



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA  
QUÍMICA



# Precipitação Química Por Basificação De Efluente De Revenimento Para Reuso Direto

*Autor: Gabriel Oliveira de Borba*

*Orientador: Caroline Borges Agustini*

Porto Alegre, fevereiro de 2024

Autor: Gabriel Oliveira de Borba

# Precipitação Química Por Basificação De Efluente De Revenimento Para Reuso Direto

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à COMGRAD/ENQ da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química*

Orientador: Caroline Borges Agustini

Banca Examinadora:

Profa. Liliane Damaris Pollo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Ma. Diana Fernanda Caicedo Chaguezac, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre

2024

## AGRADECIMENTOS

Meu principal agradecimento é para minha mãe, a pessoa mais batalhadora que conheço, que lutou e sacrificou várias coisas para que eu pudesse estudar e sempre me apoiou nos meus sonhos, quaisquer fossem esses, nunca saiu do meu lado independente do acontecesse e que com certeza estará carregando junto comigo meu diploma em engenharia química pelo resto da minha carreira. Também gostaria de agradecer meus demais familiares, que me apoiaram durante toda a graduação, entendendo minhas dificuldades e anseios e acima de tudo valorizando meu esforço e o caminho que optei seguir de profissão.

Agradeço aos meus amigos que me acompanham desde sempre na vida acadêmica e foram meus pilares emocionais nessa montanha russa chamada faculdade. Entenderam os dias que não pude vê-los e aproveitar novos momentos pois tinha que estudar para provas ou fazer trabalhos, da mesma maneira que me entenderam nos momentos difíceis e sempre apoiaram a mão para que eu pudesse seguir em frente e alcançar meus objetivos.

Meus sinceros agradecimentos a Professora Caroline Borges Agustini, que além de uma professora excepcional, que sempre está do lado dos alunos e torna o ambiente da graduação um lugar mais acolhedor, foi uma ótima orientadora, sempre disposta a ajudar e fornecer os materiais e caminhos para que este trabalho ficasse o mais completo possível. Também à colega Manuelle Minozzo e os bolsistas e doutorando do LACOURO que sempre estiveram dispostos a me auxiliar nos experimentos para o trabalho.

Por fim, gostaria de agradecer à minha avó, minha segunda mãe que não está mais entre nós, mas que com certeza estaria orgulhosa desta minha jornada da mesma maneira que eu tenho orgulho da sua história de vida.

## RESUMO

O aço é uma das principais matérias-primas da indústria metalúrgica, sendo responsável pelo alto desempenho do mercado siderúrgico através da produção de milhões de toneladas por ano deste material. Esta matéria-prima possui diversas propriedades complexas envolvendo suas conformações moleculares, como a dureza do aço, as quais devem ser levadas em consideração ao utilizá-la no processo produtivo. Os tratamentos térmicos, como a têmpera e o revenimento, são processos voltados para modificar a dureza do aço para que tal atenda as especificações do produto final, porém este processo gera efluentes saturados com hidróxido de sódio e de potássio, os quais devem ser tratados corretamente. Para remover estes sais do efluente, a alternativa mais prática e barata é a precipitação química, que pode ser realizada através da aplicação de uma base forte, como o carbonato de cálcio (ou cal hidratada), que forma hidróxidos insolúveis com os metais em solução que tendem a decantar. Com isso, o objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência do carbonato de cálcio na precipitação do nitrato de sódio e nitrato de potássio, a fim de avaliar a aplicabilidade do reuso direto do efluente tratado no processo produtivo. Foram realizadas análises de turbidez para entender o impacto do reagente na concentração de sólidos suspensos, nas quais observou-se uma diminuição de 91,60% da turbidez nos efluentes tratados quando comparados ao bruto. Também foi realizada a análise de densidade por aerômetro de Baumé para avaliar a diferença de concentração de sais antes e após o tratamento. Neste caso, foi verificado que a densidade não apresentou alterações e para verificar a origem deste dado foram realizadas análises de infravermelho por Transformada de Fourier, nas quais concluiu-se que parte da cal hidratada não solubilizou no efluente, não tendo efeito no tratamento, e parte formou carbonatos de sódio e de potássio na mesma proporção que removeu os nitratos, justificando a inalteração da concentração de sais no efluente final. Com estes resultados, conclui-se que a cal hidratada é eficiente para remoção de sólidos suspensos, porém não proporciona um efluente passível de ser reutilizado no processo produtivo devido à sua saturação de sais de carbonatos.

**Palavras-chave:** tratamento, precipitação, aço, revenimento

## ABSTRACT

O steel is one of the main raw materials in the metallurgical industry, responsible for the high performance of the steel market by producing millions of tons of this material annually. This raw material has various complex properties involving its molecular conformations, such as the hardness of steel, which must be taken into account when using it in the production process. Heat treatments, such as quenching and tempering, are processes aimed at modifying the hardness of steel to meet the specifications of the final product, but this process generates effluents saturated with sodium and potassium hydroxide, which must be treated properly. To remove these salts from the effluent, the most practical and cost-effective alternative is chemical precipitation, which can be achieved by applying a strong base, such as calcium carbonate (or hydrated lime), which forms insoluble hydroxides with the metals in solution that tend to settle. Thus, the objective of this work was to evaluate the efficiency of calcium carbonate in the precipitation of sodium nitrate and potassium nitrate, in order to assess the feasibility of directly reusing the treated effluent in the production process. Turbidity analyses were carried out to understand the impact of the reagent on the concentration of suspended solids, revealing a 91.60% decrease in turbidity in the treated effluents compared to the raw ones. Density analysis by Baumé hydrometer was also performed to evaluate the difference in salt concentration before and after treatment. In this case, it was found that the density did not change, and to investigate the origin of this data, Fourier Transform Infrared analyses were conducted, concluding that part of the hydrated lime did not dissolve in the effluent, having no effect on the treatment, and part formed sodium and potassium carbonates in the same proportion as it removed the nitrates, justifying the unchanged concentration of salts in the final effluent. With these results, it is concluded that hydrated lime is effective for removing suspended solids but does not provide an effluent suitable for reuse in the production process due to its saturation with carbonate salts.

**Keywords:** *treatment, precipitation, steel, tempering*

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Evolução da produção de aço de 2012 à 2022.....	3
<b>Figura 2:</b> Solução Sólida: Comparação do tamanho do interstício na estrutura cristalina da ferrita e da austenita .....	4
<b>Figura 3:</b> Esquema de tratamento de efluentes convencional de uma indústria metalúrgica da região metropolitana de Porto Alegre .....	6
<b>Figura 4:</b> Esquema do Jar Test no experimento.....	10
<b>Figura 5:</b> Turbidímetro modelo HI88703 da marca Hanna utilizado no experimento.....	12
<b>Figura 6:</b> Efluente bruto de revenimento.....	14
<b>Figura 7:</b> Comparativo entre o (A) efluente de pH de referência 11 e (B) efluente de pH de referência 12, ambos logo após a adição de cal hidratada. ....	15
<b>Figura 8:</b> Comparativo entre o (A) efluente de pH de referência 11 e (B) efluente de pH de referência 12, ambos logo após 24 horas de decantação.....	16
<b>Figura 9:</b> Análise de densidade do efluente bruto através do aerômetro de Baumé .....	17
<b>Figura 10:</b> Espectroscopias de infravermelho das 5 amostras sobrepostas .....	18
<b>Figura 11:</b> Espectroscopia de infravermelho do efluente bruto .....	19
<b>Figura 12:</b> Espectroscopia de infravermelho do efluente tratado de pH 11 .....	20
<b>Figura 13:</b> Espectroscopia de infravermelho do efluente líquido de pH 12 .....	21
<b>Figura 14:</b> Espectroscopia de infravermelho do lodo de pH 11.....	22
<b>Figura 15:</b> Espectroscopia de infravermelho do lodo de pH 12.....	23

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Condições experimentais.....	9
<b>Tabela 2:</b> Correspondências entre os graus Baumé e as densidades à 15°C .....	11
<b>Tabela 3:</b> Comparação da escala do aerômetro de Baumé utilizado no experimento com o valor real da densidade.....	11
<b>Tabela 4:</b> Dados de turbidez nas diferentes condições experimentais.....	16
<b>Tabela 5:</b> Bandas relevantes do espectro de infravermelho do efluente bruto .....	19
<b>Tabela 6:</b> Bandas relevantes do espectro de infravermelho do efluente tratado de pH 11...	20
<b>Tabela 7:</b> Bandas relevantes do espectro de infravermelho do efluente tratado de pH 12...	21
<b>Tabela 8:</b> Bandas relevantes do espectro de infravermelho do lodo de pH 11 .....	22
<b>Tabela 9:</b> Bandas relevantes do espectro de infravermelho do lodo de pH 12 .....	23

## SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Revisão Bibliográfica	3
2.1	Indústria metalúrgica	3
2.2	Processos na indústria metalúrgica	4
2.2.1	Tratamentos térmicos	4
2.3	Tratamento de efluentes líquidos	5
2.3.1	Tratamento físico-químico	7
3	Materiais e Métodos	9
3.1	Efluente bruto	9
3.2	Reagentes utilizados	9
3.3	Ensaio de precipitação por basificação	9
3.4	Concentração de sais no efluente	10
3.5	Turbidez	12
3.6	Espectroscopia de infravermelho por Transformada de Fourier	12
3.7	Estudo de caso: reuso direto do efluente de revenimento	13
4	Resultados	14
4.1	Ensaio de precipitação por basificação	14
4.2	Análise de turbidez	16
4.3	Análise de densidade	17
4.4	Análises de infravermelho por Transformada de Fourier	18
4.4.1	Análise do espectro de infravermelho do efluente bruto	19
4.4.2	Análise do espectro de infravermelho da parcela líquida do efluente de pH 11	19
4.4.3	Análise do espectro de infravermelho da parcela líquida do efluente de pH 12	20
4.4.4	Análise do espectro de infravermelho da parcela sólida do efluente de pH 11	21
4.4.5	Análise do espectro de infravermelho da parcela sólida do efluente de pH 12	22
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	25
	REFERÊNCIAS	26



## 1 Introdução

O aço desempenha um papel fundamental na indústria, sendo uma das matérias-primas mais essenciais e versáteis. Sua importância reside na sua notável combinação de resistência, durabilidade e maleabilidade. A indústria automotiva utiliza o aço para a fabricação de estruturas de veículos, garantindo segurança e leveza. Na construção civil, o aço é empregado em vigas, pilares e estruturas, conferindo estabilidade a edifícios e pontes. Além disso, o setor de maquinaria, o ramo naval, e a produção de equipamentos eletrodomésticos também dependem do aço devido à sua capacidade de suportar condições adversas e aprimorar a eficiência. Sua versatilidade e resistência fazem do aço um elemento essencial para inúmeras aplicações industriais, desempenhando um papel central no desenvolvimento tecnológico e na infraestrutura global.

