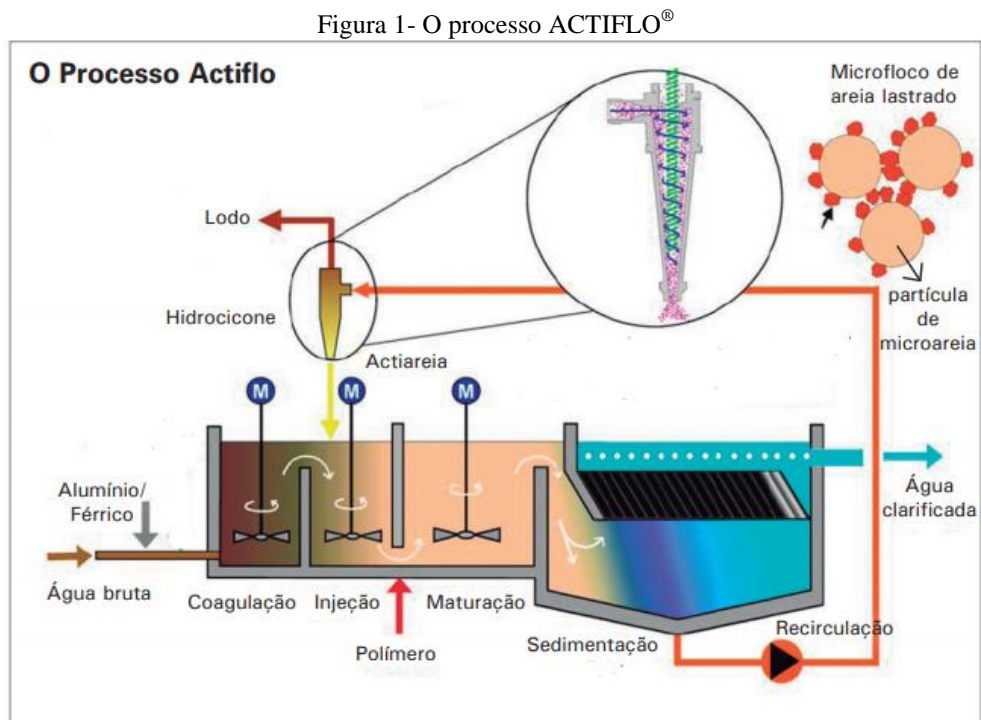
3.3 O SISTEMA ACTIFLO[®]

Grande parte das instalações de tratamento de água de superfície combinam os processos de coagulação, floculação e decantação, com o objetivo de remover as partículas coloidais e a matéria orgânica presente na água bruta. Nas últimas décadas, inúmeras tecnologias vêm sendo estudadas e desenvolvidas, visando reduzir a área necessária para implantação das estações de tratamento de água. Dentre estas inovações da indústria de tratamento de água, encontra-se o clarificador ACTIFLO[®] (DESJARDINS et al., 2002).

Este processo, comercialmente chamado ACTIFLO[®], faz uso da técnica de floculação com lastro e foi desenvolvido pelo grupo Veolia Water Solutions and Technologies nos anos 90. Na floculação lastreada do ACTIFLO[®] utiliza como lastro a microareia GA39. Os flocos lastreados conferem ao sistema taxa de sedimentação elevada e tempo de floculação de três a cinco vezes menor que o sistema convencional, permitindo a elaboração de projetos de clarificadores compactos (HILSDORF, 2013). Os projetos contendo unidades ACTIFLO[®] resultam em áreas de cobertura até 20 vezes menores que os sistemas de clarificação convencionais. Além da demanda de áreas menores para implantação, o ACTIFLO[®] apresenta alta eficiência na remoção de fósforo, matéria orgânica, sólidos suspensos e grande variedade de metais pesados (PLUM et al., 1998).

3.3.1 Funcionamento do ACTIFLO®

De acordo com Plum et al. (1998), o funcionamento do ACTIFLO® baseia-se na combinação dos processos de precipitação química e sedimentação lamelar. A sequência do tratamento se dá em quatro compartimentos, sendo o compartimento inicial de coagulação, seguido pelo tanque de injeção, tanque de maturação e por último, o decantador lamelar, como mostrado na Figura 1 (DESJARDINS et al.,2002).



Fonte: Hilsdorf (2013).

Segundo Desjardins et al.(2002), em condições normais de operação, o coagulante é injetado no tanque de coagulação, o qual é misturado rapidamente à água (tempo de contato de dois minutos) formando microflocos. Em seguida, no tanque de injeção, a microareia e o polímero são adicionados simultaneamente, no qual o tempo de contato de dois minutos permite a formação inicial de flocos. Ambos os tanques supracitados, de coagulação e injeção, são providos de injetores automatizados e misturadores de alta intensidade, viabilizando o tempo de contato reduzido. A água, ao fluir do tanque de injeção para o tanque de maturação, é então misturada lentamente durante seis minutos. Esta mistura, da água com o coagulante, polímero e microareia, permite a maturação dos flocos lastreados. De acordo com Plum et al. (1998), a incorporação da microareia a estes flocos torna-os mais pesados, aumentando sua

velocidade de sedimentação no decantador lamelar. O fluxo de retorno presente ao final do decantador lamelar é conduzido ao hidrociclone. No hidrociclone, a microareia é separada dos flocos e redirecionada ao tanque de injeção, visando manter a concentração média entre 3 e 10 g/L de microareia de reuso no processo ACTIFLO[®]. Ainda, Plum et al. (1998) explica que o fluxo de lodo do hidrociclone é descarregado no esgoto ou tratado, dependendo da função real da planta ACTIFLO[®]. Este fluxo de lodo normalmente representa 6% do fluxo total de água tratada.

3.3.2 Aplicações do ACTIFLO[®]

A Estação de Tratamento de água contendo o sistema ACTIFLO[®], além de compacta apresenta a vantagem de inicialização do seu processo em menos de 15 minutos, tempo que o sistema leva para apresentar performance eficiente. O ACTIFLO[®] é, portanto um método com diversas aplicações e está disponível em projetos de contêineres, permitindo soluções de tratamento temporárias e, se necessário, móveis (VEOLIA WATER TECHNOLOGIES).

Para a produção de água potável, o ACTIFLO[®] trata águas superficiais e subterrâneas. É um método particularmente eficaz na eliminação de turbidez, matéria orgânica natural, cor e algas. Para as necessidades específicas da indústria, o ACTIFLO[®] pode ser aplicado ao tratamento de água de processos industriais, sendo recomendado para o tratamento da água de reposição de torre de resfriamento e do pré-tratamento de alimentação de caldeira (LONGO, 2018).

De acordo com Longo (2018), o ACTIFLO[®] pode ser aplicado em todos os estágios do tratamento de águas residuais urbanas: clarificação primária e secundária, polimento terciário e reuso de águas residuárias. Este pode também ser implementado para o tratamento específico de águas pluviais e para a eliminação de fósforo da água, sendo compatível às mais restritas normas, apresentando reduções superiores a 95%. O processo ACTIFLO[®] pode ainda ser utilizado no tratamento de efluentes industriais. Ele é compatível, por exemplo, no tratamento e reciclagem da purga de torres industriais de resfriamento. E também é adequado para eliminar metais pesados, cinzas e finos de carvão em usinas de energia ou siderúrgicas.

4 METODOLOGIA

4.1 LOCALIZAÇÃO DA ETA DE GAHARD

Esta pesquisa foi realizada na Estação de Tratamento de Água localizada na cidade de Gahard, França (Figura 2).

Figura 2- Localização da cidade de Gahard.



Fonte: Google Maps.

A ETA é operada pelo Grupo Veolia, o qual além de operar o sistema de tratamento de água para distribuição de Gahard desenvolve projetos-piloto envolvendo a busca de melhorias nos processos de tratamento de água. A planta de Gahard conta com um laboratório onde são realizadas as análises de acompanhamento da qualidade da água para distribuição e também onde são desenvolvidos os projetos de pesquisa.

4.2 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE GAHARD

Gahard é uma pequena comunidade francesa localizada na região da Bretanha. Em Gahard está situada uma Estação de Tratamento de Água gerenciada pelo Sindicato Misto de Produção de Água Potável da Bacia de Couesnon e operada pela empresa Veolia

Environnement. A Bacia de Couesnon agrupa 10 municípios, com consumo total de 510.000 m³ de água por ano e atende à 10.000 habitantes.

4.2.1 Sequência de Tratamento da ETA de Gahard

A sequência de tratamento da ETA de Gahard é composta, nesta ordem, por uma unidade do ACTIFLO[®] Softening, um filtro de fluxo ascendente denominado FILTRAFLO[®] Carb, quatro filtros de areia e dois filtros de Carvão Ativado Granular (CAG), seguidos por um sistema de desinfecção por cloração. Em 2018, a Estação de Gahard recebeu um volume médio mensal de 34.034 m³ de água bruta e produziu o total de 349.702 m³ de água tratada (VEOLIA EAU RENNES, 2018).

