

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA E
MATERIAIS - PPGE3M**

VÍTOR OTACÍLIO DE ALMEIDA

**PRODUÇÃO DE CLORETO FÉRRICO A PARTIR DE REJEITO DE MINÉRIO DE
FERRO: UM ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO E APLICABILIDADE**

**Porto Alegre
2019**

VÍTOR OTACÍLIO DE ALMEIDA

PRODUÇÃO DE CLORETO FÉRRICO A PARTIR DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO: UM ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO E APLICABILIDADE

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalúrgica na modalidade acadêmica.

Orientador: Ivo André Homrich Schneider

**Porto Alegre
2019**

CIP - Catalogação na Publicação

Almeida, Vitor Otacilio de
PRODUÇÃO DE CLORETO FÉRRICO A PARTIR DE REJEITO DE
MINÉRIO DE FERRO: UM ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO E
APLICABILIDADE / Vitor Otacilio de Almeida. --2019.
116 f.
Orientador: Ivo André Homrich Schneider.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Estudos acerca da incorporação de rejeitos de
minério de ferro. 2. Caracterização físico-químico do
rejeito da mineração de ferro. 3. Potencialidades de
incorporação deste resíduo como insumo industrial. 4.
Produção de cloreto férrico a partir de rejeitos de
minério de ferro. I. Schneider, Ivo André Homrich,
orient. II. Título.

Esse trabalho foi julgado adequado como dissertação de mestrado em Engenharia, área de concentração de Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalúrgica e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Ivo André Homrich Schneider

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Otávio Petter

Prof. Dr. Rafael Newton Zaneti

Prof. Dr. Versiane Albis Leão

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGE3M

DEDICATÓRIA

Dedico todas as horas, dúvidas, dificuldades e vitórias deste projeto àqueles que têm grandes sonhos e são colocados à prova todos os dias.

Dedico a minha família que é o alicerce que fez esse objetivo se tornar realidade.

Que a realização deste propósito inspire àqueles que querem buscar o seu melhor e não colocam limites para a realização de seus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela inspiração de todas as manhãs, pela força e pela coragem que me permitiram vencer grandes limites e me reinventar a medida que a vida me colocava frente a novos desafios.

À minha mãe; ícone de perseverança e paciência que em todos os dias mesmo de longe se mostrou presente em minhas batalhas.

Gratidão a minha madrinha Ana que é minha referência de força e dedicação, por todos os dias me inspirar a ser melhor e a ver o melhor da vida.

Aos meus familiares e amigos, que são minha referência de amizade, fraternidade e companheirismo, meu muito obrigado!

Meus agradecimentos ao meu orientador Ivo Schneider, que confiou em meu potencial e engajou-se comigo em um projeto desafiador para os dois. Obrigado por todas as oportunidades, pela atenção e por sua maestria como pessoa e profissional.

Aos colegas do Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental (LTM), em especial a Jessica Weiler e Karine Batista que estiveram ao meu lado e buscaram comigo objetivos comuns.

A CAPES pela provisão da bolsa de mestrado e a todos que fizeram parte do meu caminho, que cruzaram minha estrada em algum momento e são parte da pessoa que venho construindo a cada passo da minha jornada!

Minha Gratidão!

RESUMO

A exploração de minério de ferro é segmento de destaque dentro da indústria mineral, sendo forte indicador de desenvolvimento e investimentos em infraestrutura. Associado às práticas de exploração e beneficiamento está à geração de grandes montantes de resíduos, cujo destino final é o descarte em estruturas de disposição tais como pilhas e barragens. O rejeito do processo de beneficiamento ganhou grande repercussão após o rompimento das Barragens de Fundão e de Córrego do Feijão; que configuraram desastres sem precedentes para a mineração brasileira. Assim, o objetivo deste trabalho foi caracterizar uma amostra de rejeito de minério de ferro e investigar a aplicação deste resíduo como insumo para a produção de cloreto férrico. A metodologia do trabalho incluiu a caracterização do material, estudos de lixiviação para obtenção de uma solução férrica, além da caracterização e avaliação da eficiência do reagente férrico obtido como coagulante. No processo de lixiviação, as variáveis investigadas foram: temperatura, concentração de ácido clorídrico e o tempo de aquecimento. Os resultados demonstram que a fração sólida do rejeito bruto apresenta uma granulometria na faixa de 0,07 a 300 μm e área superficial específica de 10,6 m^2g^{-1} . A composição do material é de aproximadamente 31% de óxidos de ferro (predominantemente Fe_2O_3), 62% de SiO_2 e 7% de caulinita e outros minerais. A melhor condição obtida no processo de lixiviação foi a temperatura de 80°C, concentração de 10,8 mol L^{-1} de ácido clorídrico e o tempo de aquecimento de 120 min. Nestas condições, obteve-se uma eficiência de solubilização do ferro de 94%. O reagente férrico obtido neste estudo apresentou uma concentração de ferro III superior a 11%, atendendo as exigências de mercado, e teores de contaminantes metálicos indesejáveis em níveis abaixo de um reagente similar produzido a partir de sucata metálica. O coagulante produzido foi utilizado no tratamento de uma amostra de água bruta de abastecimento do corpo hídrico Guaíba, onde foi obtido um resultado satisfatório segundo os padrões de potabilidade estabelecidos na Portaria N° 2914/2011 do Ministério da Saúde. Pode-se concluir que a produção cloreto férrico mostra-se uma alternativa para o aproveitamento de parte do rejeito de minério descartado pela mineração de ferro da região do Quadrilátero Ferrífero.

Palavras-chave: rejeitos de minério de ferro, lixiviação, cloreto férrico, meio ambiente.

ABSTRACT

The exploitation of iron ore is an important segment within the mining industry, being a strong indicator of development and investments in infrastructure. Associated with the exploitation and processing is the generation of large amounts of waste, whose final destination is disposal in structures such as piles and dams. Iron ore tailings are at the forefront of public debate after the rupture of the Dams of Fundão and Córrego do Feijão which constituted unprecedented disasters for Brazilian mining. The objective of this work was to characterize a sample of iron ore tailings and to investigate the application of this residue for the production of ferric chloride. The methodology of the work included the characterization of the material, leaching studies to obtain a ferric solution, and evaluation of the chemical composition and efficiency of the ferric reagent obtained as coagulant. In the leaching process, the variables investigated were the temperature, the concentration of hydrochloric acid and the time of heating. The results showed that the solid fraction of the raw tailings has a particle size in the range of 0.07 to 300 μm and a specific surface area of 10.6 m^2g^{-1} . The material is composed of about 31% iron oxides (mostly Fe_2O_3), 62% SiO_2 and 7% of caulinite and other minerals. The best condition attained in the leaching process was a temperature of 80 °C, a concentration of 10.8 mol L^{-1} hydrochloric acid and a heating time of 120 min. Under these conditions, an iron solubilization efficiency of 94% was reached. The ferric reagent obtained in this study had concentrations of an iron III concentration higher than 11% (meeting the market requirement) and levels of undesirable metal contaminants below a similar reagent produced from metal scrap. The coagulant produced was used for the treatment of water from the Guaíba water body, where a satisfactory result was obtained according to the potability standards established in Ordinance N^o. 2914/2011 of the Ministry of Health - Brazil. It can be concluded that the ferric chloride production is an alternative for the exploitation of part of the ore discarded by the iron mining of the Quadrilátero Ferrífero region.

Keywords: iron ore tailings, leaching, ferric chloride, environment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Participação dos minerais metálicos no valor da produção mineral comercializada - 2016	23
Figura 02 - Produção Minério de ferro - Players Mundiais (2017)	23
Figura 03 - Principais minerais que contém ferro	24
Figura 04 - Itabirito (BIF).	25
Figura 05 - Províncias ferríferas brasileiras.....	26
Figura 06 - Mina a céu aberto de minério de ferro.	27
Figura 07- Fluxograma típico de beneficiamento de minérios.....	28
Figura 08 - Mina de minério de ferro explorada no estado de Minas Gerais	30
Figura 09 - Contribuição de cada substância na geração de rejeitos da mineração (1996-2005).....	32
Figura 10 - Contribuição de cada substância na geração de rejeitos da mineração (2010- 2030).....	32
Figura 11- Comparativo entre as Contribuições de cada substância na geração de rejeitos da mineração entre os períodos de 1996-2005 e 2010-2030.	33
Figura 12 - Área do desastre com a barragem de fundão. (A) Área do desastre antes do rompimento em novembro de 2014. (B) Área após o rompimento da barragem..	34
Figura 13 - Antes e depois da área do acidente em Brumadinho/MG.....	35
Figura 14 - Imagens de satélite da área afetada pelos rejeitos da barragem de Córrego do Feijão.....	36
Figura 15 - Método de Alçamento da linha de montante.....	37
Figura 16 - Acidentes com barragens de rejeitos de minério de ferro ocorridos no Brasil.	37
Figura 17 - Métodos de alteamento de barragens. (A) Método de alteamento a Jusante. (B) Método de Alteamento a linha de centro.....	38
Figura 18 - Barragem de rejeitos de minério de ferro em Minas Gerais.....	39
Figura 19 - Percentual das formas de disposição de rejeitos de minério de ferro no estado de Minas Gerais em 2018.....	39
Figura 20 - Potencial de dano associado às barragens de rejeitos de mineração. ...	40
Figura 21 - Últimas falhas nas barragens de rejeitos de minério de ferro ocorridas no Brasil desde 1975 até 2018.....	42
Figura 22 - Principais segmentos de investigação relacionados a rejeitos minerais .	43
Figura 23 - Investigação acerca dos rejeitos por tipologia mineral.....	44
Figura 24 - Principais campos de investigação dos estudos relacionados aos rejeitos de minério de ferro	48
Figura 25 - Contribuição por país em estudos sobre rejeitos de minério de ferro.	48
Figura 26 - Representação esquemática do modelo da dupla camada elétrica	51
Figura 27 - Partículas coloidais. (A) Partículas eletricamente carregadas em repulsão. (B) Partículas “sem carga” livres para colidir e se agregarem.	52
Figura 28 - Esquema geral de uma estação de Tratamento de água convencional..	54
Figura 29 - Mecanismos dos processos de coagulação que desestabilizam as partículas coloidais.....	55

Figura 30 - Características dos principais coagulantes aplicados no tratamento de efluentes.....	56
Figura 31 - Esquema de produção de coagulante cloreto férrico.....	58
Figura 32 - Potencial dos ácidos de diluição dos óxidos de ferro.....	60
Figura 33 - Estágios do trabalho	62
Figura 34 - Localização da mineração de origem do rejeito de minério de ferro.....	63
Figura 35 - Lavra de minério de ferro em bancadas.....	64
Figura 36 - Fluxograma de Beneficiamento da empresa.....	65
Figura 37 - Tambores utilizados para transporte do rejeito.	66
Figura 38 - Sistema de Abastecimento Menino Deus.	67
Figura 39 - Ponto de coleta da água no Lago Guaíba.....	68
Figura 40 - Amostra de água bruta. (A) amostra bruta. (B) Amostra condicionada para análise.....	68
Figura 41 - Caracterizações físico-químicas do rejeito de minério de ferro.....	70
Figura 42 - Etapas de pesagem do método do picnômetro.....	71
Figura 43 - Suspensão de micro e nano partículas de rejeito de minério de ferro. ...	74
Figura 44 - Processo de produção e caracterização do cloreto férrico.	76
Figura 45 - Etapas de produção do cloreto férrico	78
Figura 46 - Comparativo do tratamento de água bruta em função da dosagem do coagulante.....	80
Figura 47- Escopo dos resultados obtidos.	85
Figura 48- Distribuição granulométrica do rejeito de minério de ferro (μm).....	86
Figura 49 - Distribuição granulométrica do rejeito de minério de ferro (nm).....	87
Figura 50 - Imagem obtida em Microscópio Óptico. (A) Rejeito em Polpa (B) Suspensão de Micro e Nanopartículas de Rejeito.....	89
Figura 51 - Análise Termogravimétrica. (A) Curvas de TGA e DTG. (B) TGA detalhada.....	90
Figura 52 - Calorimetria exploratória diferencial (DSC).....	91
Figura 53 - Difratoograma do rejeito de minério de ferro.....	92
Figura 54 - Resultado da Espectrometria de fluorescência de Raios-X.	93
Figura 55 - Soluções obtidas no processo de lixiviação em função das variações de temperatura e concentração de ácido clorídrico.....	95
Figura 56 - Concentração de ferro obtida nos ensaios de produção de cloreto férrico a partir da variação de temperatura e concentração ácida na solução lixiviante.	96
Figura 57 - Eficiência de solubilização do ferro contido no rejeito.....	97
Figura 58 - Valores médios de concentração de ferro em função da temperatura e da concentração de agente lixiviante.	98
Figura 59 - Solubilização do ferro em função do tempo, da temperatura de 80°C e concentração ácida de $10,8 \text{ mol L}^{-1}$	99
Figura 60 - Cloreto férrico obtido para a caracterização	101
Figura 61 - Proporção dos metais presentes na amostra de coagulante férrico comercial e o coagulante produzido nesta pesquisa.....	104
Figura 62 - Tamanho dos flocos frente ao aumento da dosagem de coagulante....	105

Figura 63 - Comparativo dos resíduos do processo de obtenção de cloreto férrico com o rejeito de minério de ferro.....	108
Figura 64 - Comparação de volume do rejeito e dos resíduos sem/pós lavagem. ...	109
Figura 65 - Distribuição Granulométrica do resíduo. (A) Sem a etapa de lavagem. (B) após a etapa de lavagem.	111
Figura 66 - Resultado da Espectrometria de fluorescência de Raios-X para o resíduo sem a etapa de lavagem.	113
Figura 67 - Resultado da Espectrometria de fluorescência de Raios-X para o resíduo após a etapa de lavagem.	114
Figura 68 - Perfil de consumo da sílica na forma de areia de quartzo no Brasil.....	115
Figura 69 - Especificações de uso da sílica	116
Figura 70 - Escala de resultados de produção de cloreto férrico a partir de rejeitos de minério de ferro.	118
Figura 71 - Esquema de processo para produção de cloreto férrico.	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 01- Resíduos sólidos da mineração de Minas Gerais (2008-2009).....	21
Tabela 02 - Equipamentos utilizados no estudo experimental	69
Tabela 03 - Reagentes empregados no estudo experimental.....	70
Tabela 04 - Delineamento experimental para produção de cloreto férrico.	77
Tabela 05 - Metodologias utilizadas na realização das determinações de água bruta e tratada.	81
Tabela 06 - Metodologias utilizadas nas análises de metais da água bruta e tratada.	81
Tabela 07 - Dados de caracterização física das partículas de rejeito.	86
Tabela 08 - Distribuição e concentração das nanopartículas de rejeito.	87
Tabela 09 - Fases cristalinas identificadas na análise de DRX.....	92
Tabela 10 - Análise elementar de amostra de rejeito de minério de ferro via ICP/OES	94
Tabela 11 - Análise elementar da amostra do cloreto férrico via ICP/OES	102
Tabela 12 - Comparativa entre alguns cloretos férricos produzidos a partir de diferentes materiais em relação aos limites máximos de elementos tóxicos.....	103
Tabela 13 - Ensaio de determinação da dosagem de coagulante.....	105
Tabela 14 - Resultado da análise de inorgânicos da água bruta antes e após o tratamento	106
Tabela 15 - Resultado da análise de metais, microbiológicos e compostos orgânicos voláteis	107
Tabela 16 - Resultados de densidade e pH do resíduo.	110
Tabela 17 - Distribuição das partículas segundo diâmetro.....	110
Tabela 18 - Massas aferidas no rejeito e nos resíduos gerados para a produção de 1 litro de $FeCl_3$	113
Tabela 19 - Comparativo dos resultados de FRX do rejeito, do resíduo sem lavagem e do resíduo pós-lavagem.....	114
Tabela 20 - Custo estimado com reagentes para produção de cloreto férrico P.A.	121
Tabela 21 - Custo estimado com reagentes para produção de cloreto férrico grau técnico.....	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA: Agência Nacional de Águas

BIF: *Banded iron formations*

Bm³a: bilhões de metros cúbicos ano

BNDES: Banco Nacional do Desenvolvimento

CENIMA: Centro Nacional de Monitoramento e Informações Ambientais

COPAM: Conselho Estadual de Política Ambiental

DMAE: Departamento Municipal de Águas e Esgotos

DNPM : Departamento Nacional de Produção Mineral

DSC: *Differential scanning calorimeter*

DTG: *Derivative Thermogravimetry*

FEAM: Fundação Estadual do Meio Ambiente

ha: hectare

IBAMA: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBRAM: Instituto Brasileiro de Mineração

ICOLD: *International Commission on Large Dams*

IPEA: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

LACER: Laboratório de materiais Cerâmicos

LAQIA: Laboratório de Análises Químicas, Industriais e Ambientais.

LQ: Limite de Quantificação

LTM: Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental

MG: Minas Gerais

Mt: milhões de toneladas

Mta: milhões de toneladas ano

Mm³a: milhões de metros cúbicos ano

N.A.: Não se aplica

NTA: *Nanoparticle Tracking Analysis*

P.A.: Para Análise

pH: potencial Hidrogeniônico

PIB: Produto Interno Bruto

ROM: *Run of Mine*

RPM: Rotações por Minuto

ta: toneladas por ano

TGA: *Thermogravimetric analysis*

t/h: toneladas hora

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

VMP: Valor Máximo Permitido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS.....	19
1.1.1 Objetivo Geral.....	19
1.1.2 Objetivos Específicos.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Mineração e Histórico	20
2.2 Minério de ferro	23
2.3 Rejeito de Minério de ferro.....	30
2.4 Potenciais e aplicabilidades do rejeito de minério de ferro	44
2.5 Coagulantes.....	50
2.6 Cloreto Férrico	57
3 MATERIAIS E MÉTODOS	62
3.1 MATERIAIS.....	63
3.1.1 Amostra de Rejeito de Minério de Ferro	63
3.1.2 Amostra de água bruta de abastecimento	66
3.1.3 Equipamentos.....	69
3.1.4 Água e reagentes.....	69
3.2 MÉTODOS.....	70
3.2.1 Caracterização do rejeito de minério de ferro	70
3.2.1.1 Densidade da Polpa	71
3.2.1.2 Densidade do Rejeito Seco	71
3.2.1.3 Concentração de Sólidos.....	72
3.2.1.4 Área Superficial Específica.....	73
3.2.1.5 Análise granulométrica	73
3.2.1.6 Concentração de Nanopartículas	73
3.2.1.7 Análise Termogravimétrica - TGA	74
3.2.1.8 Calorimetria Exploratória Diferencial - DSC.....	74
3.2.1.9 Difração de Raios-X (DRX).....	75
3.2.1.10 Fluorescência de Raios-X (FRX)	75
3.2.1.11 Análise Elementar - ICP (OES)	75
3.2.2 Produção do Cloreto Férrico.....	76
3.2.2.1 Variáveis de Produção.....	77

3.2.2.2	Análise por Via Úmida de Fe_{total} , Fe^{2+} , Fe^{3+}	79
3.2.2.3	Caracterização Cloreto Férrico	79
3.2.2.4	Eficiência de Aplicação do coagulante	79
3.2.2.5	Caracterização do Resíduo produzido no Processo	82
3.2.2.6	Considerações técnicas e econômica	83
3.2.2.7	Análise de Variância	84
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
4.1	Caracterizações físico-químicas do rejeito de minério de ferro	85
4.2	Produção do Cloreto Férrico	95
4.3	Caracterizações e Eficiência de Aplicação do Cloreto Férrico	101
4.4	Caracterizações do resíduo produzido nos estágios de obtenção do cloreto férrico	108
4.5	Considerações técnicas e econômicas	117
5	CONCLUSÕES	123
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	125
	REFERÊNCIAS	126
	ANEXOS	139
	ANEXO I - Método de determinação de Fe_{total}	139
	ANEXO II - Método de determinação de Fe^{2+}	140
	ANEXO III - Laudo da análise de Água Bruta	141
	ANEXO IV - Laudo da análise de água tratada com cloreto férrico	145

1 INTRODUÇÃO

A mineração é parte importante da sociedade, mas está sujeita a expressivos riscos e impactos. Ampliar estudos e pesquisas acerca de todos os estágios da indústria mineral é determinante para a reinvenção de modelos de processos, atualização do sistema produtivo da mineração frente às novas demandas de sustentabilidade e progresso, como também conhecimento das condicionantes que caracterizam esse ramo industrial.

Questões a respeito de sustentabilidade, a necessidade de remodelamento dos processos de exploração e beneficiamento de minérios são elementos a serem investigados para o avanço do setor.

O montante de passivos ambientais gerados pela mineração e a gestão aplicada aos resíduos minerais são temáticas importantes. Os rejeitos de mineração assumiram grande evidência diante dos últimos acidentes com barragens ocorridos no Brasil.

Jones e Boger (2012) afirmam que a mineração é a maior produtora mundial de resíduos, produzindo cerca de 65 bilhões de toneladas/ano, dos quais 14 bilhões são rejeitos oriundos do beneficiamento.

Os acidentes com barragens ocorridos em Mariana/MG (2015) e Brumadinho/MG (2019) configuram as maiores tragédias socioambientais da história brasileira, causadas por atividade mineradora. Tais acidentes chamam a atenção para uma série de elementos que precisam ser identificados, analisados e criticados de maneira a reinventar o modo operante que gerou desastres com tal magnitude. As tecnologias disponíveis, as metodologias de monitoramento, os processos de fiscalização e os treinamentos de segurança que foram enfatizados após o rompimento da Barragem de Fundão (2015) não foram suficientes para evitar e minimizar os danos ocorridos no rompimento da barragem de Córrego do Feijão (2019).

A presença das instalações administrativas, operacionais e de convivência da empresa Vale, em Córrego do Feijão, instaladas a jusante da Barragem mostram que o gerenciamento dos riscos vinculados a estruturas de barragens não vem sendo ponderados. Tais gargalos evidenciam a intrínseca necessidade de

readequação do sistema de gerenciamento de rejeitos da mineração com urgência primária.

O cenário destes acidentes se mostra associado a minerações de ferro e a empresas que tem grande destaque nacional, estando à frente da produção brasileira. Isso intensifica a preocupação quanto ao gerenciamento destes resíduos, visto o papel do minério de ferro e o destaque destas corporações dentro do universo da mineração.

A indústria de produção do minério de ferro pode ser caracterizada como termômetro de desenvolvimento. A produção de aço que sustenta o crescimento de diversas economias em ascensão absorve a maior parte do minério de ferro produzido, sendo que 99% desse metal são utilizados na fabricação de aço e ferro fundido (DNPM, 2013).

De acordo com Cantisano (2012), o grande consumo de aço e a conseqüente incorporação do minério de ferro produzido são características de períodos de intenso investimento em infraestrutura, necessária para sustentar os processos de industrialização e urbanização associados à evolução das economias em desenvolvimento.

O papel do minério de ferro na economia brasileira é de destaque, já que o Brasil apresenta-se como um dos grandes fornecedores deste insumo para o mercado internacional. No segmento de produção mineral do Brasil, o minério de ferro representa 63,4% do valor total de produção das oito principais substâncias metálicas comercializadas (DNPM, 2017).

Assim como a produção do minério de ferro, o rejeito obtido nos processos de beneficiamento dessa tipologia mineral também tem destaque no cenário nacional. Neste caso, o destaque se deve a quantidade gerada deste resíduo e como é realizada a gestão do mesmo.

Os processos de beneficiamento do minério de ferro demonstram, em média; que a cada tonelada de minério de ferro obtida, 400 kg de rejeito são produzidos. Assim, 40% da produção nacional de minério de ferro ROM (*Run of mine*) correspondem a rejeitos.

Dentro deste contexto, tomou-se o rejeito de minério de ferro como matriz para elaboração deste estudo. O rejeito de minério de ferro é todo o material que não apresenta interesse econômico e é removido do minério de interesse durante os estágios de processamento mineral. Em sua grande maioria, este resíduo é destinado para barragens, que constituem grandes passivos ambientais.

As atividades de mineração buscam constantemente a otimização do processo de produção e muitas vezes o rejeito é pouco estudado. Para que as problemáticas associadas à geração de rejeitos possam ser mitigadas e seu aproveitamento possa ser potencializado é fundamental a caracterização destes resíduos.

Nesta pesquisa, serão exploradas as principais características de um rejeito de minério de ferro proveniente do Quadrilátero Ferrífero, visando determinar suas principais condicionantes físicas e químicas. A caracterização físico-química é alicerce para a investigação das potencialidades deste rejeito para aplicação industrial.

Partindo da caracterização é possível entender melhor as possíveis aplicabilidades atreladas a esse material e assim se buscar utilidades para o mesmo. O aproveitamento de rejeitos minerais é um campo que deve ser investigado, sendo um assunto alinhado às premissas de economia circular e desenvolvimento sustentável.

Levantamento estatístico realizado por Almeida e Schneider (2018), demonstra que a maioria dos estudos associados a rejeitos minerais apresentam cunho remediativo, ou seja, são pesquisas voltadas para contenção de contaminações e toxicidade relacionadas a determinadas tipologias minerais.

No que diz respeito à incorporação de rejeitos na indústria, o campo da construção civil é o que apresenta maior número de pesquisas que destacam a aplicabilidade dos rejeitos como insumo. Neste segmento, os rejeitos de minério de ferro já apresentam resultados positivos quanto ao uso em produtos como cerâmicas, cimentos e agregados, conforme apresentado nos estudos de Chen *et al* (2013) e Shettima *et al* (2016).

Porém, diante da quantidade de rejeitos gerada; é preciso a avaliação deste resíduo para diversos campos industriais, de modo que seu aproveitamento possa ser maximizado.

Dentre as características deste rejeito, a sua composição é a primeira a ser considerada quanto aos potenciais de incorporação. Os rejeitos de minério de ferro são formados basicamente por óxidos de ferro e sílica (ESPÓSITO, 2000; PORTES, 2013, ASSIS, 2018).

Frente à composição dos rejeitos de minério de ferro, várias aplicabilidades podem ser avaliadas, principalmente no que diz respeito ao aproveitamento do ferro e da sílica presentes nesse material, já que juntos compõem mais de 80% deste resíduo mineral.

A rota escolhida para incorporação deste resíduo foi a de produção de cloreto férrico. O cloreto férrico é um importante coagulante aplicado ao tratamento de água para abastecimento público ou no tratamento de águas residuárias. A produção deste reagente se baseou na dissolução do rejeito de minério de ferro em ácido clorídrico, onde o produto deste processo torna-se o reagente férrico comumente aplicado como coagulante. Esse seria um material alternativo à produção deste reagente, uma vez que normalmente este é produzido a partir de sucata metálica e concentrado de hematita.

Portanto, o presente trabalho investigou a possibilidade de obtenção de um cloreto férrico de qualidade a partir do rejeito de minério de ferro. Para tal, foram avaliadas as principais variáveis que regem a incorporação do rejeito nesse processo de maneira a se identificar a melhor rota de produção deste reagente. Parâmetros de eficiência, produção, técnicos e econômicos foram abordados. Além das caracterizações acerca do rejeito e do cloreto férrico foi realizada a caracterização do resíduo gerado no processo de lixiviação. Foram analisadas condicionantes físicas e químicas, abordando possíveis potencialidades para incorporação do resíduo deste processo em aplicações industriais. Por fim, foram discutidas as principais relevâncias e benefícios a serem obtidos com a incorporação do rejeito no processo produtivo do cloreto férrico.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa foi caracterizar o rejeito de minério de ferro e investigar a aplicação deste resíduo como insumo para produção de cloreto férrico.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o rejeito de minério de ferro em termos de parâmetros físicos, químicos e mineralógicos;
- Estudar as principais variáveis de processo para produção do cloreto férrico, as quais: concentração do agente lixiviante ácido clorídrico (HCl), temperatura e tempo de aquecimento.
- Produzir um coagulante férrico nas melhores condições definidas neste estudo, visando analisar sua composição e eficiência no tratamento de uma água para abastecimento público.
- Caracterizar o resíduo gerado no processo de obtenção do cloreto férrico, com o intuito de explorar possíveis aplicações para o mesmo;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Mineração e Histórico

O contexto da indústria mineral envolve campos multidisciplinares os quais compreendem questões econômicas, ambientais, de segurança e geológicas.

Segundo Amaral e Filho (2014), mineração é a extração de minerais que apresentam natureza econômica que também é referida, num sentido lato, como indústria extrativa mineral ou indústria de produtos minerais.

O resultado econômico da indústria mineral precisa estar alinhado em pilares característicos deste ramo de negócios, que devem ser reconhecidos diante das condições de cada empreendimento; não fugindo de fundamentações elementares que são comumente visualizadas em todas as operações de extração mineral. Muitas das peculiaridades que circundam as atividades minerárias conferem riscos que tornam tais negócios muito vulneráveis.

A mineração é fundamental para a sociedade e sua importância deve ser referenciada e atualizada perante as novas demandas de mercado, do meio ambiente e população. Importância corroborada por Lorenzo (2015), que afirma que a mineração é reconhecida internacionalmente como atividade impulsionadora do desenvolvimento, tendo grande participação no progresso econômico de muitas das principais nações do mundo, como: Canadá, Austrália, Estados Unidos. A mineração é fundamental para implantação de toda infraestrutura, tecnologia e comodidade que conhecemos hoje.

Contudo, os impactos da mineração não são todos favoráveis, gerando controvérsias na opinião pública. Há um impasse entre os benefícios da mineração e também quanto aos efeitos ambientais e riscos gerados nas operações (HARTMAN e MUTMANSKY, 2002). Essa conjuntura contrastante desafia a indústria da mineração a buscar inovações que permitam uma redução de impactos ambientais e sociais.

Segundo BNDES - Banco Nacional do Desenvolvimento (2017); o porte elevado de algumas operações, a quantidade de carga movimentada e os rejeitos gerados têm representado risco para diversas regiões e populações, eventualmente afetadas por

acidentes e mecanismos ineficientes de monitoramento. Esses fatores são grandes desafios a serem superados dentro do universo de exploração mineral.

A consolidação de mudanças visando maior sustentabilidade socioambiental dentro do universo da mineração depende fundamentalmente de inovação tecnológica. A busca por inovação é alicerce para que práticas de “Economia Circular” possam ser efetivamente incorporadas na estrutura da mineração.

A Economia Circular pode ser entendida como o modelo que busca remediar a degradação gerada pelo modelo linear de produção, entendido como: extração-fabricação-uso-descarte. Estudos da *Royal Society of Arts* (2014), indicam que cerca de 90% do material extraído do meio natural se torna resíduo antes dos produtos saírem das fábricas e aproximadamente 80% do conteúdo material dos próprios bens é descartado em menos de seis meses.

A proposta da economia circular é manter o valor de todos os materiais ao longo do processo produtivo e uso deste bem, garantindo redução de: consumo de novas matérias primas, geração de resíduos e emissões; como também a perda de energia (COMISSÃO EUROPEIA, 2014).

No caso da mineração, grande quantidade de energia é despendida para operacionalização, disposição e controle dos resíduos gerados no processo. Os resíduos da mineração de destaque são os resíduos sólidos de extração que são chamados de estéril e os resíduos provenientes dos processos de tratamento/beneficiamento dos minérios que são conhecidos como rejeitos.

Dados da FEAM (2010), baseado em inventários dos resíduos sólidos da mineração de Minas Gerais, indicam a magnitude das quantidades de resíduos gerados nas atividades da mineração (Tabela 01).

Tabela 01- Resíduos sólidos da mineração de Minas Gerais (2008-2009).

Categoria	Quantidade (t)		Total (t)	%
	2008	2009		
Estéril	375.377.784	286.546.806	661.924.590	75%
Rejeito	101.452.987	123.058.761	224.511.748	25%

Fonte: FEAM (2009).

Esses números demonstram o quão significativas são as quantidades de resíduos gerados nas atividades de mineração. Perante o aporte de materiais provenientes das atividades da mineração observa-se que é fundamental um bom gerenciamento dos resíduos minerais, visando à minimização dos impactos ambientais e controle de riscos. Traçar rotas que visem melhores resultados quanto à geração, controle e gestão dos resíduos é essencial para colocar a cadeia de processos da indústria mineral nos trilhos de “Logística Reversa”, “Economia Circular” e “Produção Mais Limpa” que são preceitos essenciais a sustentabilidade dos processos.

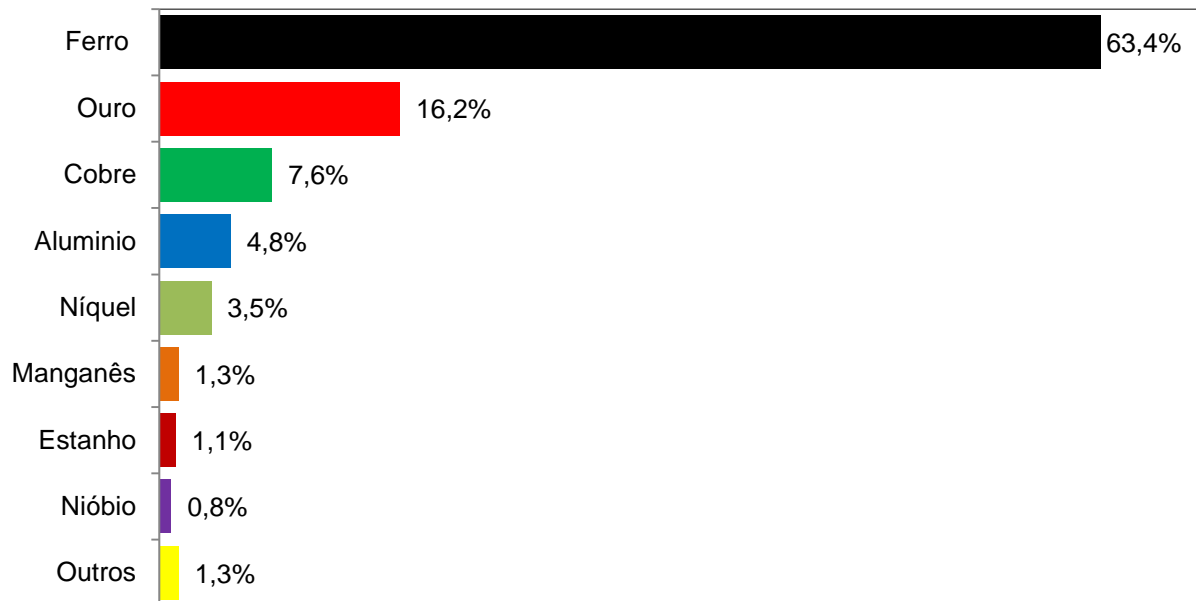
No caso da mineração a incorporação destas inovações é diferente de outras áreas industriais. Segundo SÁNCHEZ (2007), a aplicação de processos produtivos mais limpos na mineração depende diretamente de pesquisa e desenvolvimento tecnológico específico. Contexto distinto da aplicação de metodologias e ferramentas de sustentabilidade de sucesso que são comumente utilizadas em outros ramos industriais.

Essa condição ocorre, uma vez que processo de extração e tratamento mineral apresenta um conjunto de especificidades que caracterizam cada empreendimento, o que exige uma atenção descentralizada e particular para cada contexto.

Avaliando toda a interface produtiva da mineração, há um universo de fatores que se distribuem entre as inúmeras espécies minerais exploradas e beneficiadas no Brasil. Mas ante a essa série de elementos, cabe salientar a importância econômica da mineração para o cenário brasileiro. Dados do IBRAM (2016) elucidam que a mineração movimentou U\$ 40 bilhões no ano de 2014; respondendo por 5% do PIB industrial brasileiro.

Por sua vez, os minerais metálicos respondem a 77% do valor total da produção mineral comercializada no Brasil, onde o ferro assume a dianteira das principais substâncias metálicas produzidas, conforme distribuição observada na Figura 01.