A indústria metalúrgica desempenha um papel crucial no cenário econômico global, com o aço sendo uma das matérias-primas mais relevantes no mercado devido à sua ampla aplicação em diversos setores. Nesse contexto, é de extrema importância assegurar que o aço apresente suas propriedades mecânicas dentro do que é especificado para cada utilização, como no caso da dureza, a qual é um parâmetro essencial para definir a resistência à deformação e penetração deste material. Sendo assim, como forma de controlar a dureza, o tratamento térmico tem foco em alterar as propriedades físicas e mecânicas do aço, sem alterar sua forma, como é o caso do processo de revenimento.

O revenimento, processo fundamental no tratamento térmico, consiste no aquecimento controlado do aço seguido por um resfriamento moderado. Essa técnica visa ajustar a dureza do aço, promovendo características mecânicas ideais para diferentes aplicações. Contudo, esse procedimento frequentemente resulta na geração de efluentes contendo elevadas quantidades de sais, como o nitrato de sódio e o nitrato de potássio, os quais podem ser precipitados utilizando uma técnica adequada para tal. O tratamento convencional realizado hoje em dia é dado através da adsorção utilizando carvão ativado (Metcalf e Eddy, 2003).

Outros processos podem ser aplicados no tratamento de efluentes tais quais os métodos biológicos, como a lagoa de estabilização e reatores biológicos, utilizam microorganismos para degradar contaminantes orgânicos. A osmose reversa é eficaz na remoção de sais dissolvidos, enquanto a filtração por membranas é empregada para retenção de partículas e microrganismos. A oxidação avançada, que inclui processos como ozonização e fotocatalise, é eficaz na degradação de poluentes persistentes. A troca iônica é aplicada para remover íons específicos da água, enquanto a destilação eletrolítica pode concentrar efluentes, reduzindo o volume a ser tratado. Essa variedade de métodos permite a escolha de abordagens adequadas às características específicas dos efluentes a serem tratados.

No âmbito do tratamento e reuso direto desses efluentes, a precipitação química surge como uma alternativa simples e barata a qual pode apresentar resultados favoráveis para redução da concentração de sais de nitrato. Através da adição controlada de uma base forte é possível promover a precipitação dos íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  (Cavalcanti, 2016), bem como do nitrato. Dentre as bases possíveis de serem utilizadas neste processo, o hidróxido de cálcio (ou cal

hidratada) é uma opção interessante visto suas vantagens quanto ao baixo custo, alta geração de lodo e formação de sais de cálcio que são pouco solúveis em água.

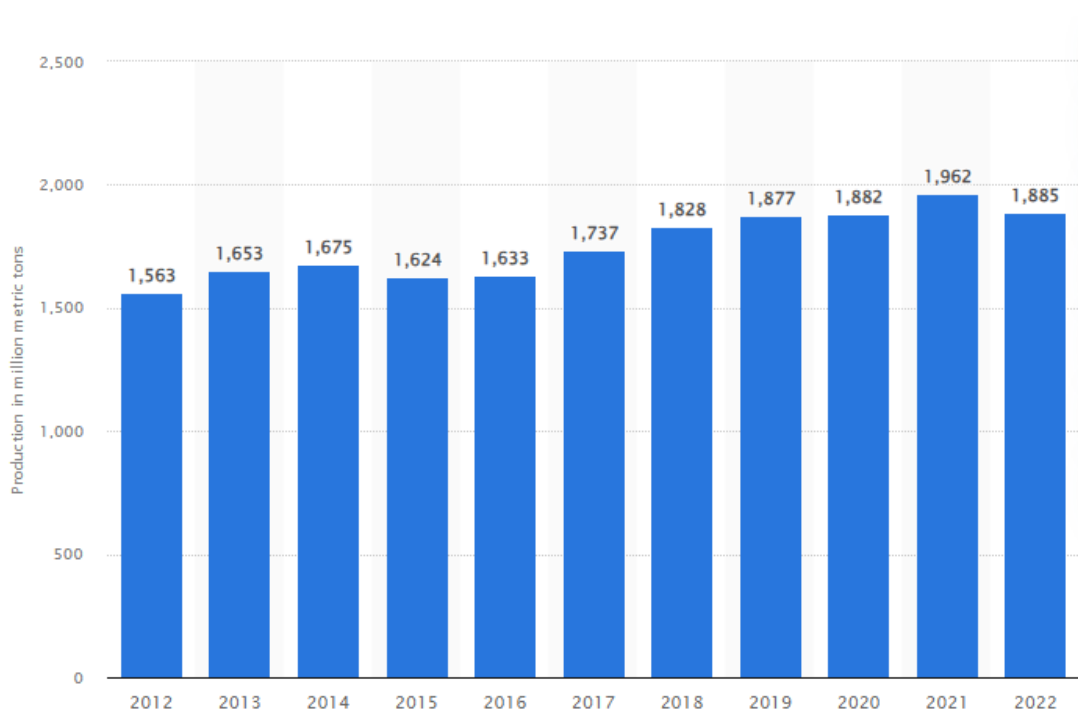
A questão ambiental torna-se premente, uma vez que a descarga inadequada desses efluentes pode acarretar impactos adversos. Uma abordagem sustentável e economicamente viável consiste na reutilização desses efluentes no próprio processo produtivo. Este ciclo fechado não apenas contribui para a preservação ambiental, mas também se alinha às práticas industriais responsáveis. Assim, este trabalho se propõe a avaliar a eficiência do processo de precipitação química por basificação quanto à redução da concentração do nitrato de sódio e nitrato de potássio de um efluente oriundo do processo de revenimento, tendo como foco obter um efluente tratado o qual possa ser reutilizado dentro do processo produtivo.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Indústria metalúrgica

O aço é um dos produtos mais amplamente utilizados na produção industrial. Nos últimos 10 anos, houve um aumento notável na produção de aço a nível global. Conforme demonstra a Figura 1, a quantidade de aço bruto produzido subiu 1,563 bilhões de toneladas em 2012 para 1,962 bilhões de toneladas em 2021, resultando em um aumento de 25% da matéria prima. Apesar da pandemia de Covid-19 não gerar um impacto significativo na produção mundial de aço entre 2019 e 2021, houve uma queda de cerca de 4% no ano de 2022, atingindo 1,885 bilhão de toneladas. Esta queda foi oriunda de fatores geopolíticos e econômicos como à invasão russa na Ucrânia, à escalada global nos preços da energia e aos persistentes desequilíbrios entre oferta e demanda que afetaram a indústria metalúrgica em escala global (World Steel Association, 2022).

**Figura 1:** Evolução da produção de aço de 2012 à 2022



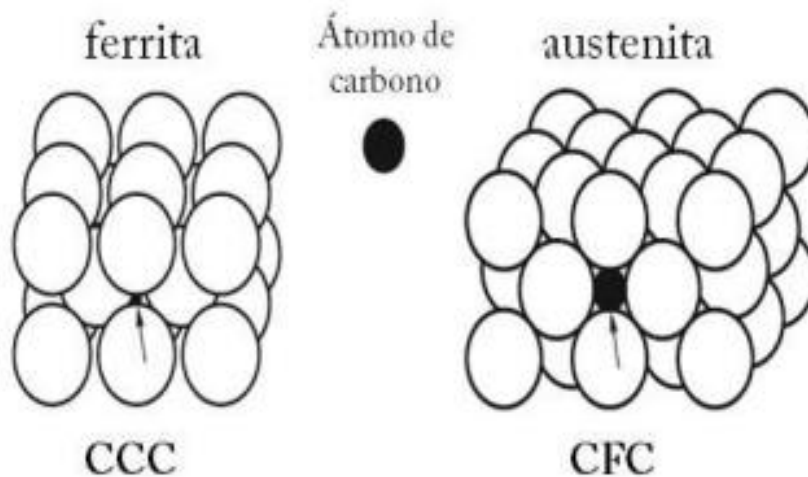
Fonte: Statista, 2022

Conforme as projeções indicam, a demanda global por aço bruto está estimada para aumentar significativamente, prevendo-se um acréscimo em torno de 44 milhões de toneladas métricas até o ano referência de 2022 (Statista, 2022). Este cenário ressalta a contínua importância do aço na indústria mundial, sendo impulsionado por diversos setores, como construção, automotivo e manufatura, refletindo a vitalidade desse material como componente essencial para o desenvolvimento econômico global.

## 2.2 Processos na indústria metalúrgica

O setor metalúrgico apresenta um dos mercados mais amplos quando se trata de matéria prima devido às diversas aplicações que o aço apresenta devido às suas propriedades físicas e mecânicas as quais permitem que o mesmo seja extremamente maleável. Dentre os diversos processos que podem ser aplicados ao aço com o objetivo de modelar estas propriedades mecânicas, os tratamentos térmicos são essenciais quando se trata da conformação molecular desta matéria prima (World Steel Association, 2022). A Figura 2 demonstra as diferentes estruturas cristalinas do aço as quais apresentam diferentes propriedades.

**Figura 2:** Solução Sólida: Comparação do tamanho do interstício na estrutura cristalina da ferrita e da austenita



Fonte: Berns e Theisen, 2008

O aço é uma liga metálica que consiste principalmente de ferro e carbono, mas também pode conter outros elementos em quantidades variáveis. A estrutura química básica do aço é caracterizada pela presença de átomos de ferro (Fe) e carbono (C). O carbono desempenha um papel crucial na determinação das propriedades do aço, influenciando sua resistência, dureza e outras características.

A estrutura cristalina do aço pode variar, e existem diferentes fases ou formas de arranjo dos átomos de ferro, como a ferrita e a austenita. A ferrita é uma fase cristalina do ferro que possui uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC). Nessa estrutura, um átomo de ferro está localizado no centro de um cubo, e átomos adicionais ficam nos vértices desse cubo, atribuindo uma característica magnética e com boa ductilidade. Já a austenita é outra fase cristalina do ferro, caracterizada por uma estrutura cúbica de face centrada (CFC), na qual um átomo de ferro está no centro da face de cada cubo, em vez de no centro do cubo como na ferrita, apesar de não ser magnética e exibir maior resistência e dureza.

### 2.2.1 Tratamentos térmicos

O tratamento térmico é definido como um conjunto de operações que geram o aquecimento ou resfriamento de ligas metálicas, resultando na alteração da microestrutura

do material que, por sua vez, modifica suas propriedades mecânicas tais como resistência, dureza, ductilidade, tenacidade e resistência a corrosão (Kliauga e Ferrante, 2018).

#### 2.2.1.1 *Têmpera do aço*

Dentre os diversos tratamentos térmicos, a têmpera e o revenimento são os principais para tal aplicação. A têmpera é um processo de resfriamento, geralmente realizada com óleo, na qual permite uma queda abrupta de temperatura do aço onde se obtêm a dureza máxima do material. Todavia, essa alta dureza conduz ao mínimo de resistência e tenacidade do aço, necessitando-se ajustar essa propriedade para que o produto esteja de acordo com o especificado. Sendo assim, após a têmpera, é necessário aplicar um processo de revenimento do aço (Kliauga e Ferrante, 2018).

