



REMOÇÃO DE FERRO EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DE POÇOS TUBULARES EM UMA INDÚSTRIA DE BENEFICIAMENTO DE ARROZ

Kelly Mendes Marcelino¹

Aline Resmini Melo²

Carolina Resmini Melo Marques³

Tatiani Malgarise Brolesi⁴

Débora De Pellegrin Campos⁵

Resumo: A água é de importância vital para todos os seres vivos, no entanto, vem enfrentando uma crescente escassez e por consequência atingindo a população mundial. Como alternativa de abastecimento, os recursos hídricos subterrâneos têm se tornado de vital importância. Apesar de uma maior proteção dos contaminantes, as condições físico químicas no ambiente subterrâneo favorecem a dissolução de ferro em teores elevados, limitando a utilização da água para uso doméstico e industrial. Por este motivo, a água subterrânea utilizada para abastecer uma indústria de beneficiamento de arroz vem causando problemas de incrustação e corrosão nas tubulações da caldeira, tendo consequências econômicas e de segurança. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o teor de ferro encontrado na água subterrânea a fim de remover o ferro através do uso de uma bancada de tratamento de efluente, na qual foi feita a comparação de dois flocculantes, sulfato de alumínio e sulfato férrico. As águas subterrâneas foram tratadas e realizaram-se análises de teor de ferro e pH para verificação da qualidade da água. Os resultados das análises mostraram que com a utilização do sulfato de alumínio o teor de ferro se apresentou abaixo do limite máximo permitido pela Resolução do CONAMA 20/86 que é 0,3mg/l e com a utilização do sulfato férrico se apresentou com o teor deste elemento elevado. Esses resultados possibilitaram verificar que o flocculante sulfato de alumínio obteve melhor desempenho para a remoção do ferro e também economicamente para uso na indústria, porém com relação a troca de tubulação a implantação de uma estação de tratamento de água não será praticável devido ao custo. Entretanto, o problema não se resume apenas a economia, mas também a segurança e dentre as consequências, riscos de explosão.

Palavras-Chave: Água subterrânea, Remoção de ferro, Poços tubulares, Tratamento de água.

¹ Graduanda em Engenharia Química, Faculdade Satc. E-mail: kellymarcelino@live.com

² Coordenadora do curso de Engenharia Química, Faculdade Satc. E-mail: aline.melo@satc.edu.br

³ Professora de Engenharia Química, Faculdade Satc. E-mail: carolina.melo@satc.edu.br

⁴ Professora de Engenharia Química, Faculdade Satc. E-mail: tatiani.brolesi@satc.edu.br

⁵ Professora de Engenharia Química, Faculdade Satc. E-mail: debora.campos@satc.edu.br



1 INTRODUÇÃO

A crescente escassez de água que atinge grande parte da população mundial faz com que os recursos hídricos subterrâneos tenham se tornado uma importante alternativa de abastecimento. A alternativa para as práticas industriais e para o abastecimento doméstico é a água subterrânea, porém o ciclo hidrológico encontra-se alterado e a recarga dos aquíferos encontra-se também prejudicada. Cerca de 60% do abastecimento de água se dá por meio de poços (públicos ou particulares) ou nascentes na propriedade (BAUMGARTEN; PAIVA; RODRIGUES, 2014, MENEZES; SILVA JUNIOR; SANTOS, 2007).

Apesar de uma maior proteção dos contaminantes externos, as águas subterrâneas podem apresentar problemas de qualidade e, dentre esses, um dos mais frequentes consiste na presença de ferro em concentrações elevadas (água ferruginosa), limitando, algumas vezes, a utilização da água tanto para uso doméstico como industrial. Ainda que o organismo humano necessita de até 19 mg de ferro por dia, os padrões de potabilidade exigem que uma água de abastecimento público não ultrapasse os 0,3 mg/l. Este limite é estabelecido em função de problemas estéticos relacionados à presença do ferro na água e do sabor ruim que o ferro lhe confere. No sistema de tratamento, a presença de ferro na água pode implicar na sua precipitação nos filtros e/ou no pré-filtro de poços, reduzindo a eficiência destes. Assim sendo, é importante que a água apresente baixos teores de ferro dissolvido (BAUMGARTEN; PAIVA; RODRIGUES, 2014, OLIVEIRA; SCHMIDT, FREITAS, 2003).

Os íons de ferro e manganês em águas destinadas ao abastecimento causam depósitos, incrustações e possibilitam o aparecimento de bactérias ferruginosas nocivas nas redes de abastecimento, além de serem responsáveis pelo aparecimento de gosto e odor, manchas em roupas e aparelhos sanitários e interferir em processos industriais (MORUZZI; REALI, 2012).

A água disponibilizada para o processo de beneficiamento de arroz de uma indústria de Forquilha - SC, é extraída de poços subterrâneos e levada por meio de tubulações para as caldeiras. Esta água, por não ser tratada, reage ocasionando incrustações e corrosão nas tubulações das caldeiras resultando no possível



rompimento dos tubos, tendo consequências econômicas, de segurança e podendo haver comprometimento do produto.

Neste contexto, análises serão mostradas sobre a qualidade da água com o intuito de investigar a causa da corrosão das tubulações das caldeiras e aplicar o tratamento de aeração, sedimentação e filtração, comparando dois floclulantes. Encontrar qual floclulante obteve o melhor desempenho e qual a viabilidade econômica para aplicação do tratamento da água e remoção ou diminuição do ferro, solucionando assim o problema nas tubulações das caldeiras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A água é uma substância vital presente na natureza e constitui parte importante de todas as matérias do ambiente natural. Não existe água pura na natureza, a não ser as moléculas de água presentes na atmosfera na forma de vapor. Assim que ocorre a condensação, começam a ser dissolvidos, por exemplo, os gases atmosféricos. Isso ocorre porque a água é um ótimo solvente (KUHN; ZART; OLIVEIRA, 2015, BRAGA; et all, 2005).

Existem regiões no planeta com intensa demanda de água, tais como os grandes centros urbanos, os pólos industriais e as zonas de irrigação. Essa demanda pode superar a oferta de água, seja em termos quantitativos, seja porque a qualidade da água local está prejudicada em virtude da poluição. Tal degradação da sua qualidade pode afetar a oferta de água e também gerar graves problemas de desequilíbrio ambiental (BRAGA; et all, 2005).