Figura 01 - Participação dos minerais metálicos no valor da produção mineral comercializada - 2016



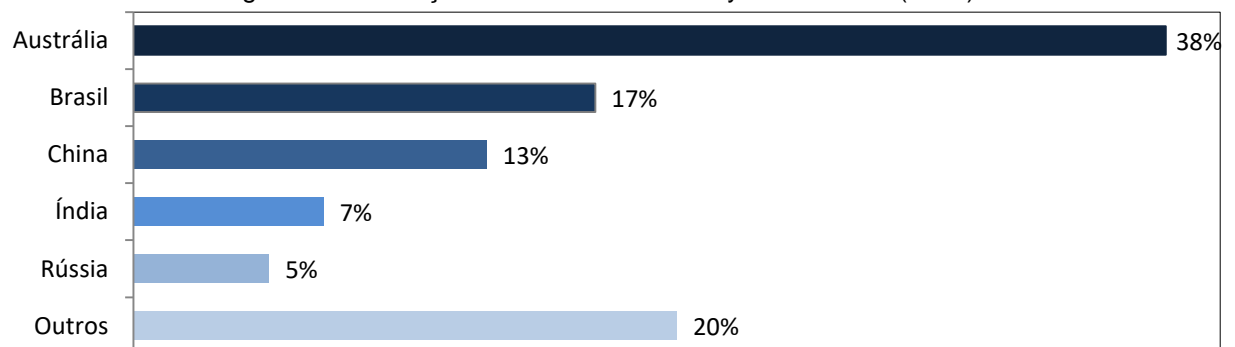
Fonte: Adaptado de DNPM (2017).

O minério de ferro representa significativa parcela do mercado comercial brasileiro de minerais metálicos. Posição essa que juntamente com as características de exploração, geração de resíduos, porte das operações de exploração e beneficiamento, configura um segmento de grande relevância para o estudo dos rejeitos minerais gerados; sendo por isso alvo desta pesquisa.

2.2 Minério de ferro

Dentre as tipologias minerais de relevância para o mercado brasileiro o minério de ferro assume posição de destaque, colocando o Brasil entre grandes *players* mundiais (FIGURA 02).

Figura 02 - Produção Minério de ferro - Players Mundiais (2017)



Fonte: WA Iron Ore Profile (2019).

Segundo dados do *Government of Western Australia* (2018), o Brasil é o segundo maior produtor e exportador de minério de ferro do mundo, assumindo 17% da produção global de minério de ferro e 24% das exportações marítimas deste mineral no ano de 2017.

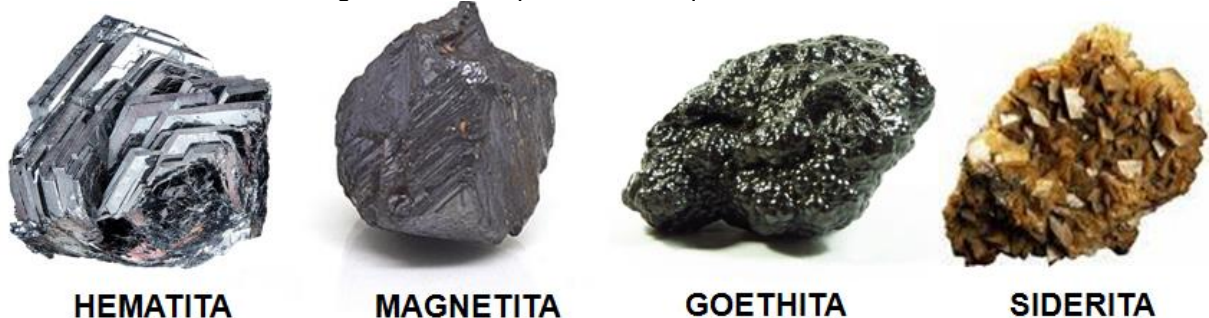
O ferro é o quarto elemento mais abundante da crosta terrestre, compondo 35% da massa total do planeta. Uma pequena fração de ferro é encontrada em estado livre e tem origem meteórica, mas a maior parte do elemento está combinada com oxigênio, silício e enxofre (OLIVEIRA *et al*, 2013; DNPM, 2014).

Ao longo do planeta existem muitas áreas com concentrações de ferro, porém devido ao baixo teor destes depósitos torna-se impraticável a exploração. As jazidas comerciais concentram-se em apenas alguns países; sendo que o Brasil detém aproximadamente 13,9% das reservas mundiais.

Segundo Silva (2015), o teor do minério é essencial para sua classificação diante do grau de pureza e para definir o valor da comercialização. Normalmente, uma jazida de ferro deve conter um teor de pelo menos 25% de ferro recuperável para que a exploração seja viável. Em casos mais específicos, grandes jazidas podem permitir teores menores em caso de baixos custos com transporte.

Aproximadamente 95% do metal utilizado pela sociedade contém ferro, que pode ser encontrado em mais de 300 tipologias minerais. Os principais minerais que contém ferro são: hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4), goethita ($\text{FeO}\cdot\text{OH}$) e siderita (FeCO_3) (FIGURA 03). Geologicamente os depósitos de ferro sedimentares são os mais importantes, por constituírem as grandes formações ferríferas bandadas (QUARESMA, 2009; YELLISHETTY *et al*, 2010; BNDES, 2014).

Figura 03 - Principais minerais que contém ferro.



HEMATITA

MAGNETITA

GOETHITA

SIDERITA

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

As formações ferríferas bandadas (*Banded-iron formation – BIF*), conhecidas no Brasil como Itabirito, são formações compostas basicamente por hematita (Fe_2O_3) e sílica (SiO_2), apresentando-se morfologicamente como a Figura 04 a seguir.

Figura 04 - Itabirito (BIF).



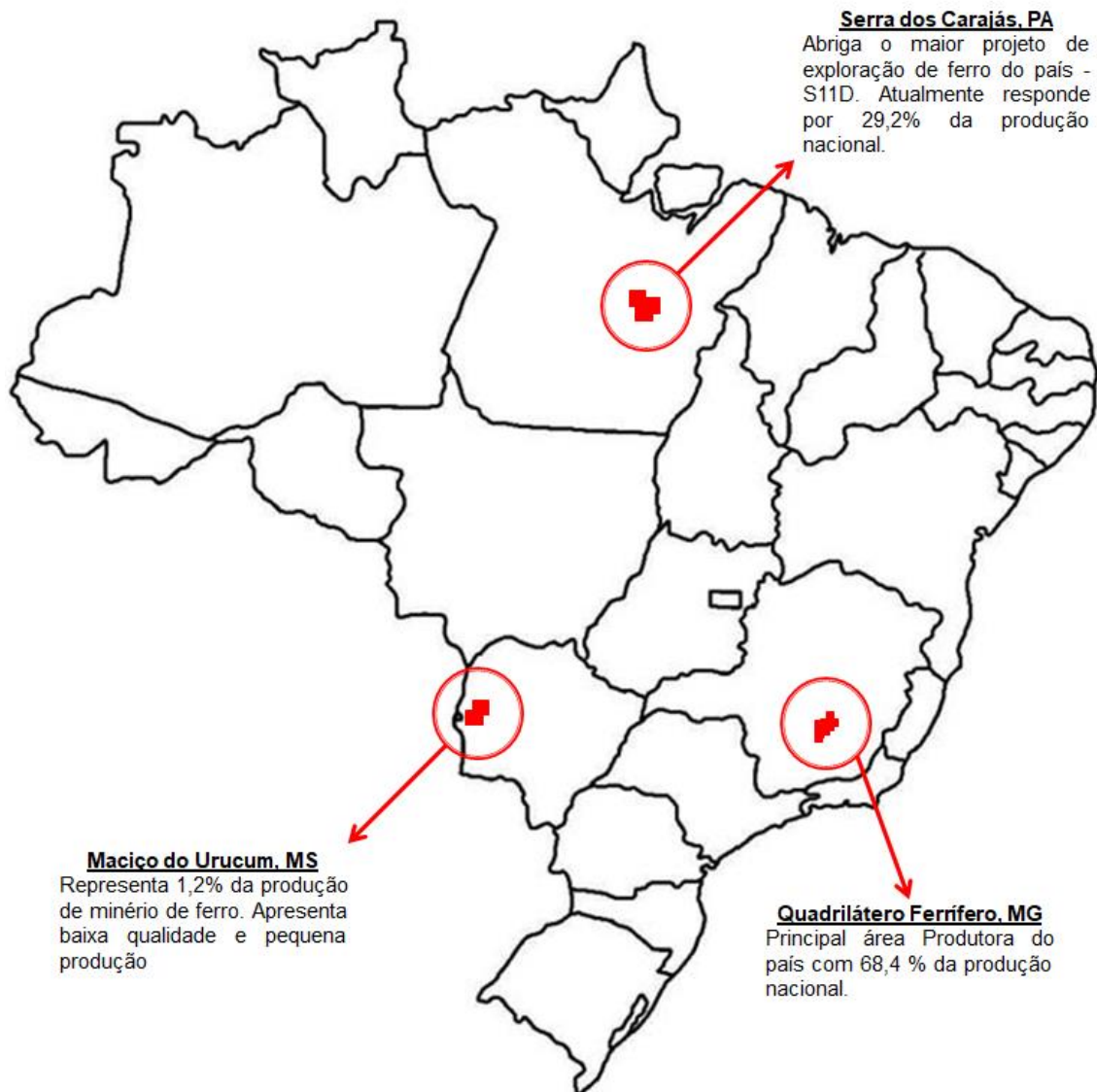
Fonte: Autor (2019)

As maiores reservas de minério de ferro estão localizadas na Austrália, Rússia, China e no Brasil. Dados do DNPM (2014), indicam que as reservas mundiais de exploração de minério de ferro totalizam 170 bilhões de toneladas.

De acordo com DNPM (2013), as reservas brasileiras de minério de ferro estão distribuídas basicamente nos estados de Minas Gerais (63%), Pará (18%) e Mato Grosso do Sul (17%). Esses estados correspondem respectivamente às províncias ferríferas do Quadrilátero Ferrífero, Serra dos Carajás e Maciço do Urucum (FIGURA 05).

As províncias ferríferas de Minas Gerais e do Pará assumiram juntas a marca de 86,9% da produção de substâncias metálicas do Brasil. No ano de 2016, foram beneficiadas cerca de 420 milhões de toneladas de minério de ferro, que geraram uma produção comercializada de mais de 46 bilhões de reais (DNPM, 2017).

Figura 05 - Províncias ferríferas brasileiras



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

As atividades de mineração passam por uma série de etapas; como escavação, beneficiamento (britagem, moagem, peneiramento, classificação, concentração, entre outros); além de processos de extração avançados como processos hidrometalúrgicos e pirometalúrgicos (WILLS, 1992).

As minas de minério de ferro brasileiro são exploradas a céu aberto, com lavra em bancadas e desmonte com uso de explosivos (FIGURA 06).

Figura 06 - Mina a céu aberto de minério de ferro.



Fonte: Autor (2019).

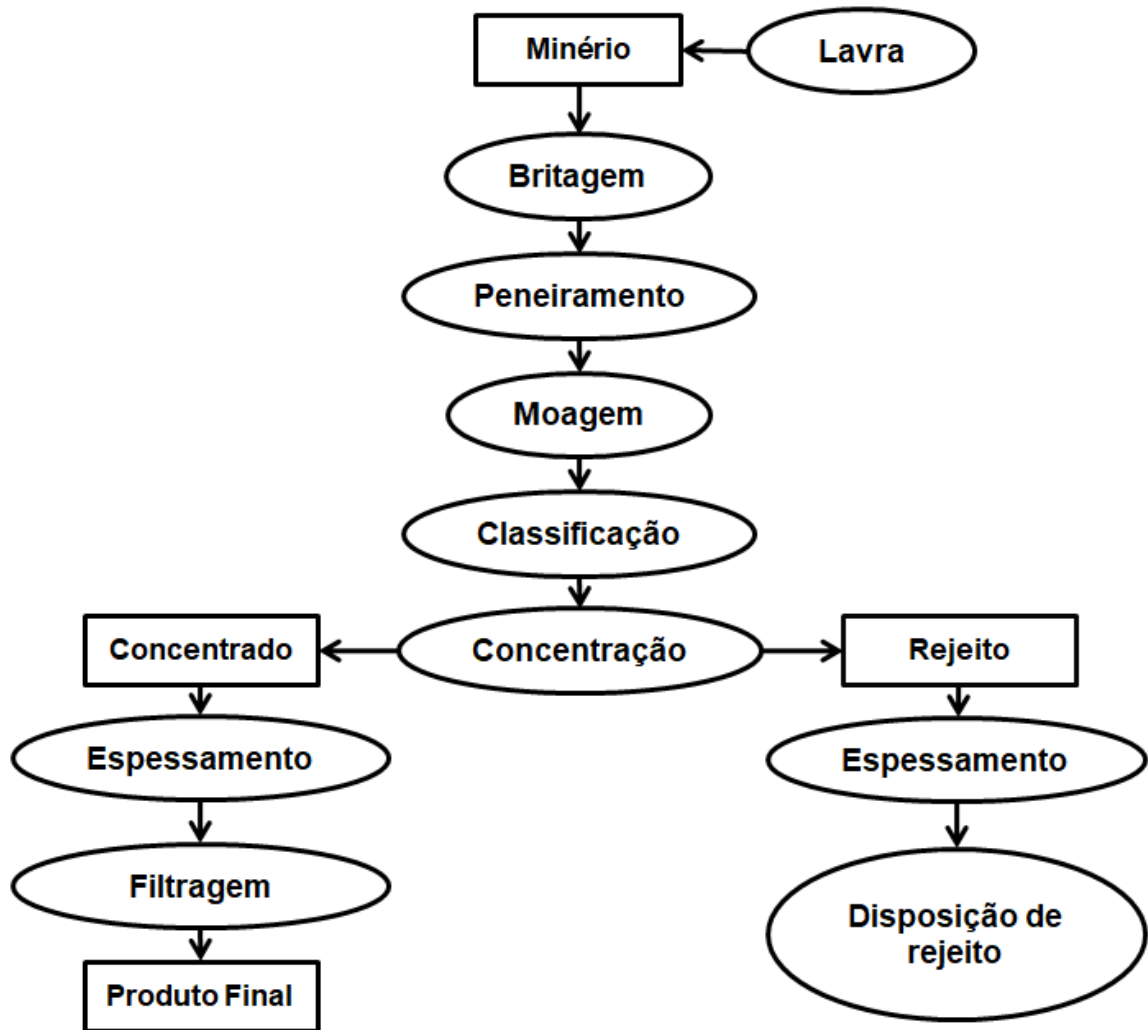
As minas de minério de ferro apresentam portes variando de pequenas a grandes, sendo que mais de 63% são minas de grande porte. As minas de pequeno e médio porte assumem o percentual de 7% e 30% respectivamente do número de minas de ferro do Brasil (DNPM, 2017).

A classificação do porte das minas é embasada na produção bruta (ROM):

- Grande porte: > 1.000.000 ta;
- Médio porte: > 100.000 ta até 1.000.000 ta;
- Pequeno porte: > 10.000 ta até 100.000 ta.

O beneficiamento do minério de ferro é realizado em linhas gerais, com rotas que envolvem etapas de cominuição e classificação, seguidas de processos de concentração, como a flotação ou separação magnética. O resultado é o minério de ferro, vendido para o setor siderúrgico, e o rejeito, alocado ainda com a água de processo em bacias de rejeitos ou descartado a seco em pilhas (FIGURA 07).

Figura 07- Fluxograma típico de beneficiamento de minérios



Fonte: Adaptado de Luz (2004).

As etapas de concentração são fundamentais para o aproveitamento do minério de ferro, visto que os depósitos vêm se exaurindo cada vez mais. Os depósitos de hematita estão cada vez mais próximos do fim de operação e assim inicia-se a exploração dos depósitos de itabirito. As jazidas com menores teores exigem uma maior liberação dos minerais de interesse, para que as etapas de concentração possam ser aplicadas.

A flotação é um processo de concentração que se baseia na diferença de afinidade pela água pela superfície das espécies minerais (hidrofilicidade - hidrofobicidade). De acordo com Finch e Dobby (1990), a flotação é aplicada para concentração de minérios de granulometria fina e em estágios de limpeza. Sua aplicação envolve a adição de reagentes químicos que realizam a indução de propriedades

diferenciadoras que garantem a separação seletiva de substâncias com propriedades superficiais distintas.

O processo de flotação é classificado em flotação direta, que é quando o material de interesse é hidrofobizado e flotado. Já na flotação reversa, que é usualmente aplicada ao minério de ferro; é realizada a operação inversa, onde a ganga é hidrofobizada e flotada. Para realização da flotação alguns reagentes são aplicados, sendo estes classificados em: coletores, espumantes e modificadores. Junto a estes reagentes é aplicado um fluxo de ar induzido que permite a flotação das partículas hidrofobizadas e decantação da fase hidrofílica.

Nas minerações de ferro do estado de Minas Gerais há uma grande aplicação dos circuitos de flotação reversa, que segundo definição de Matos (2017), é a coleta das partículas de quartzo (SiO_2) pela ação de surfactantes, enquanto a hematita (Fe_2O_3) é concentrada na polpa em suspensão através da ação depressora de polímeros do tipo amido.

Já a concentração magnética se baseia na diferença de susceptibilidade magnética entre as espécies minerais. No caso do minério de ferro, campos magnéticos concentram as partículas de hematita contidas em itabiritos.

A separação magnética pode ser classificada de acordo com o meio de concentração: classificação a seco e a úmido; e em função da intensidade do campo magnético aplicado: alta e baixa intensidade (LUZ *et al*, 2004).

Associado aos processos de exploração e beneficiamento do minério de ferro existe uma série de impactos ambientais os quais são parte decisiva do processo produtivo. A mineração é associada a vários tipos de poluição, os quais afetam diversos sistemas.

Silva (2015) cita o estado de Minas Gerais como exemplo de grandes impactos ambientais causados pelo processo de extração, seguido pelos despejos do processo da mineração. O impacto visual das atividades de mineração é um dos efeitos negativos apresentado por esse ramo industrial, conforme pode ser visualizado na Figura 08 a seguir:

Figura 08 - Mina de minério de ferro explorada no estado de Minas Gerais



Fonte: Google Earth (2019).

Um dos agentes de considerável peso nos impactos ambientais das atividades de mineração é o rejeito gerado no processo de beneficiamento. Frente às quantidades e as formas de disposição comumente adotadas, o passivo ambiental de responsabilidade contínua das mineradoras e os riscos atrelados a esse resíduo o tornam material alvo deste estudo. Detalhes maiores a respeito do mesmo serão apresentados a seguir.

2.3 Rejeito de Minério de ferro

As atividades de exploração e beneficiamento mineral apresentam significativa geração de resíduos. Para Kuranchie (2015), as operações minerárias apresentam crescente aumento na produção de resíduos nas formas de emissões líquidas, sólidas ou gasosas. Dentre os resíduos da mineração, os sólidos apresentam elevada importância devido à quantidade gerada.

Por definição da Lei N° 12.305/10, resíduos são materiais, substâncias, objetos ou bem descartados resultante de atividades humanas em sociedade. Os resíduos sólidos são aqueles em que a destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, no estado sólido ou semi-sólido.

Na geração de resíduos na mineração, destacam-se a existência do estéril e do rejeito. Os principais resíduos da mineração, de modo geral, são pilhas de minérios

pobres, sedimentos, solos, polpas da decantação de efluentes, além de finos e ultrafinos não aproveitados no beneficiamento (IBRAM, 2016).

Os rejeitos minerais são parte intrínseca do processo de produção mineral, já que as diversas tipologias minerais não se encontram puras na natureza e por essa razão precisam passar por processos de tratamento que lhes garantam as características de qualidade necessárias para sua posterior utilização como produto de interesse.

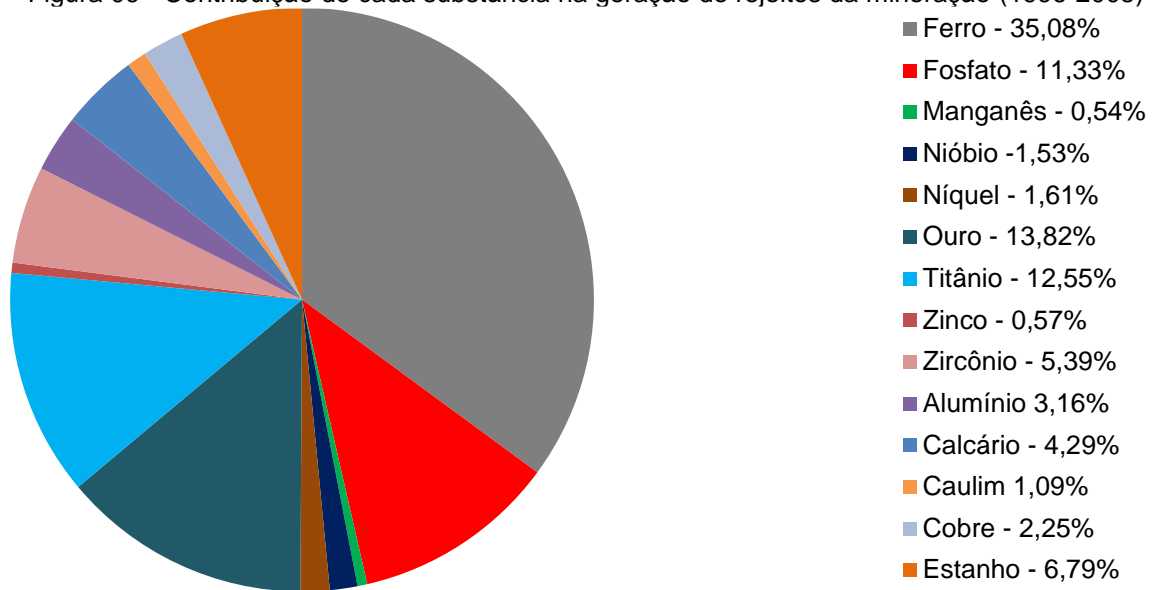
Como consequência deste processo, as substâncias que não apresentam interesse econômico são removidas através dos diversos estágios de beneficiamento mineral, resultado nos rejeitos de mineração.

Visto isso, os rejeitos minerais são fruto do processo de tratamento/beneficiamento e por isso apresentam como características algumas especificidades oriundas desse processo de transformação. Essa informação está de acordo com Kuranchie (2015), que afirma que os estágios de operação da mina estão intimamente ligados com a geração de rejeitos, sendo que estes não podem ser desassociados das atividades de extração e beneficiamento mineral.

A quantidade de resíduos produzida depende do tipo e da qualidade dos minerais, como também da eficiência dos processos de extração e tratamento utilizados (MUDD, 2004). Nos últimos anos, com o avanço das atividades de exploração mineral vem se verificando uma diminuição nos teores das minas, cenário esse que corrobora para que haja um aumento crescente das quantidades de rejeitos gerados.

No Brasil, as diferenças visualizadas quanto à geração de rejeitos estão diretamente relacionadas com a tipologia mineral, confirmando a informação de que o tipo de mineral, a qualidade e os processos adotados para extração e beneficiamento são variáveis diretamente relacionadas à contribuição na geração de rejeitos. O minério de ferro assume a dianteira quanto à geração de rejeitos; com 35% de contribuição dentro de toda a produção mineral (FIGURA 09).

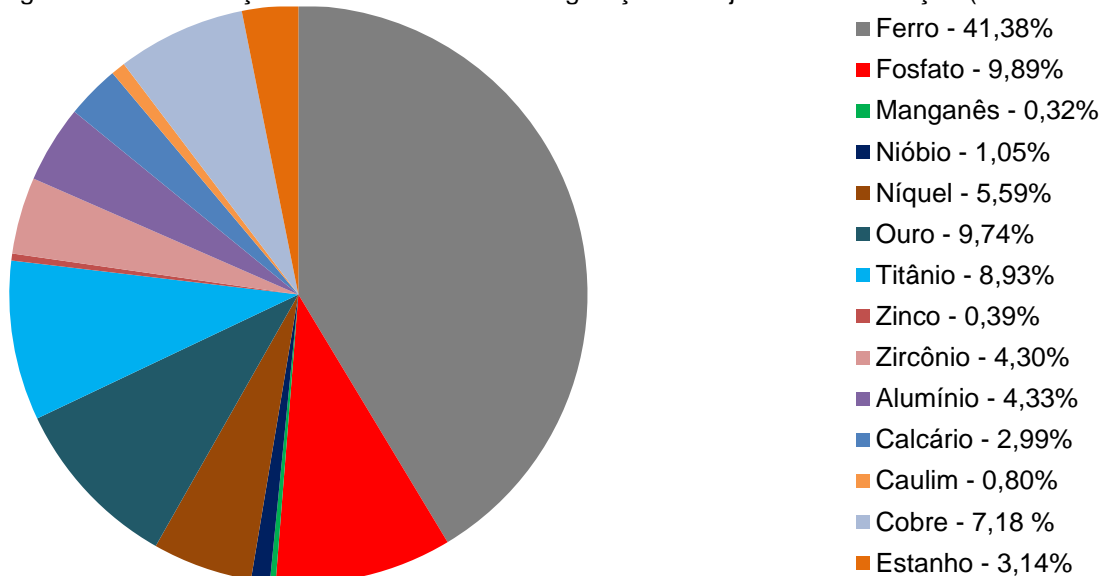
Figura 09 - Contribuição de cada substância na geração de rejeitos da mineração (1996-2005)



Fonte: IPEA, 2012.

Uma projeção fornecida pelo mesmo relatório do IPEA (2012) mostra, que para o período de 2010 a 2030; há uma tendência de aumento na participação do minério de ferro quanto à geração de rejeitos (FIGURA 10).

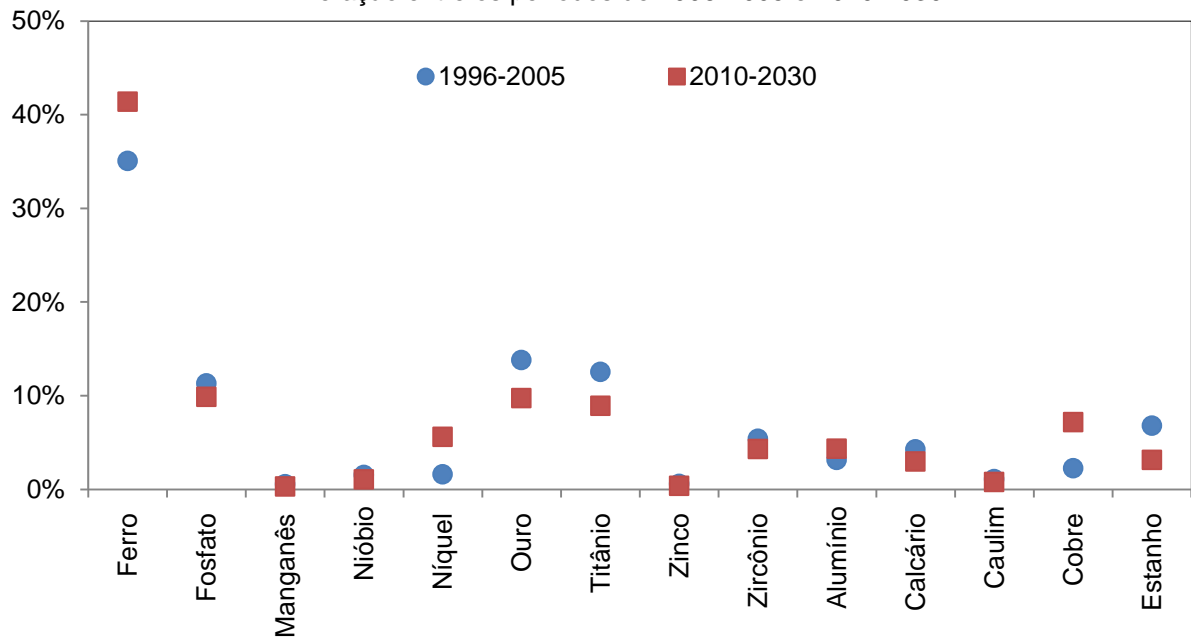
Figura 10 - Contribuição de cada substância na geração de rejeitos da mineração (2010- 2030)



Fonte: IPEA, 2012.

O aumento referente à contribuição do minério de ferro foi acima de 6%. Além do ferro, cabe mencionar o aumento para cobre e níquel, porém a uma taxa menor comparada ao primeiro. Para as demais tipologias minerais, haverá um decréscimo quanto à contribuição de rejeitos no período projetado (FIGURA 11).

Figura 11- Comparativo entre as Contribuições de cada substância na geração de rejeitos da mineração entre os períodos de 1996-2005 e 2010-2030.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Esse aumento na geração de rejeitos é uma das maiores preocupações dentro do contexto da mineração. Por Kuranchie (2015), o descarte de resíduos de mineração impõe um grande ônus econômico e ambiental para o segmento industrial. Além disso, a preocupação com a poluição e a busca por metodologias de eliminação de rejeitos através de técnicas mais sustentáveis tem sido uma obrigação crescente do cenário mineral.

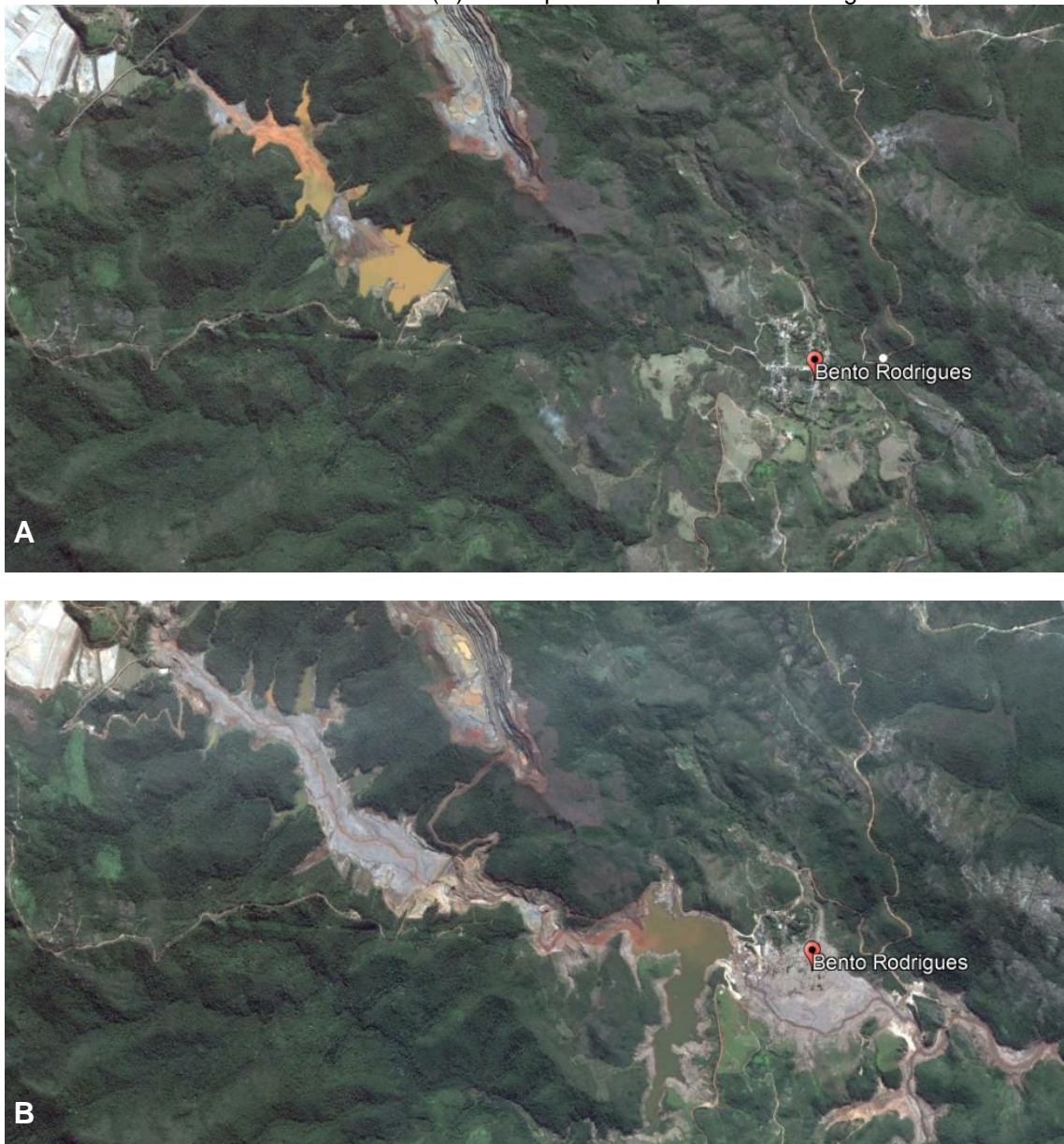
As principais fontes de degradação associadas à mineração são a disposição de rejeitos do beneficiamento e disposição do estéril proveniente da lavra (IPEA, 2012). O grau de risco e degradação associado à disposição dos rejeitos pode ser mensurado pelos acidentes ocorridos com as barragens de Fundão (2015) e Córrego do Feijão (2019).

O rompimento da Barragem de Fundão foi mencionado nos últimos anos como o maior acidente de mineração da história do Brasil, onde 50 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração foram lançados na bacia do Rio Doce após o colapso da barragem de Fundão (SCHOENBERGER, 2016; GOMES *et al* 2017).

O rompimento da barragem de rejeitos de Mariana/MG demonstrou um dano ambiental extremo (FIGURA 12), que associado à perda de vidas humanas tornou a mineração protagonista de um desastre imensurável (ALMEIDA e SCHNEIDER,

2018). Parte do abastecimento de água e as atividades de subsistência dos 3,6 milhões de habitantes de 35 cidades, dependentes do Rio Doce, ainda estavam comprometidas mais de um ano após o colapso da barragem (ANA, 2015; Leonardo *et al.*, 2017). Estudo de Omachi *et al* (2018) demonstrou que o colapso da barragem de rejeitos em Mariana afetou 74 km a jusante do acidente, cobrindo uma área de 1176,6 hectares (ha) com lama e destruindo 457,6 ha da Mata Atlântica.

Figura 12 - Área do desastre com a barragem de fundão. (A) Área do desastre antes do rompimento em novembro de 2014. (B) Área após o rompimento da barragem.



Fonte: Google Earth (2019).

Após o desastre com a barragem de Mariana, outro acidente envolvendo barragem de rejeitos de minério de ferro aconteceu no município de Brumadinho/MG, em 25 de janeiro de 2019. A barragem de rejeitos da mina Córrego do Feijão, explorada

pela empresa Vale S.A., eclodiu e causou um desastre com proporções ainda maiores. O número de fatalidades envolvendo funcionários da empresa, moradores da Vila Ferteco e pessoas que estavam próximas à região do rompimento foram maiores que o ocorrido no acidente de Mariana, que registrou 19 mortos. O rompimento da Barragem de Brumadinho foi uma grande tragédia humana e já configura o maior acidente de trabalho do Brasil. Segundo Pretti (2019), o maior acidente de trabalho registrado no Brasil até então tinha sido o desabamento de um galpão em Belo Horizonte, que deixou 69 mortos em 1971.

A proporção de danos ambientais com fauna e flora também foi gigantesca. A onda de lama destruiu as estruturas da empresa, soterrou casas, pousadas e destruiu todo o *habitat* natural por onde passou (FIGURA 13).

Figura 13 - Antes e depois da área do acidente em Brumadinho/MG.