#### 2.2.1.2 *Revenimento do aço*

O revenimento constitui um método de tratamento térmico em temperaturas moderadas, cujo propósito é mitigar as tensões relacionadas à dureza. Isso é alcançado ao fornecer uma quantidade adequada de energia térmica, o que facilita a difusão do carbono na estrutura molecular. Esse processo viabiliza a precipitação de carboneto de ferro  $Fe_3C$  e/ou de carbonetos de elementos de liga, resultando na redução da supersaturação e da tetragonalidade das moléculas até sua recristalização completa (Pinedo, 2021).

O processo de revenimento é comumente executado ao imergir o aço em um banho de sais de nitrato, que oferecem taxas de resfriamento superiores em comparação a outros meios, como água ou óleo. Dentre esses sais, é possível empregar uma combinação de nitrato de sódio e nitrato de potássio para essa operação. Essa mistura pode ser ajustada para alcançar uma temperatura de ebulição específica, mantendo-se uniforme em todo o banho. Além disso, apresenta outras vantagens em termos de segurança, uma vez que é uma mistura pouco inflamável — característica crucial em um processo que envolve elevadas temperaturas (Pinedo, 2021).

Devido à alta quantidade de sal nos banhos, após o revenimento o aço apresenta material residual destes sais em sua superfície, necessitando que este passe por um tanque de enxágue para que seja lavado. Com o passar do tempo, esta água de enxágue fica saturada com os sais de nitrato, perdendo sua eficiência de limpeza. Sendo assim, esta água passa a ser caracterizada como um efluente industrial e é encaminhada para estação de tratamento. Na gestão convencional, esses efluentes são tratados da seguinte forma: para remoção dos sólidos em suspensão, são utilizados coagulantes para agregação dos colóides, e floculantes para formação de flocos maiores de sólidos, os quais são pesados o suficiente para decantar. Já para remoção dos íons metálicos é utilizado o método de adsorção, o qual se baseia na transferência de massa do efluente para um material que apresenta grande área superficial e alta reatividade superficial, tal qual o carvão ativado, que é comumente utilizado neste tipo de tratamento (Benvenuti, 2012).

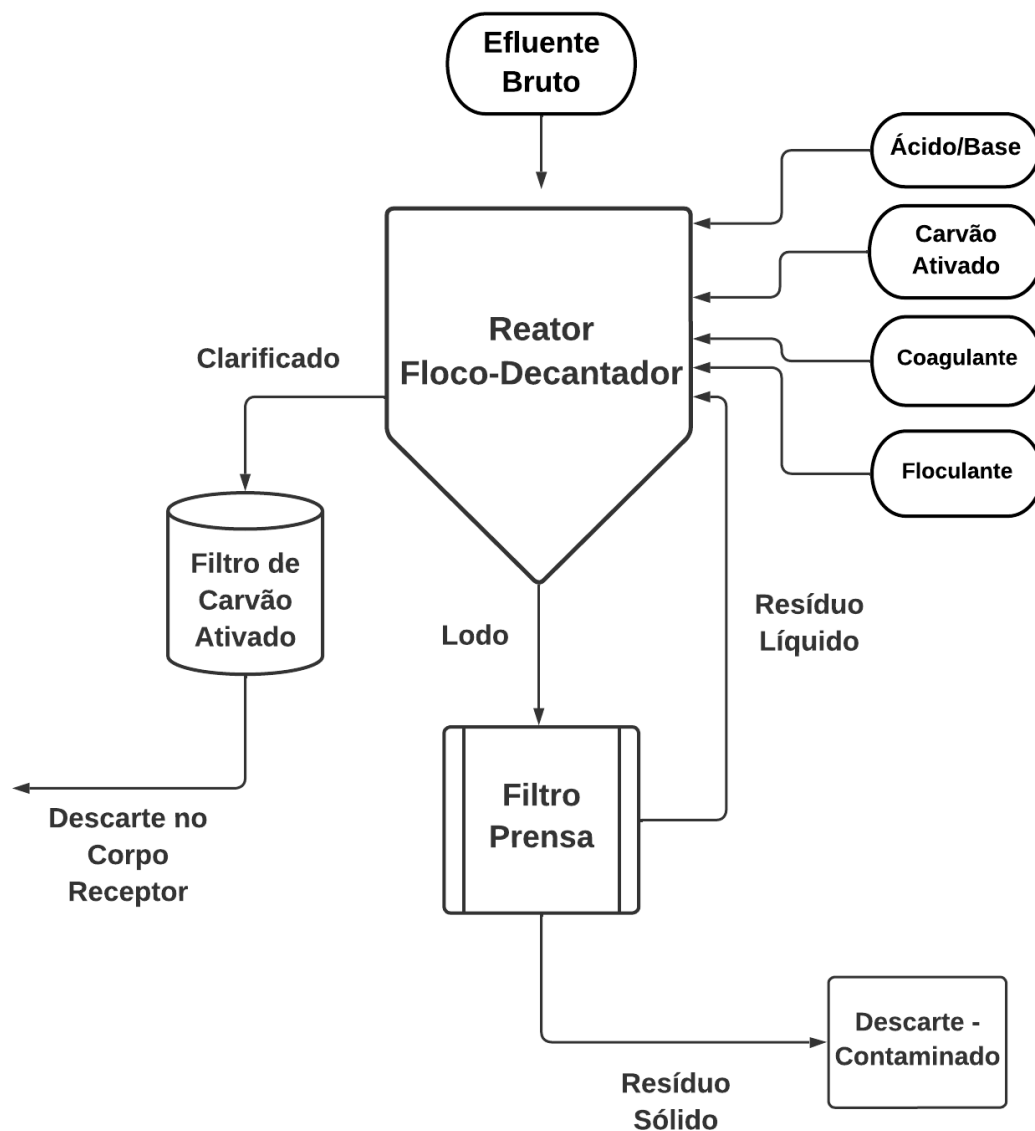
### 2.3 Tratamento de efluentes líquidos

De acordo com a resolução CONAMA 430/2011, artigo 3º, os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente nos corpos receptores após o devido tratamento.

Segundo Metcalf e Eddy (2003, *apud* CHIAVENATO, 2022), o tratamento de resíduos líquidos pode ser realizado através da aplicação de forças físicas ou por meio de reações químicas e biológicas, levando à eliminação das substâncias indesejadas. De maneira geral, o processo de tratamento engloba as seguintes etapas: tratamento inicial, que tem como propósito a remoção de impurezas sólidas de grande porte; tratamento físico-químico, voltado para a eliminação de partículas em suspensão; tratamento biológico, utilizado para a retirada de componentes dissolvidos, e tratamento terciário para aprimoramento final.

Na Figura 3 é demonstrado o fluxo de um tratamento físico-químico convencional utilizado na indústria metalúrgica.

**Figura 3:** Esquema de tratamento de efluentes convencional de uma indústria metalúrgica da região metropolitana de Porto Alegre



Fonte: Autor

### 2.3.1 Tratamento físico-químico

O tratamento físico-químico tem como objetivo remover tanto os sólidos em suspensão quanto aqueles que estão dissolvidos no efluente, através da utilização de produtos químicos. Para a remoção dos sólidos em suspensão, os fenômenos envolvidos no tratamento são a coagulação e a floculação. A coagulação se trata da desestabilização de partículas coloidais em suspensão através de um agente químico, geralmente um sal inorgânico, carregado com carga oposta à dos colóides, resultando na neutralização destes e, conseqüentemente, sua aglutinação. Já a floculação se dá através da adição de polieletrólitos responsáveis pela neutralização das forças eletrostáticas repulsivas entre os coágulos, resultando na aglomeração destes em flocos maiores, com o peso necessário para iniciar o processo de decantação (Cavalcanti, 2016).

Todavia, em muitos casos, os sólidos no efluente encontram-se dissolvidos em solução, sendo assim são necessários métodos focados em tornar essas partículas insolúveis para que possam ser suscetíveis à coagulação e floculação. Dentre estes métodos, o mais comum é a precipitação química, a qual se dá pelo ajuste de pH da solução, podendo ser através da adição de um ácido ou uma base, voltado para produzir compostos insolúveis com os metais no efluente (Cavalcanti, 2016).

#### 2.3.1.1 Precipitação química

A precipitação química é um procedimento no qual uma substância que pode ser dissolvida se transforma em uma forma que não pode ser dissolvida, seja por meio de reações químicas ou por alterações na composição do solvente que diminuam a capacidade de dissolução dessa substância. Como resultado, ocorre a criação de duas partes: uma fase consiste em um líquido claro (o sobrenadante), que pode ser eliminado no sistema de esgoto pluvial ou reutilizado no processo de produção, e outra fase é composta por um sólido que se precipita. Esse sólido, após ser submetido a um processo de secagem, pode ser incinerado, coprocessado, encaminhado para aterros sanitários ou reaproveitado em aplicações menos rigorosas (Possignolo et al., 2009).

A precipitação é eficaz para tratar resíduos perigosos que estão em forma líquida e contêm componentes tóxicos, os quais podem ser convertidos em uma forma insolúvel. Esse método é amplamente utilizado para eliminar metais tóxicos encontrados em resíduos líquidos, tais como arsênio, bário, cádmio, cromo, cobre, chumbo, mercúrio, níquel, prata, selênio, tálio e zinco. Além disso pode ser utilizado como um meio para melhorar o desempenho de decantadores primários, bem como para remoção de dureza e sólidos suspensos totais (SST) (Metcalf e Eddy, 2003). Segundo Metcalf e Eddy (2003), com precipitação química, é possível remover 80 a 90% dos SST.

No processo de precipitação, a solução a ser tratada pode conter diversos elementos quimicamente semelhantes, o que resulta em reações semelhantes. Esse fenômeno pode ocorrer de duas maneiras: por meio da coprecipitação, na qual o precipitado principal e o elemento de menor interesse se precipitam juntos, ou por meio da pós-precipitação, na qual o precipitado principal pode ser inicialmente puro, mas, com o tempo, pode se tornar impuro devido à precipitação de outro elemento. Quando se trata de soluções residuais, esses dois fenômenos podem ser particularmente importantes, pois ajudam a remover possíveis contaminantes do sobrenadante, que será descartado na rede pluvial (Possignolo et al., 2009).

A precipitação química é muito importante na remoção de SST, o que impacta diretamente na turbidez, que se trata do grau de atenuação da intensidade que um feixe de luz sofre ao atravessar o efluente. Este parâmetro é um ponto de atenção no tratamento do efluente já que é altamente prejudicial para flora aquática, visto que altos graus de turbidez reduzem a incidência solar no corpo receptor, resultando na queda da fotossíntese das algas e conseqüentemente, diminuindo a disponibilidade de CO<sub>2</sub>.