Segundo Lira (2004), apenas 4,9% da água do mundo é doce, e 64% estão sob a forma de água subterrânea, formando os aquíferos, que são capazes de armazenar e transmitir quantidades significativas de água. A qualidade requerida destas águas está especificada conforme as Resoluções do CONAMA 396/08 (2008) e 20/86 (1996), que dispõem sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e de potabilidade da água. Os principais indicadores da qualidade da água são separados sob os aspectos físicos, químicos e biológicos.



2.1 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EXTRAÍDAS DE POÇOS ARTESIANOS

O crescente uso das águas subterrâneas deve-se ao melhoramento das técnicas de construção de poços e dos métodos de bombeamento, permitindo a extração de água em volumes e profundidades cada vez maiores e possibilitando o suprimento de água a cidades, indústrias, projetos de irrigação, etc., que, pelo porte, eram impossíveis na prática (OLIVEIRA; SCHMIDT; FREITAS, 2003).

A água subterrânea em seu estado natural é, na maioria dos casos, de boa qualidade sanitária e oferece segurança para o consumo doméstico. Apesar de uma maior proteção dos contaminantes externos, as águas subterrâneas podem apresentar problemas de qualidade e, dentre esses, um dos mais frequentes consiste na presença de ferro em concentrações elevadas (água ferruginosa), limitando, algumas vezes, a utilização da água tanto para uso doméstico como industrial (BAUMGARTEN; PAIVA; RODRIGUES, 2014, OLIVEIRA; SCHMIDT, FREITAS, 2003).

Um poço artesiano é uma obra de engenharia que se destina à captação de água em grande profundidade, o qual tecnicamente também é chamado de Poço Tubular Profundo. Poços tubulares são construídos através de perfurações em rochas duras ou moles, em diâmetros variáveis, objetivando explorar o aquífero nos horizontes onde ocorre água. Recebem posteriormente revestimento, por meio da aplicação de uma tubulação de aço ou policloreto de vinila (PVC), o que proporciona um invólucro seguro, de forma que o furo não se feche ou permita a entrada de material abrasivo no seu interior através de suas seções filtrantes (MADEIRA, 2003, CAPPUCI; MARTINS; MANSUR; MONSORES, 2001).

De acordo com Oliveira (OLIVEIRA; SCHMIDT; FREITAS, 2003), um poço subterrâneo quando bem construído representa uma forma segura e econômica de abastecimento de água. Por outro lado, quando construído de forma inadequada, pode haver contaminação da água captada. Um exemplo disto é o caso em que, visando obter uma maior vazão, os filtros do poço são colocados em formações distintas podendo comprometer a qualidade da água no caso de captação de níveis de água contaminados (com teor elevado de ferro ou de nitrato, por exemplo).

A utilização das águas subterrâneas, tanto para o abastecimento público quanto para uso industrial ou para a irrigação agrícola tem sido amplamente disseminada na atualidade. Um dos fatores mais importantes na utilização de água subterrânea para abastecimento público é o seu baixo custo de captação, o qual



representa menos de 50% do equivalente em água superficial, pois dispensa a construção de obras como barragens, adutoras de recalque e estações de tratamento se a água possuir boa qualidade (MADEIRA, 2003).

2.2 PRESENÇA DE ÍONS DE FERRO EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A presença de ferro é frequentemente associada ao manganês, que na água de abastecimento pode acarretar em diversos problemas. Teores excessivos de ferro nas águas apresentam vários inconvenientes. O acúmulo de ferro e manganês precipitado nas canalizações favorecem depósitos, incrustações e possibilitam o crescimento de bactérias ferruginosas nos sistemas de distribuição, além de serem responsáveis pelo aparecimento de gosto e odor, causarem o surgimento de manchas em roupas e aparelhos sanitários, bem como interferirem em processos industriais (fabricação de papel, tecidos, tinturarias e cervejarias). Assim, é necessário remover o ferro e manganês, antes da sua entrada nos sistemas de distribuição (BRAGA; et al, 2005, MORUZZI; REALI, 2012).

De acordo com Madeira (2003), a presença de ferro e manganês em águas naturais acontece devido a interação da água com o solo, ao passo que metais como o níquel, o zinco, o cromo, o mercúrio, o cádmio, o cobre, o estanho, o chumbo, surgem de despejos industriais e atividades agrícolas.

O manganês é encontrado em maiores quantidades nas rochas metamórficas e sedimentares e os dióxidos de manganês, especificamente a manganita e a pirolusita, concentram-se nos solos à proporção que os componentes mais solúveis se separam por lixiviação. Nas águas naturais aparece sob a forma bivalente podendo, no entanto, aparecer em maiores graus de oxidação nas estações de tratamento. A sua presença se deve a solubilidade dos sais do solo pelas bactérias e compostos orgânicos, os quais geram condições anaeróbias, facilitando a redução de seus compostos na forma manganosa (OLIVEIRA; SCHMIDT; FREITAS, 2003, MORUZZI; REALI, 2012).

O ferro no estado ferroso (Fe^{+2}) forma compostos solúveis, principalmente hidróxidos. Em ambientes oxidantes o Fe^{+2} passa a Fe^{+3} dando origem ao hidróxido férrico, que é insolúvel e se precipita, tingindo fortemente a água. Desta forma, águas com alto conteúdo de Fe, ao saírem do poço são incolores, mas ao entrarem em contato com o oxigênio do ar ou pela aplicação de cloro, ficam amareladas, o que lhes



conferem uma aparência nada agradável, ou no caso do manganês a coloração varia de púrpura a preto. A precipitação de ferro presente nas águas é a principal responsável pela perda da capacidade específica de poços profundos (OLIVEIRA; SCHMIDT; FREITAS, 2003, MORUZZI; REALI, 2012).

A ingestão de ferro em doses moderadas tem um efeito positivo à saúde humana, pois é um nutriente essencial para o metabolismo normal das células. Em humanos, a sua carência pode causar anemia ferropriva e outras disfunções. Mas em quantidades elevadas, o ferro pode ser tóxico, já que quando metabolizado excessivamente, afeta quase todos os órgãos humanos, em função de sua toxicidade intracelular sistêmica, podendo aumentar a incidência de problemas cardíacos e diabetes (BAUMGARTEN; PAIVA; RODRIGUES, 2014).