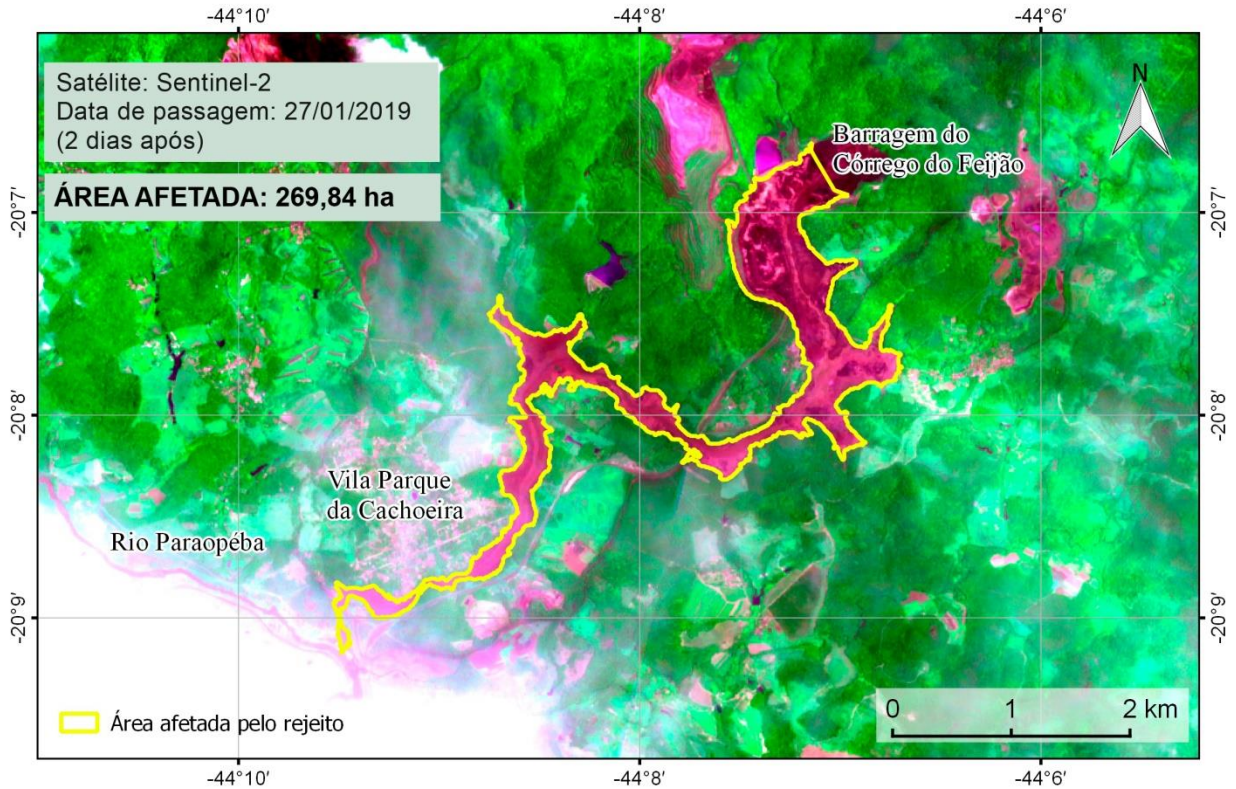


Fonte: site de notícias G1 (2019).

Dados do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA (2019) indicam que o rompimento da Barragem em Brumadinho destruiu

pelos menos 269,84 hectares (FIGURA 14). A análise obtida por imagens de satélite realizadas pelo Centro Nacional de Monitoramento e Informações Ambientais (CENIMA) aponta que os rejeitos da barragem destruíram 133,27 hectares de vegetação nativa de Mata Atlântica e 70,65 hectares de áreas de Proteção Permanente.

Figura 14 - Imagens de satélite da área afetada pelos rejeitos da barragem de Córrego do Feijão.



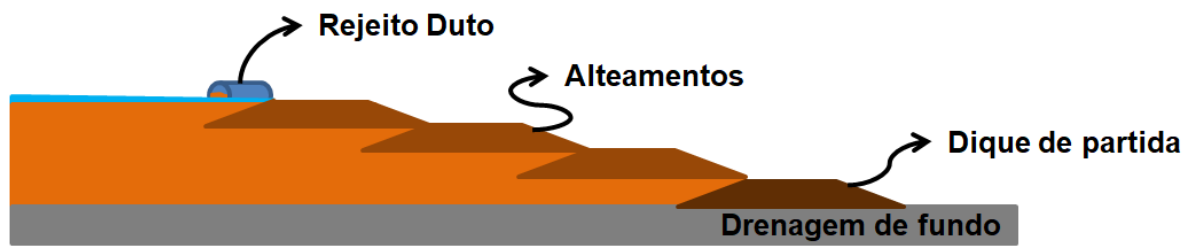
Fonte: IBAMA (2019).

A barragem de Córrego do Feijão que se rompeu tinha uma capacidade de 11,7 milhões de metros cúbicos, correspondendo a 25% do volume apresentado pela Barragem de Fundão. Foi construída em 1976, pela antiga empresa Ferteco e atualmente encontrava-se inativa (VALE, 2019).

A referida barragem foi construída pelo método de alteamento a montante, assim como a barragem de Mariana. Segundo Thomé (2018), o método de alteamento a montante consiste na construção de diques sobre a área de decantação do rejeito, deslocando o eixo da obra em direção a montante (FIGURA 15).

É um método de baixa onerosidade de construção, maior velocidade de alteamento e pouca utilização de equipamentos de terraplanagem.

Figura 15 - Método de Alçamento da linha de montante.

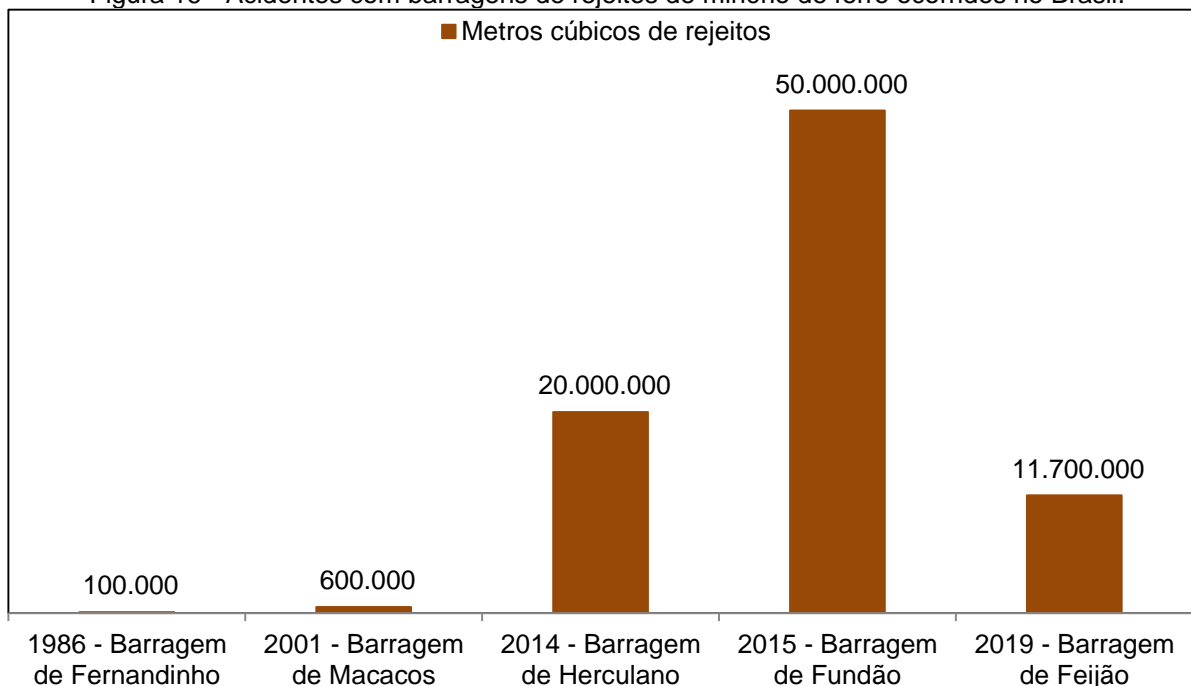


Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

A principal desvantagem do método a montante é que ele é mais propenso a sofrer liquefação estática que é causada geralmente por carregamentos que, sob solicitação não-drenada, causam a geração de excessos de poropressão que podem induzir a liquefação do material (RAFAEL, 2012).

No Brasil alguns acidentes envolvendo barragens de rejeitos de minério de ferro ocorreram ao longo dos anos e tiveram como causa principal a liquefação estática (FIGURA 16).

Figura 16 - Acidentes com barragens de rejeitos de minério de ferro ocorridos no Brasil.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

International Commission on Large Dams - ICOLD (2001) apresentam dados mostrando que há mais acidentes em barragens alteadas para montante do que nas demais metodologias de construção.

Com base na magnitude de riscos associados a esse método, o Decreto n. 46993, de 02 de maio de 2016, do Estado de Minas Gerais, suspendeu a emissão de orientação básica e a formalização de processos de licenciamento ambiental de novas barragens de contenção de rejeitos nas quais se pretenda utilizar o método para montante até que o Conselho Estadual de Política Ambiental - COPAM defina critérios e procedimentos adicionais a serem adotados pelo empreendedor (Minas Gerais, 2016).

Além do método de alteamento a montante, as barragens de rejeitos podem ser construídas pelos métodos de linha de centro e da linha de jusante (FIGURA 17). Estes últimos, por sua vez são métodos mais caros, porém apresentam maior segurança em relação aos riscos de liquefação apresentados pelo método de alteamento a montante.

Figura 17 - Métodos de alteamento de barragens. (A) Método de alteamento a Jusante. (B) Método de Alteamento a linha de centro.

A

Lagoa de Decantação



B

Lagoa de Decantação



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

De acordo com o IBRAM (2016), a principal forma de disposição de rejeitos no Brasil é através do uso de barragens (FIGURA 18). Isso pode ser exemplificado pelo contexto das minas de ferro do estado de Minas Gerais que, de acordo com dados fornecidos pela FEAM (2018) as barragens de rejeitos assumem mais de 50% das

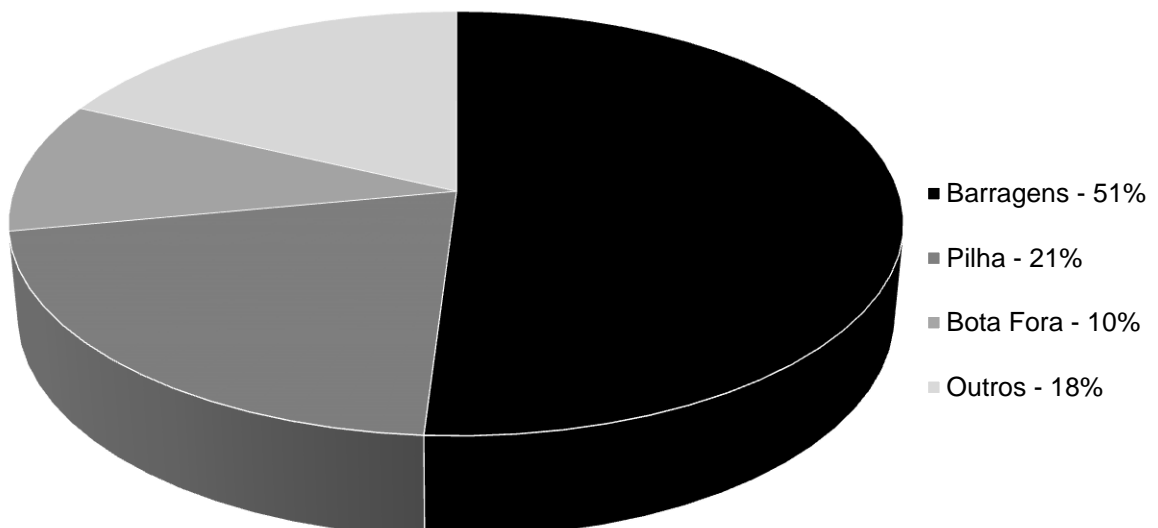
formas de disposição dos rejeitos de minério de ferro das minas em operação no estado (FIGURA 19).

Figura 18 - Barragem de rejeitos de minério de ferro em Minas Gerais.



Fonte: Google Earth (2019).

Figura 19 - Percentual das formas de disposição de rejeitos de minério de ferro no estado de Minas Gerais em 2018.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Esse cenário de disposição de rejeitos em barragens mostra-se preocupante, pois de acordo com os dados do Inventário de barragens realizado pela FEAM (2018),

em 2017 foram fiscalizadas 685 barragens, das quais 435 eram barragens de mineração. Dentre as barragens associadas às atividades de mineração, 15 apresentaram as condições de “estabilidade não garantida” ou “auditor não conclui”.

No mesmo levantamento, as barragens foram classificadas de acordo com o potencial de dano:

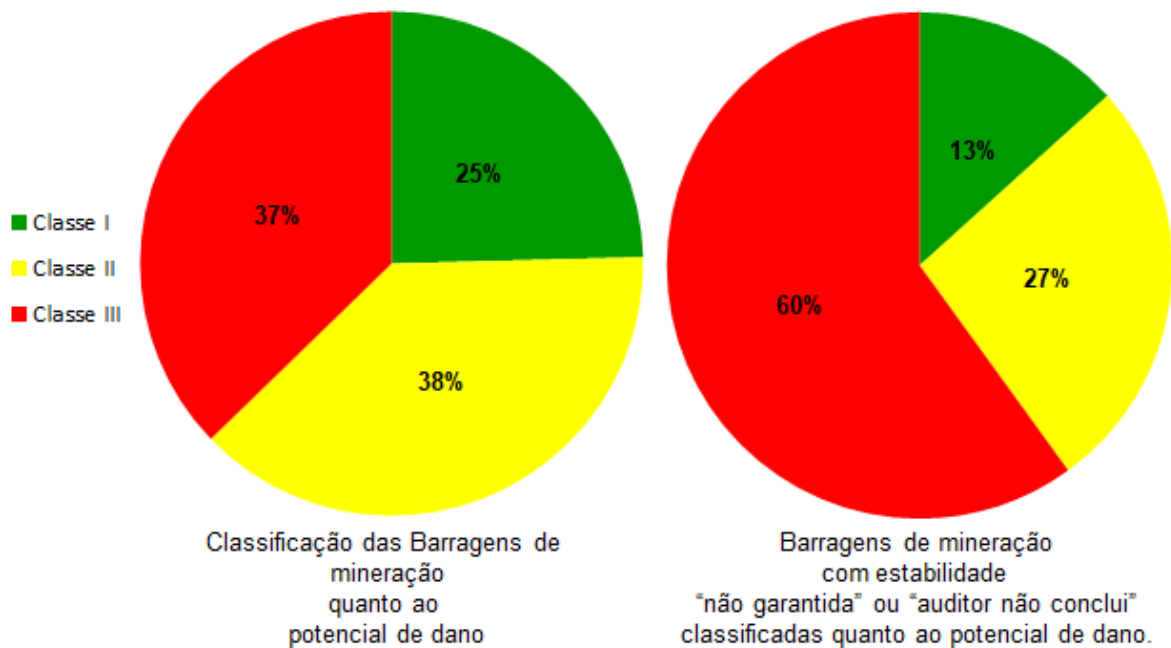
Classe I: Baixo potencial de danos;

Classe II: Médio potencial de danos.

Classe III: Alto potencial de dano.

O potencial de dano associado às barragens de mineração, junto à condição de “estabilidade não garantida” ou “auditor não conclui”; podem ser verificados na Figura 20.

Figura 20 - Potencial de dano associado às barragens de rejeitos de mineração.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

O panorama de barragens de rejeitos apresentado pela mineração brasileira - têm aberto espaço para a busca de novas alternativas para disposição dos rejeitos. De acordo com Guimarães (2011), em outros países, existe uma tendência para o adensamento dos rejeitos. A disposição de rejeitos na forma de polpa de alta densidade, pastas minerais ou tortas apresenta vantagens consideráveis e representam alternativas às práticas convencionais.

Além da disposição na forma de barragens, outras metodologias disponíveis são:

- Preenchimento de galerias subterrâneas e cavas exauridas de minas;
- Disposição em pilhas;
- Empilhamento a seco (método “*drystacking*”);
- Disposição em pasta.

O destaque dado às barragens de rejeitos se dá, pelo grande volume de rejeitos e os menores custos da disposição, fazendo com que seja atrativa a utilização destes materiais na construção das próprias barragens de contenção (DAVIES e MARTIN, 2000). Argumento reforçado por Van Niekerk e Vijoen (2005), que afirmam - que como a disposição de rejeitos normalmente não produz receita, as barragens apresentam o melhor custo benefício.

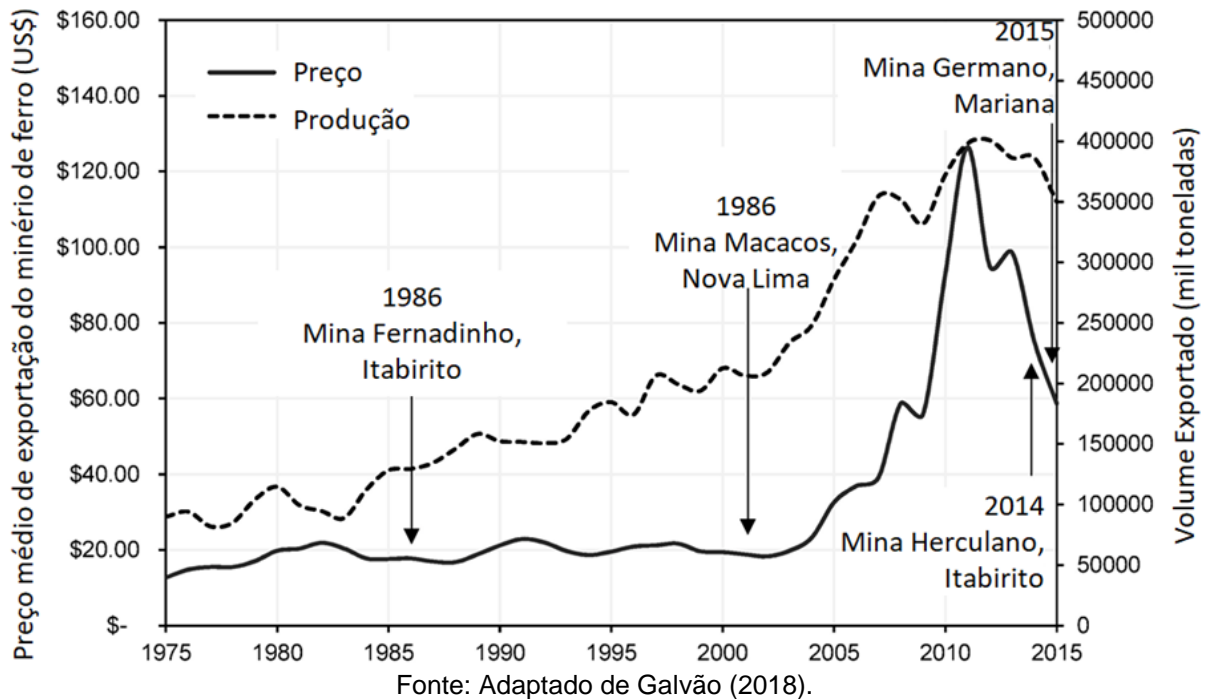
Apesar das vantagens de custo visualizadas com o uso de barragens, o conjunto de riscos e impactos gerados por tais construções tem tornado cada vez mais necessária a busca por novas alternativas e metodologias voltadas para disposição e gerenciamento dos rejeitos minerais.

Segundo CBDB (2012, *apud* IBRAM, 2016 p. 13), as barragens ganharam repercussão a partir da década de 80, pois o potencial de dano ambiental e os mecanismos de transporte de contaminantes relacionados à disposição de rejeitos em barragens são gigantescos.

Segundo Davies (2002), as consequências das falhas de barragens de rejeitos são potencialmente degradantes e o risco associado a tais construções é estimado na taxa de cerca de 1 falha em 700 a cada ano em comparação com represas convencionais onde esta taxa cai para 1 em 10.000.

Galvão *et al* (2018) - correlacionam as últimas falhas nas barragens de rejeitos ocorridas no Brasil desde 1975 com o preço e volume de exportação do minério de ferro, onde identifica uma tendência de falhas nas barragens de rejeitos após picos no preços de exportação dessa *commodity* (FIGURA 21).

Figura 21 - Últimas falhas nas barragens de rejeitos de minério de ferro ocorridas no Brasil desde 1975 até 2018.



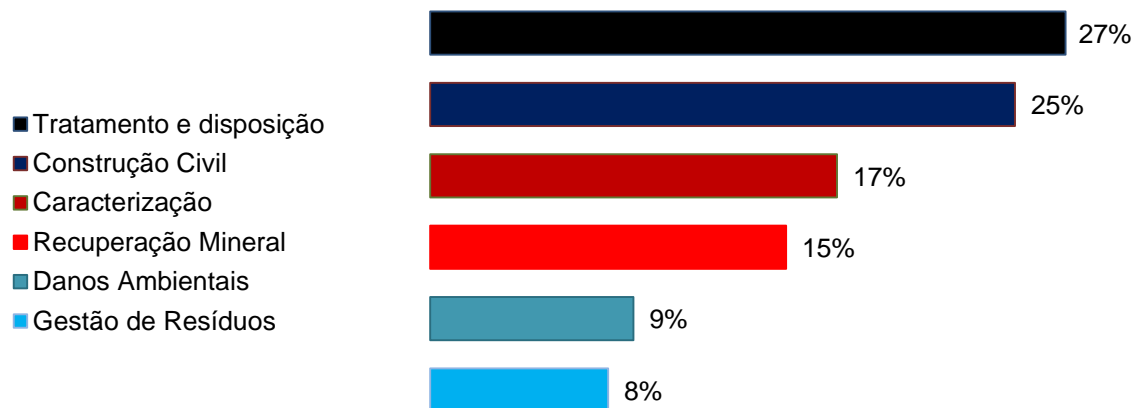
Davies e Martin (2009) também verificaram uma correlação entre aumento de produção x rompimento de barragens para as explorações minerais de ouro e cobre.

Esse aumento de produção, que gera o consequente aumento da disposição de rejeitos nas barragens, também aumenta os riscos o que deve ser avaliado e corrigido através de medidas de avaliação, operação e manutenção da estrutura das barragens.

Diante do porte dos danos socioambientais associados a acidentes com barragens de rejeitos é fundamental o investimento em investigações que forneçam alternativas quanto ao atual panorama de gerenciamento e disposição dos rejeitos de mineração. Para a obtenção de novas rotas é preciso ter um mapeamento das principais diretrizes de pesquisa que vem sendo desenvolvidas no âmbito dos rejeitos da mineração.

Um levantamento desenvolvido por Almeida e Schneider (2018) - traçou as principais categorias voltadas para a temática de rejeitos de mineração, onde foi identificado que as principais áreas investigadas deste segmento se referem a estudos de "Tratamento e disposição" e "Construção civil" (FIGURA 22).

Figura 22 - Principais segmentos de investigação relacionados a rejeitos minerais



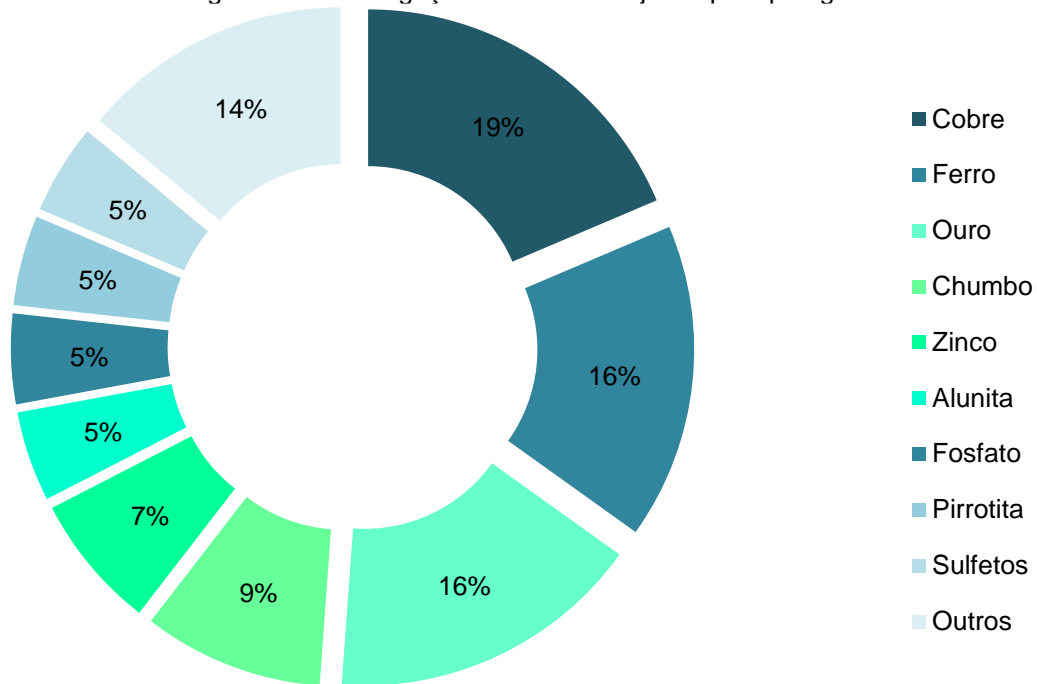
Fonte: Almeida e Schneider (2018).

A importância dessas categorias está alicerçada nas características apresentadas pelos rejeitos; características estas que serão atreladas às especificidades de cada mina. Estudos a respeito do potencial toxicológico, do efeito dos rejeitos na biota e a avaliação de tratamentos para rejeitos com risco em potencial para o meio ambiente precisam ser continuamente avaliados visando o avanço do conhecimento da integração destes resíduos no meio ambiente.

Já os estudos sobre as metodologias de disposição de rejeitos têm sido impulsionados pela preocupação com as barragens de rejeitos. Essa preocupação é graças à demanda por barragens cada vez maiores, os riscos ambientais, a proximidade de áreas urbanas e a pressão da opinião pública. Todos esses fatores vêm dificultando o licenciamento de áreas para a construção de novas barragens e também o alteamento de barragens existentes (VALE, 2009 *apud* GUIMARÃES, 2011). Esse panorama intensifica a demanda por novas tecnologias e alternativas de disposição.

A análise executada por Almeida e Schneider (2018) também abordou as tipologias minerais que apresentam seus rejeitos investigados no universo acadêmico. Nesse prisma o rejeito de minério de ferro apresentou posição de destaque, estando entre as principais tipologias estudadas (FIGURA 23).

Figura 23 - Investigação acerca dos rejeitos por tipologia mineral



Fonte: Almeida e Schneider (2018).

Diante deste aparato de dados avaliou-se o perfil de estudos voltados diretamente para os rejeitos de minério de ferro. Essa investigação, no banco de dados de artigos científicos do *ScienceDirect*, foi crucial para o posicionamento desta pesquisa dentro do cenário de estudos atualmente difundido no meio científico.

2.4 Potenciais e aplicabilidades do rejeito de minério de ferro

O campo de aplicabilidades dos rejeitos minerais é um universo que vêm sendo explorado aos poucos e precisa ser enfatizado dentro do cenário da indústria de mineração, de maneira a permitir que este ramo industrial seja conduzido a premissas mais sustentáveis de atuação. Uma ferramenta importante para estes resultados é a aplicação de tecnologias de gestão de resíduos, que segundo Edraki *et al* (2014), incluem as oportunidades de reutilização dos rejeitos. Para a obtenção de novas rotas que incluam a utilização de resíduos minerais e adoção de metodologias mais sustentáveis é fundamental a busca por investigações científicas e desenvolvimento tecnológico. No âmbito do uso de rejeitos de minério de ferro, o campo da construção civil tem sido amplamente aberto à incorporação destes resíduos aos seus produtos.

Estudos de aplicação dos rejeitos de mineração na indústria de construção civil se fundamentam no comportamento mecânico dos materiais e no fato de que sua utilização garante a reciclagem e reutilização de resíduos que ocupam grandes áreas para sua disposição.

A incorporação de rejeitos garante a manufatura de produtos sustentáveis, permite a economia de área de disposição e diminui a extração de novas matérias-primas (SHETTIMA *et al*, 2016). A conversão de resíduos industriais sólidos em produtos de valor agregado tem recebido grande importância nos últimos anos já que enfatiza a sustentabilidade de processos e permite que os impactos ambientais sejam minimizados (DAS, KUMAR e RAMACHANDRARAO, 2000).

Apesar do destaque científico dado ao aproveitamento de rejeitos, tem sido pouco efetiva a incorporação industrial destes. Dados de Cai *et al* (2016) - indicam que na China, de 2007 a 2011, os estoques de rejeito de minério de ferro aumentaram em 2,8 bilhões de toneladas e a reciclagem destes resíduos totalizou apenas 307 milhões. Mesmo que essa quantidade de rejeitos incorporada não seja a quantidade de aplicação ideal, a incorporação dos rejeitos de minério de ferro na China está significativamente à frente de outros países geradores deste resíduo.

O estudo realizado por Almeida e Schneider (2018) - mostra que as investigações a respeito de rejeitos de mineração se mostram modestas dentro do universo de pesquisa, sendo que o número de estudos relacionados a esse tema é pequeno em relação ao tamanho dos impactos gerados pela indústria mineral e a quantidade de rejeitos gerada por cada empreendimento. No caso dos rejeitos de minério de ferro essa tendência se repete.

Apesar do número de produções acadêmicas acerca de aplicabilidades do rejeito de minério de ferro ser pequeno, os campos de exploração desse material podem alcançar os mais variados nichos.

Na construção civil, a composição elementar dos rejeitos de minério de ferro juntamente com a sua distribuição granulométrica indicam potencial para sua incorporação na fabricação de cerâmicos e cimentos. De acordo com Assis *et al* (2018), os rejeitos de minério de ferro apresentam sílica, alumínio e ferro como

elementos predominantes, assim como as matérias-primas tradicionais de cerâmicas vermelhas.

Também partindo do pressuposto de composição, o rejeito de minério de ferro foi alvo de estudos para síntese de nanopartículas de magnetita, onde através de processos de redução-precipitação foi possível obter partículas ferromagnéticas (DAREZERESHKI *et al*, 2018).

No âmbito de recuperação de áreas degradadas, Cele e Maboeta (2016) avaliaram o potencial de incorporação de bio sólidos e plantas no rejeito de minério de ferro, visando à avaliação dos potenciais de remediação de áreas de minas. Os resultados mostraram que a aplicação de bio sólidos pode melhorar o status de capacidade de retenção de água, matéria orgânica e capacidade de troca de cátions das áreas estudadas. Tal resultado aponta uma área com grande potencial e que apresenta campo para várias investigações.

Na mesma linha de recuperação de áreas degradadas, o rejeito de minério de ferro foi utilizado como matriz para produção de nanopartículas biosintéticas que potencializam o crescimento de plantas como fonte biodisponível de ferro. A biossintetização dessas partículas foi realizada através do fungo *Aspergillus aculeatus* que converte o rejeito de minério de ferro em nanopartículas revestidas com proteínas que apresentam potencial para a agricultura (BEDI *et al*, 2018).

A capacidade adsorptiva também foi alvo de estudos. Visto a afinidade de adsorção existente entre os óxidos de ferro e o elemento fósforo, Sima *et al* (2018) avaliou a capacidade de adsorção do rejeito de minério de ferro para polimento de efluentes ricos em fósforo e concluiu que os rejeitos apresentaram-se como uma alternativa barata para remoção de fósforo em efluentes terciários.

Objetivando reconhecer o perfil dos estudos acerca dos rejeitos de minério de ferro foi realizado um levantamento estatístico para avaliação dos dados vinculados a este segmento de produções acadêmicas. O levantamento foi realizado adotando-se a metodologia de Almeida e Schneider (2018).

A verificação dos dados foi embasada na mesma faixa temporal, de 2014-2018; e com a seleção do mesmo tipo de publicação (*Article type*) como *Research articles* na plataforma *ScienceDirect*. A diferença neste levantamento foi nas palavras-chaves

utilizadas (*Keywords*), sendo aqui direcionado diretamente para os rejeitos de minério de ferro, através da busca por “*iron ore tailings*”.

Primeiramente foi comparado o número de resultados obtidos na pesquisa quando a busca se referia a todo o universo do minério de ferro e quando esta era direcionada para os rejeitos deste mineral. Esse comparativo foi realizado alterando as *Keywords* entre “*iron ore*” e “*iron ore tailings*”. A pesquisa acerca do minério de ferro, estabelecida como “*iron ore*”, retornou 12.186 resultados. Já com os termos “*iron ore tailings*”, o número de resultados apresentados foi de 2.182. Essa avaliação permitiu visualizar que o número de publicações relacionadas aos rejeitos de minério de ferro corresponde a 18% do número de resultados vinculados ao minério de ferro. Os resultados apresentados foram verificados para confirmação da real relação com os termos estabelecidos para pesquisa e classificados segundo as áreas as quais estavam correlacionados.

Os resultados obtidos na busca foram enquadrados em quatro categorias principais:

(a) construção civil - estudos que buscam a incorporação dos rejeitos de minério de ferro na produção de materiais como concreto, cerâmicas, entre outros.

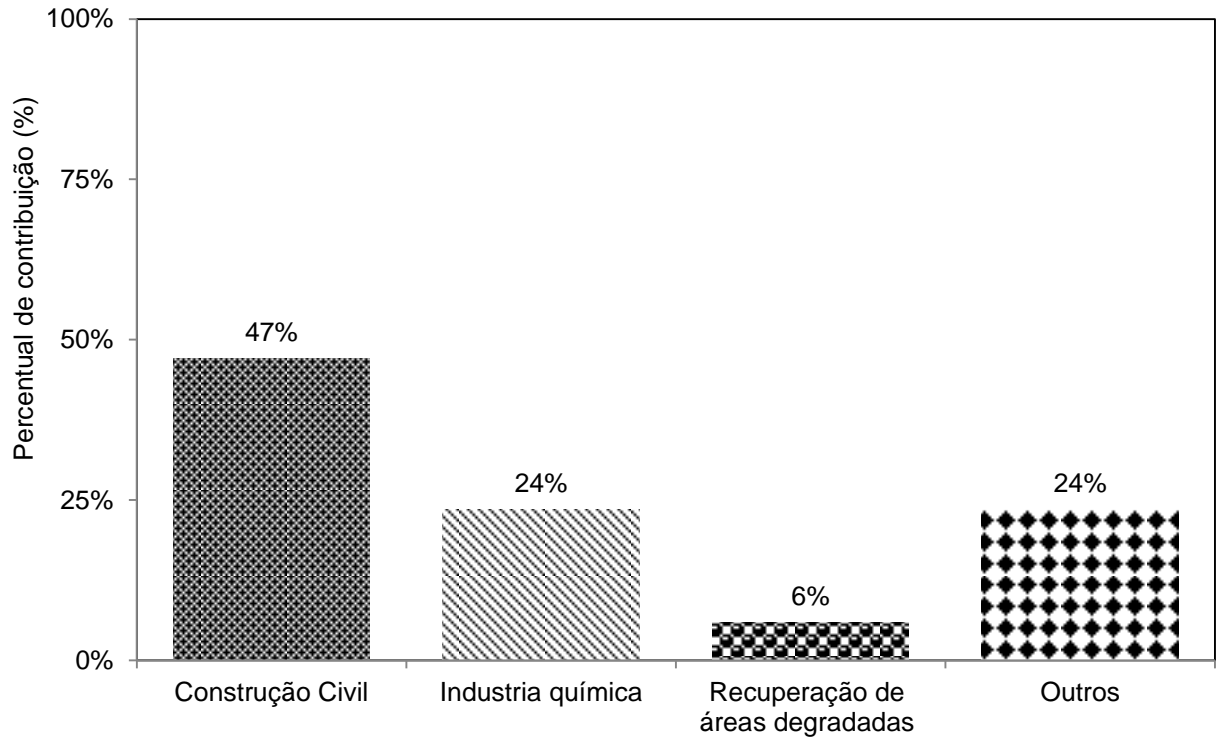
(b) Indústria química - foram considerados artigos visando à avaliação do rejeito de minério de ferro como matéria-prima para produção de pigmentos e síntese de novos materiais;

(c) Recuperação de áreas degradadas - contemplou estudos relacionados à recuperação de áreas degradadas pela disposição de rejeitos de minério de ferro ou por acidentes com barragens de contenção destes resíduos.

(d) outros - neste segmento foram incorporadas as pesquisas que mostraram pequena participação dentro do universo estudado. Onde se podem citar estudos de caracterização, de novas metodologias de disposição e também aplicação dos rejeitos de minério de ferro visando ganhos nos processos siderúrgicos.