### *2.3.1.2 Reuso direto de efluente*

A água, considerada um recurso renovável, é submetida ao ciclo hidrológico, um processo constante de renovação natural. Quando submetida a sistemas naturais de reciclagem, a água atinge um estado de pureza e segurança. Contudo, a interferência humana, por meio de atividades antrópicas, pode resultar em diferentes graus de poluição, comprometendo sua qualidade. Apesar dos casos com alta taxa de contaminação, a água apresenta a capacidade de ser recuperada e reutilizada para diversos propósitos benéficos (Mancuso; Santos, 2003).

A determinação dos padrões de tratamento, critérios de segurança, bem como os custos associados de capital, operação e manutenção, está intrinsecamente ligada à qualidade da água utilizada e à finalidade específica do reuso. A viabilidade e as modalidades potenciais de reuso são, portanto, dependentes de fatores locais distintos, incluindo decisões políticas, estruturas institucionais e a disponibilidade hídrica (Mancuso; Santos, 2003).

De acordo com a Diretriz Técnica 05/2017 da FEPAM, a destinação final de efluentes industriais devidamente tratados inclui o lançamento em águas superficiais, disposição em solo, envio para tratamento externo, bem como o reuso direto da água nos processos, atividades e operações industriais. Sendo assim, o reuso direto do efluente tratado, quando aplicável, é fundamental em termos de gerenciamento de recursos de uma unidade fabril visto que, além das vantagens ecológicas envolvidas, resulta em uma redução de custos considerável com a aplicação de água no processo produtivo, a qual geralmente é o insumo mais consumido nas operações industriais.

Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi analisar a eficiência do tratamento por precipitação química utilizando cal hidratada, verificando o teor de sais e a turbidez do efluente, para avaliar os impactos do reuso direto da água tratada no processo de revenimento de uma indústria metalúrgica situada na região metropolitana de Porto Alegre, no Rio Grande do Sul.



### 3 Materiais e Métodos

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Estudos em Couro e Meio Ambiente (LACOURO) do Departamento de Engenharia Química da UFRGS.

#### 3.1 Efluente bruto

O efluente bruto utilizado para realizar as análises foi coletado diretamente do tanque de enxágue pós-revenimento do processo de têmpera de uma indústria metalúrgica do Rio Grande do Sul. Para garantir que o efluente apresentasse alta concentração de sais, este foi coletado no mesmo dia que seria encaminhado para a estação de tratamento.

#### 3.2 Reagentes utilizados

O único reagente utilizado para realizar as análises foi o hidróxido de cálcio, também conhecido como cal hidratada.

#### 3.3 Ensaio de precipitação por basificação

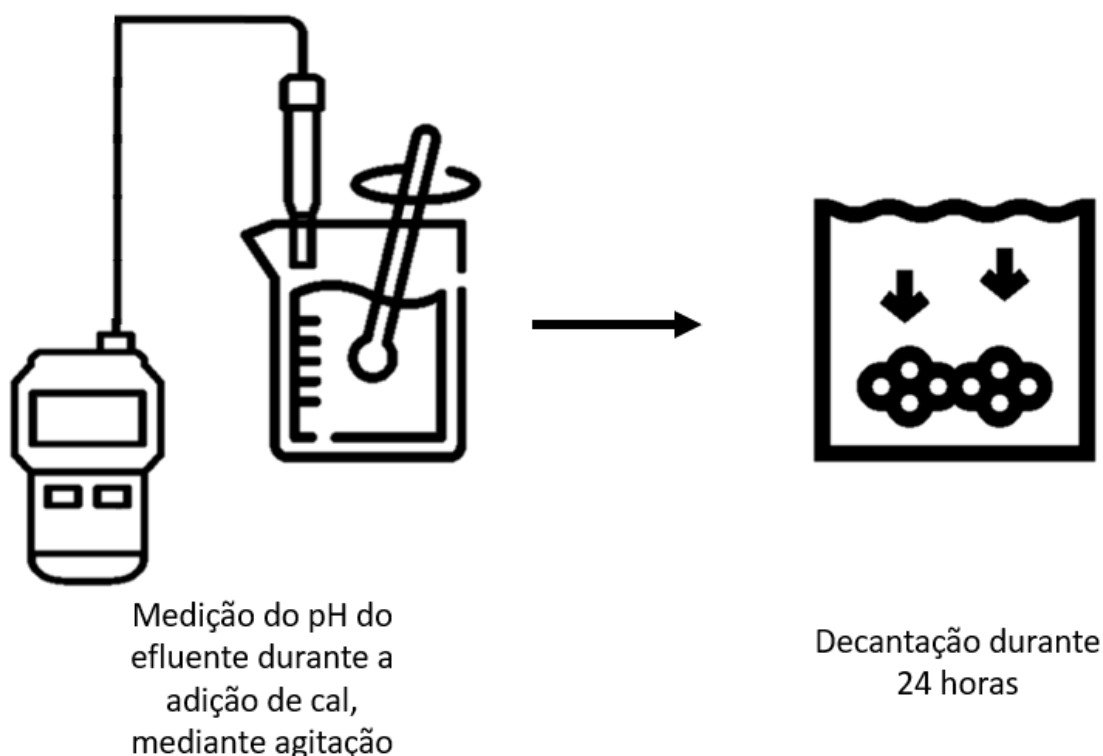
Os ensaios de precipitação foram realizados utilizando teste de jarros Floc Control da marca PoliControl com uma rotação de 150 rpm. O procedimento foi realizado adicionando cal hidratada em 1,5 litros de efluente bruto, sob agitação constante, controlando o pH com o pHmetro de bancada DM-22 da marca Digimed, até que este atingisse os valores das condições de análise, mostradas na Tabela 1.

**Tabela 1:** Condições experimentais

Amostra	pH de referência	pH final	Quantidade de cal adicionada (g)
1	11	11,08	1,05
2	11	11,19	0,97
3	12	12,32	4,11
4	12	12,20	4,84

Após o pH atingir aproximadamente o valor de referência, foi mantida a agitação por 1 minuto para homogeneização da cal hidratada no efluente. Ao final da agitação, seguiu-se para decantação durante 24 horas, conforme mostra a Figura 4.

**Figura 4:** Esquema do Jar Test no experimento



Fonte: Autor

### 3.4 Concentração de sais no efluente

Para avaliar a concentração de sais no efluente, empregou-se um densímetro graduado com escala Baumé. O Aerômetro de Baumé utiliza o princípio da flutuação para determinar a densidade do líquido a ser medido, calculando a força necessária para equilibrar o líquido dentro do tubo. A escala Baumé oferece uma graduação em graus, variando conforme a densidade do líquido analisado em relação à água (Oliveira et al., 2013). Esse método fornece uma medida precisa da densidade do efluente, permitindo uma avaliação detalhada da concentração de sais no líquido analisado. Essa abordagem instrumental é valiosa para garantir resultados confiáveis nas análises de efluentes, contribuindo para a compreensão abrangente das características químicas dessas amostras

A Tabela 2 apresenta os valores de conversão de graus Baumé em densidade.

O aerômetro de Baumé utilizado para o experimento apresentava sua escala invertida para os graus Baumé. A Tabela 3 demonstra como foi realizada a leitura no instrumento.

**Tabela 2:** Correspondências entre os graus Baumé e as densidades à 15°C

Líquidos menos densos que a água		Líquidos mais densos que a água	
Grau Baumé (°Bé)	Densidade	Grau Baumé (°Bé)	Densidade
10	1,000	0	1,000
15	0,966	5	1,035
20	0,935	10	1,074
25	0,905	15	1,116
30	0,878	20	1,160
35	0,852	25	1,209
40	0,827	30	1,262
45	0,804	35	1,320
50	0,783	40	1,383
55	0,762	45	1,453
60	0,742	50	1,530
65	0,724	55	1,615

Fonte: Oliveira; et al, 2013

**Tabela 3:** Comparação da escala do aerômetro de Baumé utilizado no experimento com o valor real da densidade

Escala do aerômetro (°Be)	Valor real (°Be)
11	0
10	1
9	2
8	3
7	4
6	5
5	6
4	7
3	8
2	9
1	10
0	11

### 3.5 Turbidez

A turbidez é um parâmetro essencial a ser analisado no tratamento de efluentes, pois além de se tratar da quantidade de luz que refrata no efluente, é um indicador da concentração de partículas em suspensão no mesmo. Essas partículas, geralmente compostas por matéria orgânica e inorgânica, podem variar em tamanho, influenciando diretamente na eficácia dos processos de tratamento.

O excesso de partículas coloidais em suspensão no efluente dificulta a propagação da luz pelo efluente, o que resulta no impacto direto na fotossíntese da flora aquática. Além disso, a presença de turbidez pode afetar negativamente a eficiência de processos biológicos, como a digestão anaeróbica, comprometendo a remoção de poluentes orgânicos no tratamento de águas residuais.

Para realizar as análises, conforme mostrado na Figura 5, foi utilizado o Turbidímetro modelo HI88703 da marca Hanna, o qual examina a turbidez através da absorbância da luz no efluente. Foram analisadas amostras de 10 mL em cubetas de vidro do próprio equipamento.

**Figura 5:** Turbidímetro modelo HI88703 da marca Hanna utilizado no experimento



Fonte: Autor

### 3.6 Espectroscopia de infravermelho por Transformada de Fourier

Para caracterizar os compostos moleculares da amostra bruta, bem como dos efluentes tratados em ambos os pH e seus respectivos lodos, foi utilizada a técnica espectroscópica de infravermelho por Transformada de Fourier.

A espectroscopia de infravermelho se baseia na frequência de vibração das moléculas mediante à absorção da radiação infravermelha, a qual resulta em frequências de vibração diferentes conforme o grupo funcional irradiado (Solomons et al., 2018).

Para realizar tal análise podem ser utilizados diversos tipos de equipamentos voltados para transcrever as absorções da radiação pelas moléculas em espectros. Neste trabalho foi utilizado o espectrômetro FTIR (Fourier Transform Infrared), o qual transforma as interferências recebidas pelas variações de intensidade de radiação em espectrograma no domínio da frequência (SILVERSTEIN et al., 1994).

A região do espectro analisada foi a do infravermelho médio (MIR) pela técnica de refletância total atenuada (ATR). Para configuração do equipamento de medição foi adotado a resolução de  $4\text{ cm}^{-1}$  e 64 varreduras para garantir uma melhor visualização das bandas a serem analisadas.