Uma reação característica das águas subterrâneas, que passam longos períodos distantes do contato com o ar, acontece quando atingem a superfície, onde o O₂ tem a chance de dissolver-se nelas e seu nível bastante elevado de Fe⁺² solúvel é convertido em Fe⁺³ insolúvel, formando-se um depósito marrom-alaranjado de Fe(OH)₃. A reação global é:



O ferro nas águas superficiais é geralmente presente na forma Fe(III). Ele está presente no estado dissolvido em camadas profundas de alguns reservatórios com pouco oxigênio dissolvido ou em águas subterrâneas, na forma de Fe(II), Fe(OH)⁺ ou na forma de quelatos. As formas dissolvidas do ferro podem ser precipitadas pelo incremento do potencial de oxidação, do pH ou de ambos (MORUZZI; REALI, 2012).

2.3 MÉTODO DE ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA

A percepção do homem nas alterações da qualidade da água através de seus sentidos dá-se pelas características físicas da água, pois se espera que essa seja transparente, sem cor e sem cheiro. Não é necessário que a água existente no manancial presente, em estado bruto, o padrão de qualidade exigido para fins de abastecimento público. Há várias maneiras de alterar suas características para torná-la compatível com as exigências do consumidor. Essa possibilidade de tratamento ou de condicionamento da água é praticamente ilimitada do ponto de vista técnico, mas



imperativos de ordem econômica restringem muito sua execução (BRAGA; et al, 2005, VEIGA, 2005).

Na química analítica, assim como nas demais áreas de estudo, há várias maneiras de realizar um procedimento, mas há sempre um procedimento mais adequado que o outro, em função dos objetivos das análises, considerando fatores como precisão, acuracidade, sensibilidade, repetibilidade, segurança e custo do método. Por isso, a seleção do método de análise é vital para solução de um problema analítico (PARRON; FREITAS; PEREIRA, 2011).

Segundo Parron, Freitas e Pereira (2011), os métodos analíticos mais comumente utilizados em química analítica de águas e soluções são: espectrofotometria UV/Visível, espectrometria de emissão (ICP), titulometria e cromatografia iônica. Estes métodos atendem as especificações das normas internacionais de análise de água, tais como Standard Methods for the Examination of the Water and Wastewater e das normas publicadas pela International Standardization Organization (ISO).

Para Szikszay (1993), em águas subterrâneas com a finalidade de uso industrial as principais substâncias contidas são, dependendo da indústria, a dureza, Fe, Mg, SiO₂. As principais características físico-químicas, conforme Celligoi (1999), encontradas nesta água são sólidos totais dissolvidos, alcalinidade, dureza, oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO) e condutividade. Analisando estas substâncias e características pelos métodos analíticos de espectrofotometria UV/Visível, como exemplo para análises de compostos orgânicos e titulometria tendo como exemplo análise de dureza.

De acordo com Szikszay (1993), a dureza da água é predominantemente causada pela presença de sais de cálcio e magnésio, na forma mais comum de carbonatos e bicarbonatos, além de cloretos, nitratos e sulfatos. Grau de dureza é a quantidade de sais alcalinoterrosos contidos na água.

Essa água é imprópria para o abastecimento de equipamentos geradores de vapor. As caldeiras industriais requerem o uso de água com baixa dureza, pois o cálcio e magnésio possuem características naturais de se agregarem nas paredes das tubulações. Em altas temperaturas cristalizam-se formando incrustações, causando sérios danos às caldeiras, tais como: diminuição da eficiência na geração do vapor e aumento da temperatura de película do metal, além da possibilidade de rompimento



de tubos e explosões (OLIVEIRA; SILVA; CARVALHO, [s.d.]). A classificação das águas segundo a dureza segue conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Classificação das águas segundo dureza.

Parâmetro	Valores (mg/L)
Muito branda	70
Branda	70 – 140
Medianamente duras	140 – 220
Bastante duras	220 – 320
Duras	320 – 540
Muito duras	540

Fonte: Parron, Freitas, Pereira (2011).

A concentração de ferro na água pode ser determinada por métodos colorimétricos (ou espectrofotométricos) utilizando-se substâncias que formam íons complexos coloridos com o íon ferro. O método colorimétrico da fenantrolina é adequado para análises de águas naturais ou tratadas e efluentes domésticos (OLIVEIRA; SCHMIDT; FREITAS, 2003, APHA, 1995).

Conforme a metodologia do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1995), o ferro é solubilizado, reduzido ao estado ferroso por ebulição com ácido e hidroxilamina e tratado com 1,10 fenantrolina em pH de 3,2 a 3,3. Cada três moléculas de fenantrolina quelatam um íon ferroso para formar um complexo vermelho-alaranjado. A solução colorida obedece a lei de Lambert-Beer, sua intensidade independe do pH se ele estiver na faixa de 3,0 a 9,0. Um pH entre 2,9 e 3,5 garante um rápido desenvolvimento da cor na presença de um excesso de fenantrolina e por fim pode ser analisado no espectrofotômetro. Os padrões de cores são estáveis pelo menos por 6 meses.

2.4 SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ÁGUA

A remoção de íons ferro presente em águas naturais é geralmente realizada através da oxidação e posterior filtração. O tratamento para remoção de ferro geralmente envolve: oxidação pelo ar, cloro ou ozônio seguida por filtração;



precipitação química seguida por filtração, ou, ainda, troca iônica. A capacidade da instalação de tratamento, o pH da água e a presença de outros contaminantes determinam o processo mais econômico para cada caso (MADEIRA, 2003).

De acordo com Oliveira, Schmidt, Freitas (2003) e Madeira (2003), existem diversos tipos de tratamentos para remoção de ferro, entre os vários processos incluem-se aeração e filtração; aeração, sedimentação e filtração; aeração, alcalinização e filtração; coagulação química, sedimentação e filtração; troca iônica; leitos de contato – zeólita impregnada com óxido de manganês; tratamento com cal; cloração; adsorção, oxidação e precipitação de ferro; utilização de produtos químicos complexantes.