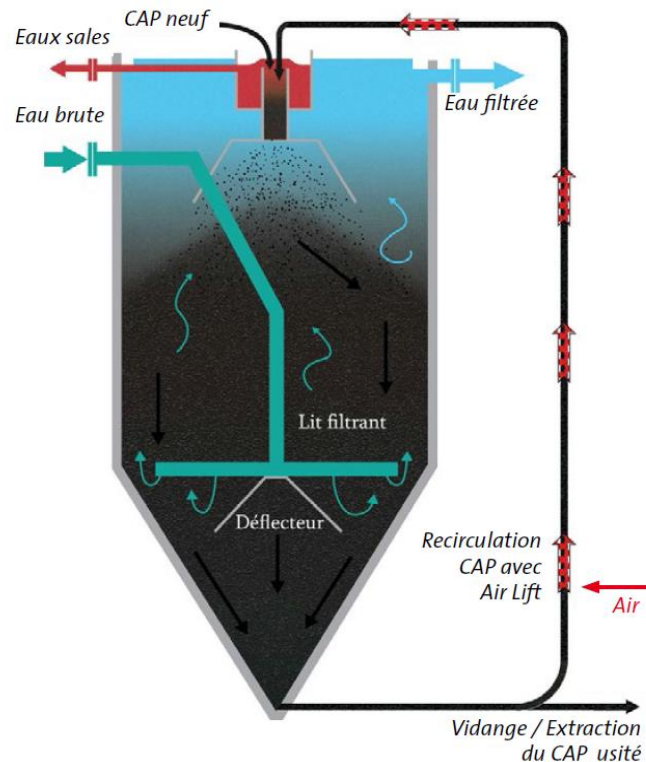
4.2.1.1 ACTIFLO[®] Softening

O ACTIFLO[®] Softening é responsável por eliminar a dureza e a alcalinidade da água através da combinação dos processos de clarificação e abrandamento em uma única unidade compacta. Este processo proporciona um tratamento otimizado e elimina diversos contaminantes como a sílica, metais pesados, fluoretos e fosfatos, bem como sólidos suspensos totais e matéria orgânica (VEOLIA WATER TECHNOLOGIES).

4.2.1.2 Filtraflo[®] Carb

O Filtraflo[®] Carb (Figura 3) é um sistema de tratamento secundário que apresenta fluxo rápido ascendente de filtração da água através de meio granular. O princípio deste processo corresponde à adsorção da matéria orgânica e dos micropoluentes pelo carvão ativado granular e à filtração da água através da camada formada pelos grãos de carvão. Isto permite o tratamento da matéria orgânica e o abatimento da turbidez utilizando a camada filtrante de CAG. Ainda, nenhum reagente químico é adicionado nesta etapa do tratamento e o carvão ativado é regenerado termicamente (VEOLIA WATER TECHNOLOGIES).

Figura 3- Processo Filtraflo® Carb.



Legenda: **Cap neuf**- Carvão Ativado Granular novo, **Eaux sales**- Águas residuais, **Eau brute**- Água bruta, **Eau filtrée**- Água filtrada, **Lit filtrant**- Leito filtrante, **Déflecteur**- Defletor, Massa total de ferro na água dos ciclos de lavagem, **Vidange/Extraction de CAP usité**- Extração de Carvão Ativado usado, **Recirculation CAP avec Air Lift**- Recirculação de Carvão ativado granular com Air Lift, **Air**- Entrada de ar.

Fonte: Veolia Water Technologies.

4.2.1.3 Filtros de Areia e de CAG

Nos quatro filtros de areia a camada filtrante é formada por grãos de areia de granulometria média de 1.052 μm através da qual a água flui à uma velocidade relativamente baixa. Esta filtração acontece por gravidade onde o filtro retém a matéria em suspensão reproduzindo mecanismos naturais.

Os dois filtros de carvão ativado granular utilizam o mesmo princípio dos filtros de areia. Neste caso, sobre as superfícies granulares, forma-se um biofilme e as substâncias dissolvidas na água, bem como as partículas sólidas são fixadas sobre a superfície de carvão ativado formando um leito filtrante. Estes dois filtros são regularmente submetidos à retrolavagem com o objetivo de eliminar os sólidos retidos e parte do biofilme que forma-se na superfície do filtro (LONGO, 2018).

4.2.1.4 Desinfecção

A desinfecção representa a última etapa do tratamento de água para fins potáveis, previamente a sua distribuição. Na Estação de Tratamento de Água de Gahard a desinfecção da água é feita com cloro líquido para eliminar bactérias, micróbios, vírus e outros microrganismos patógenos (LONGO, 2018).

4.3 MACRO PROJETO ACTIMAX

A pesquisa desenvolvida no presente trabalho de conclusão de curso fez parte do projeto ACTIMAX, desenvolvido pela Veolia Water Technologies. Este projeto engloba uma série de ensaios e desenvolvimento de melhorias relacionadas ao processo ACTIFLO[®]. Entre as melhorias almejadas, podemos citar a redução do consumo de energia, redução das áreas ocupadas pelas estações de tratamento de água e a pesquisa de agentes de lastro mais eficazes. Este estudo, relativo ao projeto ACTIMAX, teve como foco o desenvolvimento e pesquisa de melhorias nas partículas da microareia utilizada no processo ACTIFLO[®] como agente de lastro. O propósito de modificar a microareia GA39 também decorre da necessidade de resolver um dos grandes desafios do processo ACTIFLO[®]: a dosagem contínua de poliácrilamida aniônica como floculante. A porcentagem de acrilamida presente neste polímero é inferior a outros tipos de polímero, mas é significativa (200 µg de acrilamida/g de polímero) e potencialmente nociva à saúde humana. Para a água potável, a Portaria 2.914 (2011) estabelece a concentração de acrilamida equivalente 0,5 µg/L como valor máximo permitido (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2011).

No estudo realizado em Gahard, a microareia utilizada possui a nomenclatura técnica GA39 e é produzida especificamente para o processo ACTIFLO[®], sendo chamada comercialmente de Actiareia.

A fim de propiciar estas melhorias, o método testado busca modificar as características químicas da superfície do grão de microareia, sem que sua composição mineral sofra alterações.

4.4 ESTUDO BASE PARA OS EXPERIMENTOS

A Universidade McGill, situada em Montreal, Canadá, realizou para a Veolia Water Technologies um estudo no qual foi depositado óxido de ferro (Fe_2O_3) na superfície de contato da Actiareia (GA39). Os objetivos deste estudo, solicitado à Universidade McGill e elaborado pelos pesquisadores Christian Scott e Alan Gadbois, consistiram em explorar diferentes alternativas para melhorar a ligação e interação do polímero à superfície da microareia GA39, preservando o desempenho ótimo oferecido por estes materiais durante a floculação com lastro. Os procedimentos realizados neste estudo serão descritos detalhadamente a seguir.

A quantidade do componente ferro (Fe) adicionado à Actiareia na forma de óxido de ferro (Fe_2O_3) pode variar entre 69, 0,138 e 0,069 mmoles de Fe. Estas soluções formadas são nomeadas da seguinte forma: 1x AreiaFe (69 mmoles de Fe), 1/500x AreiaFe (0,138 mmoles de Fe) e 1/1000x (0,069 mmoles de Fe) AreiaFe, respectivamente. Esta adição de Fe_2O_3 à microareia GA39 representa a primeira etapa do procedimento e AreiaFe é o nome criado para nomear as soluções base deste experimento.

Preparadas as amostras base (AreiaFe), foram adicionados 80 ml de solução de Cloreto de Ferro (III) com concentração molar 2,5M à 100 ml da amostra 1x AreiaFe. Esta mistura foi levada ao forno e aquecida à 110°C durante 3 horas, e por fim foi misturada manualmente a cada 15 minutos durante este período. Este procedimento tinha como objetivo permitir a nucleação das partículas de microareia e a oxidação inicial do óxido de ferro (Fe_2O_3) adicionado na primeira etapa do procedimento. Em seguida, foi reduzido o tempo de aquecimento aplicado em nova amostra de 1/500x AreiaFe, passando de três horas para uma hora, a fim de determinar o efeito da diminuição da etapa de nucleação. Após a secagem, as amostras foram calcinadas à 550°C ao longo de 3 horas para oxidar o ferro e converter o ferro restante em partículas livres de oxihidróxido de ferro (FeOOH), elemento que apresenta elevada estabilidade química.

Após a calcinação, as amostras foram submetidas ao procedimento de lavagem para eliminar o ferro residual ou mal fixado à superfície da microareia. Para a lavagem, foi usada água deionizada, solvente puro e isento de íons. A turbidez desta água decantada foi aferida a cada lavagem e a amostra de AreiaFe foi considerada própria para dar prosseguimento aos ensaios quando a turbidez resultante estabilizou, cessando seu decaimento. Os aspectos finais

das amostras AreiaFe 1/100 após o aquecimento (110°C), calcinação (550°C) e lavagem, respectivamente, são mostrados na Figura 4.