### **3.7 Estudo de caso: reuso direto do efluente de revenimento**

A grande problemática do sistema de revenimento é o alto consumo de água para lavagem do aço revestido com sal, visto que a saturação desta ocorre rapidamente, principalmente em épocas de alta produtividade, demandando a troca frequente desta água, equivalente, em média, a 4.000 litros por semana. Tendo em vista os fatores negativos econômicos e ambientais oriundos desta situação, o reuso direto do efluente tratado no processo de revenimento é a melhor alternativa para evitar gastos excessivos e desperdícios. Porém, o tratamento inadequado para tal finalidade, resultando em um efluente tratado ainda com alta concentração de sal, pode ocasionar problemas como a necessidade de substituir a água de lavagem com uma frequência ainda maior. A proposta do método de precipitação tem como finalidade reduzir ao máximo a concentração dos sais no efluente para que o reuso deste seja eficiente.

## 4 Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes às concentrações de sal via densidade, a turbidez e a análise de espectroscopia por infravermelho tanto para o efluente bruto quanto para os tratados em diferentes condições experimentais. Além disso, serão levantadas discussões frente aos resultados obtidos a fim de avaliar a eficiência da precipitação utilizando a cal hidratada e a viabilidade de aplicação do reuso direto do efluente tratado no processo produtivo.

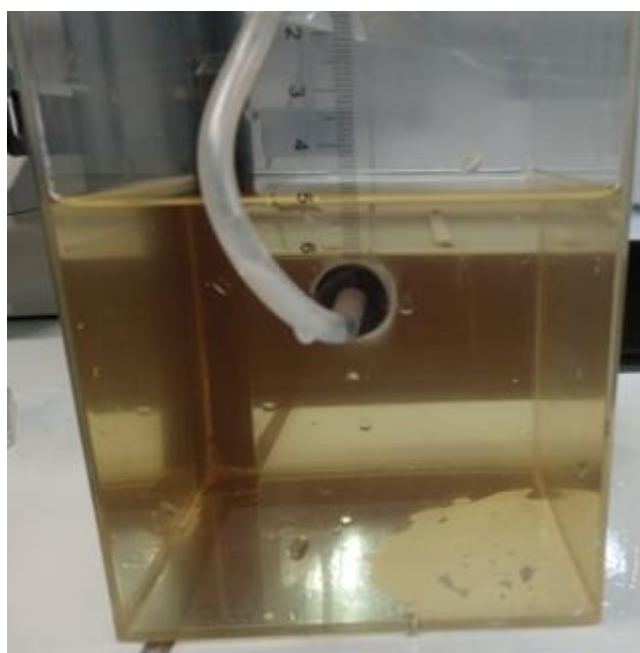
### 4.1 Ensaios de precipitação por basificação

Durante a aplicação da cal hidratada mediante agitação de 150 rpm, notou-se que parte do reagente demorou para se dissolver completamente no efluente, indicando o motivo pelo qual o pH final obtido apresentou valores levemente maiores que o pH de referência, visto que a reação continuou mesmo após o pHmetro indicar os valores 11,00 e 12,00.

Após a decantação de 24 horas, observou-se que o efluente tratado apresentava coloração levemente mais fraca que o bruto com uma baixa formação de lodo. Este resultado é esperado tendo em vista que o processo de tratamento neste estudo não representa o procedimento completo realizado em uma estação de tratamento, onde se é adicionado outros reagentes tais como carvão ativado, coagulantes e floculantes, os quais aumentam consideravelmente a sedimentação dos sólidos contidos no efluente. Devido ao fato da altura de lodo ser muito baixa, foi inviável realizar o cálculo do volume de material decantado.

O efluente bruto foi coletado direto da linha de produção, na condição de maior saturação de sal possível para que a amostra apresentasse a realidade do tratamento aplicado na estação. Devido à alta saturação, o efluente apresentou uma coloração alaranjada, conforme mostrado na Figura 6. O pH lido para o efluente bruto foi de 10,87.

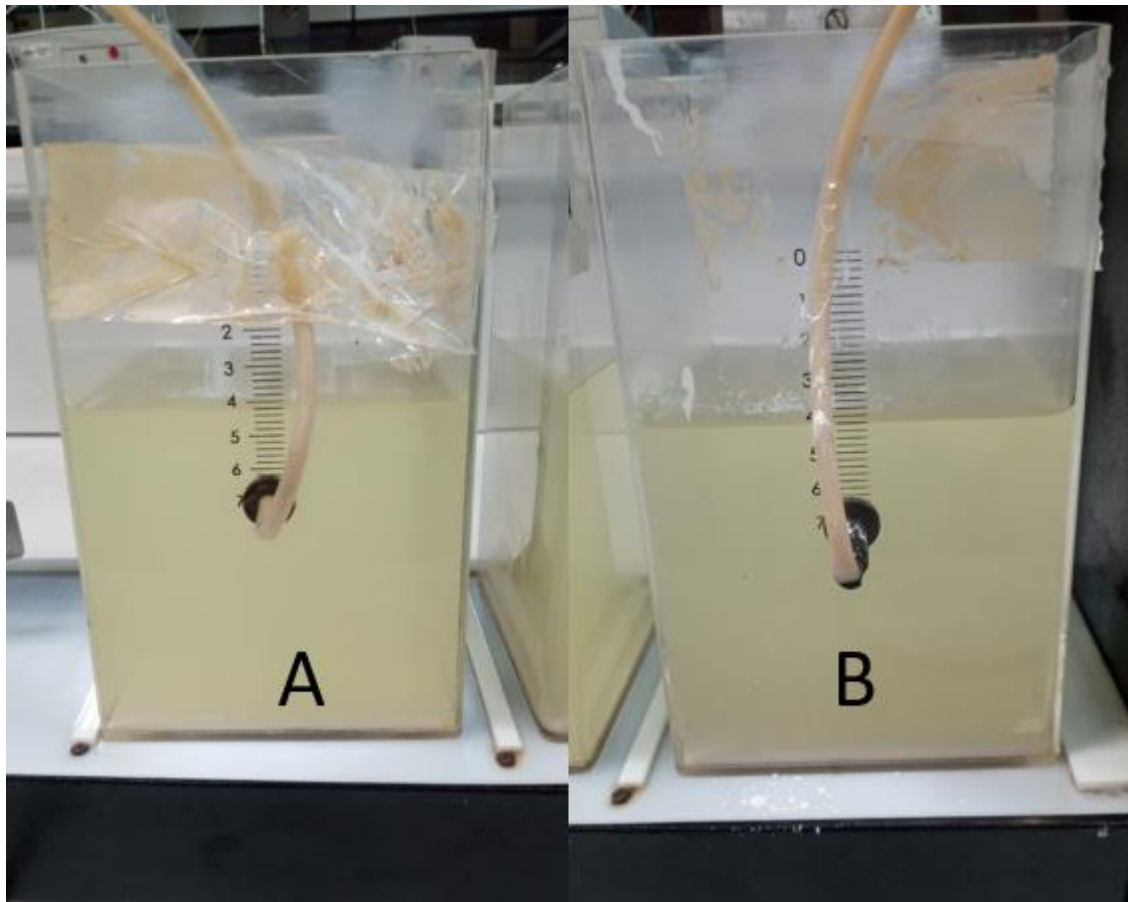
**Figura 6:** Efluente bruto de revenimento



Fonte: Autor

Após a adição da cal hidratada no efluente bruto, notou-se que este imediatamente já apresentou um tom mais claro na sua coloração, bem como a turbidez oriunda do fato do reagente possuir sua cor natural branca, como é demonstrado na Figura 7. Além disso, a cal hidratada é disponibilizada na forma de pó, portanto para que não ocorra a sedimentação instantânea é necessária uma agitação maior que outras bases comumente utilizadas no tratamento de efluentes as quais são comercializadas na forma líquida, como por exemplo o NaOH (Cavalcanti, 2016).

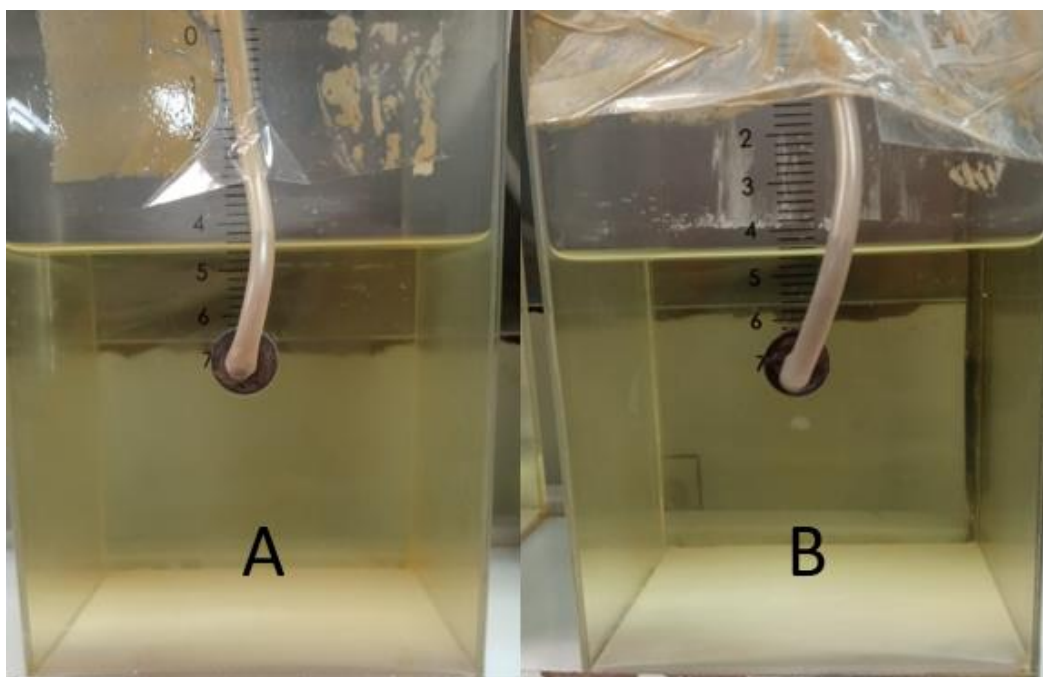
**Figura 7:** Comparativo entre o (A) efluente de pH de referência 11 e (B) efluente de pH de referência 12, ambos logo após a adição de cal hidratada.



Fonte: Autor

Após a decantação de 24 horas, verificou-se que o efluente apresentava uma coloração amarelada leve, indicando que a aplicação da cal hidratada teve efeito direto na sedimentação dos sólidos suspensos, conforme ilustrado na Figura 8. Já o lodo apresentou coloração branca, o que é esperado quando se utiliza esta base no tratamento, porém durante a aplicação do reagente notou-se flocos que tinham dificuldade de solubilizar, podendo indicar que junto ao lodo haviam resquícios de cal hidratada que não reagiram.

**Figura 8:** Comparativo entre o (A) efluente de pH de referência 11 e (B) efluente de pH de referência 12, ambos logo após 24 horas de decantação.