O tratamento de aeração sedimentação e filtração é recomendado para remoção de pequenas a moderadas concentrações de ferro e manganês. O processo de aeração, sedimentação e filtração inclui um equipamento de aeração, tanque de sedimentação e filtros. O oxigênio da atmosfera reage com o ferro e manganês contido na água para produzir sais insolúveis de óxidos de ferro (fêrricos) e manganês (mangânicos) (MORUZZI; REALI, 2012, MADEIRA, 2003).

Em condições de pequenas a moderadas concentrações de ferro e manganês o tratamento consiste na floculação, empregando-se o sulfato de alumínio ou o sulfato fêrrico. A separação dos sólidos, formados com a floculação na água em que estão suspensos, mediante a força gravitacional, resulta em um líquido límpido na fase superior e uma lama de alto conteúdo sólido na fase inferior, sendo chamada de sedimentação, onde logo após há a filtração do líquido (MORUZZI; REALI, 2012, MADEIRA, 2003).

2.5 INCRUSTAÇÕES E CORROSÃO EM TUBULAÇÕES

Um dos maiores problemas envolvidos na operação de poços refere-se à incrustação, que é a formação de crostas em paredes, e corrosão de tubulares, sejam elas edutoras ou de revestimento (tubos e filtros), bem como em equipamentos de bombeamento instalados, o que pode ocasionar queda de vazão e de níveis de água ao longo do tempo, além de prejuízos e transtornos ao abastecimento de usuários de águas subterrâneas (GASTMANS; STRADIOTO; PEDE; KIANG, 2004).

A formação de incrustações na superfície interna da tubulação é determinada por fatores como alcalinidade, dureza, presença de sólidos em suspensão,



temperatura, velocidade da água e estado da superfície interna da tubulação. A presença de ferro e manganês na água tratada também favorece a formação de incrustações nas tubulações (GASTMANS; STRADIOTO; PEDE; KIANG, 2004).

Segundo Oliveira, Silva e Carvalho ([s.d.]), incrustações aparecem particularmente em pontos onde existe mudança de pressão, como nas conexões onde o fluxo é turbulento pela existência de obstáculos e válvulas, pelas mudanças de direção e em saídas de água como torneiras, chuveiros e registros. A queda brusca de pressão favorece a formação de cristais, cuja estrutura adere e se deposita em qualquer lugar. Incrustações ocorrem também quando a temperatura da água aumenta dentro das tubulações ou sistemas, quanto mais quente a superfície, mais rápida a deposição dos cristais. Estes problemas podem ser encontrados em aquecedores, caldeiras e trocadores de calor.

Dentre os inúmeros problemas causados pelas incrustações de cálcio e pela ferrugem à elas associada, é possível destacar os seguintes: bloqueio do sistema de tubulações, perda de pressão de água devido à redução do diâmetro do tubo, acúmulo de ferrugem nos tubos que pode provocar corrosão, desenvolvimento de bactérias em tubulações de água potável, reparos contínuos nos sistemas e em equipamentos comerciais e industriais, substituição de todo o sistema de tubulação, perda de energia nos sistemas de água quente e alto custo de aquecimento, superfícies sem brilho em cozinhas e instalações sanitárias, alto custo de limpeza e necessidade de detergentes mais agressivos, falhas em equipamentos e máquinas, alto custo de produção devido à manutenção de equipamentos e queda na produtividade da empresa (OLIVEIRA; SILVA; CARVALHO, [s.d.], GASTMANS; STRADIOTO; PEDE; KIANG, 2004, MORUZZI; CONCEIÇÃO; NAVARRO; ZANARDO, 2012).

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Uma amostra foi coletada na entrada da tubulação da caldeira, conforme mostra a Figura 1, onde a água vem dos poços tubulares da indústria de beneficiamento de arroz situada na cidade de Forquilha, distante 21 km do centro de Criciúma, município da região sul de Santa Catarina.



Figura 1: Coleta da amostra de água na entrada da tubulação da caldeira.

A primeira coleta da amostra foi realizada em abril e foi feita com um recipiente de polietileno de 600 ml, sendo lavada três vezes com a água a ser analisada e enchida. A amostra de aparência amarela esbranquiçada vinda dos poços, conforme mostrado na Figura 1, foi encaminhada no mesmo dia ao H₂O Laboratório de análises físico-química e microbiológica de Criciúma, para realização das análises de cloretos, dureza, ferro total, pH, sílica total e sulfatos. A segunda coleta da amostra foi realizada em setembro e foi coletada em um recipiente de polietileno de 600 ml e encaminhada ao laboratório para análise do ferro total novamente.

O método utilizado para remoção do ferro foi o de aeração, floculação e filtração, comparando dois flocculantes, o sulfato de alumínio e o sulfato férrico. Na realização do experimento, foi utilizada a bancada de tratamento de água ou efluentes: processo físico-químico do laboratório de Fenômenos de Transferência e Operações Unitárias Experimental I da Faculdade Satc.

Na elaboração do experimento foi coletado 100 l de água do poço na entrada da tubulação da caldeira, diretamente em cinco galões de 20 l, lavando o mesmo duas vezes com a água coletada afim de evitar contaminações. O volume das soluções de



sulfato de alumínio e do sulfato férrico foram de um litro com concentração a 10% a partir de cada floculante.

Uma solução álcali com 1 litro a 5% de hidróxido de sódio foi utilizada como auxiliar para ajuste de pH devido ao uso de floculantes ácidos. Também foi preparada uma solução de um litro de polímero aniônico 0,1g/l como auxiliar de floculação, pois este gera uma ligação entre as partículas já coaguladas e a cadeia de polímero, formando flocos de maior diâmetro.

Com o auxílio de um jar test compacto, com 3 cubas de 1 litro cada e com a água coletada, foram realizados os devidos ensaios de floculação em batelada investigando a melhor relação entre a água subterrânea e as soluções floculantes de sulfato de alumínio e sulfato férrico, buscando um pH ideal utilizando a solução álcali, para uma melhor decantação. Para a solução de sulfato de alumínio, foram realizados seis testes, onde a água utilizada em cada teste foi inicialmente aerada com um compressor por 1 minuto e o seu pH inicial era de 7,40. Os testes foram realizados em cada jarro com adição das soluções com valores conforme Tabela 2.