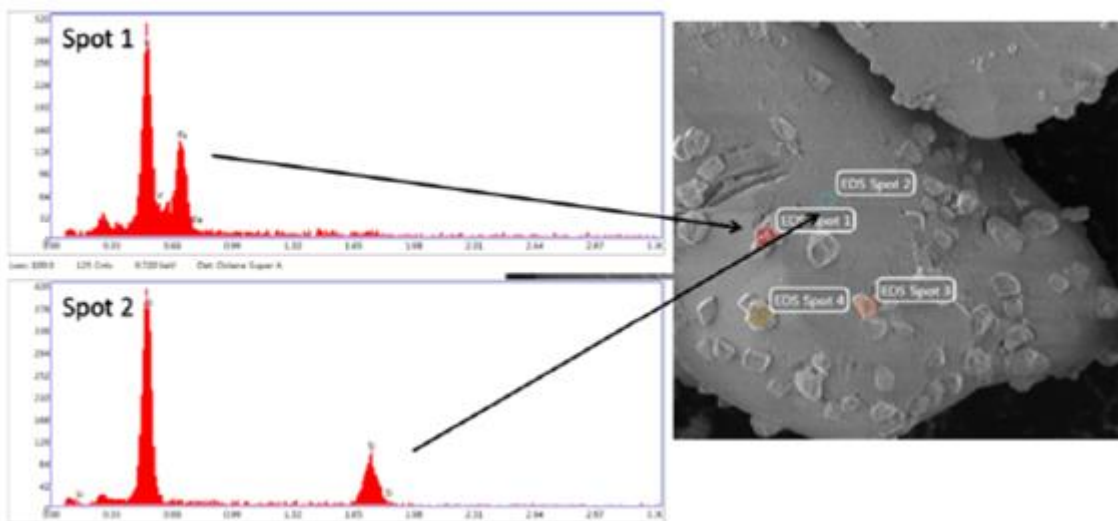
Figura 4- Amostras de AreiaFe 1/100 após aquecimento, calcinação e lavagem, respectivamente.



Fonte: Universidade McGill, 2019.

Para as amostras de AreiaFe 1/500 x e 1/1000 x, o valor de estabilização da turbidez resultou em aproximadamente 3 UT. Comparando com a turbidez de apenas uma lavagem da microareia GA39 pura (1,82 UT), fica evidenciado que quantidade considerável de ferro foi liberado na água de lavagem. A análise inicial por microscopia eletrônica de varredura (MEV) associada à espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDX), indicou a presença de óxido de ferro nas amostras 1x e 1/100x AreiaFe. O resultado da espectroscopia, que confirma a presença de óxido de ferro sobre a superfície de SiO_2 , é apresentado na Figura 5.

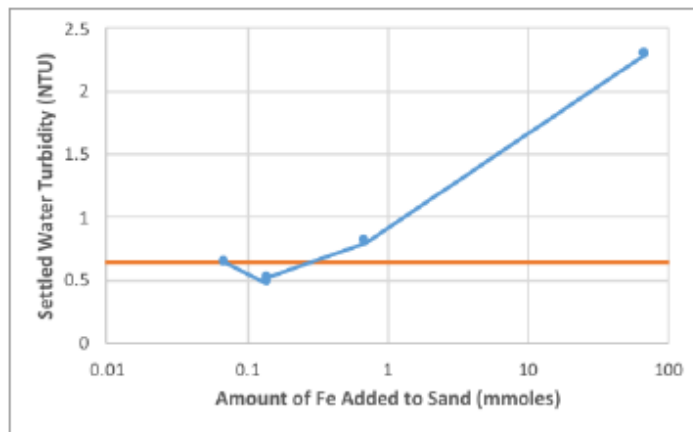
Figura 5- MEV e EDX confirmando a presença de fragmentos de ferro (Spot 1) na superfície de SiO_2 (Spot 2).



Fonte: Universidade McGill, 2019.

Para determinar a eficiência de cada AreiaFe produzida em comparação ao desempenho da microareia GA39, Jar Tests foram realizados. A Figura 6 demonstra o comportamento da turbidez da água de lavagem decantada em relação ao teor de ferro adicionado às amostras. A curva laranja, com turbidez constante equivalente a 0,64 UT, corresponde ao resultado observado com a Actiareia convencional (GA39). As amostras 1/1000x e 1/500x AreiaFe apresentaram comportamento similar à GA39. Por sua vez, a amostra 1/100x AreiaFe, a qual não atingiu turbidez inferior a 30 UT durante os ciclos de lavagem, manifestou turbidez inferior a 1 UT ao curso dos testes de jarro. Em contrapartida, a 1x AreiaFe forneceu elevada quantidade de resíduo de ferro à água, inviabilizando a clarificação desejada.

Figura 6- Comparação entre o comportamento das AreiaFe (linha azul) e a GA39 pura (linha laranja).



Fonte: Universidade McGill, 2019.

Tendo em vista a problemática da adição contínua de PAM na água, após a preparação das amostras de AreiaFe e verificação de seus desempenhos nos Jar Tests, a etapa seguinte deste estudo consiste em testar a aderência do polímero aos grãos de AreiaFe. Para isto, foi adicionado em cada AreiaFe o polímero PAM à concentração de 50 mg/L. Em seguida, as amostras formadas foram misturadas manualmente e submetidas a duas lavagens para eliminar o polímero em excesso. Finalmente, os testes de jarro foram executados objetivando a comparação de suas performances. Dentre as amostras comparadas nos Jar Tests, constam: AreiaFe com depósito de polímero em sua superfície, GA39 com depósito de polímero e GA39 (matriz).

Todas as AreiaFe, com exceção da 1x AreiaFe, apresentaram clarificação melhorada em relação a GA39 que não havia sido previamente revestida com ferro e polímero. Além

disso, as AreiaFe 1/100x e 1/1500x também apresentaram melhor clarificação comparadas à GA39, sendo neste caso todas revestidas com polímero. Entretanto, mostrou-se necessária a adição de PAM à água para obtenção de resultados de turbidez inferiores à 1 UT. Com o acréscimo de 0,025 mg de PAM/L, a AreiaFe 1/500x (0,82 UT) reduziu em 40% a turbidez comparada a microareia GA39 pura (1,36 UT). Enquanto a AreiaFe 1/1000x mostrou igualmente melhora na clarificação, com turbidez resultante de 0,94 UT para a mesma concentração de polímero adicionado à água (0,025 mg PAM/L).

Esta pesquisa desenvolvida pela Universidade McGill elencou as seguintes conclusões:

- As modificações propostas e ensaiadas nas partículas de microareia GA39 criam depósitos superficiais de óxido de ferro de diferentes tamanhos e espessuras, ao modificar a concentração de ferro adicionada e a duração da permanência das amostras no forno.
- A AreiaFe 1/500x mostrou-se mais eficaz que a microareia GA39 para clarificação da água.
- A incorporação do polímero às amostras de microareia reduz consideravelmente a concentração de PAM a ser adicionado no decorrer do processo de floculação com lastro do ACTIFLO[®] (redução de 70% com a AreiaFe 1/500x). Com a GA39 esta redução limitou-se a 35%.

O presente trabalho visa replicar este estudo e contestar os resultados obtidos.

4.5 MODIFICAÇÃO DA SUPERFÍCIE DA ACTIAREIA

Inspirando-se no estudo da Universidade McGill, modificações foram submetidas ao material Actiareia em busca de reproduzir a pesquisa desenvolvida e alcançar resultados com desempenho similar.

4.5.1 Modificação da Actiareia com Cloreto de Ferro

4.5.1.1 Reagentes e Materiais Utilizados

A Actiareia consiste na microareia produzida para ser empregada como agente de lastro no processo ACTIFLO[®] e possui propriedades físicas específicas determinadas para tornar viável sua aplicação no sistema. Suas principais propriedades são elencadas na Tabela 1.

Tabela 1- Características físicas GA39.

Parâmetro	Valor
Granulometria (μm)	115
Densidade (g/mL)	2,5
Massa específica (kg/m^3)	2.500
Superfície específica grão (m^2)	3.9×10^{-8}

Fonte: Elaboração da autora (2021).

Na Estação de Tratamento de Água de Gahard, o cloro férrico (FeCl_3) é utilizado como coagulante no processo de clarificação da água. Por questão de disponibilidade, este foi o reagente depositado na superfície da Actiareia. Para a planta de Gahard, este reagente é fornecido na concentração de 1430 g/L. Esta solução comercial possui concentração de ferro (Fe) equivalente à 185 g/L. Tendo em vista replicar o experimento de McGill e obter então o cloro férrico na concentração 2,5M, a solução comercial de FeCl_3 foi diluída 3,5 vezes, atingindo a concentração de 408,5 g/L sendo 52,9 g/L a concentração de ferro (Fe).