O enquadramento dos dados nas áreas descritas acima pode ser visualizado na Figura 24. Estes dados dão uma ideia geral de quais são os principais alvos de estudo atrelados aos rejeitos de minério de ferro e quais segmentos são pouco investigados.

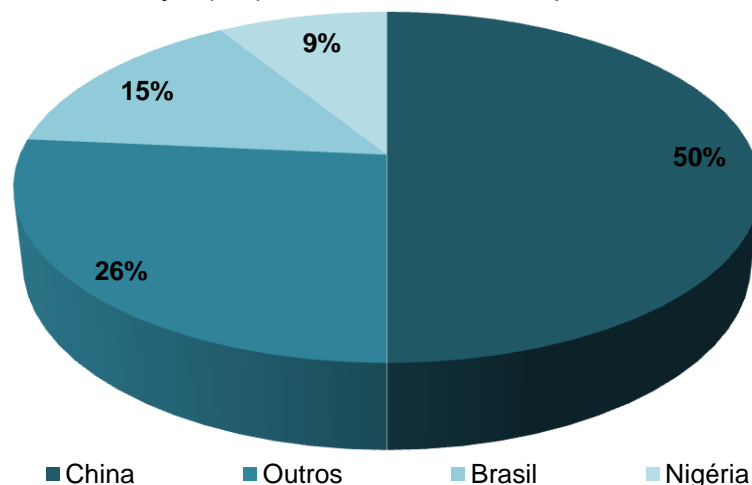
Figura 24 - Principais campos de investigação dos estudos relacionados aos rejeitos de minério de ferro



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

A área da construção civil é a que apresenta destaque neste *ranking* de categorias, assumindo 47% do número de publicações elencadas nesta análise. O campo da construção civil incorpora o rejeito principalmente na produção de agregados/cimentos e cerâmicas. Assuntos como a produção de pigmentos e asfalto também são enfatizados neste nicho. O levantamento também focalizou o direcionamento da pesquisa por país de origem, conforme apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Contribuição por país em estudos sobre rejeitos de minério de ferro.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

A China assume a dianteira nos estudos acerca de rejeitos de minério de ferro, com 50% da contribuição nas pesquisas acerca deste assunto. Neste levantamento, grandes nomes da produção do minério de ferro como Austrália, Índia e Rússia; que compõem o ranking dos maiores produtores junto com a China e o Brasil, pouco apareceram nos resultados e estão centralizados na categoria “Outros”.

O Brasil assume a marca de 15% no número de estudos deste levantamento. Esse percentual chama a atenção, visto o papel do Brasil como produtor e exportador de minério de ferro. Além disso, o porte dos acidentes com as barragens de Fundão e Córrego do Feijão são campos férteis para o desenvolvimento de pesquisas no âmbito de estudos de recuperação de áreas, toxicidade de rejeitos, metodologias de disposição, uso industrial dos rejeitos, entre outros.

Esse panorama enfatiza a importância de pesquisas a respeito dos resíduos da mineração de ferro e também indica áreas com potencial para serem estudadas e aprimoradas.

Frente à amplitude de campos aos quais podem ser avaliados quanto aos potenciais de utilização do rejeito de minério de ferro, muito ainda pode ser estudado e mapeado a respeito do assunto. Nesta pesquisa avaliou-se a possibilidade de uso do rejeito de minério de ferro como matriz para produção de um coagulante. Perante a composição elementar do rejeito de minério de ferro, almeja-se a obtenção de um cloreto férrico com características compatíveis com as do reagente disponível no mercado.

Estudos sobre a produção de cloreto férrico foram realizados e patenteados pela empresa SAMARCO, onde obtiveram esse reagente férrico a partir do subproduto resultante do beneficiamento do minério de ferro, em especial o resultante da deslamagem. A patente N° PI 1103933-7 A2 - refere-se a um processo baseado nas etapas de desaguamento, lixiviação, filtragem, envase ou cristalização; para obtenção de cloreto férrico na forma líquida ou sólida

As variáveis consideradas nesta patente são uso de ácido clorídrico 36-37%, para uma concentração de sólidos em pasta em torno de 45%. Conjunto este que é submetido a um aquecimento de 80-90°C.

Visto que os parâmetros elencados na patente não fornecem todo o mapeamento acerca deste processo, este estudo visa investigar algumas outras condicionantes de uma rota de lixiviação, bem como validar algumas já estabelecidas. O presente estudo ainda avança na caracterização do coagulante, aplicação no tratamento de água para abastecimento público e nas características do resíduo remanescente após a solubilização e extração da hematita.

2.5 Coagulantes

Segundo Libânio (2010), o conceito de coagulação surgiu em 1844, com a finalidade de tratar a água com o intuito de melhorar seu aspecto visual. A real importância para esse processo veio um pouco depois, quando se descobriu a relação existente entre a concentração de partículas e a presença de patógenos na água.

Pode-se estabelecer que os coagulantes são compostos químicos que possuem a capacidade de desestabilizar partículas coloidais não sedimentáveis através da modificação das condições físico-químicas. Esses compostos quebram a estabilidade das partículas em meio aquoso, promovendo a formação de coágulos.

Bratby (1980) - afirma que a coagulação é a desestabilização da dispersão coloidal, devido à compressão ou redução da dupla camada elétrica. A coagulação também é referida pela desestabilização causada pela adição de eletrólitos hidrolisáveis, tais como Fe^{3+} e Al^{3+} .

Segundo Ravina (1993), partículas que provocam turbidez têm seu tamanho variando de 0,01 a 100 micrometros aproximadamente, sendo que as frações maiores possuem mais facilidade para sedimentar ou serem filtradas. A fração coloidal é a que apresenta dificuldades de ser removida, visto que o tempo de sedimentação é alto e a filtração não é eficaz devido às partículas facilmente atravessarem o meio filtrante.

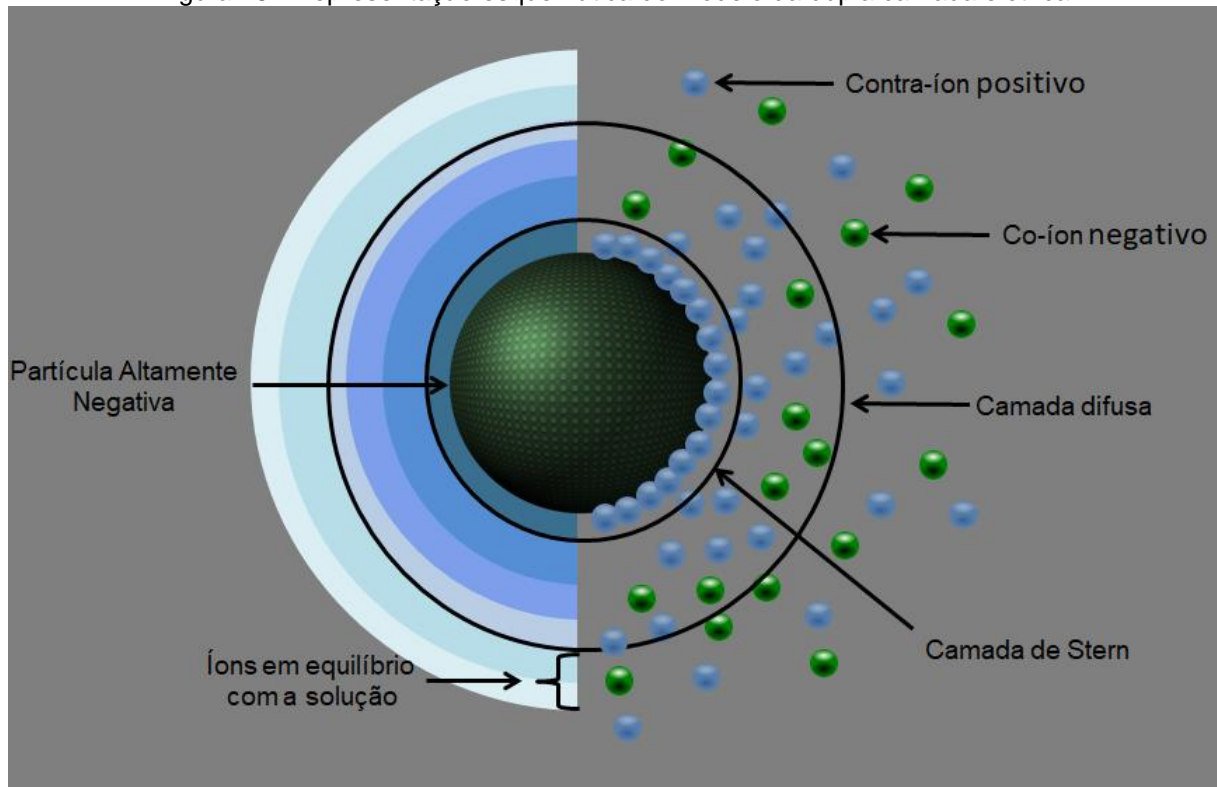
Os colóides referidos acima são de acordo com Lins e Adamian (2000) partículas finas com tamanho inferior a 1 μm . Abaixo das partículas coloidais existe a classificação de supercoloidais que são partículas inferiores a 0,2 μm .

O comportamento dos colóides em água é bastante influenciado por sua carga superficial. Eckenfelder (1989) - afirma que os colóides possuem propriedades

elétricas que criam uma força de repulsão que impede a aglomeração e a sedimentação. Na maior parte dos efluentes industriais os colóides possuem cargas negativas, comportamento que faz com que as partículas adjacentes sejam repelidas, impedindo a aglomeração, resultando que estas permaneçam dispersas e em suspensão no meio.

A carga superficial das partículas tem origem nos possíveis fatores: ionização de grupos ou sítios superficiais, imperfeição da estrutura cristalina da superfície do sólido e/ou adsorção específica de íons. O potencial superficial dos colóides, a distribuição de íons em solução e os efeitos térmicos levam a formação da dupla camada elétrica (YANG *et al.*, 2010) mostrada na Figura 26.

Figura 26 - Representação esquemática do modelo da dupla camada elétrica



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

O modelo da dupla camada elétrica é composto por duas regiões separadas pelo plano de Stern; onde a camada interna é chamada de camada de Stern e a camada externa de Gouy-Chapman ou camada difusa.

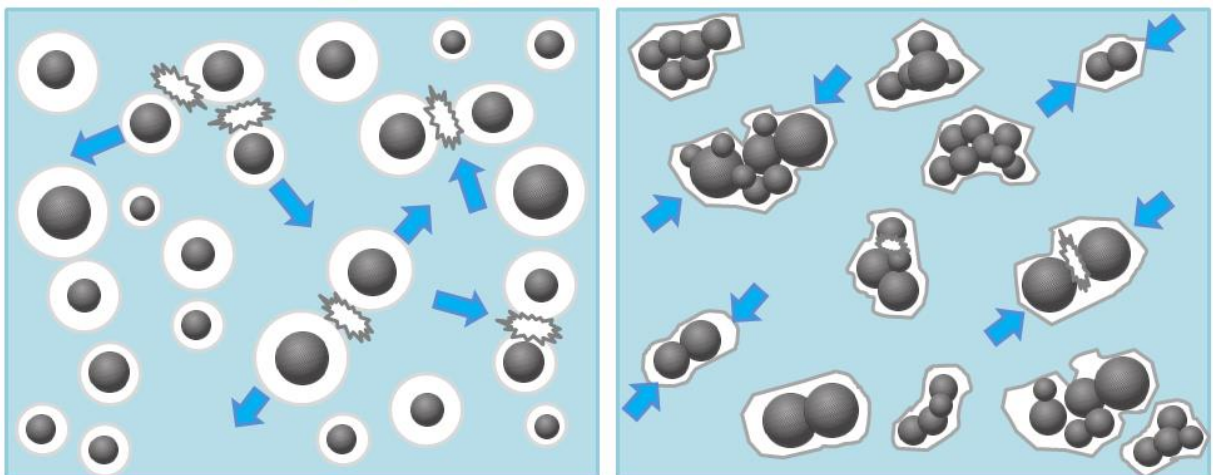
A estabilidade dos sistemas coloidais pode ser explicada pela teoria DLVO que relaciona as forças de atração (forças atrativas de pequeno alcance de London e van-der-Walls) e a energia de repulsão (forças elétricas entre a dupla camada das

partículas). Com o avanço da microscopia atômica, a teoria DLVO clássica foi atualizada quanto à existência de forças adicionais de hidratação (força repulsiva) e hidrofóbica (atrativa). A validação das informações teorizadas por Derjaguin-Landau e Verwey-Overbeek (criadores da teoria DLVO) foi realizada na década de 80, junto com o reconhecimento das forças adicionais de hidratação e hidrofóbica (força atrativa maior que a força de van-der-Waals) e ficou conhecida como Teoria X-DLVO ou DLVO estendida (LINS e ADAMIAN, 2000).

De acordo com Ravina (1993), se a carga for reduzida significativamente ou eliminada, a aglomeração poderá ocorrer, principalmente em pequenos grupos, depois a agregados maiores e finalmente em flocos de partículas visíveis que sedimentam com rapidez e também podem ser filtradas com facilidade.

O comportamento das partículas coloidais pode ser visualizado no modelo proposto por Ravina (1993), apresentado na Figura 27(A) e 27(B).

Figura 27 - Partículas coloidais. (A) Partículas eletricamente carregadas em repulsão. (B) Partículas "sem carga" livres para colidir e se agregarem.



Fonte: Adaptado de Ravina (1993).

Para separação sólido-líquido dessas partículas é preciso a utilização de tratamentos que permitam a aglomeração das mesmas, já que de acordo com Bratby (1980), as partículas coloidais menores que $0,1 \mu\text{m}$ demandam de 80 dias para decantarem em um percurso de 100 mm.

Os colóides são coagulados com maior eficiência quando são utilizados íons de carga elevada e cargas opostas a da partícula coloidal, o que torna sais contendo íons bivalentes e trivalentes mais efetivos (SAWYER E McCARTY, 1994).

Segundo Belan (1980), os reagentes que apresentam a capacidade de coagulação dos colóides são chamados de coagulantes. De acordo com Borba (2001), os coagulantes são responsáveis por melhorar os parâmetros de cor e turbidez devido à precipitação de coágulos.

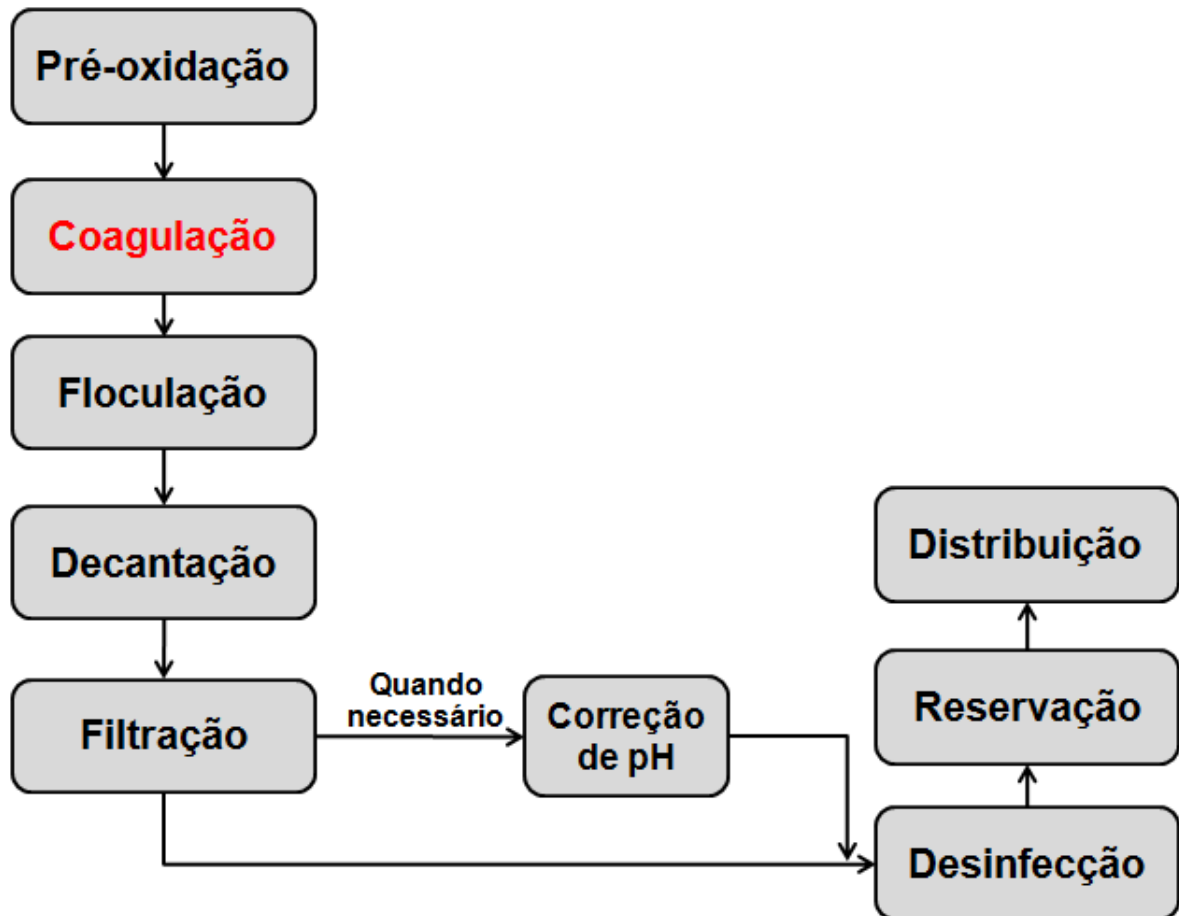
Lima Júnior e Abreu (2018) afirmam que a coagulação é um dos principais fenômenos de desestabilização do material coloidal, por estes comumente exibirem carga elétrica superficial negativa, quando em pH neutro. Assim, os coagulantes devem ser capazes de produzir espécies catiônicas em solução promovendo a desestabilização das partículas do meio através da neutralização/redução das cargas.

Os coagulantes apresentam variadas aplicações, mas o tratamento de água ainda é a principal delas. Segundo Metcalf & Eddy (2003), os coagulantes são fundamentais para os sistemas de abastecimento de água potável e tratamento de efluentes industriais, devido ao baixo custo e alta eficiência.

Estes podem ser classificados em coagulantes naturais e coagulantes químicos. Segundo Borba (2001) os coagulantes naturais são constituídos principalmente por polissacarídeos, proteínas e amidos. O mecanismo coagulante dessas espécies se deve ao tamanho de suas moléculas e de suas características eletromagnéticas, sendo constituídos por grandes cadeias carbônicas dotadas de frações eletropositivas e eletronegativas, permitindo considerá-los coagulantes catiônicos ou aniônicos. Já os coagulantes químicos são os mais utilizados devido à grande eletropositividade dos elementos químicos que se opõem.

A etapa de coagulação é comumente aplicada antes da adição de um agente floculante. Os agentes floculantes são utilizados para aumentar a taxa de sedimentação ou flotação dos agregados atuando no mecanismo de pontes (BRATBY, 1980). Essa informação pode ser contextualizada no fluxograma apresentado a seguir, que sintetiza o esquema geral de uma estação de tratamento de água convencional (FIGURA 28).

Figura 28 - Esquema geral de uma estação de Tratamento de água convencional.



Fonte: Adaptado de Vieira *et al* (2007).

O processo de coagulação é coordenado por uma série de condicionantes que variam em função da natureza do poluente, tipo e dosagem do coagulante, pH da água, temperatura, concentração de componentes solúveis, entre outras (BRATBY, 1980). Dentre essas variáveis, o pH assume papel de relevância. De acordo com Libânio (2010), o pH deve ser um dos parâmetros observados com maior frequência nas rotinas de tratamento, pois sua variação interfere em determinados processos unitários de tratamento, como por exemplo, a coagulação química.

Além destas variáveis, a coagulação está submetida a alguns mecanismos de ocorrência. Bratby (1980) elucida os principais mecanismos que ocorrem com a coagulação no tratamento de efluentes, conforme a Figura 29 abaixo:

Figura 29 - Mecanismos dos processos de coagulação que desestabilizam as partículas coloidais.

Mecanismo	Fundamentação
Compressão da dupla camada elétrica	A desestabilização das partículas coloidais ocorre pela adição de grande quantidade de íons de carga contrária, não se adsorvendo na superfície do colóide. A grande concentração de cargas positivas causa excesso de íons na camada elétrica, comprimindo/reduzindo a área de influência ao redor do colóide, sem necessariamente reduzir sua carga.
Neutralização de cargas	As espécies químicas de cargas contrárias adsorvem nas partículas coloidais, resultando em uma carga líquida tendendo a zero. Esse mecanismo diminui a barreira de energia repulsiva e permite a formação de flocos estáveis.
Varredura	Esse mecanismo é caracterizado pela adição de grandes quantidades de coagulantes na forma de hidróxido ((Al(OH) ₃) e Fe (OH) ₃). A precipitação depende do pH da mistura e da concentração de alguns íons presentes na solução. Os colóides são aprisionados no coágulo do precipitado metálico. Neste mecanismo os colóides são literalmente "varridos" do meio.

Fonte: Adaptado de Bratby (1980).

Os coagulantes mais utilizados no mercado são aqueles a base de alumínio ou ferro, como o sulfato de alumínio e o cloreto férrico. Além destes, o policloreto de alumínio, os sulfatos férrico, ferroso e ferroso clorado; juntamente com alguns coagulantes orgânicos a base de tanino têm ganhado espaço no mercado (VILLETTI, 2017).

Dentre os mecanismos de coagulação, o mecanismo de varredura é o que explica o processo que ocorre pela adição de sais de ferro e alumínio em água. No processo do mecanismo de varredura, os sais em contato com a água formam uma variedade de diferentes espécies químicas através de várias reações hidrolíticas. Os produtos da hidrólise dos coagulantes sofrem reações de polimerização ligando-se uns aos outros para formar moléculas maiores, que por sua vez, transformam-se em largas cadeias tridimensionais com extremos ativos. Essas cadeias adsorvem os colóides formando massas esponjosas (coágulos) que ao sedimentarem arrastam novas partículas; "varrendo" o meio (SCHENEIDER, 1991).

As principais considerações acerca destes coagulantes estão presentes na Figura 30 (BRATBY, 1980; MENEZES, 2009; ANJOS, 2016; VILLETTI, 2017):

Figura 30 - Características dos principais coagulantes aplicados no tratamento de efluentes

Sulfato de alumínio $(Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O)$	É o principal coagulante utilizado no tratamento de água para abastecimento público. Produzido a partir da bauxita de elevada pureza, através do processo Bayer, reagindo com ácido sulfúrico em condições especiais.
Policloreto de Alumínio $Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$	Também conhecido como PAC, o policloreto de alumínio se destaca frente a outros coagulantes devido ao seu poder de coagulação ser aplicado a uma faixa mais ampla de pH, o que permite a adição de uma menor quantidade de alumínio na água em comparação ao sulfato de alumínio. É produzido da reação entre alumínio e ácido clorídrico.
Sulfato Férrico $Fe_2(SO_4)_3$	É utilizado com sucesso para remoção de fósforo, ferro e manganês, devido a sua ampla faixa de pH que varia entre 4 e 11.
Cloreto Férrico $FeCl_3$	Apresenta as mesmas vantagens do sulfato férrico como coagulante. Ainda, por não possuir sulfato não sua composição química, não há potencial de produção odores sulfurosos quando empregado em estações de tratamento de efluentes que possuem processos anaeróbios a jusante.
Sulfato Ferroso $FeSO_4 \cdot 7H_2O$	Reagem com a alcalinidade natural da água/efluente formando hidróxidos ferrosos. Para sucesso no uso do sulfato ferroso é preciso oxidar os hidróxidos formados da forma ferrosa para férrica, através da utilização de aeração, adição de oxigênio ou cloro gasoso.
Sulfato Ferroso Clorado	Formando a partir da combinação entre sulfato ferroso e cloreto férrico, é produzido a partir da oxidação de sulfato ferroso com cloro. É indicado quando uma pré-cloração é necessária no sistema.
Taninos	São coagulantes orgânicos, com alta biodegradabilidade de baixa toxicidade, gerando um lodo menos perigoso, isento de metais oriundos dos coagulantes, como ferro e alumínio. É um coagulante tradicionalmente utilizado na indústria do couro, como agente de curtimento. Coagulantes a base de tanino não exigem correção de pH, visto que o pH mantém-se constante, sendo efetivos em uma faixa de 5 a 8.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Em linhas gerais os sais de ferro formam flocos mais pesados que os de alumínio, trabalham numa faixa mais ampla de pH, e apresentam menor tempo de acondicionamento para formação dos coágulos. Ainda, segundo Zendron (2015) - a ingestão contínua de alumínio tem sido associada a algumas doenças neurológicas como Parkinson e Alzheimer.

Contudo, os coagulantes apresentam como desvantagem proporcionar coloração amarela na água no caso de ineficiência do processo de separação coágulo-água.

As principais características, aplicações e especificidades do cloreto férrico serão dissertadas a seguir.

2.6 Cloreto Férrico

O cloreto férrico, é um sal à base de ferro trivalente, com fórmula química FeCl_3 . É um coagulante que apresenta grande efetividade no tratamento de água, esgoto e efluentes líquidos industriais. Além das aplicações no tratamento de efluentes o cloreto férrico é eficiente no tratamento superficial de metais, purificação de glicerina, inibição de betumes, processos hidrometalúrgicos, entre outras.

Essa grande aplicabilidade no tratamento de efluentes se dá por este coagulante poder ser empregado em meios com grandes variações de pH e de temperatura. Na purificação de água, ele diminui drasticamente a turbidez, a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e também a presença de fosfatos e trihalometanos (LEE *et al.*, 2011 *apud* CARAVELLI *et al.*, 2012).

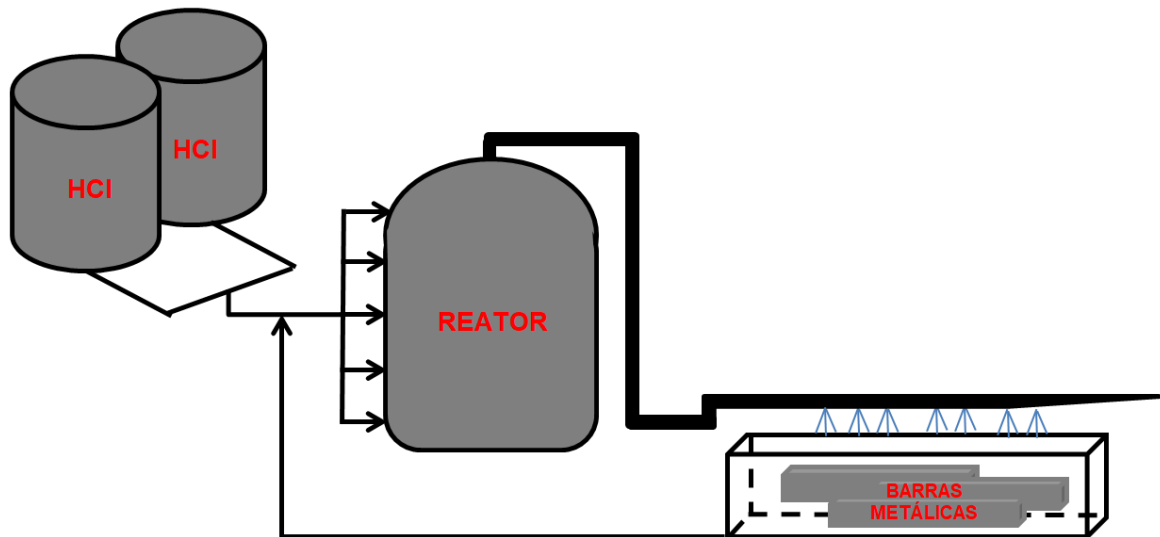
Além destas características, Shi *et al.* (2004) afirmam que o cloreto férrico apresenta outras vantagens quando comparado aos coagulantes a base de alumínio, sendo que a mais importante delas é o menor risco a saúde, tendo em vista a suspeita de estes últimos serem carcinogênicos e mutagênicos.

A produção de cloreto férrico é realizada através da cloração a quente do minério de ferro ou sucata ferrosa, seguido do resfriamento e filtração. A cloração é feita através da lixiviação de ácido clorídrico (HCl), dando origem a um produto líquido de coloração castanha e altamente corrosivo (SILVA, 2015).

Silva (2013) descreve o processo produtivo do cloreto férrico como sendo realizado através de barras, chapas e perfis de aço que são aspergidos com uma solução ácida de HCl. Quando essa água ácida entra em contato com a fase metálica, se inicia o processo de solubilização do ferro, que neste ponto encontra-se na forma ferrosa (Fe^{2+}). A solução ferrosa obtida é recolhida e retorna de forma cíclica, para reação com adição de gás cloro, convertendo o Fe^{2+} para Fe^{3+} . A solução contendo Fe^{3+} retorna e entra em contato com as chapas e é reduzido novamente a Fe^{2+} devido a oxidação do Fe^0 presente na sucata. O processo segue até que sejam atingidas as condições ideais do coagulante, principalmente em relação à

concentração de Fe_{total} e Fe na forma férrica (Fe^{3+}), que devem possuir valores próximos. Para controle de processo, a temperatura é uma das variáveis de maior importância. Um esquema da produção de cloreto férrico pode ser visualizado na figura 31.

Figura 31 - Esquema de produção de coagulante cloreto férrico.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

O ácido clorídrico entra em contato com as chapas de ferro formando o cloreto ferroso:



O cloreto de ferro II formado é enviado para o reator de oxidação e passa para o estado trivalente formando o cloreto férrico:



Ainda, a produção do $FeCl_3$ pode ser obtido pela reação de cloração do minério de ferro (hematita), conforme equação 3 a seguir:



O cloreto férrico obtido nesses processos é um coagulante que atua por meio de mecanismos de varredura, onde não existe relação estequiométrica entre a área superficial da partícula e a dosagem do coagulante (PACKMAN, 1965 *apud* LIBÂNIO, 2010). O $FeCl_3$ quando adicionado ao meio aquoso, passa pelas seguintes reações:



Por sua vez, o Fe^{3+} reage com a água, pelas seguintes reações:



A distribuição das espécies de ferro no meio depende da concentração de ferro e do pH do meio. A coagulação se dá pela neutralização da carga superficial das partículas negativas presente na água pelas espécies carregadas positivamente de ferro (Fe^{3+} , $\text{Fe}(\text{OH})^{+2}$ e $\text{Fe}(\text{OH})_{2+}$) ou pelo efeito de varredura do precipitado $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Pode-se verificar, que a adição do FeCl_3 promove um aumento da acidez no meio.

A dosagem de cloreto férrico aplicada é calculada juntamente com a dosagem da base (cal ou hidróxido de sódio) a serem utilizadas na formação de flocos pelo aumento do pH da solução (MANCUSO & SANTOS, 2003).

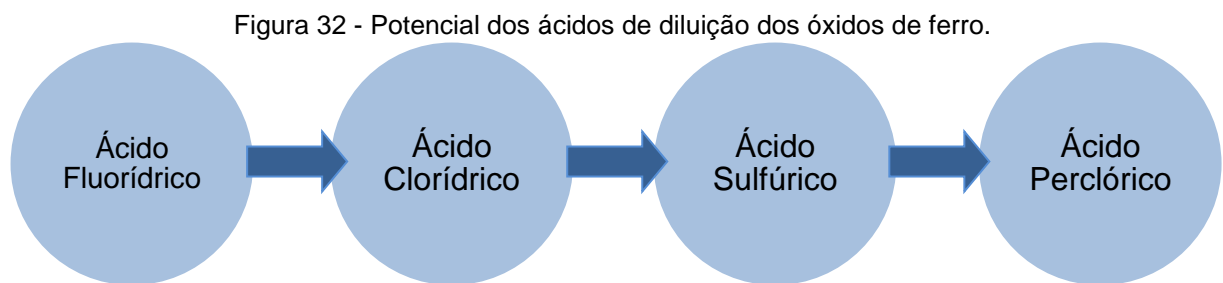
O cloreto férrico é vendido nas formas sólidas e líquida, hidratada ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ou anidra (FeCl_3), e é um reagente que apresenta alta solubilidade em água (SILVA, 2015). O cloreto férrico apresenta pH extremamente ácido (< 0,5) com concentração superior a 40% na forma líquida e coloração marrom escura (BRATBY, 1980; CAVALCANTI, 2016).

De acordo com Menezes (2009), um problema associado ao uso do cloreto férrico é a excessiva corrosividade, que compromete algumas partes metálicas em sistemas de tratamento e exige certos cuidados em relação ao seu uso e estocagem.

O processo de produção do cloreto férrico tem seus princípios subsidiados no comportamento de dissolução dos óxidos de ferro por ataque ácido a quente. Por isso, entender os processos acerca da concentração de ácido clorídrico e o comportamento da temperatura em relação à eficiência da lixiviação é de grande importância.

Os óxidos de ferro, em geral, apresentam capacidade de solubilização baixa a muito baixa (SURANA, 1969). Os fatores que influenciam a taxa de dissolução dos óxidos de ferro são as propriedades do sistema global (temperatura), a composição da fase de solução (pH e concentração de ácido) e as propriedades do óxido (área de superfície específica, estequiometria, composição química e hábito cristalino) (CORNELL e SCHWERTMANN, 1996).

Com base nas averiguações da dissolução em função da concentração ácida, Pryor e Evans (1949) elucidaram que a taxa de dissolução dos óxidos de ferro diminui na ordem dos seguintes ácidos (FIGURA 32):



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Diante destas considerações percebe-se que o ácido clorídrico apresenta uma boa capacidade de dissolução de óxidos de ferro, o que indica sua eficiência para solubilização do ferro contido no rejeito. Essa capacidade de dissolução mostra o potencial de produção de cloreto férrico a partir do rejeito, apontando que o aproveitamento do ferro disponível neste resíduo mineral poderá ser bastante efetivo.

A avaliação da temperatura na dissolução do ferro pode ser explicada pelos métodos de dissolução aplicados para análises químicas que demandam da dissolução total do ferro. Segundo Schwertmann *et al.* (1989) para obtenção da dissolução total do ferro são utilizadas concentrações de ácido clorídrico entre 6 e 12 mol L⁻¹, aquecidas em temperaturas de 60 a 80°C.

Temperaturas mais altas são necessárias para que haja uma maior efetividade na dissolução dos óxidos de ferro. Porém, no caso da produção de cloreto férrico, esse aumento de temperatura não deve ser tão maior que 80°C; visto que - o ponto de ebulição do ácido clorídrico é em 110°C. Essas considerações embasam a busca

pelas condições ótimas de concentração de ácido clorídrico e temperatura necessária para a produção de um coagulante férrico de qualidade.