Em vista dos ensaios realizados apresentados na Tabela 2, foi obtido as melhores condições e melhor volume econômico no teste 4. Na melhor condição, foram adicionados 25 ml de solução de sulfato de alumínio e 1 ml de polímero aniônico, utilizando a solução de hidróxido de sódio apenas para ajustar o pH. Esta água foi transferida para uma proveta de 1,5 l onde foi possível observar a decantação das partículas floculadas, que tiveram um tempo médio de 13 minutos, com um lodo de aproximadamente 120 ml.

Tabela 2: Valores das soluções utilizados nos ensaios para o floculante sulfato de alumínio.

Testes	Soluções		
	Sulfato de Alumínio (ml)	NaOH	Polímero Aniônico (ml)
1	5	-	-
2	10	-	-
3	15	Ajuste de pH	-
4	25	Ajuste de pH	1
5	30	Ajuste de pH	2
6	50	Ajuste de pH	5



Para a solução de floculante sulfato férrico, foram realizados três testes, onde foi inicialmente aerado com um compressor por 1 minuto e o pH inicial da água era de 7,40. Os testes foram realizados em cada cubeta com adição das soluções com valores conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Valores das soluções utilizados nos ensaios para o floculante sulfato férrico.

Testes	Soluções		
	Sulfato Férrico (ml)	NaOH	Polímero Aniônico (ml)
1	5	-	-
2	3	Ajuste de pH	1
3	5	Ajuste de pH	1

Com os valores utilizados nos ensaios apresentados na Tabela 3, foi observado que o teste 2 obteve melhores condições e melhor volume, pois houve boa floculação e uma decantação mais rápida de aproximadamente 7 minutos e 130 ml de lodo quando transferidos para a proveta de 1,5 l. Portanto, a melhor condição foi de 3 ml de solução de sulfato férrico e 1 ml de polímero aniônico, fazendo o ajuste de pH após o uso das outras duas soluções.

De acordo com os dados obtidos com o jar test, foi simulado no modelo contínuo um processo de decantação real, utilizando as condições ótimas encontradas no processo em batelada de concentração de floculantes e da vazão ótima de trabalho, conforme demonstrado no fluxograma da Figura 2, seguido por um desenho esquemático na Figura 3.

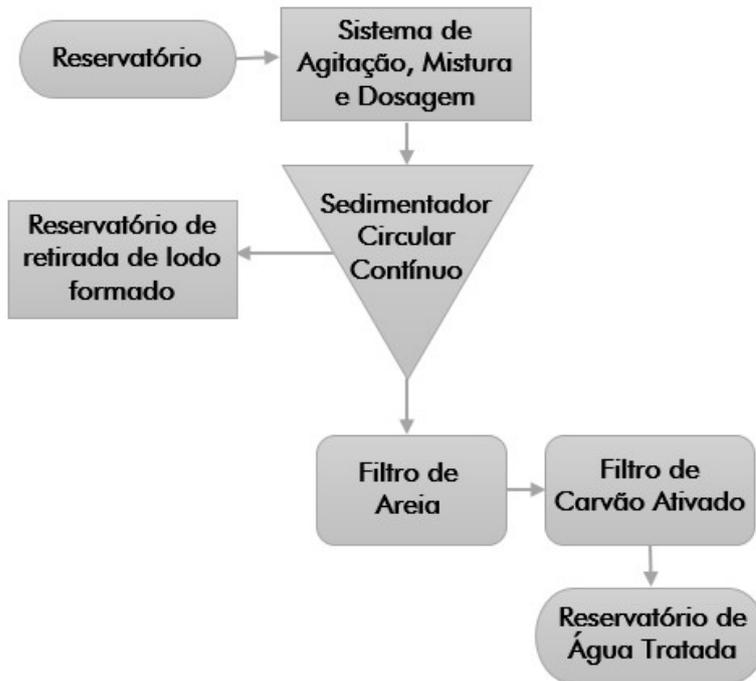


Figura 2: Fluxograma de bancada de tratamento de água modelo contínuo

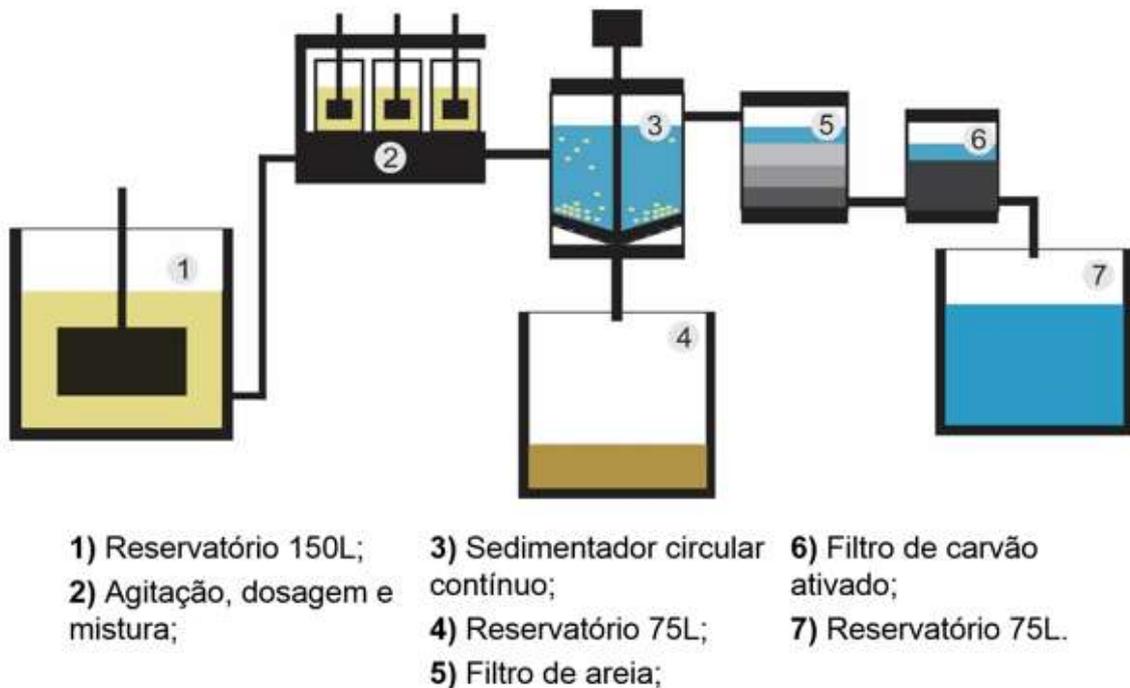


Figura 3: Desenho esquemático de bancada de tratamento de água modelo contínuo.