Fonte: Autor

#### 4.2 Análise de turbidez

Os resultados obtidos para análise de turbidez são demonstrados na Tabela 4. Avaliando o resultado de turbidez do efluente bruto e comparando com a média de 1,85 NTU obtida nas demais condições experimentais é possível verificar a alta eficiência que a cal hidratada apresentou na remoção dos sólidos suspensos, resultando em uma redução média de 91,60% da turbidez inicial.

**Tabela 4:** Dados de turbidez nas diferentes condições experimentais

Condição	Turbidez (NTU)
Efluente bruto	<b>22,0</b>
1	<b>2,0</b>
2	<b>2,4</b>
3	<b>1,8</b>
4	<b>1,2</b>



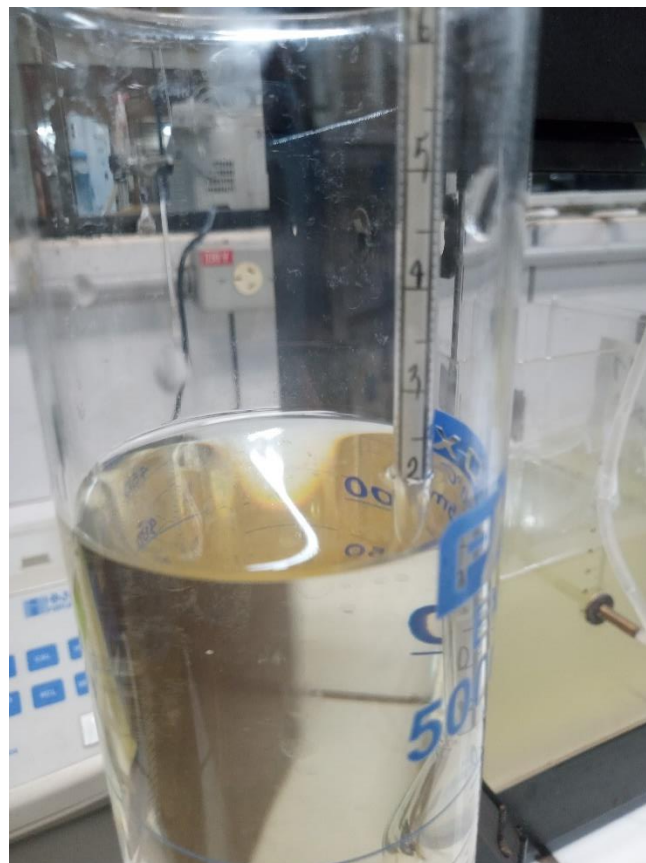
Comparando os resultados obtidos entre as condições 1, 2, 3 e 4, é possível verificar que o índice de turbidez diminui conforme o aumento da quantidade de cal hidratada adicionada ao efluente, conforme é mostrado na Tabela 4, indicando que o aumento do pH da solução tende à causar uma maior sedimentação de sólidos em suspensão, o que está de acordo com a literatura (Metcalf e Eddy, 2003). Entretanto, uma vez que a legislação não apresenta nenhum tópico referente à limites de turbidez em NTU, não são necessárias para essas condições experimentais estudadas, um pH tão alto, uma vez que quanto maior o pH, maior os custos com reagentes e com o tratamento posterior de efluente, além de maior deterioração dos equipamentos do processo.

### 4.3 Análise de densidade

Inicialmente, foi analisada a densidade da amostra de efluente bruto com o objetivo de comparar com o mesmo efluente após o tratamento.

Conforme observado na Figura 9 o efluente bruto apresentou densidade de 9°Be, conforme a leitura da escala indicada na Tabela 3.

**Figura 9:** Análise de densidade do efluente bruto através do aerômetro de Baumé



*Fonte:* Autor

Ao realizar a mesma análise com o efluente após 24 horas de decantação, verificou-se que em todas as condições experimentais o valor de densidade foi de 9°Be, igual ao efluente bruto. Um dos motivos pelo qual a densidade não apresentou nenhuma mudança pode ter sido a possibilidade de a cal hidratada não ter solubilizado completamente no efluente, resultando

na decantação do reagente, não completando a reação com os sais do efluente, fazendo com que os mesmos mantivessem a mesma concentração que possuíam no efluente bruto. Outra possibilidade é a formação de sais de carbonato com o sódio e potássio, a qual ocorreu na mesma proporção que a dissociação dos nitratos, resultando na mesma concentração de sais, porém com características diferentes do efluente bruto.

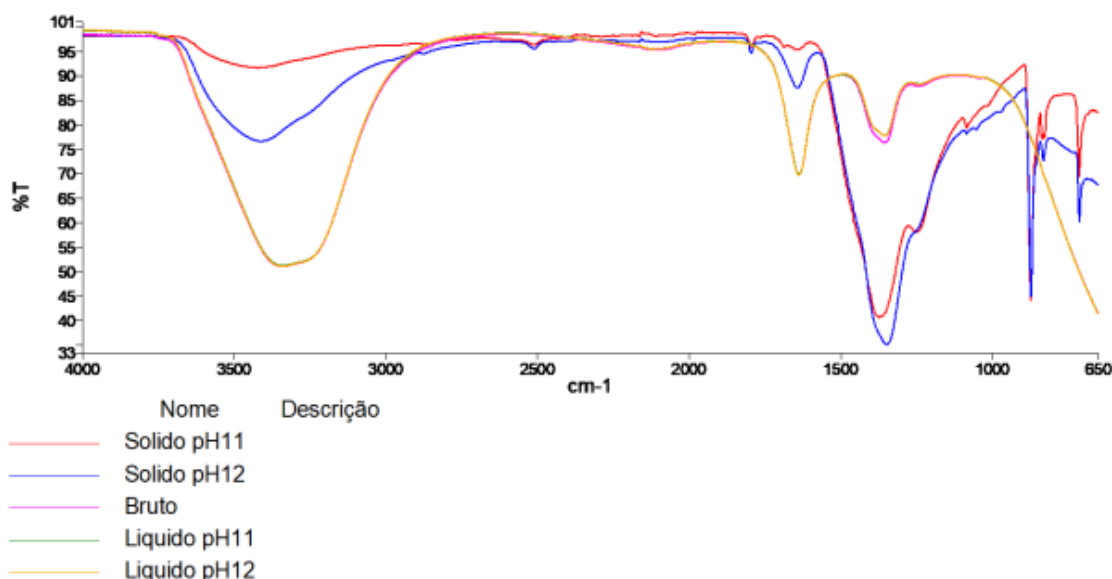
#### 4.4 Análises de infravermelho por Transformada de Fourier

Através da análise de infravermelho por Transformada de Fourier foi possível avaliar as ligações contidas em 5 amostras: efluente bruto, efluente tratado em pH 11, efluente tratado em pH 12, lodo em pH 11 e lodo em pH 12.

Na Figura 10 observa-se os espectros das 5 amostras sobrepostos. Comparando inicialmente os efluentes tratados em pH 11 e 12 (curvas verde e laranja, respectivamente), nota-se que ambos apresentam suas curvas praticamente idênticas, com bandas características em torno de  $3340\text{ cm}^{-1}$ ,  $1640\text{ cm}^{-1}$  e  $1350\text{ cm}^{-1}$ , indicando que mesmo com a diferença de pH ambos os líquidos clarificados não apresentaram diferenças significativas em sua composição. Estas observações serão detalhadas avaliando os espectros individualmente separadamente através das figuras 12 e 13.

Já os lodos em pH 11 e pH 12 (curvas vermelha e azul, respectivamente), apesar de apresentarem bandas parecidas, demonstraram diferenças nos valores de transmitância dos picos, indicando que a quantidade de cal hidratada aplicada teve impacto no resultado.

**Figura 10:** Espectroscopias de infravermelho das 5 amostras sobrepostas

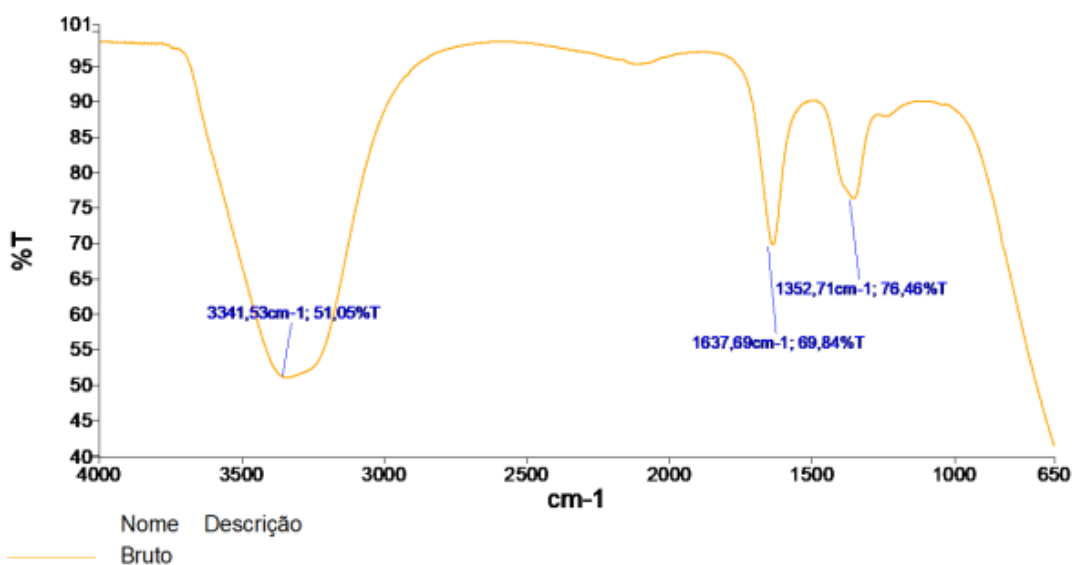


Fonte: Central Analítica – DEQUI UFRGS

#### 4.4.1 Análise do espectro de infravermelho do efluente bruto

Analisando a Figura 11 e seus respectivos picos descritos na Tabela 5, observa-se uma banda em  $1352\text{ cm}^{-1}$  a qual é característica do estiramento no nitrato assimétrico, além disso apresenta uma banda em  $1637\text{ cm}^{-1}$  a qual representa o estiramento da ligação N=O presente no nitrato, indicando que, conforme esperado, o efluente bruto apresenta os sais de nitrato contidos no processo de revenimento. A banda em  $3341\text{ cm}^{-1}$  indica o estiramento da ligação O-H referentes às moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$ , visto que maior parte do efluente é composto de água (Trivedi e Dahryn Trivedi, 2015).