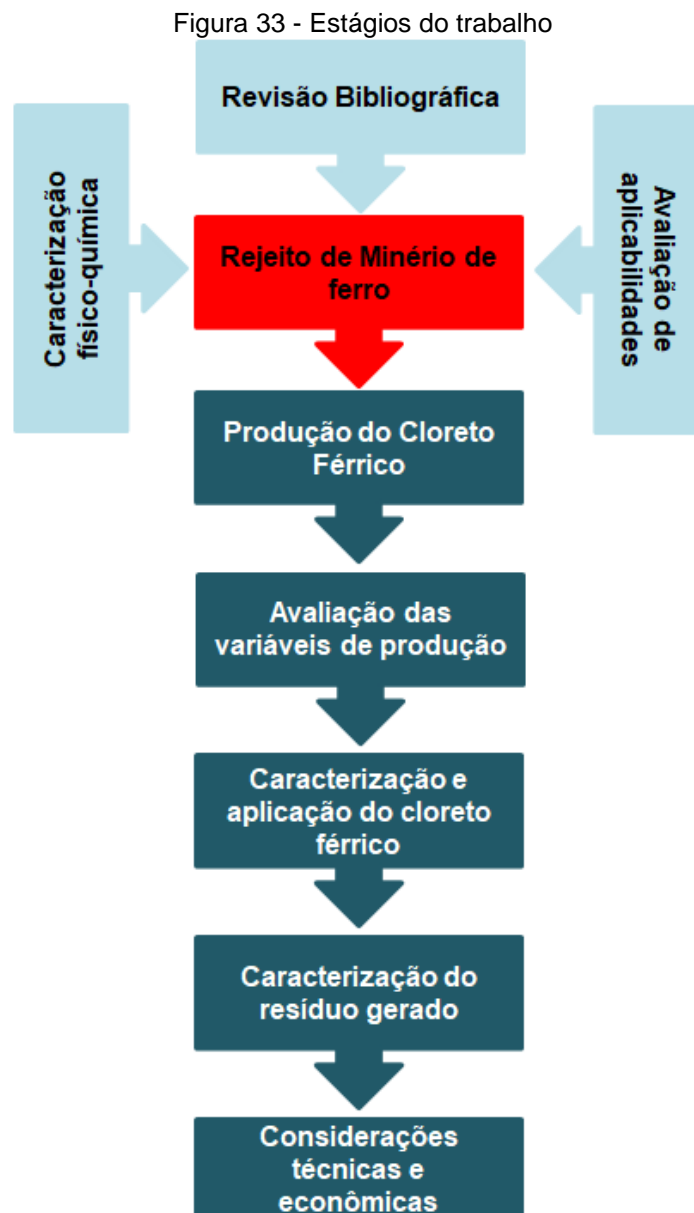
De posse das principais informações que subsidiam as características do rejeito de minério de ferro e suas especificidades juntamente às considerações acerca dos coagulantes com ênfase na produção do cloreto férrico foi possível fundamentar os processos e informações obtidas nessa pesquisa.

Partindo das considerações elencadas até aqui serão apresentados a seguir os materiais e métodos empregados na elaboração deste trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia experimental deste trabalho embasou-se em uma amostra típica de rejeito de minério de ferro proveniente do Quadrilátero Ferrífero. As etapas de caracterização centralizaram-se em análises físicas e químicas do rejeito. Com as informações obtidas nas investigações físicas e químicas foi possível direcionar potencialidades para este resíduo mineral e a aplicação adotada neste estudo foi à produção de cloreto férrico.

O conjunto de análises de caracterização do rejeito de minério de ferro de procedimentos para produção do cloreto férrico está sintetizado no fluxograma apresentado na Figura 33.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

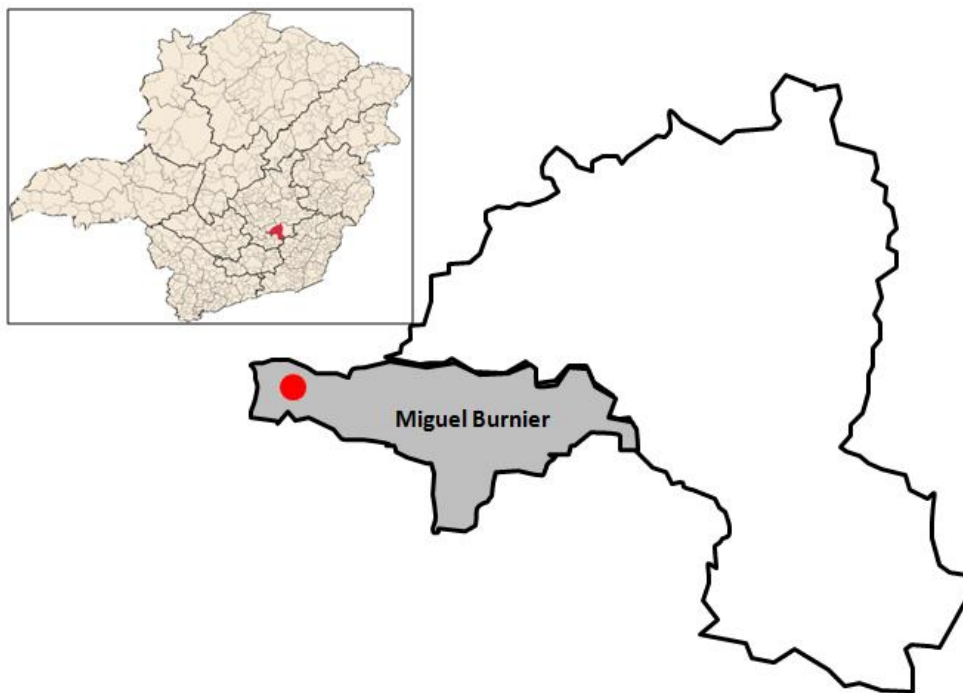
3.1 MATERIAIS

As amostras de rejeito de minério de ferro, equipamentos e reagentes utilizados para o desenvolvimento deste trabalho estão descritos a seguir.

3.1.1 Amostra de Rejeito de Minério de Ferro

O rejeito de minério de ferro utilizado neste estudo foi fornecido por uma empresa que atua na extração e beneficiamento de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero. A mina está localizada no distrito de Miguel Burnier no município de Ouro Preto/MG, região sudeste do Quadrilátero Ferrífero (FIGURA 34).

Figura 34 - Localização da mineração de origem do rejeito de minério de ferro.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

A jazida faz parte do supergrupo geológico Minas, com a seguinte sequência de rochas mapeadas:

- **Base** - Sericita - Quartzo - filito;
- **Parte Intermediária** - Formação ferrífera constituída de itabiritos, quartzitos ferruginosos e hematita;
- **Topo** - Constituído de filitos sãos e alterados.

A exploração deste depósito é realizada com lavra em bancadas, através de desmonte mecânico, já que a maior parte da jazida é composta por itabirito friável (FIGURA 35).

Figura 35 - Lavra de minério de ferro em bancadas.



Fonte: Google Earth (2019).

O sistema de beneficiamento da empresa conta com etapas de britagem, peneiramento, concentração magnética, espessamento e filtração. Salienta-se que o diferencial do sistema de beneficiamento desta empresa é que a etapa de filtração também é utilizada para os rejeitos, visando à desidratação para disposição a seco em pilhas.

A alimentação da planta de beneficiamento é de aproximadamente 700 t/h, com recuperação na ordem de 35%. A capacidade produtiva da planta é de 2,5 Mta, gerando aproximadamente 3,4 Mta de rejeito. O fluxograma de beneficiamento da empresa é apresentado na Figura 36.

A coleta da amostra foi conduzida pela empresa, seguindo os procedimentos da NBR 10007 (ABNT, 2004d), visando a melhor representatividade do material processado no sistema. A coleta foi realizada após o estágio de espessamento, de maneira que as características da polpa de rejeitos pudessem ser avaliadas tanto na ótica dos sólidos quanto da água de processo. Foram amostrados cerca de 400 kg de polpa de rejeito de minério de ferro (*underflow* do espessamento), que foram transportados em tambores de 100L conforme apresentado na Figura 37.

Figura 37 - Tambores utilizados para transporte do rejeito.



Fonte: Autor (2019).

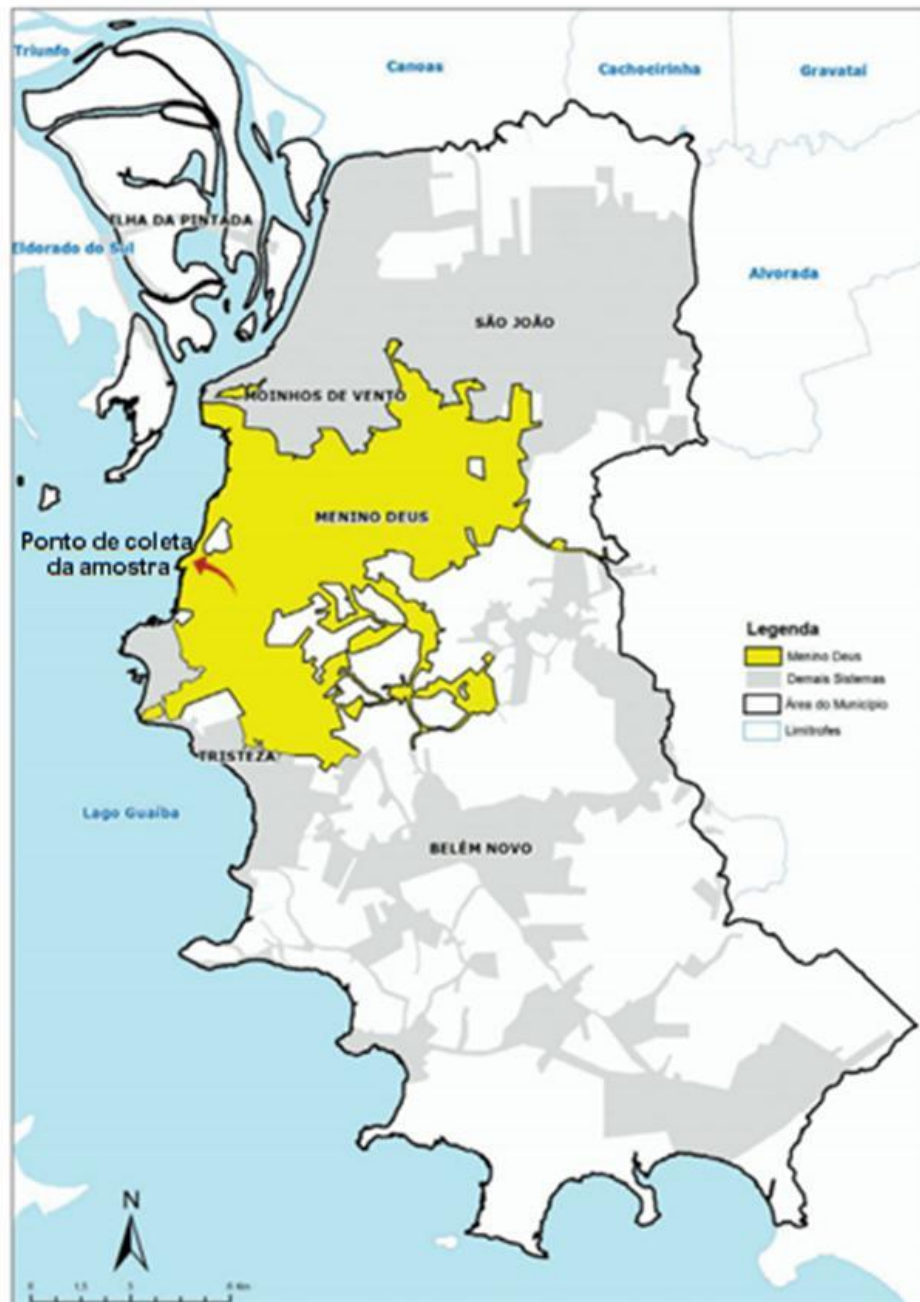
3.1.2 Amostra de água bruta de abastecimento

Para investigação da eficiência do cloreto férrico produzido a partir dos rejeitos de minério de ferro foram utilizadas amostras de água bruta proveniente do Lago Guaíba. O Lago Guaíba localiza-se na região metropolitana de Porto Alegre - RS, e é o principal manancial de abastecimento hídrico da capital gaúcha.

De acordo com dados do DMAE de Porto Alegre (2015), aproximadamente 198.069.074 m³ de água bruta são captados por ano do lago Guaíba pelos seis sistemas de abastecimento disponíveis na cidade.

O ponto de coleta da amostra de água bruta, está dentro do sistema de abastecimento Menino Deus, conforme indicado na Figura 38 abaixo. A coleta foi realizada fora do segmento de captação do DMAE, em um ponto com elevada incidência de poluição. Local escolhido com o intuito de que a amostra servisse de indicador para a avaliação do cloreto férrico frente a diversos parâmetros de potabilidade.

Figura 38 - Sistema de Abastecimento Menino Deus.



Fonte: DMAE (2015).

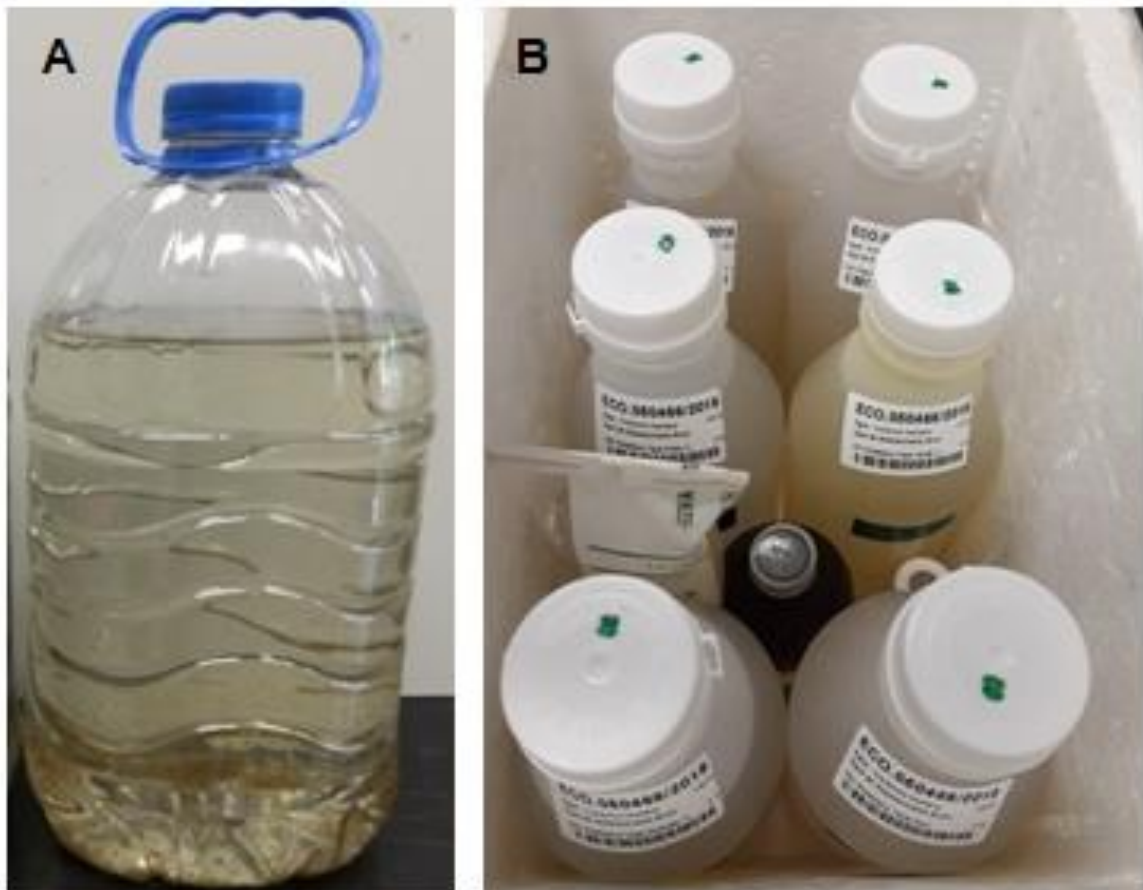
A coleta da amostra foi realizada na região da Avenida Diário de Notícias, ao lado do píer BarraShopping Sul, no dia 21 de dezembro de 2018 (FIGURA 39). Foram coletados aproximadamente 20 litros de amostra do lago Guaíba, que foram utilizados para análise da água bruta e tratada por coagulação com cloreto férrico (FIGURA 40).

Figura 39 - Ponto de coleta da água no Lago Guaíba



Fonte: Google Earth (2019).

Figura 40 - Amostra de água bruta. (A) amostra bruta. (B) Amostra condicionada para análise



Fonte: Autor (2019)

3.1.3 Equipamentos

Os equipamentos utilizados para execução das análises deste trabalho estão descritos na Tabela 02.

Tabela 02 - Equipamentos utilizados no estudo experimental

Equipamento	Marca	Modelo
Agitador Magnético	SP LABOR	SP 10209/A
Analizador de área superficial e poros	QUANTACHROME	NOVA 1000e
Balança Analítica	URANO	UA 220
Balança Digital	URANO	UR 10000 LIGHT
Câmera Digital	SONY	NEX-3
Centrífuga	FANEM	206 – R
Chapa de aquecimento	Jung	400
Difratômetro de Raios - X	SIEMENS	D-5000
DSC	NETZSCH	DSC 404 F1
Espectrofotômetro	PRO-TOOLS	UV – 1100
Espectrômetro de Fluorescência de Raios - X	RIGAKU	X RIX 2000
Estufa	MARCONI	MA037
Granulômetro a laser	CILAS	1180
ICP-OES	SPECTRO ANALYTICAL INSTRUMENTS	SPECTRO CIROS CCD
Mesa Agitadora	NOVA TÉCNICA	NT 145
Microscópio	BEL PHOTONICS	BIO3 SERIES
Osiose Reversa	MAC CLEAN	90APGE BUBE
pH-metro	AKSO	86505
PMZ	PARTICLE METRIX	PMX 120
Turbidímetro	DIGIMED	DM-TU

3.1.4 Água e reagentes

A água empregada nas análises deste estudo foi proveniente do abastecimento público de Porto Alegre, sendo ainda, purificada por osiose reversa. Quanto aos reagentes utilizados para realização dos experimentos foram de grau analítico (Tabela 03).

Tabela 03 - Reagentes empregados no estudo experimental.

Reagente	Marca
Ácido Clorídrico	QUÍMICA MODERNA
Ácido Difenilaminosulfonato	NEON
Ácido Fosfórico	NEON
Ácido Sulfúrico	DINÂMICA
Bicromato de potássio	LABSYNTH
Clorato de Potássio	MERCK
Cloreto de estanho II	DINÂMICA
Cloreto de mercúrio II	QUEMIS
Hidróxido de sódio	GUAPO

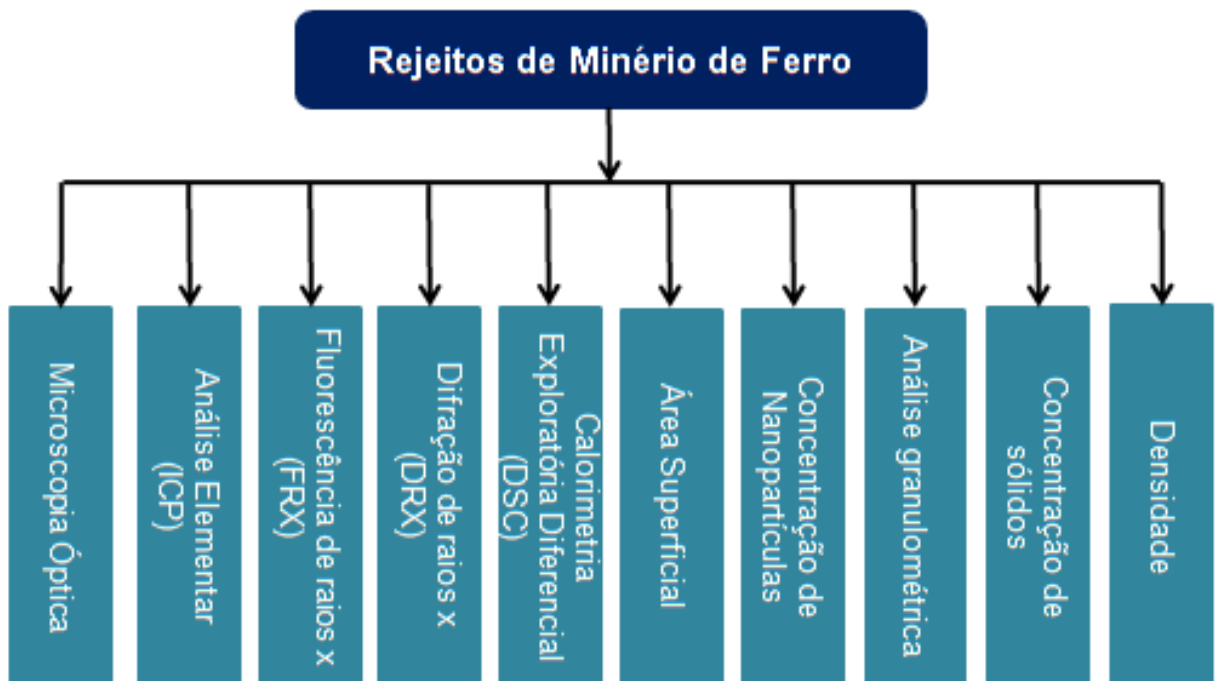
3.2 MÉTODOS

A seguir serão descritos os procedimentos adotados para a realização da caracterização e demais ensaios apresentados nesta pesquisa.

3.2.1 Caracterização do rejeito de minério de ferro

As análises realizadas para essa caracterização estão sintetizadas no esquema estruturado a seguir (FIGURA 41):

Figura 41 - Caracterizações físico-químicas do rejeito de minério de ferro



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

3.2.1.1 Densidade da Polpa

A determinação da densidade da polpa do rejeito de minério foi realizada a partir do teste da proveta conforme descrito por Tavares (2009).

Foram utilizadas três provetas graduadas de 1000 mL cada, previamente limpas e secas. Inicialmente foi realizada a pesagem das provetas, em seguida efetuada a pesagem das provetas com água. Com os dados de aferimento da densidade da água, foram adicionados 1000 mL de polpa de rejeito em cada uma delas.

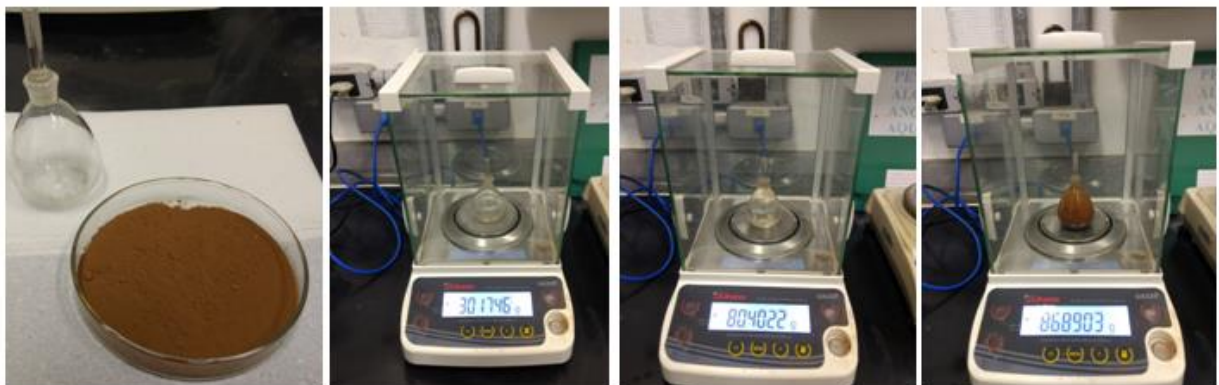
As provetas com 1000 mL de polpa também foram pesadas e todos os valores anotados. Com base no volume e na massa obtidos foi possível determinar a densidade da polpa de rejeitos de minério de ferro (equação 9).

$$\text{Densidade } (\rho) = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \quad (9)$$

3.2.1.2 Densidade do Rejeito Seco

Para medir a densidade do rejeito seco foi utilizado o método do picnômetro. Primeiramente foram pesadas 10g de rejeito seco. Em seguida, as pesagens do picnômetro, picnômetro + amostra, picnômetro + amostra + água e picnômetro + água foram realizadas (FIGURA 42).

Figura 42 - Etapas de pesagem do método do picnômetro.



Fonte: Autor (2019).

O procedimento contempla os passos utilizados para quantificar a densidade relativa do rejeito de minério de ferro (SILVA, 2007).

- Pesar o picnômetro vazio, previamente limpo e seco, em estufa, a 100°C e resfriado em dessecador (A1);

- Encher o picnômetro com água até transbordar, secar a superfície externa e pesar o conjunto picnômetro + água (A4);
- Adiciona-se a amostra de rejeito no picnômetro e, em seguida, pesa-se o conjunto picnômetro + amostra (A2);
- A este último conjunto adiciona-se água até o limite indicado, e pesa-se todo conteúdo; picnômetro + amostra + água (A3).

Esse conjunto de passos são aplicados para se calcular a densidade com base na Equação 10:

$$d_s = \frac{(A2) - (A1)}{(A4 + A2) - (A1 + A3)} \quad (10)$$

d_s - densidade dos sólidos;

A1 - massa do picnômetro;

A2 - massa do picnômetro + amostra;

A3 - massa do picnômetro + amostra + água;

A4 - massa do picnômetro + água.

3.2.1.3 Concentração de Sólidos

A concentração de sólidos presentes na polpa de rejeitos é uma informação importante dentro do contexto de beneficiamento de minérios, já que expressa a razão sólido/líquido desta fase do sistema.

Para a polpa de rejeitos, foi calculada a percentagem de sólidos (%S) em função da densidade da polpa (d_p) na qual estão contidos esses sólidos e com base na densidade dos próprios sólidos (d_s), conforme apresentado na Equação 11 (WILLS, 1992). Assim, tomando a densidade da água igual a 1.000 kg/m³, tem-se:

$$(\%S) = 100 \frac{d_s(d_p - 1000)}{d_p(d_s - 1000)} \quad (11)$$

3.2.1.4 Área Superficial Específica

A análise de área superficial específica foi realizada pelo LACER (Laboratório de materiais Cerâmicos) da UFRGS.

A área superficial específica do rejeito de minério de ferro foi medida através do método BET multiponto, a partir de isotermas de adsorção de nitrogênio (pureza 99,99%) a 77K.

O equipamento utilizado para análise foi um analisador de área superficial BET da marca Quantachrome, modelo NOVA 1000e *Surface Area & Pore Size Analyzer*. Para execução da análise foram utilizadas 0,8 g de rejeito.

3.2.1.5 Análise granulométrica

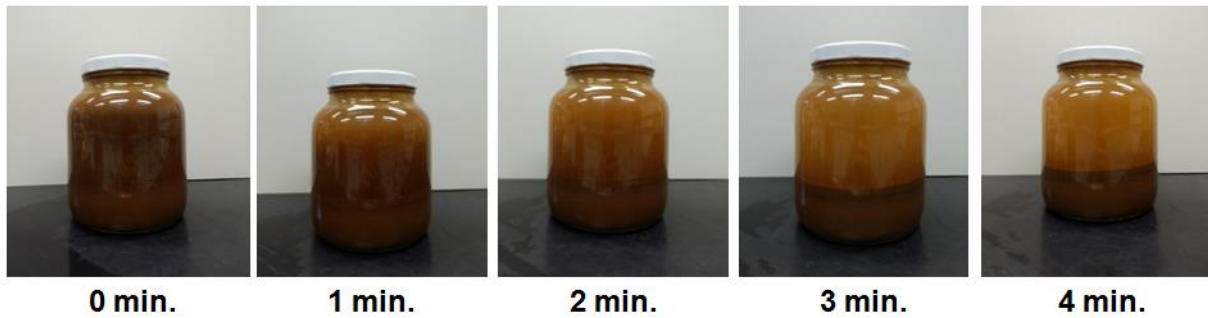
A análise granulométrica do rejeito de minério de ferro foi realizada pelo Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS. Foi adotado o método de difração de raios *laser* e para isso foi utilizado um equipamento da marca CILAS, modelo 1180. O meio adotado para análise foi água destilada, com tempo de dispersão por ultrassom de 60s. Para análise foram utilizadas 2,0 g de amostra procedendo-se à leitura em uma faixa de 0,04 a 2500 μm .

3.2.1.6 Concentração de Nanopartículas

A concentração, tamanho médio e distribuição das nanopartículas de rejeito de minério de ferro foram mensuradas pela técnica de análise de rastreamento de nanopartículas (*Nanoparticle Tracking Analysis - NTA*). A análise foi realizada no próprio Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) da UFRGS, em um equipamento ZetaView, modelo PMX-120.

A amostra utilizada para essa análise foi coletada de uma suspensão provocada pela agitação do rejeito de minério de ferro em polpa. Esperou-se um tempo de 4 min para sedimentação da maior parte dos sólidos (FIGURA 43). A parte clarificada da suspensão foi coletada e filtrada, previamente antes de ser analisada no PMX, em um filtro de membrana de acetato de celulose de 1,2 μm que é inserido na entrada da amostra no equipamento.

Figura 43 - Suspensão de micro e nano partículas de rejeito de minério de ferro.



Fonte: Autor (2019).

A técnica NTA utiliza da captura de vídeos das partículas, de modo a verificar o movimento apresentado pelas mesmas. Com base no movimento browniano de cada partícula no vídeo é possível determinar o diâmetro hidrodinâmico das partículas. Essa metodologia permite medições na faixa entre 15 nm e 5 μm ; com variações dependentes do tipo de amostra e do modo de medição adotado.

3.2.1.7 Análise Termogravimétrica – TGA

Análise termogravimétrica TGA (*Thermogravimetric analysis*) foi realizada pelo LACER. Para melhor interpretação dos resultados foi plotada a curva de DTG (derivada da análise termogravimétrica), onde os picos desta curva indicam as maiores variações de perda de massa visualizadas.

Para avaliação desse resíduo em função da sua decomposição térmica foi utilizado 1 g de rejeito, peneirado e passante em malha de #115 mesh (125 μm).

O equipamento utilizado foi um analisador térmico da marca SHIMADZU, modelo TGA-50 (cadinho de platina). Os parâmetros do ensaio foram: razão de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}.\text{min}^{-1}$, no intervalo de temperatura de 35 a 1000°C em atmosfera ambiente.

3.2.1.8 Calorimetria Exploratória Diferencial - DSC

A análise de DSC (*Differential scanning analysis*), também conhecida como calorimetria exploratória diferencial foi realizada pelo LACER.

O equipamento utilizado foi um calorímetro exploratório diferencial de alta temperatura da marca NETZSCH, modelo DSC 404 F1 (cadinho de platina). Para realização da análise foi utilizada 1 g de rejeito, peneirado e passante em malha de

#115 mesh (125 μm). O intervalo de temperatura utilizado foi de 20 a 1200°C, com uma razão de aquecimento de 10°C.min⁻¹.

3.2.1.9 Difração de Raios-X (DRX)

A análise mineralógica do material foi realizada por difração de raios-X (DRX), efetuada em difratômetro de raios-X da marca SIMENS (BRUKER AXS), modelo D-5000 (θ - θ) equipado com tubo de ânodo fixo de Cu ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), operando a 40 kV e 40 mA no feixe primário e monocromador curvado de grafite no feixe secundário.

A análise de DRX foi realizada pelo Instituto de Geociências da UFRGS - Laboratório de Difractometria de Raios-X.

A metodologia aplicada foi o método do pó, que consiste na deposição do material pulverizado e desagregado depositado em porta amostra de modo que a desorientação das partículas seja preservada para análise dos minerais e estruturas cristalinas presentes.

A análise qualitativa foi realizada no intervalo angular de 3 a 80° em passo de 0.05°/s utilizando-se fendas de divergência e anti-espelhamento de 1° e 0.2 mm no detector.

3.2.1.10 Fluorescência de Raios-X (FRX)

A amostra de rejeito de minério de ferro foi analisada em espectrômetro de Fluorescência de Raios-X (FRX), da marca RIGAKU, modelo RIX 2000, do laboratório de Geoquímica da UFRGS.

A análise de FRX foi de cunho semi-quantitativo, realizada através da técnica de amostra fundida com curva de calibração a partir de padrões de rocha. O espectrômetro utilizado está equipado com tubo de raios-X de Ródio.

3.2.1.11 Análise Elementar – ICP (OES)

A análise elementar do rejeito de minério de ferro foi realizada pelo Laboratório de Análises Químicas e Ambientais (LAQIA) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

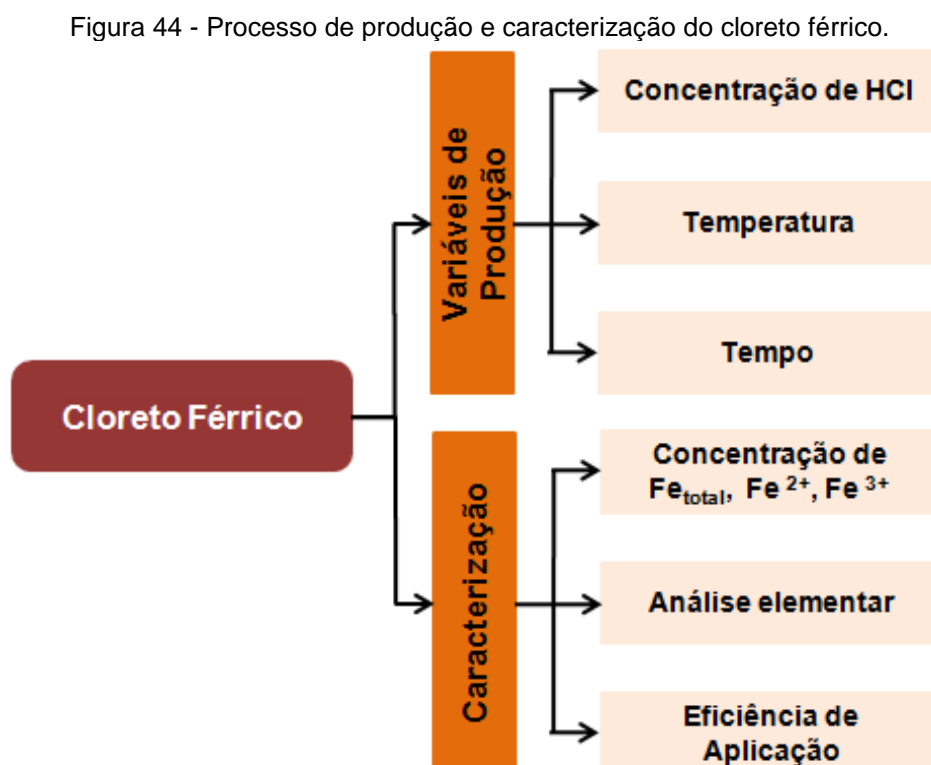
A abertura das amostras para as análises elementares do rejeito foi realizada por digestão ácida com auxílio de forno de micro-ondas marca ETHOS, modelo MILESTONE.

A extração dos metais foi realizada pelo Método 3052 (USEPA, 1996). Foram avaliadas três condições visando a melhor leitura do rejeito. A condição que apresentou o resultado mais completo de elementos majoritários foi a que contemplou a seguinte correlação de reagentes e amostra: 250 mg de amostra de rejeito, 9 mL de ácido nítrico (HNO_3), 5 mL de ácido fluorídrico (HF) e 1 mL de ácido clorídrico (HCl).

As determinações elementares do rejeito foram realizadas via ICP-OES. O equipamento utilizado é da marca *Spectro Analytical Instruments*, modelo *Spectro Ciros CCD*.

3.2.2 Produção do Cloreto Férrico

A metodologia aplicada para produção do cloreto férrico e as análises realizadas para a caracterização do mesmo estão sintetizadas no fluxograma a seguir (FIGURA 44):



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

3.2.2.1 Variáveis de Produção

Os ensaios de produção do cloreto férrico foram alinhados de maneira a se obter as melhores condições de solubilização do ferro presente no rejeito. Para a investigação dessas condições foram exploradas as variáveis de concentração de ácido clorídrico (HCl), temperatura de solubilização e tempo de contato entre o resíduo e a solução de lixiviante.

Com base na reação química de produção de cloreto férrico a partir de hematita (Equação 12) foi possível calcular estequiometricamente a concentração de HCl necessária para solubilização do ferro hematítico presente no rejeito.



Com base na reação estequiométrica acima, na composição do rejeito e na concentração do HCl P.A., determinou-se que para cada 1g de rejeito é necessário cerca de 1 mL de HCL 37% para solubilização do ferro presente.

Visto a concentração de HCl necessária, foram estabelecidas quatro concentrações para as soluções ácidas a serem utilizadas: 0; 3,6; 7,2 e 10,8 mol L⁻¹. A definição destas molaridades foi estabelecida considerando a concentração de ácido clorídrico calculada estequiometricamente. Sendo estas correspondentes respectivamente a 0%, 50%, 100% e 150% da quantidade de ácido clorídrico necessária para dissolver 1 g de rejeito. O delineamento das variáveis de concentração está resumido na Tabela 04. A nomenclatura das amostras foi de acordo com o percentual volumétrico de HCl na solução lixiviante.