O esquema do processo em sedimentação contínua, conforme mostrado na Figura 3, é constituído de um reservatório (1) de 150 litros, munido de sistema de agitação/mistura, para recepção da água coletada do poço. Os 100 l de água



subterrânea coletados foram despejados neste reservatório (1) onde o sistema foi abastecido através de uma bomba peristáltica com uma vazão de 8,1 ml/s. A água seguiu para o sistema de agitação, mistura e dosagem (2), a primeira solução que deveria ser dosada era a de hidróxido de sódio, porém inicialmente não foi utilizada, uma vez que o pH da água foi medido e estava dentro dos valores permitidos pela resolução do CONAMA 20/86. Em seguida foi adicionada a solução do floculante sulfato de alumínio com vazão proporcional a utilizada no jar test que foi de 0,25 ml/s e a solução de polímero aniônico com vazão de 0,02 ml/s. Todas as soluções estavam situadas em reservatórios de vidro de 1 litro e dosados a partir de 3 bombas peristálticas com as vazões estipuladas no ensaio em batelada com o jar test.

A água devidamente agitada e dosada seguiu para o sedimentador circular contínuo (3) ocorrendo a deposição das partículas, possibilitando a retirada do lodo formado para um reservatório de 75 litros (4) e a água foi transferida para a filtração. Este sedimentador possui capacidade de 20 litros, é graduado, construído em material transparente, munido de raspador de fundo com velocidade controlável e válvula pneumática temporizada para descarga do lodo que formara no fundo.

Desta maneira, a água seguiu para filtração. Primeiro escoou por um filtro de areia (5), de material transparente, em configuração de fluxo descendente e composto por três camadas distintas de areias. Logo após a primeira filtração, a mesma passou por um filtro de carvão ativado (6), de material transparente, em configuração de fluxo descendente, e foi depositada em um reservatório (7). Foi extraída uma amostra em uma garrafa pet de 600 ml da água subterrânea tratada encontrada no reservatório (7), e encaminhada para o H2O Laboratório.

As etapas realizadas no ensaio de sedimentação contínua para a solução de sulfato de alumínio foram realizadas também para a solução floculante de sulfato férrico, com diferença apenas nas vazões utilizadas. A dosagem inicial da solução de hidróxido de sódio foi necessária pois quando adicionada a solução floculante de sulfato férrico o pH se tornou bastante ácido, aproximadamente 2,98. A vazão da solução floculante foi de 0,13 ml/s e a de polímero aniônico se manteve em 0,02 ml/s. Posteriormente ao tratamento, as águas tratadas com sulfato de alumínio e com sulfato férrico, foram encaminhadas ao H2O Laboratório para análise de remoção ou diminuição de ferro total da amostra.

Após todos os testes laboratoriais terem sido realizados foi feito o cálculo do processo em escala de bancada para a utilização na empresa, relacionando o custo



com o melhor resultado de remoção de ferro. Assim, foi selecionado o melhor floculante para cálculos em escala real de vazão e utilização da água para o consumo da mesma. Um cálculo de custo também foi realizado afim de analisar a viabilidade para a indústria de realizar o tratamento da água subterrânea.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As seções 4.1 e 4.2, respectivamente, apresentam os resultados experimentais obtidos das análises químicas realizadas e os custos para implantação do tratamento proposto.

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados obtidos da análise da primeira coleta de água bruta para verificar a causa da corrosão das tubulações foram obtidos pelo Laboratório de análise H₂O e estão apresentados na Tabela 2. Na primeira coluna constam os parâmetros físicos analisados na amostra. Na segunda coluna estão colocados os valores máximos para cada parâmetro estabelecido pelo CONAMA 20/ 86 (BRASIL, 1986). Na sequência apresentam-se os resultados das análises químicas. Avaliando os resultados obtidos na amostra do poço tubular, a água apresenta tendência neutra (pH médio de 6,7). A legislação para água potável (BRASIL, 1986), estabelece uma ampla faixa de pH para água tratada que varia de 6,0 a 9,0 apenas com intuito de minimizar as perspectivas de corrosão ou de incrustação nas redes de distribuição.

Tabela 4: Análises Físico-Químicas realizadas em laboratório.

Parâmetros	Valores Máximo	Resultado
Cloretos	250,0 (mg/l)	27,31 (mg/l)
Dureza	500,0 (mg/l)	139,63 (mg/l)
Ferro total	0,3 (mg/l)	0,74 (mg/l)
pH	6,0 – 9,0	6,7
Sílica total	Não especificado	64,8 (mg/l)
Sulfatos	250,0 (mg/l)	31,0 (mg/l)



O excesso de ferro na água constitui risco para saúde e também prejudica as tubulações da indústria de beneficiamento de arroz, causando risco de explosões e alteração nos alimentos produzidos. Foi constatado que a quantidade de ferro total (0,74 mg/l) está acima dos valores máximos permitido pela legislação (0,3 mg/l).

Avaliando os resultados da segunda coleta realizada apresentados na Tabela 5, pode ser visto que a quantidade de Ferro total aumentou em aproximadamente 700%. Este aumento de ferro pode estar relacionado à precária conservação dos solos no meio rural, intensificando os processos de erosão, aumentando consideravelmente a quantidade de solo em contato com a água. Segundo o processo 6663/1960 do DNPM (2016), a região onde está situada a empresa possuía lavra de carvão, que produzem alterações no solo devido a drenagem ácida da mina e acaba comprometendo a qualidade da água subterrânea. Outra possibilidade pode ser devido a incrustação na tubulação de entrada da caldeira, aumentando a concentração de ferro total na água coletada para análise.

Tabela 5: Análises Físico-Químicas realizadas em laboratório.