4.5.1.2 Procedimento de Modificação da Actiareia com Cloreto de Ferro

Tendo em vista os resultados satisfatórios de clarificação fornecidos pelas AreiaFe 1/100x e 1/500x, optou-se pela produção apenas destes dois tipos de amostra. Em cada amostra, AreiaFe 1/100 e AreiaFe 1/500, foi adicionada à GA39 pura a concentração de ferro equivalente a 0,69 mmol e 0,14 mmol, respectivamente. Para esta preparação, 800 μL e 160 μL de FeCl_3 2,5 M foram acrescentados a 100 mL de GA39. As quantidades de microareia GA39 e ferro que foram utilizadas nesta etapa do estudo são sintetizadas na Tabela 2. É importante ressaltar que diversas amostras foram produzidas e armazenadas para futuras comparações de desempenho.

Tabela 2- Detalhamento da composição das amostras AreiaFe 1/100 e 1/500.

AreiaFe	1/100	1/500
Massa de GA39 (g)	140	140
Volume de GA39 (mL)	100	100
Volume de FeCl_3 2,5M (μL)	800	160
FeCl_3 (mmoles)	2	0,4
Fe (mmoles)	0,69	0,14
Massa de Fe (mg)	41	8,3

Fonte: Elaboração da autora (2021).

Em seguida, as amostras de GA39 com FeCl_3 foram aquecidas à 105°C e misturadas manualmente a cada 15 minutos, durante 3 horas. O procedimento foi efetuado para duas novas amostras AreiaFe 1/100 e AreiaFe 1/500, em que a única variante foi a temperatura de aquecimento. Estas amostras foram submetidas à temperatura de 550°C . O Quadro 1 contém a composição de cada amostra preparada e seu respectivo procedimento de secagem.

Quadro 1- Procedimento de produção das amostras de GA39 com FeCl_3 até a secagem.

Nomenclatura da amostra	Volume microareia GA39 (mL)	Volume de FeCl_3 2,5M (μL)	Secagem		
			Temperatura	Procedimento e tempo	Objetivo
AreiaFe 1/100 (105°C)	140	800	105°C (Estufa)	Homogeneização durante 3 horas	Eliminar o hidróxido de ferro ($\text{Fe}(\text{OH})_3$)
AreiaFe 1/500 (105°C)		160			
AreiaFe 1/100 (550°C)		800	550°C (Forno de mufla)	Calcinação durante 3 horas	Formar oxihidróxido de ferro (FeOOH)
AreiaFe 1/500 (550°C)		160			

Fonte: Elaboração da autora (2021).

Após o procedimento supracitado, foi registrada a presença de aglomerados de microareia GA39 com cloreto de ferro (FeCl_3) nas amostras, como é apresentado na Figura 7.

Figura 7- Aglomerados formados nas AreiaFe 1/100 e 1/500, respectivamente.



Fonte: Fotos retiradas pela autora (2019).

A fim de buscar resultado homogêneo, as amostras foram passadas através da peneira granulométrica com abertura de $300\ \mu\text{m}$.

Depois da secagem, foi iniciado o processo de lavagem das amostras com o objetivo de eliminar o ferro mal fixado à superfície da microareia. Para isso, 300 mL de água deionizada foram adicionados às amostras e estas foram agitadas na placa de testes de jarro na velocidade de 300 rotações por minuto (rpm) durante 3 minutos e, em seguida, permaneceram decantando por 1 minuto. Este procedimento visou simular o processo de sedimentação aplicado aos testes de jarro. A turbidez da água decantada foi mensurada periodicamente, após cada procedimento de lavagem. A amostra foi considerada própria para uso quando turbidez resultante parou de variar. Para as amostras produzidas foram necessárias sete lavagens até a estabilização da turbidez.

4.5.2 Adição de Polímero às Amostras de AreiaFe

4.5.2.1 Reagentes e Materiais Utilizados

Nesta etapa do estudo, foi adicionado polímero às amostras anteriormente preparadas. Estas amostras foram compostas pela combinação da Actiareia, ferro e polímero. O polímero utilizado na planta possui a nomenclatura técnica PAM AN934 e é fornecido na concentração de 2 g/L.

4.5.2.2 Procedimento de Adição do Polímero

Almejando a mistura com qualidade e a fim de assegurar que todos os grãos da microareia entrariam em contato com o polímero, aproximadamente 75 mL de água deionizada foram adicionados a cada amostra.

Em seguida, o polímero na forma líquida foi adicionado para formar a amostra constituída por 140 g de AreiaFe (microareia GA39 com cloreto férrico) e 4 mg de polímero AN934. Nesta etapa, todas as amostras receberam a mesma quantidade de polímero. A diferença na sua preparação consistiu no método de secagem. As amostras que permaneceram a temperatura de 105°C previamente foram novamente submetidas a esta temperatura durante 12 horas. No entanto, aquelas que na preparação da AreiaFe calcinaram a 550°C, permaneceram secando naturalmente (temperatura ambiente). Estas condições de variação da

de temperatura para produção de amostras foram determinadas ao longo da pesquisa, a partir da observação dos resultados iniciais obtidos.

Este procedimento resultou em quatro diferentes amostras que compõe os Grupos 1 e 2 de amostras e são elencadas com seus respectivos procedimentos de secagem na Tabela 3.

Tabela 3- Amostras de AreiaFe com depósito de polímero e seus procedimentos de secagem.

Grupo	Nomenclatura da amostra	Procedimento de secagem
1	AreiaFe 1/100 (105°C)	Estufa à 105°C durante 12 horas
1	AreiaFe 1/100 (550°C)	Secagem à temperatura ambiente
2	AreiaFe 1/500 (105°C)	Estufa à 105°C durante 12 horas
2	AreiaFe 1/500 (550°C)	Secagem à temperatura ambiente

Fonte: Elaboração da autora (2021).

Posteriormente, focando no desempenho da microareia GA39 com a concentração de 1/100 de FeCl₃, AreiaFe 1/100, 40 mg de polímero foram adicionados buscando comparar sua performance ao aumentar a concentração de polímero. Estas amostras foram colocadas na estufa a 50°C por 12 horas. Aqui buscou-se submeter as amostras a uma temperatura levemente reduzida (50°C ao invés de 105°C) com o objetivo de verificar se esta redução interfere no desempenho das amostras. Estas novas amostras AreiaFe 1/100 que foram produzidas constituem o Grupo 3 de amostras e seu processo de preparação é mostrado na Tabela 4.

Tabela 4- Amostras de AreiaFe com variação da massa de polímero adicionada.

Nomenclatura da amostra	Massa de PAM AN934 adicionada (mg)	Procedimento de secagem
AreiaFe 1/100 (105°C) + 4 mg PAM AN934	4	Estufa à 50°C durante 12 horas
AreiaFe 1/100 (105°C) + 40 mg PAM AN934	40	Estufa à 50°C durante 12 horas

Fonte: Elaboração da autora (2021).

Ainda, dando continuidade ao desenvolvimento das amostras AreiaFe 1/100 com deposição do polímero PAM AN934 [2 g/l], dois novos testes foram realizados. Esta etapa de adição de polímero, com ênfase nas amostras AreiaFe 1/100, buscou variar os procedimentos

de preparação das amostras finais para termos de comparação das eficiências. Além disso, buscou a maneira mais efetiva para obtenção de boa fixação do polímero sobre os grãos de microareia. Um novo conjunto de amostras finais (Grupo 4) foram produzidas nesta etapa do estudo e a Tabela 5 apresenta seus procedimentos de produção.

Tabela 5- Produção de novas amostras AreiaFe 1/100 com PAM AN934.

Nomenclatura da amostra base	Massa de PAM AN934 adicionada (mg)	Procedimento de mistura/secagem	Nomenclatura da amostra resultante
AreiaFe 1/100 (105°C)	5	Secagem à temperatura ambiente	A1
		Estufa à 50°C durante 12 horas	A2
		Adição de 100 mL de água DI e posterior secagem à temperatura ambiente	A3
AreiaFe 1/100 (550°C)	5	Secagem à temperatura ambiente	A4
		Estufa à 50°C durante 12 horas	A5
		Adição de 100 mL de água DI e posterior secagem à temperatura ambiente	A6

Fonte: Elaboração da autora (2021).

4.5.3 Jar Tests Comparativos das Amostras de AreiaFe

4.5.3.1 Método de Ensaio

Os Testes de Jarros são amplamente empregados em estações de tratamento de água para determinação das dosagens ótimas e parâmetros básicos de funcionamento. Nesta pesquisa os jar tests foram também efetuados para compreender as características e comportamento das amostras produzidas buscando compará-las com a microareia GA39 pura, tida como referência. A Figura 8 apresenta o aparelho de teste de jarros utilizado no laboratório da Estação de Tratamento de Água de Gahard.