Tabela 04 - Delineamento experimental para produção de cloreto férrico.

Amostra	Molaridade (mol L ⁻¹)	H ₂ O (mL)	HCl (mL)	Rejeito (g)
AM [0]	0	50	0	30
AM [30]	3,6	35	15	30
AM [60]	7,2	20	30	30
AM [90]	10,8	5	45	30

Com base na composição do rejeito e em ensaios prévios foi determinado que para a obtenção de um cloreto férrico com concentração de ferro >10% (massa/volume) são necessárias cerca de 600 g de rejeito para obtenção de um litro de cloreto férrico.

As temperaturas investigadas neste estudo foram de 25°C, 40°C, 60°C e 80°C. Não foram investigadas temperaturas superiores visando minimizar a evaporação do volume de água presente nas soluções e também evitar a proximidade com o ponto de ebulição do ácido clorídrico em 110°C.

Os ensaios iniciais com as variáveis apresentadas acima foram realizados em um período de 2 horas, conforme estudo de Silva (2013). Em posse da melhor condição de temperatura e concentração de HCl foram realizados os testes de variação do tempo de aquecimento das amostras. Os tempos adotados para esse ensaio foram de: 15, 30, 60, 120, 240, 360 e 480 minutos. A etapa de lixiviação não contou com agitação mecânica, sendo as amostras agitadas manualmente a cada 15 min.

Após os processos de lixiviação do rejeito todas as soluções foram filtradas, em papel filtro quantitativo (\varnothing 12,5 cm) para a avaliação do lixiviado obtido. Todos os ensaios foram realizados em triplicata. As etapas da metodologia descrita podem ser visualizadas na Figura 45.

Figura 45 - Etapas de produção do cloreto férrico



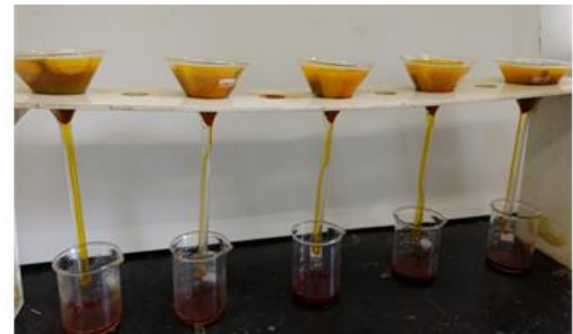
Pesagem do Rejeito



Contato com o agente lixiviante



Aquecimento



Filtragem

Fonte: Autor (2019).

A eficiência do processo de produção do cloreto férrico foi quantificada a partir da concentração de ferro do lixiviado dos ensaios descritos anteriormente.

3.2.2.2 Análise por Via Úmida de Fe_{total} , Fe^{2+} , Fe^{3+}

As soluções produzidas na metodologia descrita anteriormente foram analisadas em função da concentração de ferro dissolvido nas formas de Fe^{2+} , Fe^{3+} e Fe_{total} , de acordo com a técnica apresentada em Vogel (1981). A relação entre as formas férrica, ferrosa e ferro total pode ser visualizada na Equação 13:

$$Fe_{total} = Fe^{2+} + Fe^{3+} \quad (13)$$

Neste trabalho foram medidas as concentrações de Fe^{2+} e Fe_{total} , através dos métodos descritos nos anexos I e II. Os valores de Fe^{3+} foram obtidos por diferença através da relação apresentada na equação 13.

3.2.2.3 Caracterização Cloreto Férrico

O coagulante produzido, com o objetivo de atingir o teor de ferro dentro dos padrões apresentados pelo mercado (>10% de ferro na relação massa/volume) foi analisado em relação aos seguintes parâmetros: densidade, pH e análise elementar.

A densidade foi medida pela relação massa/volume, onde a massa foi medida em uma balança analítica de precisão de 0,0001 e o volume com um picnômetro (cujo volume foi aferido). O pH foi medido em pHmetro da marca AKSO, modelo 86505. As análises de ferro, densidade e pH foram realizadas no LTM.

A análise elementar foi realizada pelo Laboratório de Solos da UFRGS via ICP-OES e foram feitas em um equipamento da marca PERKIN ELMER, modelo OPTIMA 8300 DV.

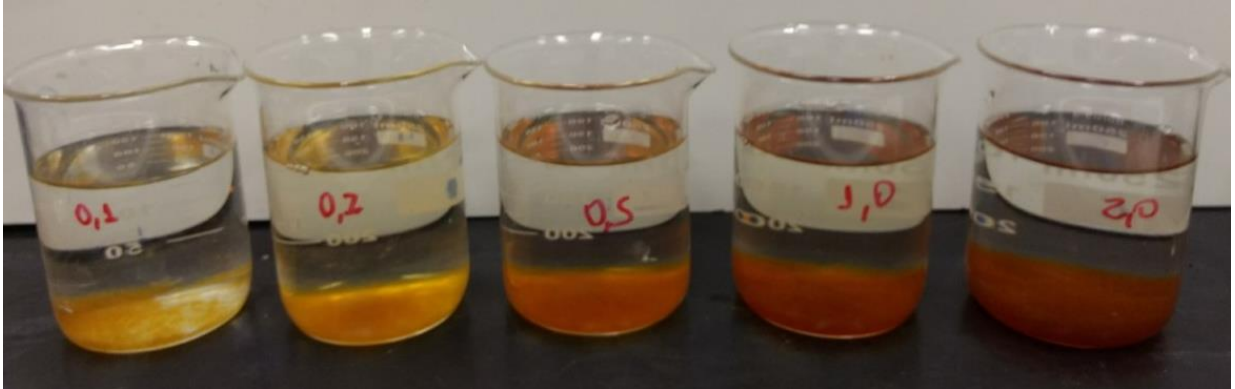
3.2.2.4 Eficiência de Aplicação do coagulante

Visando avaliar a eficiência do coagulante férrico produzido foram realizados ensaios de tratamento de água bruta de abastecimento. As amostras de água bruta foram coletadas no lago Guaíba conforme descrito anteriormente e analisadas na forma bruta, e após tratamento com cloreto férrico produzido a partir do rejeito de minério de ferro.

Inicialmente determinou-se a melhor dosagem do coagulante férrico. Para isso foram avaliadas as dosagens de 0,1 mL; 0,2 mL; 0,5 mL; 1,0 mL e 2,0 mL para cada litro

de água bruta, o que corresponde a $11,3 \text{ mg L}^{-1}$; $22,6 \text{ mg L}^{-1}$; $56,0 \text{ mg L}^{-1}$; $112,8 \text{ mg L}^{-1}$ e $225,8 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro. A água bruta foi colocada em agitação de 100 RPM por 10 minutos e em seguida adicionada as dosagens do coagulante nas concentrações citadas acima (FIGURA 46).

Figura 46 - Comparativo do tratamento de água bruta em função da dosagem do coagulante.



Fonte: Autor (2019).

A definição da melhor dosagem foi estabelecida através da avaliação visual, do tempo necessário de decantação dos flocos formados, análise de cor em espectrofotômetro em comprimento de onda de 420 nm, análise de turbidez e pela quantidade de Hidróxido de Sódio (NaOH) necessário para elevação do pH até 7,0.

Com a melhor concentração do coagulante perante as variáveis acima foi realizado o tratamento da água bruta para análise conforme Portaria 2914/2011.

Foram tratados 6L de água do lago Guaíba, sob agitação de 100 RPM por 10 minutos antes da adição da dosagem de coagulante. Depois de adicionado o coagulante e estabilizado o pH da solução, foi adicionado NaOH por cerca de 15 minutos e o pH ajustado a 7,0. Após a estabilização do pH em 7,0 a agitação foi desligada para que se iniciasse o processo de sedimentação dos coágulos.

Após a decantação, o efluente foi filtrado e encaminhado para o laboratório ECONSULTING que realizou as análises das amostras bruta e tratada.

Salienta-se que todas as análises em meio líquido seguiram os procedimentos descritos no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2017). As metodologias analíticas utilizadas neste trabalho para análise da água bruta e da água tratada estão descritas na Tabela 05 e 06.

Tabela 05 - Metodologias utilizadas na realização das determinações de água bruta e tratada.

Parâmetros	Unidade	Método	LQ
Coliformes Termotolerantes	em 100 mL	PO-054	N/A
Coliformes Totais	em 100 mL	PO-054	N/A
Fósforo	mg L ⁻¹	PO-091	0,10
Níquel	mg L ⁻¹	PO-091	0,01
Alcalinidade Total	mg L ⁻¹	PO-001	0,50
Amônia	mg L ⁻¹	PO-039	0,20
Cianeto Total	mg L ⁻¹	PO-004	0,02
Cloreto	mg L ⁻¹	PO-005	0,10
Clorobenzeno (Mono)	mg L ⁻¹	PO-102	3,00
Cor Aparente	Uh	PO-007	5,00
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	mg L ⁻¹	PO-036	13,00
Dureza Total	mg L ⁻¹	PO-011	1,50
Fluoreto	mg L ⁻¹	PO-062	0,10
Merúrio	Mg L ⁻¹	PO-091	0,10
Nitrato	mg L ⁻¹	PO-017	0,10
Nitrito	mg L ⁻¹	PO-018	0,01
Sólidos Sedimentáveis	mL L ⁻¹	PO-024	0,10
Sólidos Suspensos	mg L ⁻¹	PO-025	10,00
Sólidos Totais Dissolvidos	mg L ⁻¹	PO-038	12,00
Substâncias que reagem ao azul de metileno – Surfactantes	mg L ⁻¹	PO-030	0,20
Sulfato	mg L ⁻¹	PO-027	2,00
Sulfeto de Hidrogênio	mg L ⁻¹	PO-028	0,10
Turbidez	uT	PO-031	1,00

Tabela 06 - Metodologias utilizadas nas análises de metais da água bruta e tratada.

Parâmetros	Unidade	Método	LQ
Alumínio	mg L ⁻¹	PO-091	0,050
Antimônio	mg L ⁻¹	PO-091	0,005
Arsênio	mg L ⁻¹	PO-091	0,010
Bário	mg L ⁻¹	PO-091	0,010
Cádmio	mg L ⁻¹	PO-091	0,004
Chumbo	mg L ⁻¹	PO-091	0,006
Cobre	mg L ⁻¹	PO-091	0,010
Cromo	mg L ⁻¹	PO-091	0,009
Ferro	mg L ⁻¹	PO-091	0,060
Manganês	mg L ⁻¹	PO-091	0,010
Selênio	mg L ⁻¹	PO-091	0,010
Sódio	mg L ⁻¹	PO-091	0,600
Zinco	mg L ⁻¹	PO-091	0,050

Legenda: LQ - Limite de Quantificação; NA - Não Aplicável

Metodologias Analíticas:

- PO-102 - SMWW 23^a Ed. 2017 - Method 6410B/EPA 8260C, 2006/EPA 5120A, 2003/EPA3510C, 1996/EPA 8270D, 2007/PO-102 Rev. 7.
- PO-001 - SMWW 22^a Ed.2012. Method 2320 B.
- PO-039 - SMWW 23^a Ed.2017 Method 4500-Norg B e C e Método Colorimétrico 18^a Ed. Método 4500-NH3 B e C.
- PO-004 - SMWW 23^a Ed. 2017, Method 4500-CN-C e E.
- PO-005 - SMWW 23^a Ed.2017, Method 4500 B.
- PO-007 - SMWW, 23^a Ed 2017, Method 2120 C.
- PO-036 - SMWW, 23^a Ed. 2017, Method 5220 D.
- PO-011 - SMWW 23^o Ed. 2017. Method 2340C
- PO-062 - SMWW 23^o Ed. 2017, Method 4500-F, B/D.
- PO-017 - ABNT NBR 12620/92
- PO-018 - SMWW 23^a Ed. 2017. Method 4500-NO2 B.
- PO-024 - SMWW, 23^a Ed. 2017., Method 2540 F.
- PO-025 - SMWW 23^a Ed. 2017. Method 2540 D e E.
- PO-038 - SMWW, 23^a Ed. 2017, Method 2540 C.
- PO-030 - SMWW, 23^a Ed. 2017, Method 5540 C.
- PO-027 - SMWW 23^a Ed. 2017. Method 4500-SO4-2 E.
- PO-028 - SMWW, 23^o Ed. 2017, Método 4500-S2- H.
- PO-031 - SMWW 23^o Ed. 2017, Method 2130 B.
- PO-091 - SMWW, 23^a Ed, Method 3030I e 3120B/ EPA Method 3015 A e 6010 C,2007/PO-091 Rev.11.
- PO-054 - SMWW, 23^o Ed.2017, Method 9223B.

3.2.2.5 Caracterização do Resíduo produzido no Processo

O processo de produção do cloreto férrico a partir do rejeito de minério ferro apresentou um resíduo remanescente da etapa de lixiviação. Visando verificar possíveis destinações para esse resíduo foi realizada a caracterização do mesmo.

Foram estabelecidas duas condições para caracterização deste resíduo: ele foi analisado na sua íntegra após a filtragem e também após estágios sucessivos de lavagem visando remover o cloreto férrico excedente. A lavagem foi realizada em

três etapas consecutivas, com um volume duas vezes maior que o apresentado pelo resíduo. A lavagem foi realizada em paralelo a filtração e o número lavagens foi estabelecido pela identificação visual da cor do filtrado (a lavagem foi interrompida quando o filtrado ficou incolor).

Nas duas condições o material foi seco em estufa a 100°C e posteriormente analisado para os parâmetros de densidade, granulometria, pH em solução e composição elementar.

A densidade foi verificada pelo método do picnômetro, conforme descrito no item 3.2.1.2. A análise granulométrica foi realizada por granulometria a *laser* no equipamento CILAS, modelo 1180; com os mesmos parâmetros descritos no item 3.2.1.5.

A medida do pH em solução foi realizada a partir de 5g do resíduo, diluída em 10 mL de água deionizada. Os valores de pH foram medidos em pHmetro da marca AKSO, modelo 86505.

Ainda foram realizadas comparações do volume do material, visando mostrar o empolamento apresentado pelos resíduos em relação ao rejeito. A massa dos resíduos também foi aferida, para medição dos percentuais de remoção do ferro em massa.

A análise elementar foi feita por Fluorescência de Raios-X (FRX), em espectrofotômetro da marca RIGAKU, modelo RIX 2000, do laboratório de Geoquímica da UFRGS. Os parâmetros adotados para a análise de FRX foram os mesmos descritos no item 3.2.1.10.

3.2.2.6 Considerações técnicas e econômica

Considerações técnicas em termos de escala de produção foram embasados nos dados de produção da mina que forneceu o rejeito de minério de ferro. A avaliação da viabilidade econômica de produção do cloreto férrico a partir do rejeito de minério de ferro foi realizada com base nos valores médios de mercado dos reagentes utilizados no processo.

3.2.2.7 Análise de Variância

Todos os experimentos foram realizados em triplicatas e os resultados indicados em termos do valor médio obtido. Nos gráficos, a barra entre o valor médio indica o valor mínimo e o valor máximo atingido naquela condição experimental.

As análises de produção do cloreto férrico foram submetidas à análise variância (ANOVA) com uso de Excel. A ANOVA é uma metodologia estatística que permite avaliar se há diferenças entre as médias a um determinado nível de significância, considerando os diversos fatores e interações (RIBEIRO e CATEN, 2014).

Essa ferramenta foi adotada para se determinar estatisticamente as melhores condições para obtenção de um cloreto férrico de qualidade produzido a partir do rejeito de minério de ferro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos nos estudos conduzidos em laboratório para a produção de cloreto férrico a partir de rejeito de minério de ferro. Além dos resultados referentes à produção do cloreto férrico, realizou-se a caracterização do rejeito de minério de ferro, de modo a mapear as principais condicionantes físicas e químicas deste resíduo mineral e assim identificar parâmetros que indiquem potencialidades deste rejeito como insumo industrial. Por fim, algumas características do resíduo produzido no estágio de lixiviação também foram analisadas (FIGURA 47):

Figura 47- Escopo dos resultados obtidos.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

4.1 Caracterizações físico-químicas do rejeito de minério de ferro

O rejeito de minério de ferro utilizado como base para este trabalho foi encaminhado na forma de polpa, sendo as condicionantes desta polpa as primeiras características que foram avaliadas.

A Tabela 07 contempla as informações de densidade da polpa e concentração de sólidos; juntamente com a densidade do rejeito seco e a área superficial específica.

Tabela 07- Dados de caracterização física das partículas de rejeito.

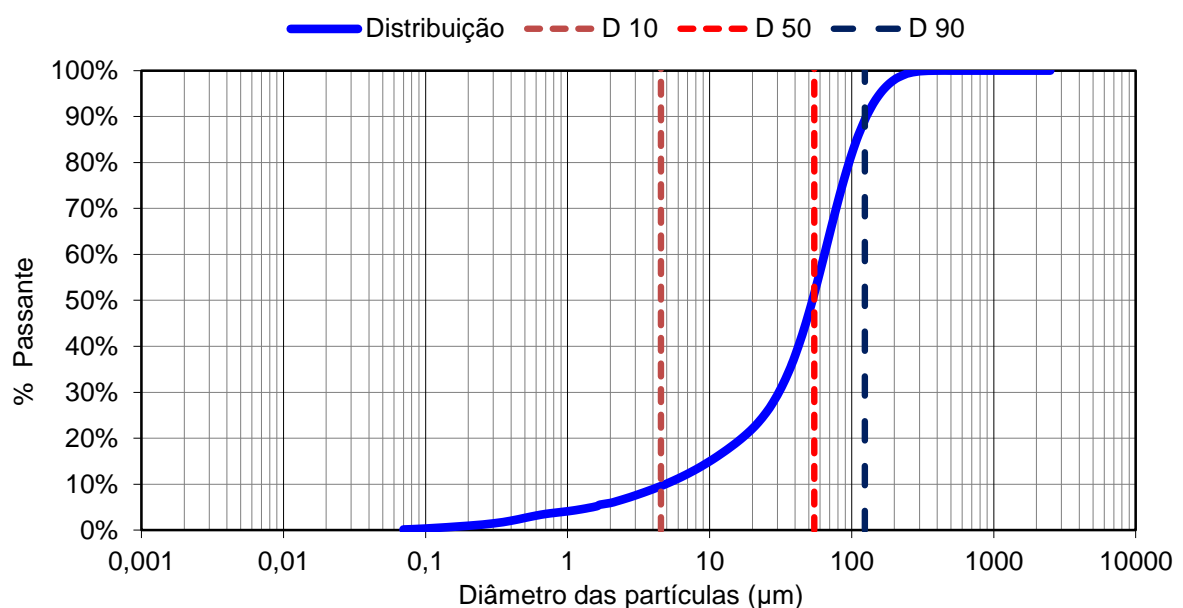
Densidade da Polpa	g cm^{-3}	1,98
Densidade do Rejeito Seco	g cm^{-3}	2,87
Concentração de Sólidos	%	76,00
Área Superficial Específica	m^2g^{-1}	10,66

A densidade e concentração de sólidos são dados importantes dentro do contexto de dimensionamento e avaliação de novos usos para os rejeitos minerais. Os estudos de metodologias de disposição também se embasam em tais características para a execução do dimensionamento.

No âmbito de aplicabilidades, esses parâmetros auxiliam na definição de um roteiro para incorporação do material, como também uma logística de implantação de processo. Decisões acerca da utilização do rejeito em pasta ou a seco se amparam nos valores de densidade e concentração de sólidos.

A distribuição de tamanho das partículas de rejeito de minério de ferro é apresentada na Figura 48. O rejeito apresenta tamanho máximo de 300 μm , com 90% das partículas com tamanho superior a 4,5 μm e inferior a 123,6 μm . O diâmetro que tem como passante 50% das partículas (D_{50}) é o de 54,5 μm .

Figura 48- Distribuição granulométrica do rejeito de minério de ferro (μm)



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

De acordo com a classificação do tamanho de partículas apresentada por Lins e Adamian (2000), aproximadamente 82% das partículas dessa amostra de rejeito de minério de ferro são enquadradas como finos ($<100 \mu\text{m}$). Um percentual superior a 20% das partículas pode ser classificado como partículas superfinas ou pré/coloidais ($< 20 \mu\text{m}$).

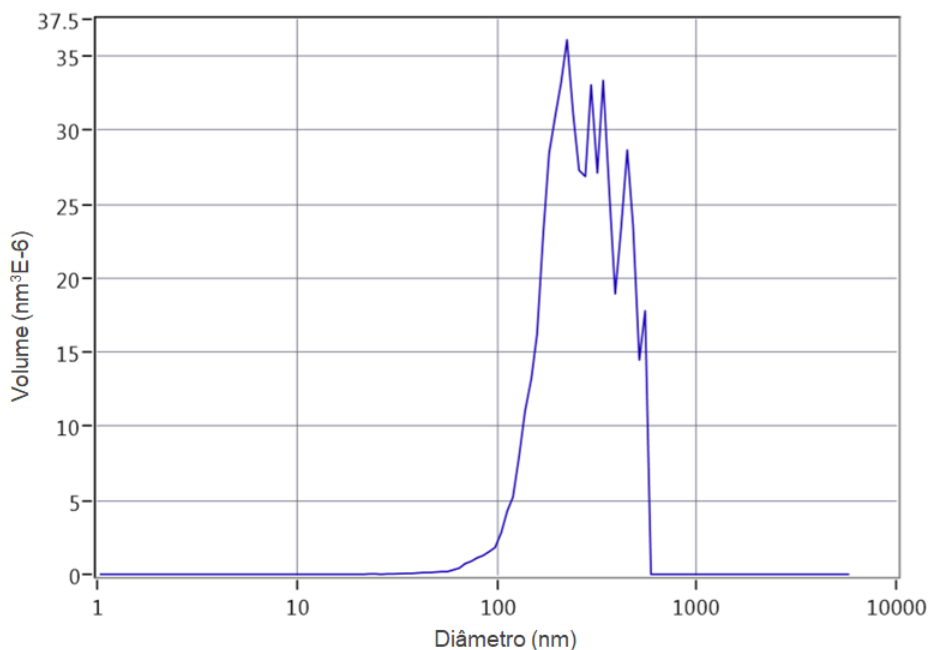
A distribuição granulométrica dos rejeitos de minério de ferro se assemelha a distribuição granulométrica apresentada pelo cimento e essa informação é fundamental para incorporação do rejeito como agregado da construção civil, conforme avaliado por Bezerra (2017).

Visto que a análise granulométrica realizada pelo CILAS 1180 contempla uma faixa de leitura de $0,04\text{-}2500 \mu\text{m}$ foi realizada uma análise adicional de distribuição de tamanhos em escala nanométrica com o uso de um ZetaView, modelo PMX-120 na fração líquida da polpa após a sedimentação dos sólidos mais grosseiros e filtração em uma membrana com $1,2 \mu\text{m}$. Os dados desta análise em escala nanométrica podem ser observados na Tabela 08 e na Figura 49 a seguir:

Tabela 08 - Distribuição e concentração das nanopartículas de rejeito.

Concentração de Nanopartículas	partículas mL^{-1}	1,80E+07
D10	nm	32,90
D50	nm	104,80
D90	nm	191,60

Figura 49 - Distribuição granulométrica do rejeito de minério de ferro (nm).



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Descobriu-se que, a fase líquida apresenta sólidos em escala nanométrica, em concentração de $1,80E+07$ partículas mL^{-1} que variam de 20 a 300 nm, sendo o D_{50} de 104,8 nm. Provavelmente o material que se mantém em suspensão é composto majoritariamente por sílica, visto sua diferença de densidade para os óxidos de ferro e pelo fato da sílica ser um dos componentes de grande presença em suspensões de águas naturais; o que demonstra sua facilidade de se manter dispersa no meio líquido.

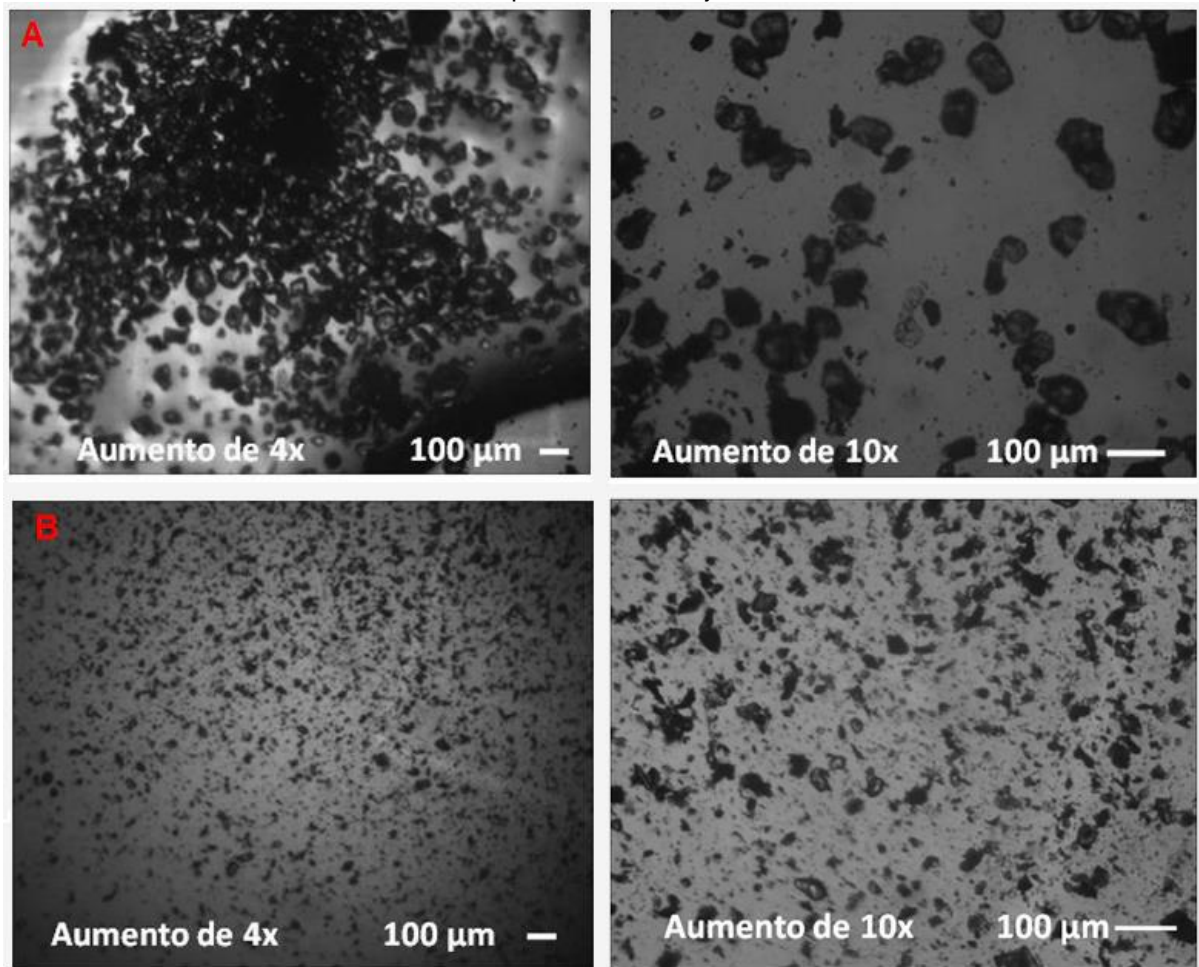
Meger (2007) menciona que em ambientes aquáticos a sílica pode ser encontrada em três formas principais: particuladas, coloidal e solúvel. Fator corroborado por Mascia (2012) que afirma que a sílica é um constituinte presente em todas as águas naturais, com concentração que pode variar de 2 a 100 ppm e sua remoção é realizada por filtros de carvão ativado.

Assim, pode-se dizer que no caso das suspensões obtidas a partir do rejeito as concentrações desse material tendem a ser muito maiores que nas condições naturais graças ao nível de liberação dessas partículas gerado pelas etapas de produção do minério de ferro. Essas partículas apresentam grande facilidade de dispersão pela chuva e águas superficiais e subterrâneas, sendo carreadas para longas distâncias.

O grande ponto de indagação a respeito dessas partículas se refere a como essa fração do material afeta o bioma circundante. Havendo efeitos negativos, quais as ações de mitigação devem ser tomadas? Tais questionamentos sustentam a busca por informações acerca da caracterização dos rejeitos e demonstram o grande campo de investigação que se encontra em aberto neste segmento.

Além das análises de distribuição granulométrica foram realizadas fotomicrografias do rejeito (FIGURA 50). Pode-se observar a morfologia das partículas tanto no rejeito em polpa (FIGURA 50A), quanto nas suspensões (FIGURA 50B) produzidas pelo procedimento de agitação/decantação descrito no item 3.2.1.6.

Figura 50 - Imagem obtida em Microscópio Óptico. (A) Rejeito em Polpa (B) Suspensão de Micro e Nanopartículas de Rejeito.

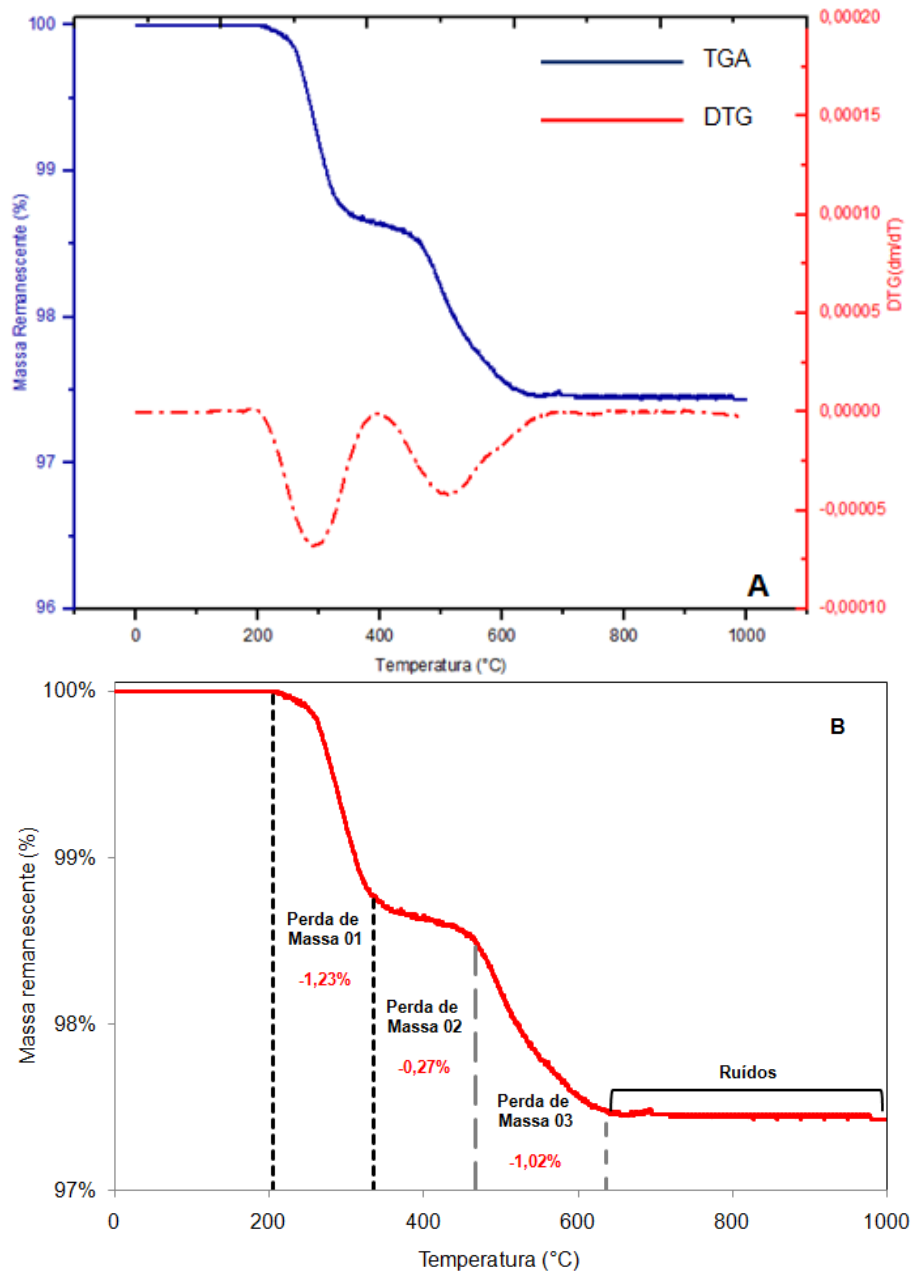


Fonte: Autor (2019).

Visualiza-se que as variações de tamanho das partículas são expressivas e que as mesmas apresentam uma geometria de arredondada a subarredondada, compartilhando feições morfológicas semelhantes às apresentadas por partículas de minério ferro do quadrilátero ferrífero que foram alvo dos estudos de Silva (2014).

Ainda nas investigações físicas do rejeito de minério de ferro foram realizadas as análises térmicas de Termogravimetria (TGA) e Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC). A análise Termogravimétrica é apresentada na Figura 51. A perda mássica visualizada na análise termogravimétrica, foi de 2,52%, correspondente a 0,30 mg. A decomposição térmica do rejeito aconteceu até cerca de 650 °C, não havendo mais perda mássica significativa até a marca de 1000 °C.

Figura 51 - Análise Termogravimétrica. (A) Curvas de TGA e DTG. (B) TGA detalhada



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

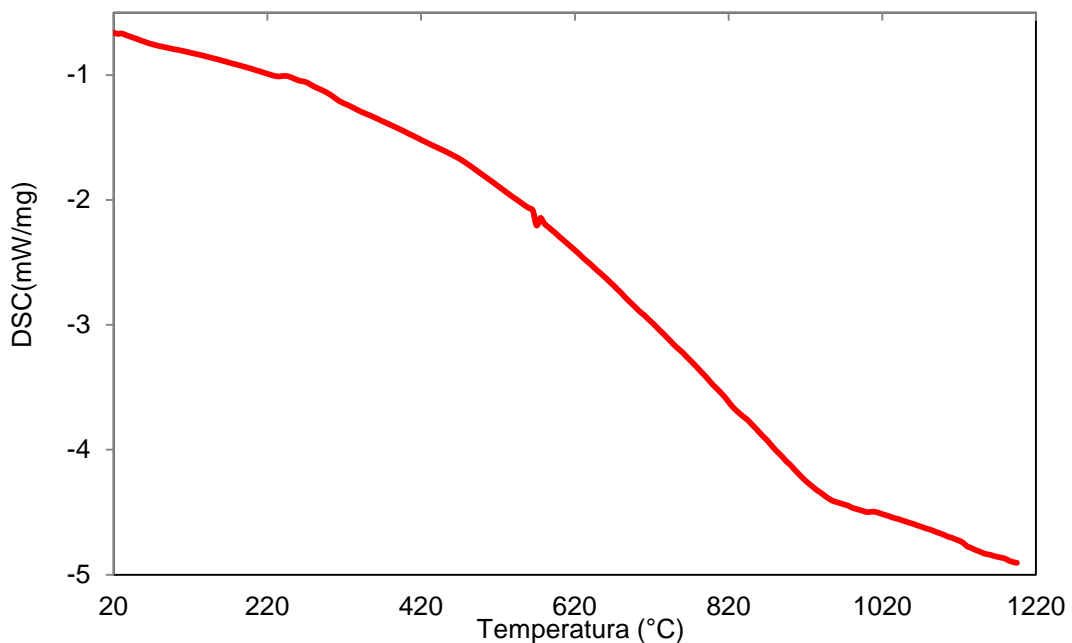
Pela curva da derivada dos resultados de decomposição térmica é possível identificar dois picos de perda mássica. Eles acontecem respectivamente nas faixas de 200-350°C e 450-650°C. Porém, conforme detalhado na Figura 51B, a curva de TGA indica três estágios de perda, sendo dois deles significativos, conforme visualizado nos picos da DTG.