**Figura 11:** Espectroscopia de infravermelho do efluente bruto



Fonte: Central Analítica – DEQUI UFRGS

**Tabela 5:** Bandas relevantes do espectro de infravermelho do efluente bruto

Número do pico	X ( $\text{cm}^{-1}$ )	Y (%T)
1	3341,53	51,5
2	1637,69	69,84
3	1352,71	76,46

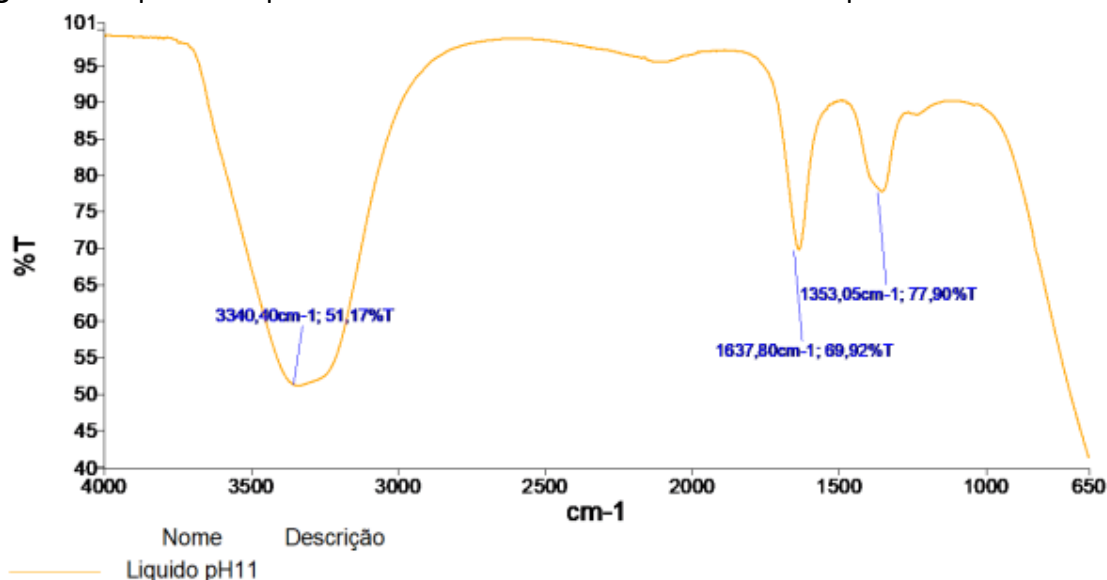
Fonte: Central Analítica – DEQUI UFRGS

#### 4.4.2 Análise do espectro de infravermelho da parcela líquida do efluente de pH 11

Através da Figura 12 e da Tabela 6 é possível verificar que a principal banda está representada no número de onda de  $3340,40\text{ cm}^{-1}$ , a qual representa uma hidroxila (-OH) ligada à cátions metálicos (Dyab et al., 2016). Este comportamento no efluente tratado com cal hidratada é esperado visto que a hidroxila contida no reagente se liga aos cátions de  $\text{Na}^+$  e

$K^+$  presentes no nitrato de sódio e potássio contidos no efluente bruto de revenimento. Isso indica que parte dos íons metálicos não precipitaram no processo, gerando hidróxidos de sódio e de potássio os quais não são insolúveis em água.

**Figura 12:** Espectroscopia de infravermelho do efluente tratado de pH 11



Fonte: Central Analítica – DEQUI UFRGS

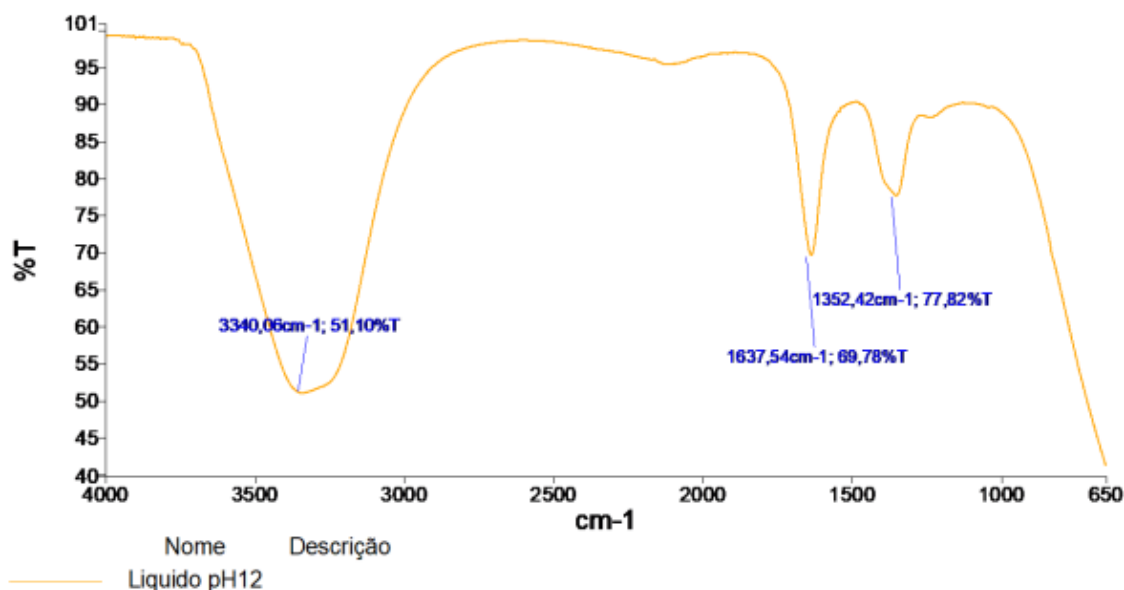
**Tabela 6:** Bandas relevantes do espectro de infravermelho do efluente tratado de pH 11

Número do pico	X ( $cm^{-1}$ )	Y (%T)
1	3340,4	51,17
2	1637,8	69,92
3	1353,05	77,9

Fonte: Central Analítica – DEQUI UFRGS

#### 4.4.3 Análise do espectro de infravermelho da parcela líquida do efluente de pH 12

Através da Figura 13 e Tabela , é possível perceber que o efluente tratado em pH 12 não apresentou diferenças, em termos de estiramentos e vibrações moleculares, quando comparado ao efluente de pH 11. Como a variação de pH de 11 para 12 é relativamente baixa, é compreensível que as ligações presentes no efluente não tenham uma variação considerável, resultando em espectros praticamente idênticos.

**Figura 13:** Espectroscopia de infravermelho do efluente líquido de pH 12

Fonte: Central Analítica – DEQUI UFRGS

**Tabela 7:** Bandas relevantes do espectro de infravermelho do efluente tratado de pH 12

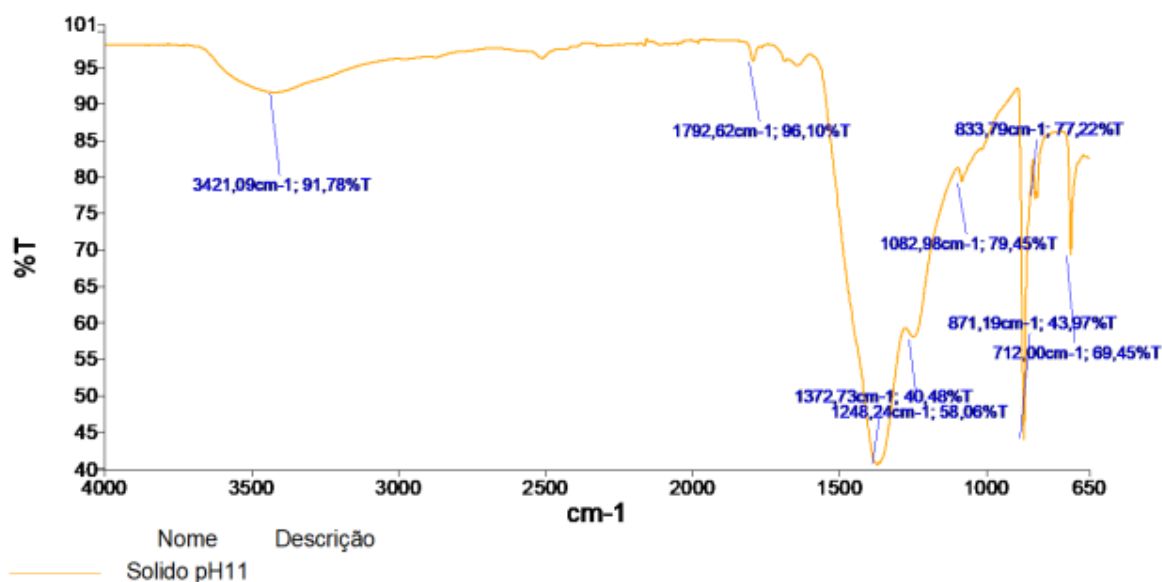
Número do pico	X (cm <sup>-1</sup> )	Y (%T)
1	3340,06	51,1
2	1637,54	69,78
3	1352,42	77,82

Fonte: Central Analítica – DEQUI UFRGS

#### 4.4.4 Análise do espectro de infravermelho da parcela sólida do efluente de pH 11

Na Figura 14, observa-se que as bandas de maior destaque são em 712 cm<sup>-1</sup>, referente à vibrações do carbonato assimétrico, e em 871 cm<sup>-1</sup> e 1372 cm<sup>-1</sup>, referentes à vibrações do carbonato assimétrico (Madhusudana Rao et al., 2013). A presença dessas bandas pode indicar que gerou-se um lodo composto por carbonatos de sódio e potássio, o que é o comportamento esperado para reação da cal hidratada com o nitrato destes sais, todavia outra possibilidade é que parte do reagente pode não ter solubilizado no efluente, sedimentando sem reagir, resultando no acúmulo de carbonato de cálcio no lodo, o que também justifica tais picos.

Também é possível perceber a banda em 3421 cm<sup>-1</sup> a qual se refere à hidroxila ligada à cátions metálicos. A presença desse composto pode ser oriunda do fato da amostra de lodo não estar completamente seca, contendo resquícios do efluente tratado na sua composição.