Figura 8- Banco Jar Test.

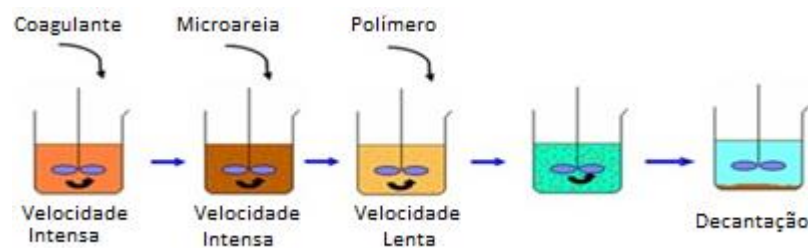


Fonte: Foto tirada pela autora (2019).

Todos os Jar Tests realizados nesta pesquisa seguem o procedimento padrão do método ACTIFLO[®], onde primeiro adiciona-se o coagulante e em seguida a microareia. Estes dois componentes são adicionados no processo de mistura rápida, equivalente a 300 rotações por minuto ($G= 360 \text{ s}^{-1}$) e agitados durante dois minutos. Por último, o floculante é adicionado e a velocidade dos agitadores é reduzida para 120 rotações por minuto ($G= 90 \text{ s}^{-1}$), passando para a mistura lenta com duração de dois minutos. Após o desligamento dos agitadores, a água é decantada pelo período de 3 minutos e é coletada a amostra de água para análise.

Os jarros utilizados possuem um litro de capacidade e foram introduzidos 800 mL de água em cada um. A água utilizada nos testes de jarros é a água bruta da estação de Gahard, que apresenta turbidez de 2,5 UT. O coagulante empregado é o cloro férrico (FeCl_3) com concentração de 1430 mg/L e 120 ppm são injetados em cada bocal. A Figura 9 ilustra as etapas do ensaio.

Figura 9- Procedimento do ensaio dos testes de jarro.



Fonte: Elaboração da autora (2019). Adaptado de Veolia.

4.5.3.2 Descrição dos Testes de Jarros Efetuados

Para comparação das amostras de AreiaFe com a GA39 pura, diversas variações foram aplicadas aos testes de jarro. Após cada teste de jarro, a turbidez da água decantada foi mensurada no Tubidímetro HACH. O parâmetro turbidez da água foi definido como critério para comparação da eficácia das amostras desenvolvidas. Devido a grande variedade de amostras, a elaboração dos testes de jarro foi segmentada por grupo de amostra.

O Grupo 1 e Grupo 2 de amostras AreiaFe foram comparados separadamente. Em ambos foram aplicados três cenários diferentes durante a realização dos testes de jarro. No primeiro cenário, não foi depositado polímero nas amostras e não foi adicionado polímero como floculante na água no teste de jarro. O Cenário 2 consiste também em amostras com ausência de depósito do polímero, sendo assim sua matriz composta apenas pela microareia GA39 e ferro. Neste cenário (2) foi dosada a concentração de 0,13 ppm de polímero durante o teste de jarro. No terceiro e último cenário foram utilizadas as amostras foco deste estudo, com depósito de ferro e polímero PAM AN934, mas sem a dosagem de polímero na água.

O Grupo 3 de amostras, produzido a partir da AreiaFe 1/100 com depósito de 4 mg e 40 mg de polímero, foi também submetido ao teste de jarros com o objetivo de comparar suas performances em termos de abatimento da turbidez. Neste conjunto de testes não foi adicionado polímero à água na etapa que ensaia a floculação.

Nos jar tests efetuados para comparar os desempenhos das amostras constituintes do Grupo 4 o fator variante foi a concentração de polímero PAM AN934 adicionado durante o processo como floculante. As concentrações adicionadas foram inferiores ao método de referência (0,13 ppm) e correspondem a 0,025 e 0,05 ppm. Em um dos jarros não foi adicionado polímero à título de comparação.

4.5.4 Adição de Polímero à Actiareia

4.5.4.1 Reagentes e Materiais Utilizados

Nesta etapa da pesquisa, o polímero foi adicionado diretamente à Actiareia pura, sem o depósito prévio de ferro como nas amostras anteriores. O polímero usado é o AN934 e apresenta concentração de 2 g/L.

4.5.4.2 Procedimento de Adição do Polímero

A massa de Actiareia que compõe todas as amostras preparadas neste estudo corresponde a 140 gramas. Foram adicionados 5 mg do polímero AN934 e em seguida a amostra foi devidamente misturada até atingir a homogeneização. Após a adição do polímero e sua mistura, diferentes condições foram aplicadas para produção de amostras distintas. As amostras produzidas nesta etapa do estudo compõe o Grupo 5 e suas condições de produção encontram-se descritas na Tabela 6.

Tabela 6- Amostras de GA39 pura com depósito de PAM AN934.

Nomenclatura da amostra base	Massa de PAM AN934 adicionada (mg)	Procedimento de mistura/secagem	Nomenclatura da amostra resultante
Microareia GA39	5	Secagem à temperatura ambiente	A7
		Estufa à 50°C durante 12 horas	A8
		Adição de 100 mL de água DI e posterior secagem na estufa à 50°C durante 12 horas	A9
		Adição de 100 mL de água DI e posterior secagem à temperatura ambiente	A10

Fonte: Elaboração da autora (2021).

4.5.4.3 Testes de jarro comparativos

Seguindo o mesmo método de ensaio descrito no subcapítulo 4.5.3.1, são realizados Jar Tests para confrontar as performances das quatro amostras produzidas nesta fase do estudo. Nestes ensaios, a variação aplicada foi a concentração do polímero dosado na água. As concentrações injetadas foram as seguintes: 0 (referência); 0,025; 0,05; 0,1; e 0,2 ppm. Estas concentrações foram adicionadas em cada jarro para uma mesma amostra e este procedimento foi repetido para cada uma das amostras produzidas (A7, A8, A8 e A10).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO QUALITATIVA DAS AMOSTRAS PRODUZIDAS

O depósito de ferro na Actiareia (GA39) busca modificar a superfície de contato dos grãos tornando-os compatíveis a adesão do polímero. A reprodução do estudo realizado na Universidade McGill, no ano de 2019 no Canadá, produzindo amostras de microareia e polímero, tinha como objetivo tornar dispensável a adição contínua de poliacrilamida na água durante o processo de floculação com lastro.

O aspecto físico analisado neste estudo foi a turbidez. É recomendado pela Organização Mundial da Saúde (OMS) que este parâmetro não exceda o valor de 1 Unidade de turbidez nefelométrica (UT) antes da desinfecção (OMS, 2017).

Para verificar a eficiência da etapa inicial de deposição do ferro à microareia, as três amostras base deste estudo, Areia Fe 1/100, AreiaFe 1/500 e microareia GA39 pura (referência), foram submetidas à sete ciclos de lavagem. Os valores de turbidez obtidos nos ciclos de lavagem para cada amostra são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2- Caracterização qualitativa da água em cada ciclo de lavagem.

Ciclo de lavagem	1	2	3	4	5	6	7
Amostra	Turbidez (UT)						
AreiaFe 1/100	115	65	46	38	21	18	16
AreiaFe 1/500	177	108	75	52	33	23	13
GA39	237	95	55	30	20	15,5	11

Fonte: Elaboração da autora (2021).

Foram realizados dez ciclos de lavagem e foi possível observar que após o sétimo ciclo de lavagem a turbidez da água cessou seu decréscimo, permanecendo constante. A estabilidade da turbidez foi adotada como indicador de que a amostra encontrava-se própria para teste, sem partículas de ferro mal associadas aos grãos de Actiareia das amostras AreiaFe 1/100 e AreiaFe 1/500.

Em complemento as análises de turbidez, o teor de ferro na água de lavagem das amostras AreiaFe 1/100 e AreiaFe 1/500 foi mensurado pelo método instrumental por espectrofotometria UV/Visível espectrofotométrico. Este método permite a determinação de ferro total em amostras de água para abastecimento através de reação de complexação com a

ortofenantrolina. Este reagente, ao entrar em contato com o ferro ferroso produz um complexo avermelhado, obedecendo a Lei de Beer-Lambert, em que a intensidade da coloração é diretamente proporcional à concentração de ferro (MENDHAM et al, 2002). O Quadro 3 apresenta as concentrações de ferro total obtidas.

Quadro 3- Concentração de ferro total presente na água de lavagem.

Ciclo de lavagem	1	2	3	4	5	6	7
Amostra	Concentração de Ferro (mg/L)						
AreiaFe 1/100	0,79	0,3	0,19	0,15	0,15	0,16	0,14
AreiaFe 1/500	0,08	0,06	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01

Fonte: Elaboração da autora (2021).