O primeiro pico, correspondente à perda de massa 01, é decorrente da desidroxilação da goethita presente no rejeito, onde a perda mássica foi de 1,23%. Na Figura 51B existe um momento de transição entre as perdas de massa, que não

representa um pico na curva de DTG. Esse evento de transição é a perda de massa 02, que representa uma fração de 0,27% da decomposição térmica entre o primeiro e o segundo pico. Já o segundo pico (Perda de massa 03) equivale a desidroxilação da caulinita, correspondendo a 1,02% da perda mássica do rejeito. Esses eventos térmicos também foram apresentados nas pesquisas de Silva (2014) e Bezerra (2017), respectivamente para o minério de ferro goethítico e para o rejeito de minério de ferro. O comparativo é possível, visto a afinidade de composição existente entre as amostras matrizes das pesquisas citadas.

Já a análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC) é apresentada na Figura 52 e expressa o perfil das variações de entalpia do rejeito de minério de ferro. Assim como no rejeito de minério de ferro caracterizado por Bezerra (2017), a amostra deste trabalho sofre um pico endotérmico em torno de 575°C, que é proporcionado devido à transição estrutural do quartzo de $\alpha \rightarrow \beta$.

Figura 52 - Calorimetria exploratória diferencial (DSC)



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

As análises térmicas do rejeito de minério de ferro fornecem informações importantes quando se trata do direcionamento de aplicabilidades para esse resíduo. Denari e Cavalheiro (2012), salientaram a importância das análises térmicas para a caracterização de diversos materiais; tais como: materiais biológicos, materiais de

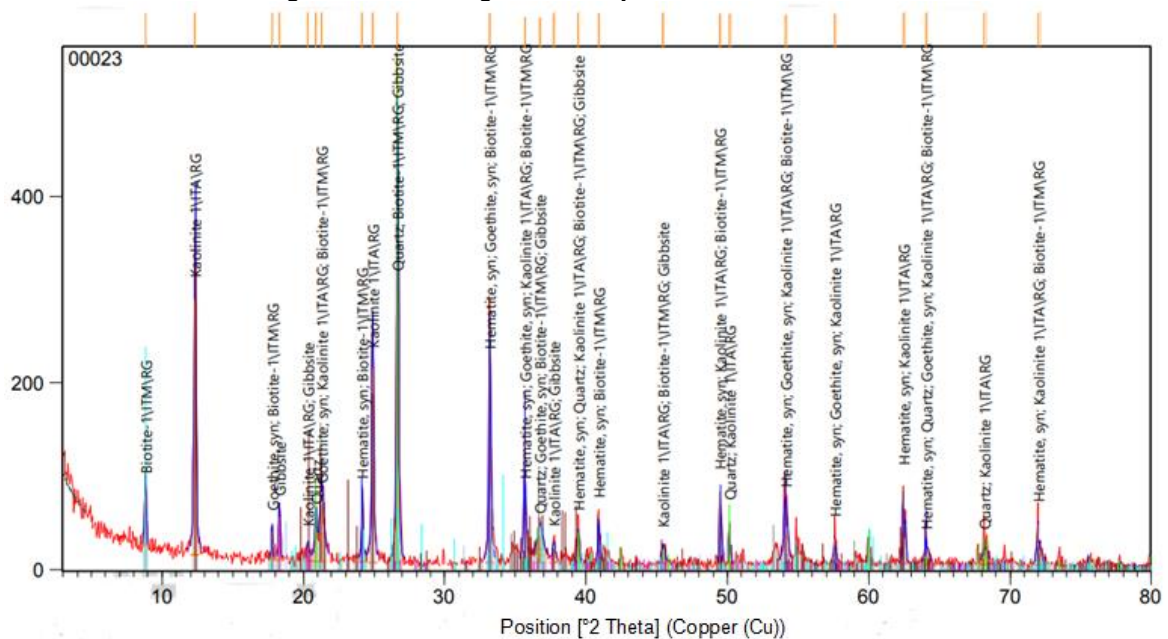
construção, catalisadores, cerâmicas e vidros, explosivos, minerais, solos, argilas, polímeros, tecidos, compostos inorgânicos, entre outros.

Diante da perspectiva de aproveitamento dos rejeitos de minério de ferro, avaliar essas condicionantes se torna relevante para compreensão das potencialidades deste material.

Até aqui foram exploradas as condicionantes físicas de caracterização do rejeito. A seguir estão explicitadas a análise mineralógica e elementar deste material.

A análise mineralógica realizada por difração de Raios-X mostrou a presença predominante de fases cristalinas de Quartzo (SiO_2), Hematita (Fe_2O_3) e Goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$). Em menor proporção apareceram a biotita ($\text{K}_{0,78}\text{Na}_{0,22}\text{Mg}_{1,63}\text{Fe}_{0,85}\text{Ti}_{0,33}\text{Al}_{1,35}\text{Si}_{2,84}\text{O}_{11}(\text{OH})$) e a gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) (FIGURA 53 e TABELA 9).

Figura 53 - Difratoograma do rejeito de minério de ferro.



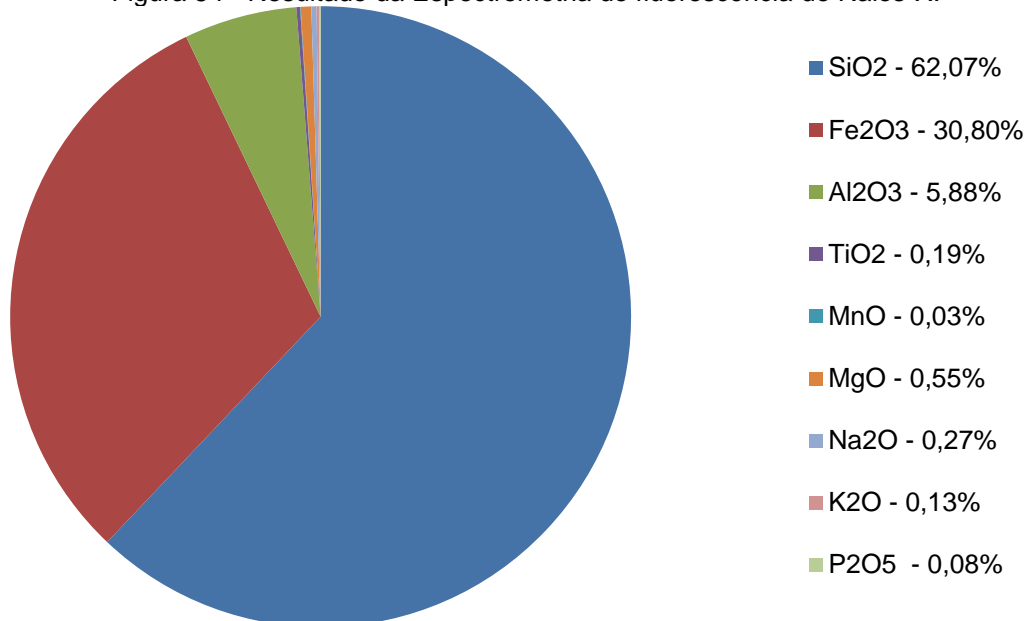
Fonte: Autor (2019).

Tabela 09 - Fases cristalinas identificadas na análise de DRX

Fase	Composição Química
Hematita	Fe_2O_3
Quartzo	SiO_2
Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$
Caulinita	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$
Biotita	$\text{K}_{0,78}\text{Na}_{0,22}\text{Mg}_{1,63}\text{Fe}_{0,85}\text{Ti}_{0,33}\text{Al}_{1,35}\text{Si}_{2,84}\text{O}_{11}(\text{OH})$
Gibbsita	$\text{Al}(\text{OH})_3$

A análise por Fluorescência de Raios-X confirma a predominância da Sílica (SiO_2) e da Hematita (Fe_2O_3) no rejeito de minério de ferro. Além dos óxidos de silícios e de ferro foram identificados pela análise de FRX óxidos de alumínio, titânio, manganês, magnésio, sódio, potássio e fósforo. A composição do rejeito de minério de ferro via FRX está apresentada na Figura 54.

Figura 54 - Resultado da Espectrometria de fluorescência de Raios-X.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Os resultados da análise de FRX vêm de encontro aos valores típicos de rejeitos do beneficiamento de minério de ferro e estão dentro da faixa de composição apresentada nas análises de produção efetuadas pela empresa que concedeu a amostra. Resultado que pode ser corroborado com o estudo de Guimaraes (2011) que analisou o rejeito de sete minas de minério de ferro do estado de Minas Gerais e encontrou valores de ferro variando de 9,6 a 54,4% e de sílica entre 19,7- 86%.

O resultado da análise elementar quantitativa via ICP/OES é apresentado na Tabela 10. O resultado da análise química corrobora os dados anteriores das análises de DRX e FRX, onde se verifica a concentração majoritária dos elementos Fe e Si assumindo juntos aproximadamente 50% da composição elementar da amostra. A concentração de alumínio apresentada no resultado de ICP confirma os teores de alumina evidenciados na análise de Fluorescência de Raios-X.

Os metais tóxicos identificados na amostra foram: arsênio, cádmio, chumbo, cobalto, cobre, cromo, estanho, níquel, vanádio e zinco. A concentração desses elementos na composição do rejeito de minério de ferro apresentou valores abaixo de 0,005%.

Tabela 10 - Análise elementar de amostra de rejeito de minério de ferro via ICP/OES

Elemento	Concentração (%)
Si	31,05
Fe	16,98
Al	1,59
Ti	0,07
P	0,04
Mn	0,02
Ca	< 0,021
Ba	0,0078
Zn	0,0042
V	0,0041
Cr	0,0038
Cd	< 0,0038
Mg	0,0038
As	<0,0035
Cu	0,0035
Pb	< 0,0035
Sn	< 0,0035
Ni	< 0,0035
Na	< 0,0035
Co	0,0033

Diante de todas as análises para a caracterização do rejeito de minério de ferro é possível propor aplicabilidades que visem à incorporação deste resíduo em um processo industrial. Algumas já sendo tema de pesquisa, como visto na revisão bibliográfica, como uso para material da construção civil, produção de pigmento, uso do rejeito como catalisador para produção de fármacos (FONTES *et al.*, 2016; GALVÃO *et al.*, 2018; AUGUSTO *et al.*, 2018)

Dentre as características do rejeito apresentadas pelas análises, a concentração de ferro remanescente no rejeito chama a atenção. Após os processos de beneficiamento, teores consideráveis de ferro vão para o rejeito e são descartados nas áreas de disposição. Assim, em função desta parcela de ferro hematítico disponível no rejeito, fina granulometria e alta área superficial do material e a baixa concentração de elementos tóxicos, estudou-se o processo de solubilização desta

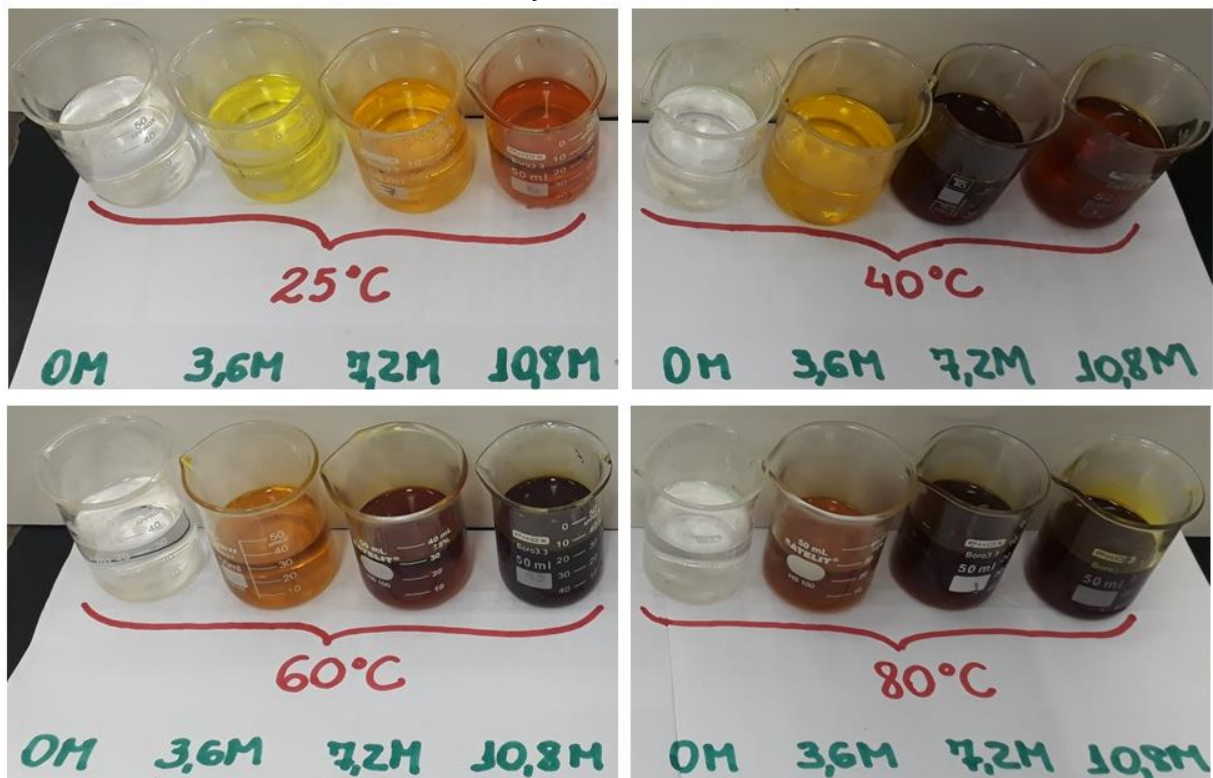
hematita remanescente visando à produção de cloreto férrico. Os resultados obtidos nos ensaios de produção do cloreto férrico, variando-se alguns parâmetros de processo, são apresentados a seguir.

4.2 Produção do Cloreto Férrico

A rota adotada para solubilização do ferro presente no rejeito baseia-se nas variáveis de temperatura, concentração de ácido clorídrico na solução lixiviante e tempo de reação. Contudo, para a identificação do perfil geral de solubilização do ferro contido no rejeito foi estabelecido um tempo inicial de solubilização de 2 horas para os testes iniciais.

Uma das características do cloreto férrico é sua identificação como um coagulante de coloração castanho-escuro. A solução férrica obtida nos estágios de mapeamento das variáveis mostrou uma tonalidade castanha crescente em função do aumento de temperatura e das maiores concentrações de ácido clorídrico (FIGURA 55).

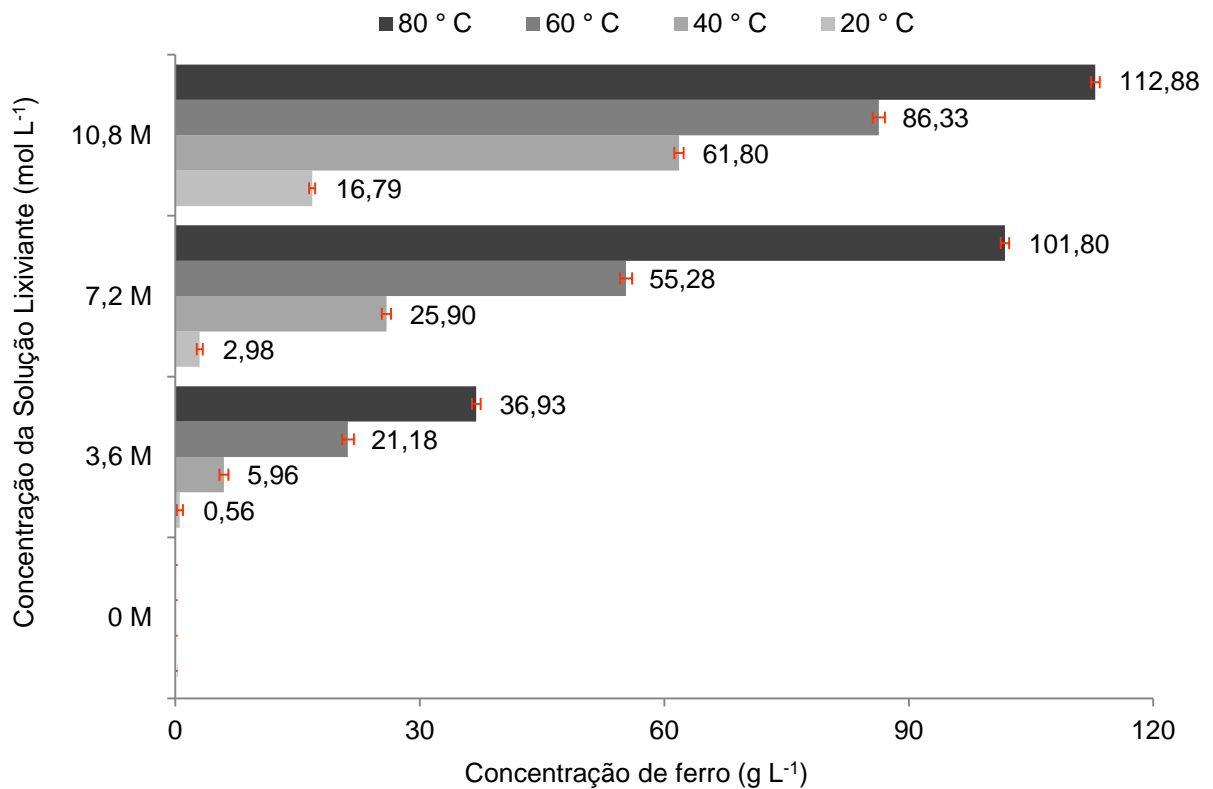
Figura 55 - Soluções obtidas no processo de lixiviação em função das variações de temperatura e concentração de ácido clorídrico.



Fonte: Autor (2019).

A eficiência na solubilização do ferro foi aferida pela quantidade de ferro total (Fe_{total}) disponível na solução após o período de duas horas de aquecimento. Os resultados da análise de Fe_{total} podem ser visualizados na Figura 56 a seguir:

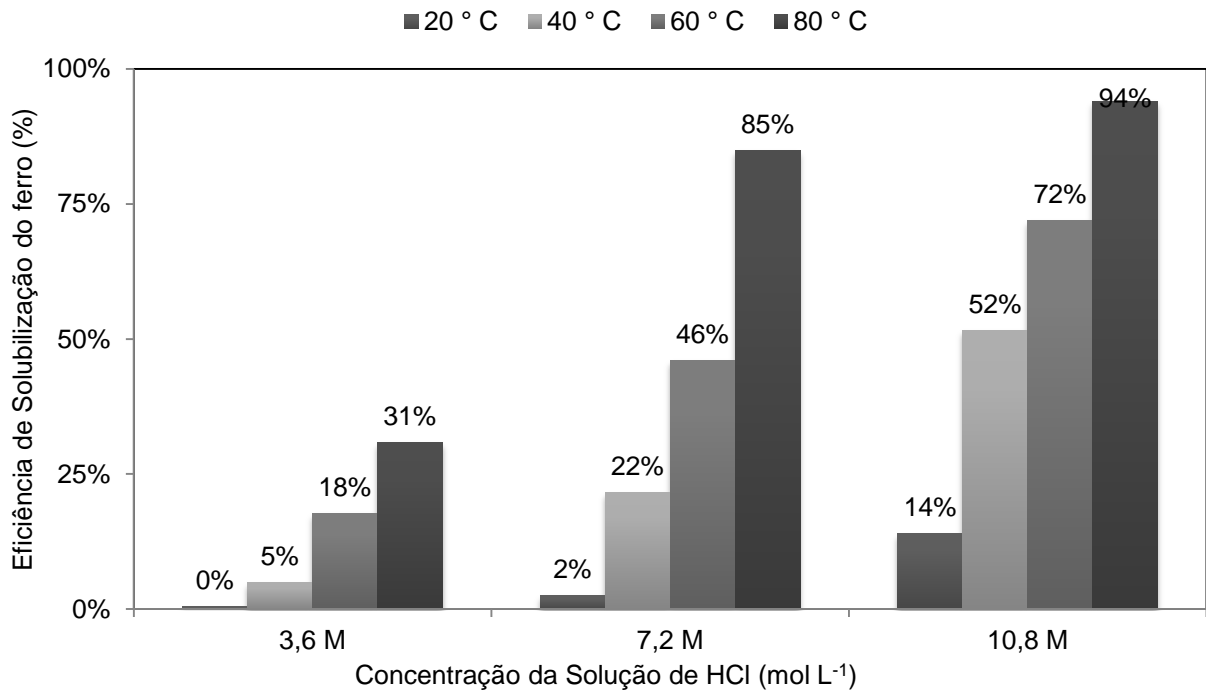
Figura 56 - Concentração de ferro obtida nos ensaios de produção de cloreto férrico a partir da variação de temperatura e concentração ácida na solução lixiviante.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Percebe-se que a eficiência da solubilização do ferro aumenta gradativamente em função do aumento na temperatura e na concentração de ácido clorídrico na solução ácida utilizada para lixiviação do ferro. As amostras colocadas em contato com água pura não apresentaram nenhum resultado de ferro dissolvido após o aquecimento. As demais amostras submetidas às concentrações de 3,6 mol L⁻¹, 7,2 mol L⁻¹ e 10,8 mol L⁻¹ de ácido clorídrico apresentaram as seguintes eficiências de solubilização (FIGURA 57).

Figura 57 - Eficiência de solubilização do ferro contido no rejeito para as temperaturas e concentrações ácidas avaliadas.

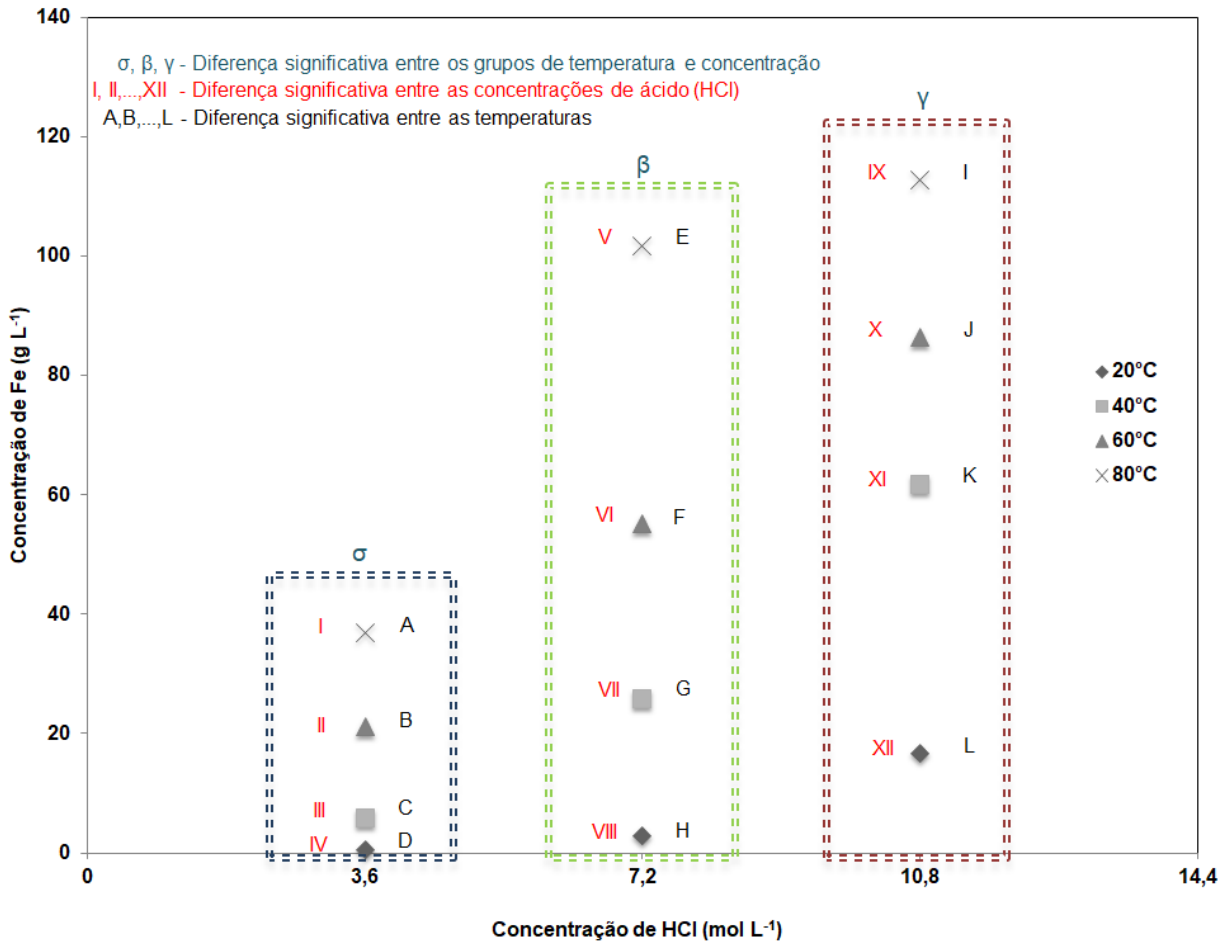


Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Os melhores resultados de solubilização foram nas concentrações de 7,2 mol L⁻¹ e 10,8 mol L⁻¹ para a temperatura de 80°C, apresentando respectivamente as eficiências de solubilização de 85% e 94%.

Com intuito de verificar se há diferenças significativas entre médias dos resultados em função da temperatura e concentração de agente lixiviante foi realizada a análise de variância (ANOVA). A ANOVA demonstrou que os resultados de ferro obtidos em função da temperatura e concentração de ácido clorídrico apresentam diferença significativa para um nível de confiança de 95% em função das duas variáveis. Na Figura 58 podem ser visualizados os valores médios de concentração de ferro em razão da temperatura e da concentração de ácido clorídrico na solução lixiviante.

Figura 58 - Valores médios de concentração de ferro em função da temperatura e da concentração de agente lixiviante.

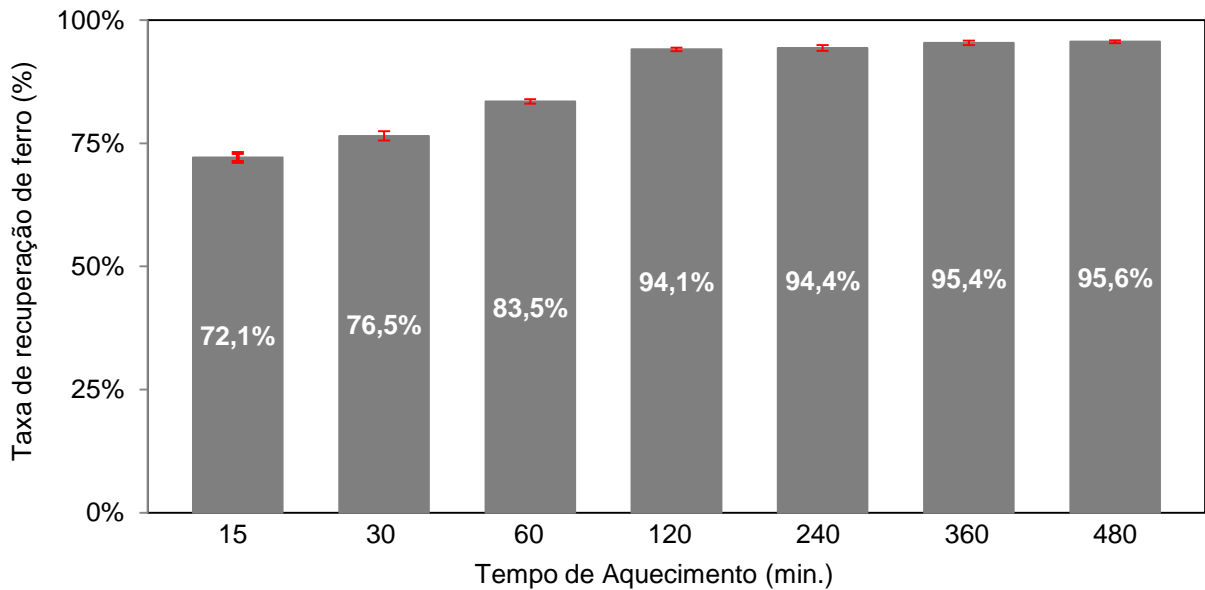


Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Com base nas informações acima, verifica-se que a condição que apresenta os resultados mais eficientes para obtenção de um cloreto férrico com altas concentrações de ferro dissolvido são: a temperatura de 80°C e a concentração de 10,8 mol L⁻¹ de ácido clorídrico para solução lixiviante.

Determinados o efeito da temperatura e da concentração ácida, foi analisado o melhor tempo de aquecimento para a obtenção de um cloreto férrico de qualidade. As taxas de solubilização em função do tempo podem ser visualizadas na Figura 59:

Figura 59 - Solubilização do ferro em função do tempo, da temperatura de 80°C e concentração ácida de 10,8 mol L⁻¹.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Percebe-se um considerável aumento na taxa de recuperação de ferro entre os tempos de 0 e 120 minutos. Em 15 min, a recuperação de ferro já é de 72,1%, aos 30 min de 76,5% e aos 60 min de 83,5%. Nota-se que a partir de 120 minutos há uma estabilização na dissolução do ferro, ficando a recuperação de ferro na ordem 94 a 95%.

Diante dos resultados pode-se considerar o tempo de duas horas um intervalo apropriado para a produção de um cloreto férrico com uma recuperação eficiente do ferro presente no rejeito.

As análises de Fe²⁺ indicaram ausência de ferro na forma ferrosa, indicando que o ferro disponível se encontra todo na forma férrica, não demandando etapas adicionais de oxidação deste elemento para a produção de um cloreto férrico de qualidade.

Resumidamente, pode-se dizer que através da lixiviação do rejeito de minério de ferro por uma solução de 10,8 mol L⁻¹ de ácido clorídrico, a uma temperatura de 80°C, por um tempo de 2 horas, é possível a obtenção de uma recuperação de ferro de 94%. A solubilização alcançada atende a concentração de ferro necessária para a obtenção de um cloreto férrico de qualidade (que deve apresentar no mínimo 10% de Fe em solução na relação massa/volume).

Os resultados da rota adotada neste estudo contribuem para o mapeamento de variáveis que não foram contempladas na patente nº PI 1103933-7 A2 , mencionado anteriormente no texto, e que são fundamentais para o entendimento do perfil de dissolução do ferro e consequente produção de cloreto férrico através da lixiviação por ácido clorídrico. Primeiramente essa patente se refere à lixiviação de outro subproduto do beneficiamento do minério de ferro (lama - subproduto do estágio de deslamagem), apresentando características de composição, granulometria e área superficial diferentes das apresentadas pelo rejeito avaliado neste estudo.

A referida patente se resume a produção de cloreto férrico em solução aquosa de 38-43% (peso/volume) a partir da lama de minério de ferro com uma composição mineralógica de 60-65% de goethita (FeO.OH), 20-25% de hematita (Fe_2O_3), 10-15% de quartzo (SiO_2) e 5-10% de caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), com tamanho de partículas variando entre 0,1 a 45 μm , utilizando ácido clorídrico (HCl) concentrado 36-37% (peso/volume). Com essas especificidades do subproduto utilizado para a obtenção do cloreto férrico, o processo patenteado se embasa nos seguintes estágios de produção: desaguamento - lixiviação (HCl - 5 a 10 mol L^{-1}) - filtração - envase ou cristalização. Com tempo de síntese variando de 1 a 2 horas, e a temperatura de reação entre 80-90°C.

Já neste estudo avaliou-se o perfil desse processo considerando a variação dos parâmetros de lixiviação, visando mapear variáveis e identificar as condicionantes que perfazem a melhor rota para obtenção de um cloreto férrico de qualidade a partir de rejeitos de minério de ferro.

A avaliação de diversas concentrações de ácido clorídrico na solução lixiviante permite a identificação do comportamento da dissolução em função da acidez do meio e garante a possibilidade de escolha da concentração que melhor se enquadra nos objetivos do processo; seja ele em relação a melhor eficiência na solubilização do ferro ou objetivando uma maior economicidade para o processo produtivo e que atenda as especificidades técnicas do reagente férrico. O mesmo se aplica em relação a combinação com os parâmetros de temperatura e de tempo de lixiviação.

Além do mais, o reconhecimento destas condicionantes permite a escolha de estágios mais eficazes para o sistema produtivo do cloreto férrico, fornecendo informações que possibilitam a otimização da rota de obtenção de cloreto férrico a

partir do rejeito de minério de ferro. Para mais, esses resultados contribuem para outros processos de lixiviação dos óxidos de ferro a partir de matérias-primas semelhantes ao rejeito.

Visto que o processo de obtenção do cloreto férrico a partir do rejeito de minério de ferro mostrou-se tangível, cabe caracterizar o reagente obtido e avaliar a eficácia do mesmo. A seguir são apresentadas as informações acerca da caracterização e aplicação do cloreto férrico produzido.

4.3 Caracterizações e Eficiência de Aplicação do Cloreto Férrico

Com a identificação das melhores condições de processo para a obtenção de um cloreto férrico a partir de rejeitos de minério de ferro, produziu-se um pequeno lote de coagulante férrico para sua caracterização e avaliação de eficiência (FIGURA 60).

Figura 60 - Cloreto férrico obtido para a caracterização



Fonte: Autor (2019).

A caracterização foi realizada para os parâmetros de densidade, pH e análise química. A densidade do cloreto férrico foi medida com um picnômetro de volume calibrado de 50 mL, e é de 1,32 g cm⁻³. O pH foi medido por pHmetro da marca AKSO e apresentou valores < 0,5.

A análise do cloreto férrico foi realizada por ICP-OES e os elementos identificados estão reunidos na Tabela 11 apresentada a seguir.

Tabela 11 - Análise elementar da amostra do cloreto férrico via ICP/OES

Elemento	Concentração (mg L⁻¹)
Fe	112880,00
Al	1700,00
P	65,68
Mn	23,55
Ba	9,91
Ca	8,52
V	8,04
Mg	7,43
K	4,63
Na	3,92
Pb	3,12
S	2,94
Cu	2,72
Cr	2,23
Zn	1,58
As	0,89
Co	0,28
Li	0,04
Se	< 0,03
Ni	0,01
Mo	< 0,003
Cd	< 0,002

Pelos resultados nota-se a presença majoritária dos elementos ferro e alumínio. Correlacionando a caracterização do cloreto férrico obtido pelo rejeito de minério de ferro com um cloreto férrico comercial produzido a partir de sucata metálica e com um cloreto férrico produzido a partir de carepa siderúrgica; os quais foram caracterizados por Silva (2013); podem-se notar algumas diferenças na concentração de determinados elementos. Além da comparação entre os reagentes é possível verificar os limites de elementos estipulados pela SABESP (2015) para aquisição de cloreto férrico (TABELA 12).