**Figura 14:** Espectroscopia de infravermelho do lodo de pH 11

Fonte: Central Analítica – DEQUI UFRGS

**Tabela 8:** Bandas relevantes do espectro de infravermelho do lodo de pH 11

Número do pico	X (cm <sup>-1</sup> )	Y (%T)
1	3421,09	91,78
2	1792,62	96,1
3	1372,73	40,48
4	1248,24	58,06
5	1082,98	79,45
6	871,19	43,97
7	833,79	77,22
8	712	69,45

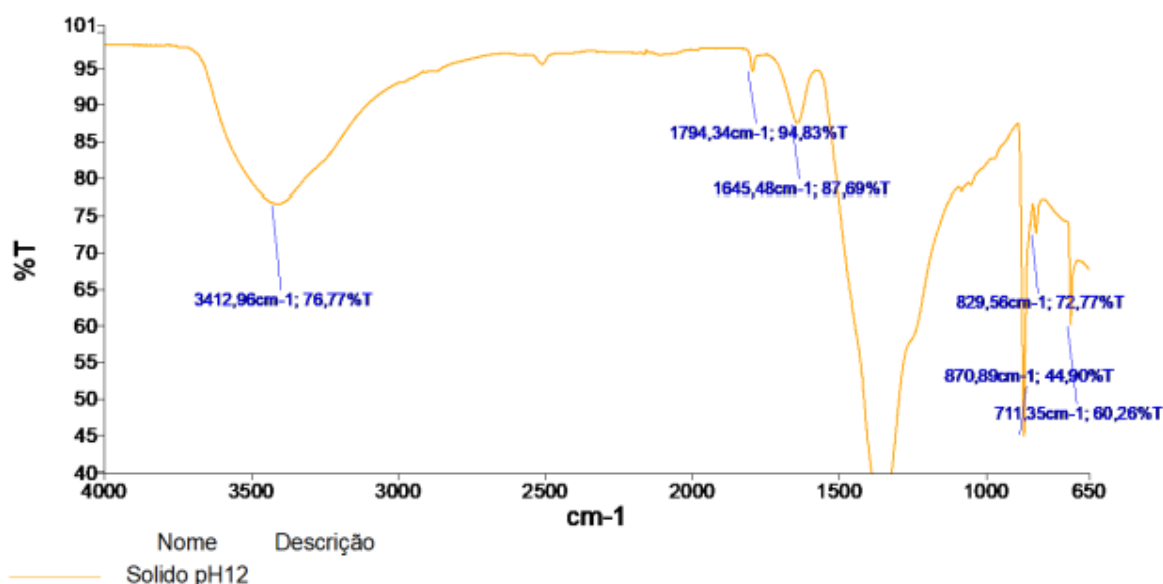
Fonte: Central Analítica – DEQUI UFRGS

#### 4.4.5 Análise do espectro de infravermelho da parcela sólida do efluente de pH 12

Na Figura 15, observa-se que o lodo de pH 12 se comportou da mesma forma que o lodo de pH 11, o que é esperado visto que tanto o efluente quanto o reagente é o mesmo o ambos os casos. Portanto, nota-se que o pico em 1372 cm<sup>-1</sup> se mostrou mais significativo do que na outra condição, que também é um resultado esperado, visto que neste efluente foi adicionado

aproximadamente 3 gramas a mais de efluente que no caso onde o pH de referência é 11, justificando o fato de se ter vibrações maiores do carbonato neste caso.

**Figura 15:** Espectroscopia de infravermelho do lodo de pH 12



Fonte: Central Analítica – DEQUI UFRGS

**Tabela 9:** Bandas relevantes do espectro de infravermelho do lodo de pH 12

Número do pico	X (cm <sup>-1</sup> )	Y (%T)
1	3421,09	91,78
2	1792,62	96,1
3	1372,73	40,48
4	1248,24	58,06
5	1082,98	79,45
6	871,19	43,97
7	833,79	77,22
8	712	69,45

Fonte: Central Analítica – DEQUI UFRGS

Em resumo, a análise dos dados revela informações valiosas sobre as características e composição das amostras investigadas. Ao utilizar a técnica de infravermelho por Transformada de Fourier, foram avaliadas cinco amostras distintas: efluente bruto, efluente tratado em pH 11, efluente tratado em pH 12, lodo em pH 11 e lodo em pH 12. A sobreposição dos espectros das amostras revela semelhanças e diferenças significativas. Notavelmente, os efluentes tratados em pH 11 e 12 apresentam curvas praticamente idênticas, indicando que a

diferença de pH não teve um impacto substancial em sua composição. Por outro lado, os lodos em pH 11 e pH 12 demonstraram diferenças nos valores de transmitância dos picos, sugerindo que a quantidade de cal hidratada aplicada influenciou os resultados.

A análise específica do efluente bruto revela a presença de características como estiramento no nitrato assimétrico e estiramento da ligação N=O, indicando a presença de sais de nitrato provenientes do processo de revenimento. Além disso, a banda em 3341 cm<sup>-1</sup> sugere o estiramento da ligação O-H, relacionada às moléculas de água presentes no efluente. Ao tratar os efluentes em diferentes níveis de pH, a análise dos espectros revela comportamentos distintos, com destaque para a identificação de hidroxila ligada a cátions metálicos no efluente tratado com cal hidratada. A análise dos espectros das parcelas sólidas dos efluentes de pH 11 e 12 indica a presença de carbonatos de sódio e potássio, corroborando com a eficácia do método de precipitação.



## 5 Conclusões e Trabalhos Futuros

O efeito direto da cal hidratada na turbidez do efluente bruto se mostrou eficiente, visto que se observou uma diminuição de 91,60% deste parâmetro no efluente tratado nas diferentes condições de tratamento. Este resultado é muito favorável tanto em termos de eficiência do tratamento quanto em termos de atendimento à legislação ambiental, visto que a redução da turbidez está diretamente relacionada à concentração de sólidos suspensos, a qual é um parâmetro controlado pela CONSEMA 430/2011.

A concentração de sais contida nas diferentes condições de efluente tratado não apresentou alteração quando avaliada via densidade, visto que se encontrou o mesmo resultado, em graus Baumé, que na amostra de efluente bruto. Em complemento à esta análise, os resultados de FTIR demonstraram que os sais contidos no efluente tratado se tratavam de carbonatos de sódio e potássio oriundos da reação com a cal hidratada, justificando que o fato da concentração ter se mantido a mesma do efluente bruto, porém com sais de composição diferente.

Na análise de infravermelho também se verificou que uma parcela do carbonato de cálcio não solubilizou no efluente, sedimentando sem reagir, indicando que tal reagente pode não ser o que possui melhor eficiência para precipitação química dos sais com tal composição que apresenta o efluente de revenimento. Avaliando os espectros das amostras em diferentes pH's, observou-se que não houve diferenças consideráveis entre ambas condições, sendo este resultado justificado pelo fato do efluente bruto já possuir um pH inicial alto, variando pouco nos dois casos. Porém apesar deste resultado, a metodologia apresentou-se viável tecnicamente para a realidade do tratamento de águas residuais deste tipo de processo, principalmente pela praticidade e os resultados favoráveis para destinação em redes pluviais. Porém não se mostrou eficiente quando avaliada a aplicação do reuso direto no processo produtivo, visto que, apesar da precipitação e decantação dos nitratos, obteve-se saturação de carbonatos no efluente clarificado. Ou seja, quando este efluente for reutilizado no banho pós-revenimento, não terá capacidade de remover o sal do aço já que sua concentração encontra-se alta tal qual o efluente original.

A fim de expandir o estudo, obtendo novos resultados para maior desenvolvimento do tema, podem ser realizados trabalhos futuros, tais como:

- Caracterizar completamente o efluente bruto, identificando sua composição em termos de metais, principalmente sódio e potássio, bem como outras características que podem alterar a metodologia aplicada, tais como possíveis quantidades de matéria orgânica diluídas no efluente;
- Avaliar a eficiência de outros reagentes alcalinos no tratamento, bem como estudar o impacto da utilização de ácidos para precipitar os sais de nitrato, tais como o ácido clorídrico e ácido sulfúrico.
- Realizar uma análise da viabilidade econômica desta metodologia em uma estação de tratamento de efluentes, através do levantamento de gastos com cal hidratada em comparação com os reagentes utilizados no tratamento convencional e os impactos financeiros de se elaborar um sistema de retorno deste efluente para o processo produtivo.

## REFERÊNCIAS

BENVENUTI, T. **AVALIAÇÃO DA ELETRODIALISE NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE PROCESSO DE ELETRODISPOSIÇÃO DE NÍQUEL**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

BERNS, H.; THEISEN, W. **Ferrous Materials: Steel and Cast Iron**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2008.

CAVALCANTI, J.E.W; Manual de Tratamento de Efluentes Industriais. Brasil, 2009.

CHIAVENATO, P. V. Avaliação da adequação de sistema de tratamento de efluentes em indústria vinícola localizada na Serra Gaúcha. **Universidade Estadual do Rio Grande do Sul**. Bento Gonçalves, 2022.

CONAMA, 2011. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente.

DYAB, A. K. F.; ABDALLAH, E. M.; AHMED, S. A.; et al. Fabrication and Characterisation of Novel Natural Lycopodium clavatum<i>Sporopollenin Microcapsules Loaded with Nano-Magnetic Humic Acid-Metal Complexes. **Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences**, v. 06, n. 04, p. 109–131, 2016.

FEPAM, 2019. Resolução nº 15/2017 versão 02, de setembro de 2019, da Fundação Estadual de Proteção Ambiental.

KLIAUGA, A. M.; FERRANTE, M. **Metalurgia básica para ourives e designers : do metal à jóia**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2018.

MADHUSUDANA RAO, K.; KRISHNA RAO, K. S. V.; SUDHAKAR, P.; et al. Synthesis and characterization of biodegradable poly (vinyl caprolactam) grafted on to sodium alginate and its microgels for controlled release studies of an anticancer drug. **Journal of Applied Pharmaceutical Science**, v. 3, n. 6, p. 61–69, jun. 2013.

MANCUSO, Pedro Caetano Sanches e SANTOS, Hilton Felício dos. **Reúso de água**. Barueri: Manole, 2003.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **WasteWater Engineering, Treatment, Disposal and Reuse**. Boston: McGraw-Hill, 2003.

OLIVEIRA, B. DE M.; FILHO, J. M. M.; AFONSO, J. C. A densidade e a evolução do densímetro. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, 18 fev. 2013.

PINEDO, C. E. Capítulo 4 - Têmpera e revenimento. Em: BLUCHER, E. (Ed.). **Tratamentos térmicos superficiais de aços**. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2021. p. 22–25.

POSSIGNOLO, N. V.; TAVARES, G. A.; OLIVEIRA, J. G. G. DE; et al. EMPREGO DA PRECIPITAÇÃO QUÍMICA COMO TÉCNICA DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS LABORATORIAIS CONTENDO FLÚOR E COBRE. **Revista Analytica**, ago. 2009.

SILVERSTEIN, R. M., WEBSTER, F. X. **Identificação Espectrométrica de Compostos Orgânicos**, 6ª. Ed. LTC Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 2000.

SOLOMONS, G.; FRYHLE, C.; SNYDER, S. **Química Orgânica**. 12. ed. São Paulo: LTC, 2018. v. 1

STATISTA. **World crude steel production from 2012 to 2022**. 2022. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/267264/world-crude-steel-production/>. Acesso em: 17 jan. 2024.

TRIVEDI, M. K.; DAHRYN TRIVEDI, A. B. Spectroscopic Characterization of Disodium Hydrogen Orthophosphate and Sodium Nitrate after Biofield Treatment. **Journal of Chromatography & Separation Techniques**, v. 06, n. 05, 2015.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **Total production of crude steel**. 2022. Disponível em: [https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/annual-production-steel-data/?ind=P1\\_crude\\_steel\\_total\\_pub/CHN/IND](https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/annual-production-steel-data/?ind=P1_crude_steel_total_pub/CHN/IND). Acesso em: 17 jan. 2024.