Parâmetros	Valores Máximos	Resultado
Ferro Total	0,3 (mg/l)	5,58 (mg/l)
pH	6,0 – 9,0	7,40

A água da segunda coleta teve seu pH com um aumento mínimo, permanecendo aproximadamente neutro e dentro dos limites permitidos pela legislação. A partir do resultado da primeira e segunda amostras analisadas, foram realizados os testes na bancada de tratamento de água ou efluentes: processo físico-químico com os floculantes, sulfato de alumínio e sulfato férrico, para remoção do ferro contido na água bruta utilizada no processo.

Avaliando os resultados das amostras após o tratamento da água bruta com o floculante sulfato de alumínio, conforme é visto na Tabela 6, o ferro total apresentou valores abaixo do máximo permitido, indicando que o floculante obteve ótimo desempenho encontrando-se de acordo com o valor máximo permitido pela legislação.



Tabela 6: Análises Físico-Químicas realizadas na amostra de água tratada com o floculante sulfato de alumínio.

Parâmetros	Valores Máximos	Resultado
Ferro Total	0,3 (mg/l)	0,21 (mg/l)
pH	6,0 – 9,0	6,85

Para o parâmetro pH, pode-se observar que houve uma diminuição, porém ainda se encontra dentro da faixa estabelecida na legislação. Com relação a cor, a água antes do tratamento era de cor amarelada com partículas suspensas, logo após o tratamento apresentou ótima aparência, incolor e límpida. Segundo Vaz e outros, (2010) o processo de coagulação/floculação com posterior sedimentação propicia a remoção de cor e turbidez do efluente a ser tratado. Fazendo uma comparação com a água bruta, anterior ao tratamento, pode-se considerar uma eficácia alta no tratamento executado, pois houve uma diminuição de 96,24% de ferro total, atingindo o resultado esperado.

O estudo de caso realizado por Costa (2004) utilizando três tipos de floculantes (Cloreto Férrico, Sulfato Férrico e Sulfato de Alumínio) e um oxidante (Cloro), demonstra que todos os floculantes, quando aplicados em doses corretas, confirmam a eficiência na remoção do ferro, sendo passíveis de utilização.

Os valores para o tratamento com o floculante sulfato férrico estão apresentados na Tabela 7. Conforme pode ser observado, o resultado do parâmetro ferro total encontrou-se acima do valor máximo permitido por legislação, que comparado com a água anterior ao tratamento teve uma diminuição de 91,40%, porém não foi o suficiente para que atingisse o ideal de remoção. Quanto ao pH, observou-se uma diminuição, deixando a água com características ácidas, pois houve dificuldade de controle do pH durante a dosagem da solução floculante. Com relação a cor, a água bruta de cor amarelada apresentou boa aparência, porém ainda assim com uma aparência não tão agradável.

Tabela 7: Análises Físico-Químicas realizadas na amostra de água tratada com o floculante sulfato férrico.

Parâmetros	Valores Máximos	Resultado
Ferro Total	0,3 (mg/l)	0,48 (mg/l)
pH	6,0 – 9,0	5,62



4.2 CUSTOS PARA IMPLANTAÇÃO DO TRATAMENTO

Baseado nos dados apresentados na Tabela 6 e na Tabela 7 pode-se observar que o floculante sulfato de alumínio obteve melhor desempenho no tratamento da água subterrânea, conseguindo ótimo resultado para remoção do ferro. Desta forma, foi feita a viabilidade de aplicação deste tratamento na escala de bancada onde uma base de 100 l de água foi usada para a realização dos custos. Para o tratamento com o floculante sulfato de alumínio o custo foi de R\$ 1,73, já para o floculante sulfato férrico o custo foi de R\$ 28,57, onde R\$ 0,37 de cada reagente é o valor gasto de polímero aniônico e nesta conta não foi acrescido o valor da solução álcali para ajuste de pH. A partir dos dados já vistos e com relação ao custo, o floculante sulfato de alumínio é muito mais eficaz e com excelente preço.

No tratamento de bancada foi possível verificar que o floculante sulfato de alumínio teve o melhor custo benefício e a partir deste dado foram realizados os cálculos para vazão real utilizada na indústria que é 10,08 l/s. Segundo Fernandez e outros (2006), com relação a implantação de uma estação de tratamento de água (ETA) com vazão de 10 l/s, o preço é estimado em R\$ 270.000,00 e com valor anual de operação de aproximadamente R\$80.000,00, sendo usado 886 kg de sulfato de alumínio por dia.

O preço da troca dos tubos da caldeira a cada 4 anos, segundo a indústria de arroz é de R\$ 69.250,00, comparando com o custo de implantação e operação de uma ETA é mais viável economicamente permanecer fazendo a troca de tubulação. Entretanto, ainda ocorrerão riscos de explosões, alteração na qualidade do produto, perda de energia nos sistemas de água quente e alto custo de aquecimento, falhas em equipamentos e máquinas, alto custo de produção devido à manutenção de equipamentos e queda na produtividade da empresa.

5 CONCLUSÕES

Através do presente estudo foi possível concluir que a água subterrânea utilizada no processo de uma indústria de beneficiamento de arroz apresentou alto teor de ferro total, valor este acima do nível de potabilidade de 0,3 mg/l da Resolução do CONAMA 20/86, e os outros parâmetros analisados como sulfatos, pH, sílica total, dureza e cloretos.



Em um período de cinco meses notou-se um aumento considerável do teor de ferro na água subterrânea coletada que pode estar relacionada a precária conservação dos solos no meio rural, aumentando a quantidade de solo em contato com a água subterrânea. Outra possibilidade também é a incrustação na tubulação de entrada da caldeira aumentando consideravelmente a quantidade do elemento.

Em decorrência de a água possuir excesso de ferro causando incrustações e corrosão da tubulação da caldeira foi realizado o processo de aeração, sedimentação e filtração utilizando a bancada de tratamento de efluente, onde foi possível comparar os floculantes, sulfato de alumínio e sulfato férrico. O sulfato de alumínio conseguiu eliminar o excesso de ferro total contido na água e manter um pH permitido pela legislação, obtendo um melhor custo benefício para o tratamento.