A partir dos valores de concentração de Fe observados nos ciclos de lavagem através do método instrumental por espectrofotometria UV/Visível, estimou-se o valor total de Fe desprendido na água. Este valor possibilitou o cálculo aproximado da massa de ferro que permanece sobre os grãos de microareia em comparação a massa total depositada inicialmente (Quadro 4). Os resultados percentuais obtidos indicam a validação do método de depósito de ferro desenvolvida na Universidade McGill, no Canadá.

Quadro 4- Detalhamento da massa de ferro remanescente nas amostras produzidas.

Amostra	M Fe (mg)	C Fe líquido-CL (mg/L)	M Fe- CL (mg)	M Fe- Amostras (mg)	Porcentagem Fe- Amostras
Areia Fe 1/100	41	1,88	1,29	39,71	97%
Areia Fe 1/500	8,3	0,23	0,16	8,14	98%

Legenda: **M Fe**- Massa de ferro adicionada à amostra, **C Fe-CL**- Concentração de ferro total líquido mensurado na água dos ciclos de lavagem, **M Fe-CL**- Massa total de ferro na água dos ciclos de lavagem, **M Fe- Amostras**- Massa de ferro remanescente nas amostras produzidas.

Fonte: Elaboração da autora (2021).

5.2 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DAS AMOSTRAS PRODUZIDAS

No estudo de modificação da Actiareia com adição de componentes químicos dois grupos de amostras finais foram formados. O primeiro grupo é composto pela mistura da matriz de GA39 com cloreto de ferro (FeCl_3) e posterior adição de PAM AN934 e o outro grupo é formado pela combinação de microareia GA39 e polímero PAM AN934.

5.2.1 Amostras de microareia GA39 com adição de FeCl_3 e PAM AN934

Após realizada a verificação que o ferro estava satisfatoriamente aderido à GA39 (Quadro 4), foram iniciados os testes de jarros para comparar o desempenho das amostras.

A seguir, no Quadro 5, são expostos os resultados médios de turbidez obtidos nos jar tests das amostras pertencentes ao Grupo 1. Este Grupo é composto pela GA39 pura (referência), AreiaFe 1/100 (105°C) e AreiaFe 1/100 (550°C), e foram realizados pelo menos cinco jar tests com cada amostra produzida. Buscou-se comparar o desempenho destas três amostras em três cenários distintos. Em todos os cenários, a dosagem de coagulante equivale à 120 mg/L (FeCl_3) e são adicionados 800 mL de água bruta em cada jarro. No entanto, no primeiro cenário as três amostras não possuem depósito de poliacrilamida e esta também não é adicionada na água. O cenário 2 é composto por amostras com ausência de depósito de PAM AN934 e 0,13 ppm de PAM AN934 foram injetados na água (protocolo de tratamento padrão da ETA de Gahard). E, por último, no terceiro cenário são utilizadas as amostras piloto deste estudo, com adição de ferro e depósito de 4 mg (0,14 ppm) de PAM AN934, sem a injeção de polímero na água.

Quadro 5- Resultados de turbidez dos testes de jarros do Grupo 1 de amostras.

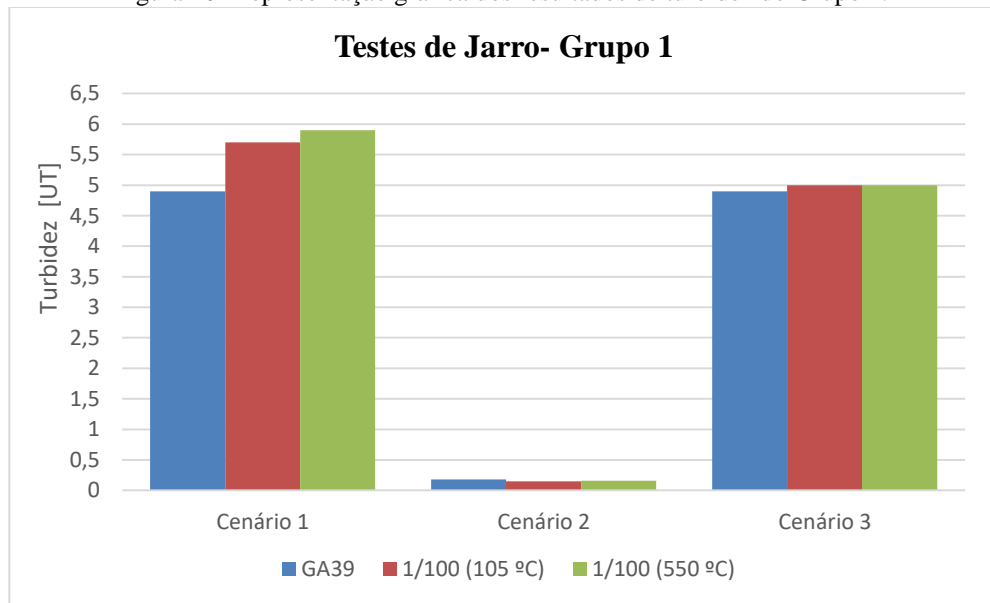
Cenário	1	2	3
Amostra	Turbidez (UT)		
GA39	4,9	0,18	4,9
AreiFe 1/100 (105°C)	5,7	0,15	5,7
AreiFe 1/100 (550°C)	5,9	0,16	5

Fonte: Elaboração da autora (2021).

A Figura 10 apresenta os resultados elencados no Quadro 5, fornecendo a comparação gráfica destes valores. É possível observar que o depósito de 4 mg de polímero às

amostras (cenário 3) não é eficaz em termos de abatimento da turbidez da água. Valores próximos ou superiores a 5 UT tornam este cenário inadequado visto que os valores obtidos estão sendo comparados a remoção de turbidez alcançada pelo método padrão da ETA. Este método da ETA adotado como referência, onde 0,13 ppm de PAM AN934 são injetados diretamente na água (cenário 2) fornece água clarificada com resultados de turbidez igual ou inferior à 0,18 UT.

Figura 10- Representação gráfica dos resultados de turbidez do Grupo 1.



Fonte: Elaboração da autora (2021).

O Grupo 2, composto pela Actiareia (referência) e as amostra AreiaFe 1/500 (105°) e AreiaFe 1/500 (550°), foi submetido aos jar tests variando os três cenários supracitados. Os resultados de turbidez da água clarificada são elencados no Quadro 6.

Quadro 6- Resultados de turbidez dos testes de jarros do Grupo 2 de amostras.

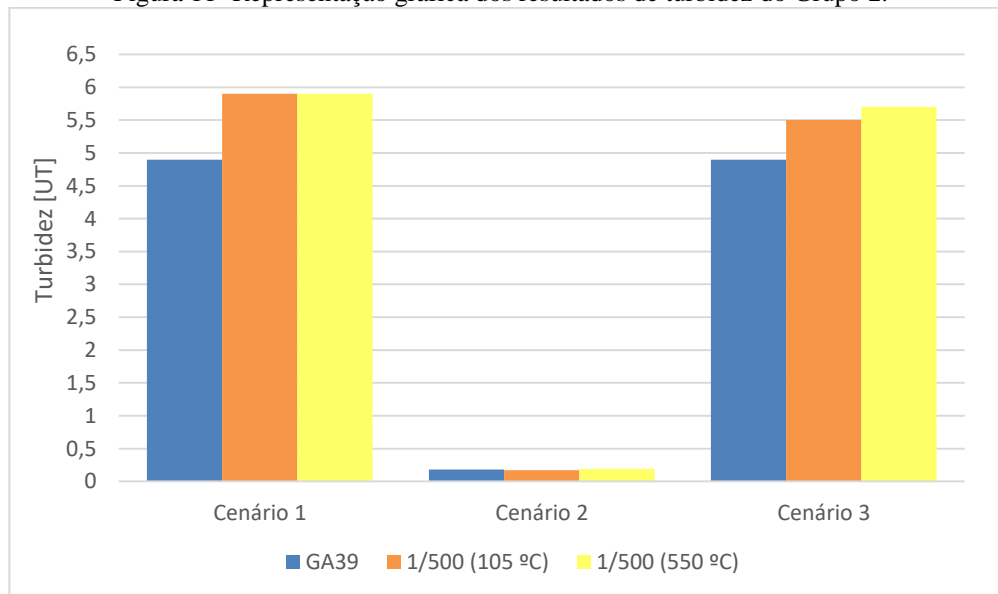
Cenário	1	2	3
Amostra	Turbidez (UT)		
GA39	4,9	0,18	4,9
AreiFe 1/500 (105°C)	5,9	0,17	5,7
AreiFe 1/500 (550°C)	5,9	0,19	5

Fonte: Elaboração da autora (2021).

A título de comparação, a Figura 11 apresenta o desempenho na remoção da turbidez das amostras do Grupo 2 nos três cenários avaliados. Os dois conjuntos de testes de jarros

efetuados (Grupo 1 e 2) evidenciaram que o método de expor as amostras à elevada temperatura (550°C) não fornece maior adesão entre os grãos de microareia e polímero. Este procedimento, com custo superior em função do gasto energético da mufla, não apresentou melhora nos resultados.

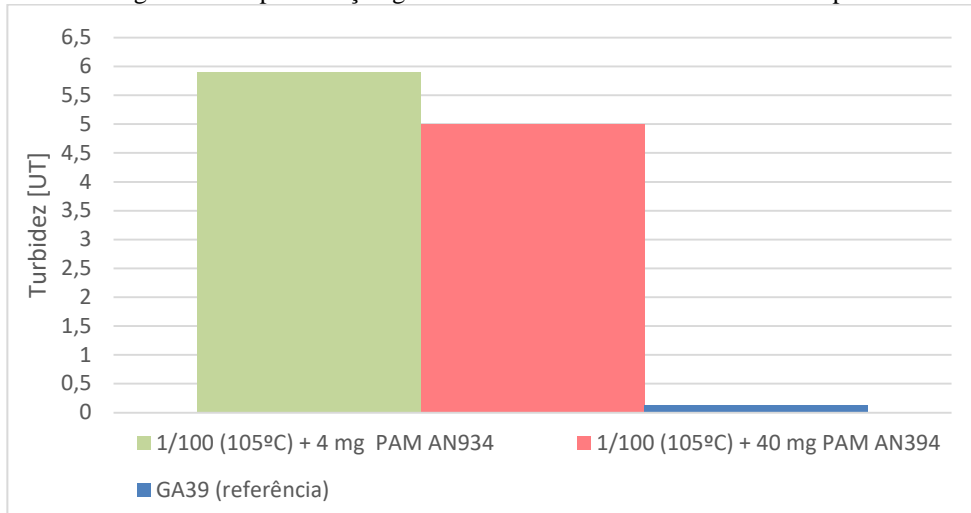
Figura 11- Representação gráfica dos resultados de turbidez do Grupo 2.



Fonte: Elaboração da autora (2021).

Em seguida, o foco foi direcionado às amostras AreiaFe 1/100 (105 ° C). Além da amostra AreiaFe 1/100 (105°) com depósito de 4 mg de PAM AN934 analisada anteriormente, foi produzida a amostra AreiaFe 1/100 com depósito de 40 mg de polímero. As duas amostras supracitadas e a GA39 pura (referência) foram avaliadas nesta nova etapa de testes de jarros, formando o Grupo 3. Nesta sequência de jar tests o procedimento padrão foi seguido para o jarro com Actiareia pura (adição do coagulante, microareia e de 0,13 ppm de polímero na água), enquanto nos outros bocais foram adicionados somente o coagulante (FeCl₃) e a AreiaFe 1/100 com depósito de PAM AN934 (sem dosagem de floculante na água). A Figura 12 apresenta os resultados de turbidez fornecidos pelas amostras do Grupo 3 e foi possível observar a ineficácia na redução deste parâmetro quando comparado ao método atual de floculação (referência).

Figura 12- Representação gráfica dos resultados de turbidez do Grupo 3.



Fonte: Elaboração da autora (2021).

Mantido o propósito de produzir novas amostras a partir da AreiaFe 1/100 (105° e 550°), 5 mg de PAM AN934 foram adicionados a 140 g de GA39 (composição para cada amostra), e aplicados diferentes procedimentos de secagem, formando seis novas amostras (Tabela 5). Das amostras formadas, três provêm da AreiaFe 1/100 (105°) (A1, A2 e A3) e as demais da AreiaFe 1/100 (550°) (A4, A5 e A6). Estas seis amostras compõem o Grupo 4.

Visto que a dosagem de polímero na água mostrou-se necessária para o abatimento satisfatório da turbidez, o objetivo neste estágio do estudo foi verificar a possibilidade de redução da concentração a ser adicionada. Para isso, o parâmetro variante entre estes novos testes de jarros, além da natureza das amostras, foi a concentração de PAM AN934 injetada na água (0; 0,025; 0,05 ppm).

O Quadro 7 a seguir contém os resultados dos valores médios de turbidez obtidos nos jar tests comparativos entre as amostras do Grupo 4 (cinco testes realizados com cada amostra). Nota-se que a dosagem de 0,05 ppm de polímero na água não forneceu remoção considerável da turbidez com a GA39 pura mantendo-se com melhor desempenho. Os valores elevados de turbidez em comparação ao alcançado no método clássico (0,18 UT) invalida a aplicabilidade das amostras produzidas na escala real de tratamento da água.

Quadro 7- Resultados dos testes de jarros comparativos do Grupo 4 de amostras.

Amostra	Concentração de PAM AN934 adicionada à água (ppm)		
	0	0,025	0,05
	Turbidez resultante (UT)		
GA39	4,9	4,2	2,8
A1	10,5	9,4	8,4
A2	13	8,9	7,4
A3	10,2	9,4	5,5
A4	8,1	5,4	5
A5	7,3	6,2	5,5
A6	8,4	6,3	4,6

Fonte: Elaboração da autora (2021).

Nesta sequência de testes foi contestado que as amostras oferecem melhor redução em termos de abatimento da turbidez, quando adicionados à água 0,025 ou 0,05 ppm de polímero. No entanto, para todas as amostras produzidas, os valores de turbidez não atendem aos padrões requeridos para o consumo de água (< 1 UT)(OMS, 2017).

5.2.2 Amostras de microareia GA39 com adição de PAM AN934

Observados os resultados insatisfatórios em termos de abatimento da turbidez utilizando como agente de lastro as amostras de microareia com depósito de ferro em sua superfície, buscou-se explorar uma nova estratégia. Neste novo grupo de ensaios o polímero PAM AN934 foi depositado diretamente aos grãos de GA39 produzindo quatro novas amostras (Grupo 5). Foram adicionados 5 mg de polímero a 140 g de GA39 para formar cada amostra, e estas foram submetidas a procedimentos diferenciados de secagem. Este método deu origem às amostras A7, A8, A9 e A10. Ainda, nos testes de jarros reproduzidos nesta etapa foram variadas as concentrações de polímero injetado na água (0; 0,025; 0,05; 0,1; 0,2 ppm). Tais variações tiveram como objetivo alcançar vasto conjunto de resultados para confrontá-los com o valor de turbidez obtido no método clássico de tratamento da ETA de Gahard. Os resultados estão contidos no Quadro 8 e consistem em valores médios obtidos a partir de cinco testes de jarros realizados com cada amostra.

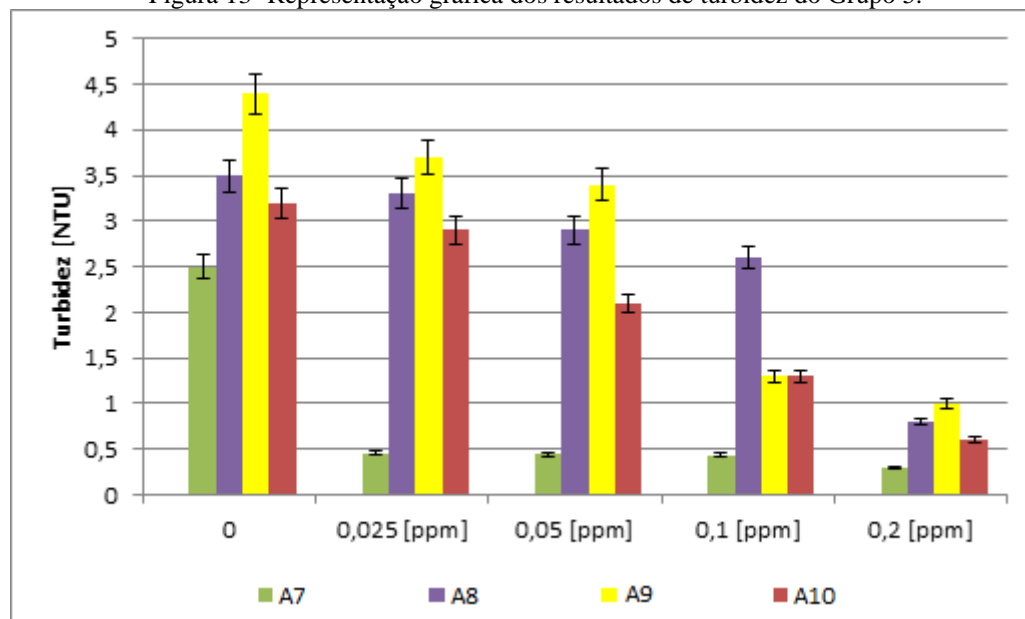
Quadro 8- Resultados dos testes de jarros comparativos do Grupo 5 de amostras.