A implantação de uma ETA apresentou-se como uma alternativa para utilização deste tratamento, porém seu custo de implantação comparado com o custo da troca de tubulação foi inviável economicamente, ainda assim por uma questão de segurança para a indústria seria necessária a implantação de uma estação de tratamento de água.

Desta forma, recomenda-se uma monitoração constante da quantidade de ferro total contido na água e a implantação de uma ETA evitando riscos de explosões da caldeira e também evitando a contaminação do arroz produzido. Portanto, como sugestão de um estudo futuro seria a verificação da qualidade do arroz com relação ao excesso de ferro na água em contato com o mesmo.

REFERÊNCIAS

APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 19. Edition. Washington, 1995.

BAUMGARTEN, M. G. Z.; PAIVA, M. L. de; RODRIGUES, H. R. S. Kit Analítico Simplificado: uma ferramenta para avaliação massiva da qualidade da água subterrânea. **Águas Subterrâneas**, v. 28, n. 2, p. 95-105, 2014.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; MIERZWA, J. C.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à engenharia ambiental: O desafio do desenvolvimento sustentável**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2005.

BRASIL. RESOLUÇÃO CONAMA n. 396, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 7 abr. 2008.



BRASIL. RESOLUÇÃO CONAMA n. 20, de 18 de julho de 1986. Dispõe sobre a classificação das águas doces, salobras e salinas do Território Nacional, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 30 jul. 1986.

CAPPUCI, E.; MARTINS, A.M.; MANSUR, K.L.; MONSORES, A.L.M. **Poços Tubulares E Outras Captações De Águas Subterrâneas: Orientação Aos Usuários**. Rio de Janeiro: SEMADS 2001.

CELLIGOI, A. **Considerações sobre análises químicas de águas subterrâneas**. Geografia, v. 8, n. 1, p. 91-97, 1999.

COSTA, E. R. H. et al. **Estudos de tratabilidade para redução do consumo de coagulante e remoção eficiente de ferro e do manganês (estudo de caso)**. In: Saneamento ambiental Brasileiro. ABES, 2004.

DNPM. **Departamento Nacional de Produção Mineral**. Títulos minerários de Santa Catarina. Disponível em:<
<https://sistemas.dnpm.gov.br/SCM/Extra/site/admin/dadosProcesso.aspx?numero=880264&ano=1997>>. Acesso em: 01 de dezembro de 2016.

FERNADES, M.F.; SOARES, S.R.A.; NUNES, C.M. **Estimativas de Preços de Implantação, Operação e Manutenção de Unidades e de Sistemas de Adução, de Bombeamento e de Tratamento de Água**. In: AIDIS; Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Sección Uruguay. Rescatando antiguos principios para los nuevos desafíos del milenio. Montevideo, AIDIS, 2006. p.1-13

GASTMANS, D.; STRADIOTO, M.R.; PEDE, M.A.Z.; KIANG; C. H. Caracterização De Incrustações Em Equipamentos De Bombeamento E Tubulações Instalados Em Poços Tubulares Profundos – Estudo De Caso. In: CONGRESS BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13, 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: UNESP, 2004, p. 13.

KUHN, M. R.; ZART, N.; OLIVEIRA, E. Avaliação Físico-Química e Microbiológica da Qualidade das Águas dos Poços Artesianos que Abastecem o Distrito de Boa Vista, No Município de Triunfo – RS. **Revista Destaques Acadêmicos- Cetec/Univates**, v. 7, n. 4, p.132-140, 2015.

LIRA, O. O. **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS**. Brasília: Funasa, 2014.

MADEIRA, V.S. **Desenvolvimento De Um Carvão Adsorvente Para Remoção De Íons Ferro Em Águas Naturais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 89 f., 2003.

MENEZES, J.M.; SILVA JUNIOR, G.C. DA; SANTOS, R.T. DOS. Hidrogeoquímica de aquíferos fraturados: estudo de caso na bacia hidrográfica do Rio São Domingos, noroeste do Estado do Rio de Janeiro. **Revista Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 21, n.1, p.10-16, 2007.



MORUZZI, R.B.; REALI, M.A.P. Oxidação E Remoção De Ferro E Manganês Em Águas Para Fins De Abastecimento Público Ou Industrial – Uma Abordagem Geral. **Revista de Engenharia e Tecnologia** v. 4, n. 1, p. 29-43, 2012.

MORUZZI, R.B.; CONCEIÇÃO, S.T.; NAVARRO, G.R.B.; ZANARDO, A. Caracterização química e mineralógica da incrustação em rede de ferro fundido e potencial de recuperação da capacidade hidráulica. **Eng. Sanit Ambient**, v.17, n.3, p. 305-314, 2012.

OLIVEIRA D. A; SCHMIDT, G; FREITAS, D. M. **Avaliação do Teor de Ferro em Águas Subterrâneas de Alguns Poços Tubulares, no Plano Diretor de Palmas-To**. Palmas: Universidade Federal do Tocantins – UFT. 2003.

OLIVEIRA, D.; SILVA, D.; CARVALHO, A. R. P. **Soluções em Engenharia de Tratamento de Água**.

PARRON, L. M.; FREITAS, D. H.; PEREIRA, C. M. **Manual de Procedimento de Amostragem e Análise Físico-Química de Água**. Colombo: EMBRAPA 2011.

SZIKSZAY, M. Geoquímica das Águas. **Boletim. IG-USP, Série didática**. São Paulo, n. 5, p. 1-166, nov. 1993.

VAZ, L. G. de L. et al . Avaliação da eficiência de diferentes agentes coagulantes na remoção de cor e turbidez em efluente de galvanoplastia. **Eclét. Quím.**, São Paulo, v. 35, n. 4, p. 45-54, 2010.

VEIGA, G. **Análises Físico-Químicas E Microbiológicas De Água De Poços De Diferentes Cidades Da Região Sul De Santa Catarina E Efluentes Líquidos Industriais De Algumas Empresas Da Grande Florianópolis**. Relatório final de estágio supervisionado (Bacharelado em Química). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 55 f., 2005.

AGRADECIMENTOS

A minha orientadora Profa. Débora De Pellegrin Campos que me auxiliou em todas as etapas desta pesquisa. A indústria de arroz pela sua receptibilidade e disponibilidade. A Faculdade Satc pelo auxílio na execução desta pesquisa.