Amostra	Concentração de PAM AN934 adicionada à água (ppm)				
	0	0,025	0,05	0,1	0,2
	Turbidez resultante (UT)				
GA39	4,9	4,2	2,8	0,78	0,09
A7	2,5	0,45	0,44	0,43	0,3
A8	3,5	3,3	2,9	2,6	0,8
A9	4,4	3,7	3,4	1,3	1
A10	3,2	2,9	2,1	1,3	0,6

Fonte: Elaboração da autora (2021).

Nota-se a partir dos resultados obtidos que as amostras de GA39 com deposição de polímero têm capacidade de abatimento da turbidez significativamente maior que a microareia GA39 pura. Mesmo quando foi dosada irrisória concentração de polímero na água (0,025 ppm) a amostra A7 apresentou desempenho ótimo na remoção da turbidez. Foi atingido o valor de 0,45 UT, sendo a turbidez inicial da água bruta equivalente a 2,5 UT (82% de remoção). Os jar tests comparativos desta etapa foram repetidos sistematicamente (cinco vezes para cada amostra) objetivando verificar a confiabilidade dos resultados. Foi constatada a presença de flutuação relativamente pequena dos valores encontrados que a qual é representada no gráfico pelos intervalos de erro (Figura 13).

Figura 13- Representação gráfica dos resultados de turbidez do Grupo 5.



Fonte: Elaboração da autora (2021).

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Promover alterações químicas na superfície dos grãos da microareia GA39, empregada como agente de lastro no sistema clarificador ACTIFLO[®], tem como finalidade eliminar ou reduzir a dosagem contínua de poliacrilamida no tratamento da água. Procedimentos diversos foram aplicados no desenvolvimento das amostras deste estudo, como variação de concentração dos reagentes, variação de temperatura, e do tempo e método de secagem.

A adição de cloreto de ferro (FeCl_3) à Actiareia buscou formar grãos com maior adesão ao polímero PAM AN934. Estas amostras, denominadas AreiaFe, foram submetidas a testes de jarro comparativos e apresentaram resultados bastante elevados do parâmetro de turbidez. Os resultados mostraram-se insatisfatórios em relação aos obtidos com o método padrão de tratamento aplicado na ETA de Gahard. Constatada a impossibilidade de eliminar a dosagem de polímero com as amostras AreiaFe, a concentração adicionada foi reduzida. No entanto, a amostra com melhor desempenho (A6) forneceu água com turbidez elevada (4,6 UT) e muito acima do valor alcançado com o método de referência aplicado à Estação de Tratamento de Água de Gahard, inviabilizando a continuação desta linha de pesquisa.

Observados os resultados, adveio o novo procedimento que consistiu em depositar o polímero PAM AN934 diretamente nos grãos de GA39 e reduzir a concentração da dosagem adicionada à água. Este experimento forneceu resultados excelentes de remoção da turbidez da água. A amostra A7 apresentou ótimo desempenho em termos de abatimento da turbidez (0,45 UT) permitindo a redução em 81% da concentração de PAM AN934 dosado na água. Esta amostra (A7) apresentou constância de resultados promissores durante a repetição dos ensaios realizados para verificar a confiabilidade e reprodutibilidade do método desenvolvido.

Este estudo teve seu desdobramento embasado em tentativas e erros, no qual a produção de cada novo grupo de amostras consistiu na tentativa de produzir uma amostra mais eficaz em termos de remoção da turbidez e que viabilizasse a redução da concentração de polímero dosada na água. Esta metodologia buscava associar o desempenho da amostra ao seu método de produção (temperatura e tempo de secagem, mistura), e, portanto diversas adaptações de variações foram aplicadas para analisar as interferências que causariam nas performances das amostras. Este processo de definição de próximas etapas a partir de

resultados obtidos envolveu apenas raciocínio lógico algumas tomadas de decisão, o que dificultou justificativas com embasamento teórico em algumas fases da pesquisa.

Ainda sim, os resultados satisfatórios da adição de PAM AN934 diretamente à GA39 motivam a continuação da pesquisa e recomenda-se a realização de nova série de ensaios para validar o método proposto. Confirmada a eficácia da amostra produzida em termos de abatimento da turbidez, deve-se iniciar uma pesquisa que englobe variados parâmetros de análise de qualidade de água, além da turbidez. Recomenda-se ainda a experimentação da amostra em escala real e, por fim, verificada sua eficiência, realizar o estudo da viabilidade da produção deste material em larga escala.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DESJARDINS, Christian; KOUDJONOU, Boniface; DESJARDINS, Boniface. **Laboratory study of ballasted flocculation. Water Research**, Montréal, v. 36 , p. 744-754, 2002.

DI BERNARDO, Luiz; DANTAS, Angela Di Bernardo. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. São Paulo, 2005.

FREIRE, Renato Sanches et al. NOVAS TENDÊNCIAS PARA O TRATAMENTO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS CONTENDO ESPÉCIES ORGANOCOLORADAS. **QUÍMICA NOVA**. Campinas, 2000. p. 504-511.

GARGALLO, S.; SOLIMENO, A.; MARTÍN, M. **Which are the most sensitive parameters for suspended solids modelling in free water surface constructed wetlands?** Environ. Model. Softw, p. 115–119. 2018.

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano**. 1º Ed. Minas Gerais: UFMG, 2006.

HILSDORF, Antonio Sérgio Carvalho. **Tratamento Terciário Actiflo™Carb: Remoção de Orgânicos Solúveis Refratários**. São Paulo, 2013.

LAPOINTE, Mathieu; BARBEAU, Benoit. **Dual starch–polyacrylamide polymer system for improved flocculation.** *Water Research*, [S.L.], v. 124, p. 202-209, nov. 2017. Elsevier BV.

LAPOINTE, Mathieu; BARBEAU, Benoit. **Selection of media for the design of ballasted flocculation processes.** *Water Research*, [S.L.], v. 147, p. 25-32, dez. 2018. Elsevier BV.

LAPOINTE, Mathieu; BARBEAU, Benoit. **Substituting polyacrylamide with an activated starch polymer during ballasted flocculation.** *Journal Of Water Process Engineering*, [S.L.], v. 28, p. 129-134, abr. 2019. Elsevier BV.

LAPOINTE, Mathieu; BARBEAU, Benoit. **Understanding the roles and characterizing the intrinsic properties of synthetic vs. natural polymers to improve clarification through interparticle Bridging: a review.** *Separation And Purification Technology*, [S.L.], v. 231, p. 115893, jan. 2020. Elsevier BV.

LEE, Chai Siah; ROBINSON, John; CHONG, Mei Fong. **A review on application of flocculants in wastewater treatment.** *Process Safety And Environmental Protection*, [S.L.], v. 92, n. 6, p. 489-508, nov. 2014. Elsevier BV.

LI, Y. et al., **Filtration and dewatering of the mixture of quartz and kaolinite in different proportions,** *J. Colloid Interface Sci.* p. 731–739, 2019.

LONGO, Eleonora. **Research and Developement of New Clarification Processes with Ballasted Flocculation.** University of Pavia, 2018.

MACEDO, J. A. B. **Águas & Águas.** 3º Ed. Minas Gerais: CRQ – MG, 2007.

MENDHAM, J., DENNEY, R. C., BARNES, J. D., THOMAS, M. J. K.; Vogel, **Análise Química Quantitativa;** 6ª edição. LTC editora. Rio de Janeiro, 2002.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. **Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.**

PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada.** São Carlos, SP. 233p. (Dissertação Mestrado) – Universidade de São Paulo, 2001.

PLUM, Victoria. The Actiflo method. **Water Science And Technology**, Denmark, v. 37, n. 1, p. 269-275, 1998. IWA Publishing.

QASIM, Muhammad; PARK, Seongjun; KIM, Jong-Oh. **The role of ballast specific gravity and velocity gradient in ballasted flocculation.** **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 399, p. 122970, nov. 2020. Elsevier BV.

QASIM, Muhammad; PARK, Seongjun; MOON, Yonggeol; KIM, Jong-Oh. **Developing a model to determine the settling velocity of ballasted flocs.** **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [S.L.], v. 8, n. 6, p. 104515, dez. 2020. Elsevier BV.

RADOIU, M.T. et al., **Preparation of polyelectrolytes for wastewater treatment.** **Journal of Hazardous Materials** 106, 2004.

SINGH, R. et al. **Biodegradable drag reducing agents and flocculants based on polysaccharides: materials and applications.** **Polymer Engineering & Science**, 2000

THOMPSON, Donald; MOORE, Richard; HACKWORTH, David. **Ballasted Sedimentation Boosts Floc Settling.** **Opflow**, [S.L.], v. 31, n. 6, p. 14-17, jun. 2005. Wiley.

UNICEF & OMS. **Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017. Special focus on inequalities.** New York, 2019.

VEOLIA. **Veolia Eau Rennes.** 2018. Disponível em: <https://www.eau.veolia.fr/>. Acesso em: 05 mar. 2021.

WORLD HEALTH ORGANIZATION, et al., **Water Quality and Health-Review of Turbidity: Information for Regulators and Water Suppliers**, 2017.