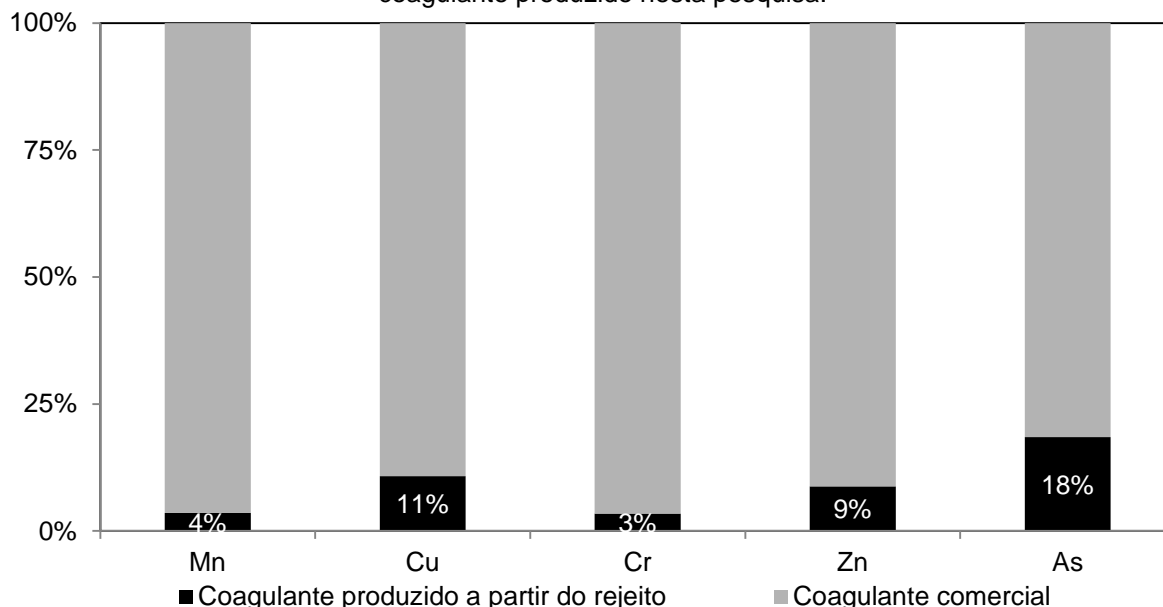
Tabela 12 - Comparativa entre alguns cloretos férricos produzidos a partir de diferentes materiais em relação aos limites máximos de elementos tóxicos

Elemento	Concentração (mgL ⁻¹)			Limites máximos dos elementos tóxicos (SABESP, 2015)
	Cloreto Férrico produzido a partir de rejeitos de minério de ferro	Cloreto Férrico comercial produzido a partir de sucata metálica	Cloreto Férrico produzido a partir de Carepa Siderúrgica (SILVA, 2013)	
Fe	112880,00	134896,00	120413,00	-
Al	1700,00	1903,00	44,80	-
Mn	663,00	663,00	1008,00	-
Ca	8,52	n.d.	200,58	-
Mg	7,43	n.d.	n.d.	-
Pb	3,12	n.d.	n.d.	≤ 10,16
Cu	25,30	25,30	96,20	-
Cr	2,72	64,70	197,00	≤ 50,82
Zn	1,58	18,00	15,80	-
As	0,89	4,84	1,18	≤ 10,16

Os valores de concentração de ferro e alumínio identificados no cloreto férrico produzido pela lixiviação do rejeito de minério de ferro foram inferiores em relação aos coagulantes produzidos a partir de sucata metálica e carepa siderúrgica. Quanto aos limites máximos de elementos tóxicos estabelecidos pela SABESP (2015), o cloreto férrico produzido a partir dos rejeitos de minério de ferro está consideravelmente abaixo dos limites determinados para os elementos chumbo, cromo e arsênio.

Comparando os elementos manganês, cobre, cromo, zinco e arsênio identificados nas amostras do cloreto férrico comercial (produzido a partir de sucata metálica) e no cloreto férrico produzido a partir do rejeito, pode-se verificar o perfil apresentado na Figura 61.

Figura 61 - Proporção dos metais presentes na amostra de coagulante férrico comercial e o coagulante produzido nesta pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Os valores de concentração destes elementos se mostraram inferiores no coagulante férrico produzido a partir do rejeito de minério de ferro quando comparadas com as concentrações do coagulante comercial.

Vale salientar a diminuição nos níveis de arsênio e cromo, que são elementos considerados cancerígenos e carcinogênicos pela Organização Mundial da Saúde - OMS (2018); a qual prevê limites rígidos quanto a presença destes elementos. O coagulante férrico produzido a partir do rejeito de minério de ferro apresentou uma concentração 82% e 97% menor de arsênio e cromo respectivamente.

Os demais elementos identificados na análise do cloreto férrico investigado nesta pesquisa não apresentam concentrações prejudiciais ao uso deste coagulante frente às dosagens comumente aplicadas para tratamento de água.

Além da caracterização, outro ponto crucial é a avaliação da eficiência apresentada pelo coagulante. Neste estudo, a eficiência do mesmo foi avaliada utilizando o coagulante férrico produzido para o tratamento de uma amostra de água bruta de abastecimento público. Os parâmetros avaliados na água bruta e na água tratada serviram de base para verificação da eficiência de aplicação do cloreto férrico produzido com o uso de rejeito de minério de ferro.

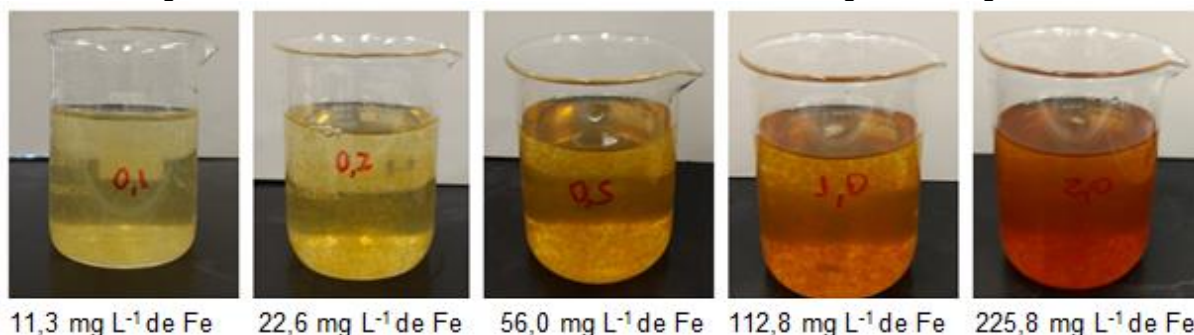
Para a realização do tratamento desta água bruta, primeiramente foi avaliada a dosagem do coagulante a ser utilizada no processo de tratamento. Para isso foram escolhidas cinco dosagens de FeCl_3 , sendo estas de 0,10 mL; 0,20 mL; 0,50 mL; 1,00 mL; 2,00 mL para cada litro de água a ser tratado. Essas dosagens correspondem respectivamente as seguintes concentrações de ferro $11,3 \text{ mg L}^{-1}$; $22,6 \text{ mg L}^{-1}$; $56,0 \text{ mg L}^{-1}$; $112,8 \text{ mg L}^{-1}$ e $225,8 \text{ mg L}^{-1}$. Os parâmetros verificados para determinação da dosagem foram quantidade de solução básica para elevação do pH (NaOH), remoção de cor, remoção de turbidez e tempo de decantação dos flocos visíveis (TABELA 13). Salienta-se que o pH da amostra de água bruta era em torno de 7.

Tabela 13 - Ensaio de determinação da dosagem de coagulante

Amostra	FeCl_3 (mL)	Dosagem de Fe (mg L^{-1})	pH	NaOH (mL)	Remoção de cor (%)	Remoção de turbidez (%)	Tempo de decantação de flocos visíveis (min.)
AM (01)	0,10	11,3	3,27	0,25	100	95	17
AM (02)	0,20	22,6	2,70	0,63	100	96	13
AM (05)	0,50	56	2,44	1,75	100	97	6
AM (10)	1,00	112,8	2,28	3,50	100	97	4
AM (20)	2,00	225,8	2,14	9,00	100	99	2

Percebe-se que a remoção de cor foi de 100% para todas as dosagens testadas e a remoção de turbidez foi acima de 95%. O tamanho dos coágulos formados foi crescente em relação ao aumento na dosagem de coagulante (FIGURA 62).

Figura 62 - Tamanho dos flocos frente ao aumento da dosagem de coagulante



Fonte: Autor (2019).

A formação de coágulos maiores permite que o tempo de decantação diminua por essa razão as dosagens de $56,0 \text{ mg L}^{-1}$, $112,8 \text{ mg L}^{-1}$ e $225,8 \text{ mg L}^{-1}$ apresentaram os menores tempos de decantação dos coágulos visíveis, sendo estes tempos

respectivamente de 6, 4 e 2 min. Essas dosagens também apresentaram as maiores taxas de remoção de turbidez.

Outro fator importante para determinação da melhor dosagem de coagulante é a quantidade de solução básica necessária para elevação do pH e início da precipitação. Através deste ensaio é possível visualizar que a quantidade de NaOH aumenta consideravelmente em função do aumento na quantidade de coagulante. Analisando os de cor e turbidez e a dosagem que demandou uma menor quantidade de solução básica e que apresentou resultados eficientes de remoção de turbidez e um tempo de decantação plausível foi a solução de 56,0 mg L⁻¹ de FeCl₃.

Com a determinação da dosagem mais adequada de FeCl₃ foi realizado o tratamento da água bruta de abastecimento visando a avaliação da eficiência do cloreto férrico frente os diversos parâmetros de potabilidade.

Os resultados do ensaio de tratamento físico-químico da água bruta de abastecimento encontram-se nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14 - Resultado da análise de inorgânicos da água bruta antes e após o tratamento

Inorgânicos					
Parâmetros	Unidade	Água Bruta	Água Tratada	LQ	VMP
Alcalinidade Total	mg L ⁻¹	54,56	25,67	0,5	NA
Amônia	mg L ⁻¹	8,488	6,208	0,2	1,50
Cianeto Total	mg L ⁻¹	< 0,02	< 0,02	0,02	0,07
Cloreto	mg L ⁻¹	13,33	190,9	0,1	250,00
Cor Aparente	uH	< 5	< 5	5	15,00
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	mg L ⁻¹	39,17	13,66	13	NA
Dureza Total	mg L ⁻¹	44,5	34,3	1,5	500,00
Fluoreto	mg L ⁻¹	0,432	< 0,1	0,1	1,50
Nitrato	mg L ⁻¹	0,307	0,597	0,1	NA
Nitrito	mg L ⁻¹	0,529	0,289	0,01	NA
Sólidos Sedimentáveis	mg L ⁻¹	1	< 0,1	0,1	NA
Sólidos Suspensos	mg L ⁻¹	20	< 10	10	NA
Sólidos Totais Dissolvidos	mg L ⁻¹	164	112	12	1000,00
Substâncias que reagem ao azul de metileno -Surfactantes	mg L ⁻¹	0,67	0,32	0,2	0,50
Sulfato	mg L ⁻¹	5,769	4,74	2	250,00
Sulfeto de Hidrogênio	mg L ⁻¹	0,167	< 0,1	0,1	0,10
Turbidez	uT	59,6	< 1	1	5,00

Tabela 15 - Resultado da análise de metais, microbiológicos e compostos orgânicos voláteis

Metais					
Parâmetros	Unidade	Água Bruta	Água Tratada	LQ	VMP
Alumínio	mg L ⁻¹	0,812	< 0,05	0,05	0,200
Antimônio	mg L ⁻¹	< 0,005	< 0,005	0,005	0,005
Arsênio	mg L ⁻¹	< 0,01	< 0,01	0,01	0,010
Bário	mg L ⁻¹	0,072	0,017	0,01	0,700
Cádmio	mg L ⁻¹	< 0,004	< 0,004	0,004	0,005
Chumbo	mg L ⁻¹	< 0,006	< 0,006	0,006	0,010
Cobre	mg L ⁻¹	0,011	< 0,01	0,01	2,000
Cromo	mg L ⁻¹	< 0,009	< 0,009	0,009	0,050
Ferro	mg L ⁻¹	1,029	< 0,06	0,06	0,300
Fósforo	mg L ⁻¹	0,649	< 0,1	0,01	NA
Manganês	mg L ⁻¹	0,125	0,03	0,01	0,100
Mercúrio	µg L ⁻¹	< 0,1	< 0,1	0,1	0,001
Níquel	mg L ⁻¹	< 0,01	< 0,01	0,01	0,07
Selênio	mg L ⁻¹	< 0,01	< 0,01	0,01	0,010
Sódio	mg L ⁻¹	14,7	102,9	0,6	200,000
Zinco	mg L ⁻¹	0,082	< 0,05	0,05	5,000
Microbiológico					
Parâmetros	Unidade	Água Bruta	Água Tratada	LQ	VMP
Coliformes Termotolerantes	em 100 mL	Presença	Presença	NA	NA
Coliformes Totais	em 100 mL	Presença	Presença	NA	Ausência em 100 mL
Compostos Orgânicos Voláteis					
Parâmetros	Unidade	Água Bruta	Água Tratada	LQ	VMP
Clorobenzeno (Mono)	µg L ⁻¹	< 3	< 3	3	120,00

Os resultados obtidos com o tratamento foram satisfatórios, onde o coagulante mostrou-se eficiente, cumprindo bem seu papel de agregar o material coloidal que se encontrava disperso, promovendo a clarificação da água e consequente remoção de impurezas.

O relatório de análise da água bruta indicou uma série de parâmetros que não atenderam os limites estabelecidos pela Portaria de Consolidação N°5 de 2017. Estes parâmetros foram: alumínio, amônia, ferro, manganês, surfactantes, turbidez, coliformes totais e sulfeto de hidrogênio. Após a realização do tratamento de coagulação com a utilização do reagente férrico obtido através da lixiviação do rejeito de minério de ferro a maioria destes parâmetros entrou em nível de conformidade. Apenas os valores de amônia e coliformes totais ficaram acima do estabelecido.

A remoção de 27% da concentração de amônia não foi suficiente a ponto de adequar essa amostra de água bruta aos padrões de potabilidade. Salienta-se que o ponto de coleta escolhido apresenta grande índice de poluição e a escolha deste local foi embasada na premissa de que a amostra de água bruta apresentasse um maior nível de poluição. Essa condição teve como intuito obter um maior número de parâmetros para real identificação da eficiência do cloreto férrico obtido a partir do rejeito de minério de ferro.

Estes resultados confirmam a eficiência do cloreto férrico produzido, mostrando sua aplicabilidade no tratamento de água que é um dos segmentos que mais incorpora os coagulantes férricos disponíveis no mercado.

4.4 Caracterizações do resíduo produzido nos estágios de obtenção do cloreto férrico

O processo de produção de FeCl_3 resultou em um resíduo sólido, que contém todos os elementos que não apresentam afinidade de dissolução com o ácido clorídrico nas condições aplicadas neste estudo. Conforme descrito na metodologia o resíduo foi caracterizado sob duas condições: sem lavagem e após uma etapa de lavagem com água (FIGURA 63).

Figura 63 - Comparativo dos resíduos do processo de obtenção de cloreto férrico com o rejeito de minério de ferro

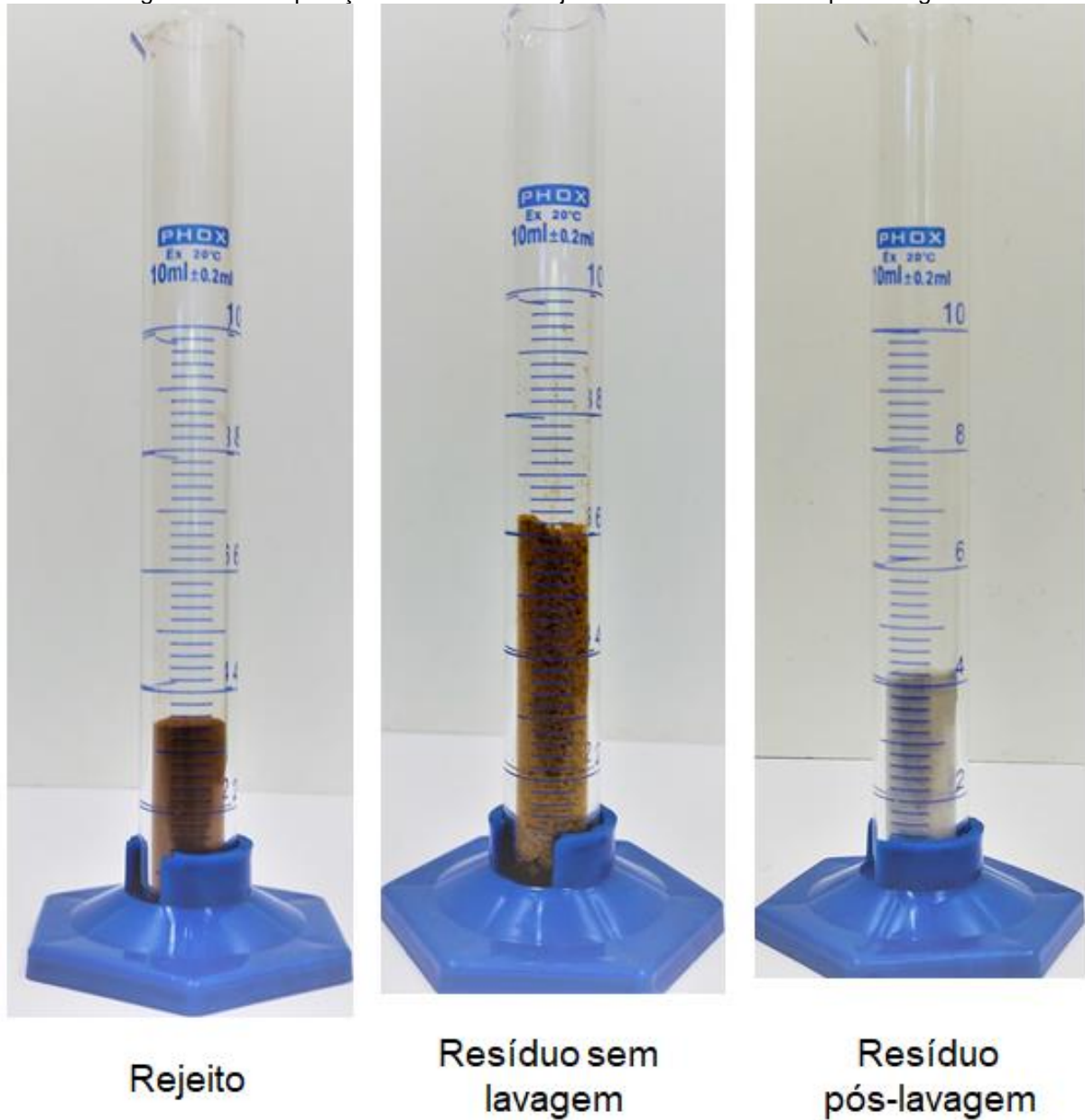


Fonte: Autor (2019).

Comparando visualmente o rejeito e os resíduos verifica-se a variação de cor e de expansão volumétrica entre as fases. O resíduo sem a etapa de lavagem apresenta certo empolamento, onde as partículas se mostram mais agregadas do que no rejeito e no resíduo pós-lavagem. Pode-se dizer que o cloreto férrico remanescente da etapa de lixiviação, confere a este resíduo a mesma propriedade hidrocópica

apresentada pelo cloreto férrico anidro. Essas variações de volume podem ser verificadas na Figura 64 a seguir.

Figura 64 - Comparação de volume do rejeito e dos resíduos sem/pós lavagem.



Fonte: Autor (2019).

Avaliando a deposição desses materiais sem nenhuma acomodação ou compactação nota-se um maior volume dos resíduos em relação ao rejeito; sendo o resíduo sem lavagem o que apresenta maior volume para as 5 g utilizadas neste comparativo. As diferenças desses volumes entre o rejeito, o resíduo sem lavagem e o resíduo pós-lavagem podem ser mensuradas pela altura do volume de 5 g desses materiais medidos em provetas de 10 mL, os quais apresentaram as seguintes

medidas respectivamente para o rejeito, para o resíduo sem lavagem e pós-lavagem: 3,4; 6,0 e 4,1 cm.

Analisando a forma de deposição do material, verificou-se que no resíduo sem lavagem há a formação de uma maior quantidade de espaços vazios quando comparando com o rejeito e o resíduo pós-lavagem.

Fazendo a acomodação do material e posterior compactação do mesmo, foram mensurados os valores de 2,9; 3,5 e 3,3 cm medidos em proveta de 10 mL; respectivamente para o rejeito, o resíduo sem lavagem e o resíduo pós-lavagem. Nota-se que mesmo acomodando e compactando o material, o volume apresentado pelo resíduo sem lavagem supera as demais alíquotas analisadas. Com base nessas variações os valores de densidade desse material são de grande valia dentro do mapeamento de suas principais características. Os valores de densidade e pH em solução do resíduo segundo as condições apresentadas está contemplado na Tabela 16 a seguir:

Tabela 16 - Resultados de densidade e pH do resíduo.

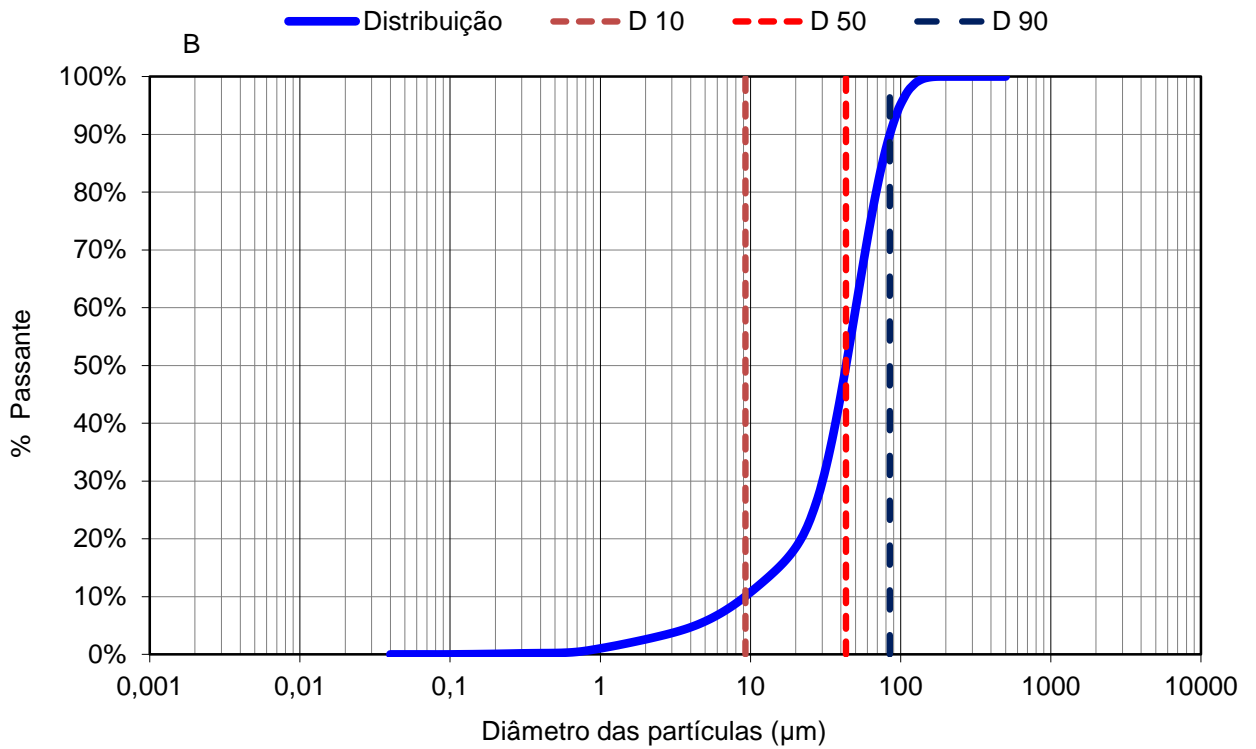
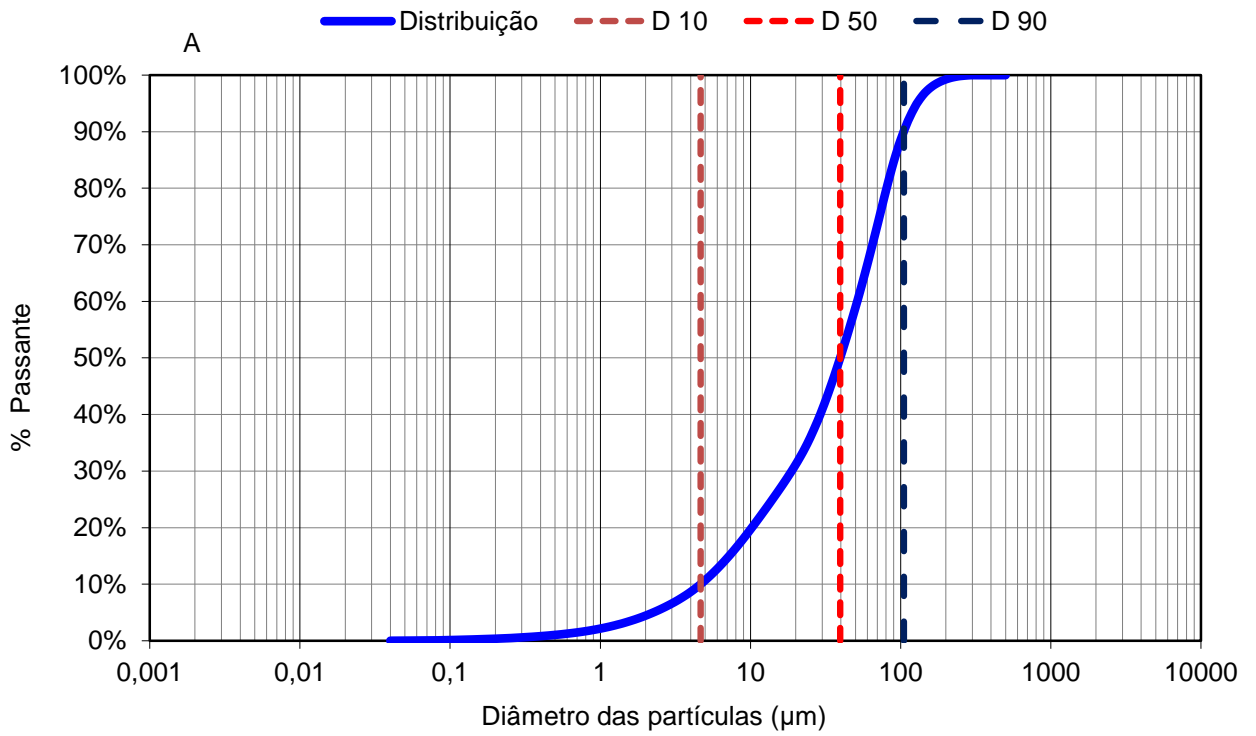
Parâmetros/ unidade	Resíduo Sem Lavagem	Resíduo Após Lavagem
Densidade (g cm⁻³)	2,26	2,21
pH	1,49	2,87

Nota-se que com a aplicação do estágio de lavagem do resíduo há uma diminuição na densidade, o que pode ser atribuído à presença de ferro remanescente do cloreto férrico aderido às partículas e que quando seco assume a forma de óxido férrico novamente. Quanto ao pH a etapa de lavagem garante o aumento de 1,49 para 2,87. Também foram realizadas as análises granulométricas do resíduo, conforme apresentado na Tabela 17 e na Figura 65.

Tabela 17 - Distribuição das partículas segundo diâmetro.

Parâmetros /Unidade	Resíduo Sem Lavagem	Resíduo Pós Lavagem
D 10 (µm)	4,65	9,27
D 50 (µm)	39,56	43,29
D 90 (µm)	104,94	84,81
Diâmetro Médio (µm)	48,94	46,40

Figura 65 - Distribuição Granulométrica do resíduo. (A) Sem a etapa de lavagem. (B) após a etapa de lavagem.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

A extensão da distribuição granulométrica nas fases consideradas para o resíduo está compreendida na faixa de 0,07 a 280 μm para o resíduo sem a etapa de lavagem e de 0,20 a 170 μm para o resíduo após a lavagem. Segundo a classificação de Lins e Adamian (2000), esse material pode ser classificado como fino, já que ambas as fases apresentam mais de 85% das partículas menores que 100 μm .

Observa-se que em relação à distribuição granulométrica o resíduo apresenta-se com diâmetros menores que os apresentados pelo rejeito de minério de ferro, que tem sua faixa de tamanho variando de 0,07 a 300 μm .

A granulometria é uma importante característica quando se avalia potencialidades de incorporação de um determinado material. No caso deste resíduo, a granulometria indica alguns potenciais para sua incorporação. Visto que sua variação granulométrica é de 0,20 a 170 μm após as devidas etapas de lavagem, o resíduo mostra que parte de suas partículas estão dentro da faixa aplicada para a areia fina, que segundo Pinto (2000) tem seu diâmetro variando de 50 a 300 μm . Adotando-se o corte em 50 μm , mais de 40% deste material pode ser utilizado como areia fina para a construção civil.

Tal uso pode representar significativos resultados, visto o porte de utilização dos agregados para construção civil que estão entre as matérias-primas mais consumidas no Brasil (IBRAM, 2012). Dutra (2015) enfatiza que a busca por novos materiais é um fator importante diante do mercado de agregados da construção civil. Isso porque a produção brasileira de areia é obtida em mais de 90% pela extração em leitos de rios e a exaustão de áreas próximas aos grandes centros consumidores, acrescida da restrição de atividades extrativas têm resultado na exploração de areia em locais cada vez mais distantes dos grandes centros urbanos, o que aumenta muito o preço final da areia natural. Além do mais, cabe salientar que utilização de resíduos neste segmento diminui a geração de impactos ambientais causados pelas atividades extrativas relacionadas à construção civil.

As potencialidades de uso deste resíduo vão além das atribuídas por sua distribuição granulométrica. Assim, mapear suas demais características é de fundamental importância. De modo a identificar as variações de massa ocorridas no

processo de lixiviação do rejeito e na lavagem dos resíduos foi verificada a massa apresentadas por cada uma das fases, conforme apresentado na Tabela 18.

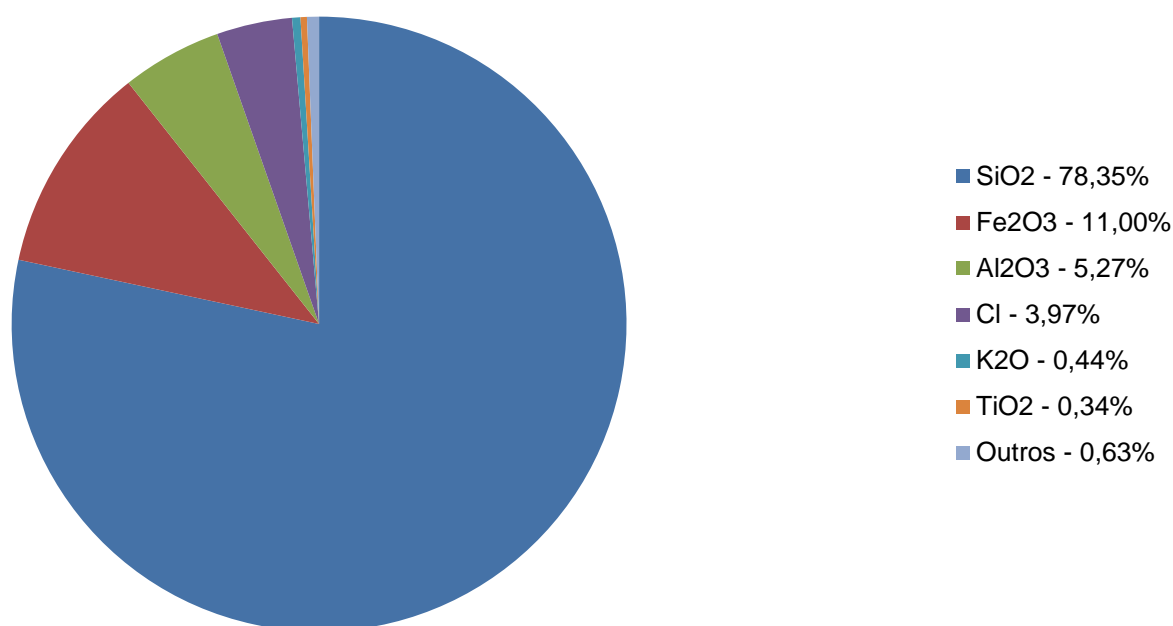
Tabela 18 - Massas aferidas no rejeito e nos resíduos gerados para a produção de 1 litro de FeCl_3

Parâmetros	Massa do rejeito de minério de ferro utilizada na lixiviação	Massa remanescente do resíduo sem a etapa de lavagem	Massa do resíduo pós-lavagem
Massa (g)	600	440,6	406,8
Massa (%)	100	73	68

Assim como nos parâmetros de densidade, a massa do resíduo pós-lavagem é menor que a do resíduo sem lavagem. Verifica-se que com a etapa de lixiviação são solubilizadas cerca de 30% da massa do rejeito de minério de ferro, valor que se equipara ao percentual de hematita (Fe_2O_3) apresentado na análise de FRX deste resíduo da mineração de ferro.

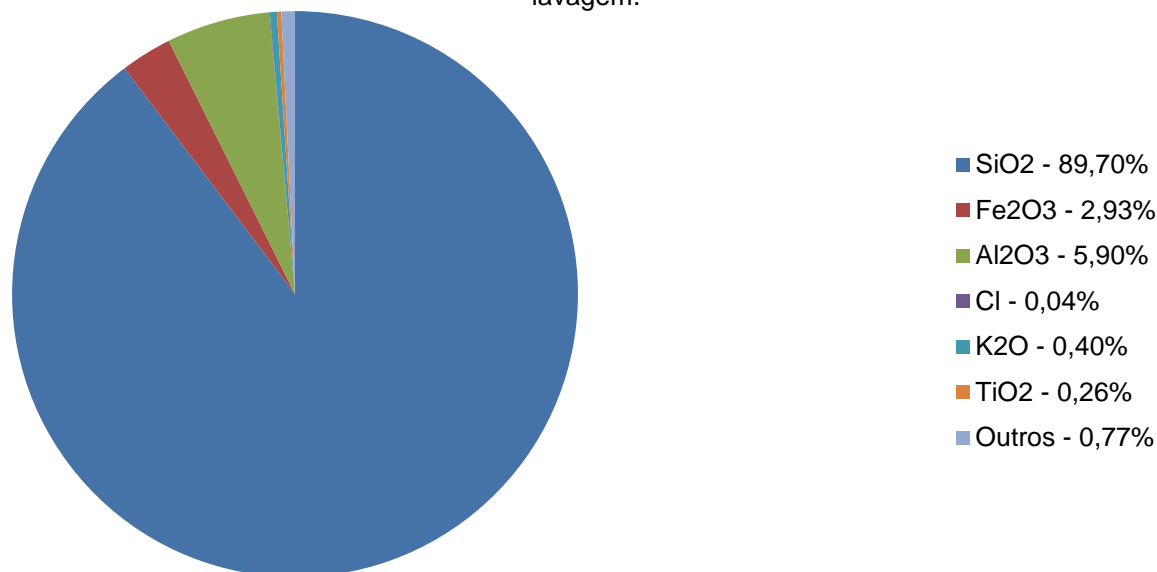
Para mais, essa verificação permite mensurar que a cada litro de cloreto férrico (FeCl_3), serão gerados cerca de 400 g de resíduo. Para conciliar todas essas informações e obter os parâmetros químicos destes resíduos, foi realizada análise de Fluorescência de Raios-X; de maneira a identificar os compostos ainda presentes após a lixiviação (FIGURAS 66 e 67).

Figura 66 - Resultado da Espectrometria de fluorescência de Raios-X para o resíduo sem a etapa de lavagem.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Figura 67 - Resultado da Espectrometria de fluorescência de Raios-X para o resíduo após a etapa de lavagem.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Pela análise de Fluorescência de Raios-X nota-se a diferença na participação do ferro na composição do material. No rejeito de minério de ferro o percentual de hematita (Fe_2O_3) é de 30,80%, no resíduo sem lavagem esse valor cai para 11% e chega ao percentual de 2,93% no resíduo do processo após a etapa de lavagem. Essa diferença corresponde ao ferro solubilizado nas etapas de lixiviação e que foi desassociado quase em sua totalidade com a adoção da etapa de lavagem do resíduo. A tabela 19 fornece um comparativo dos resultados da análise de FRX do rejeito e dos dois resíduos caracterizados neste estudo.

Tabela 19 - Comparativo dos resultados de FRX do rejeito, do resíduo sem lavagem e do resíduo pós-lavagem.

Elementos	Composição do Rejeito de Minério de ferro (%)	Composição do Resíduo sem lavagem (%)	Composição do Resíduo pós-lavagem (%)
SiO ₂	62,07	78,35	89,70
Fe ₂ O ₃	30,80	11,00	2,93
Al ₂ O ₃	5,88	5,27	5,90
Cl	-	3,97	0,04
K ₂ O	0,13	0,44	0,40
MnO	0,03	0,02	-
MgO	0,55	-	-
Na ₂ O	0,27	-	-
P ₂ O ₅	0,08	0,13	0,13
TiO ₂	0,19	0,34	0,26

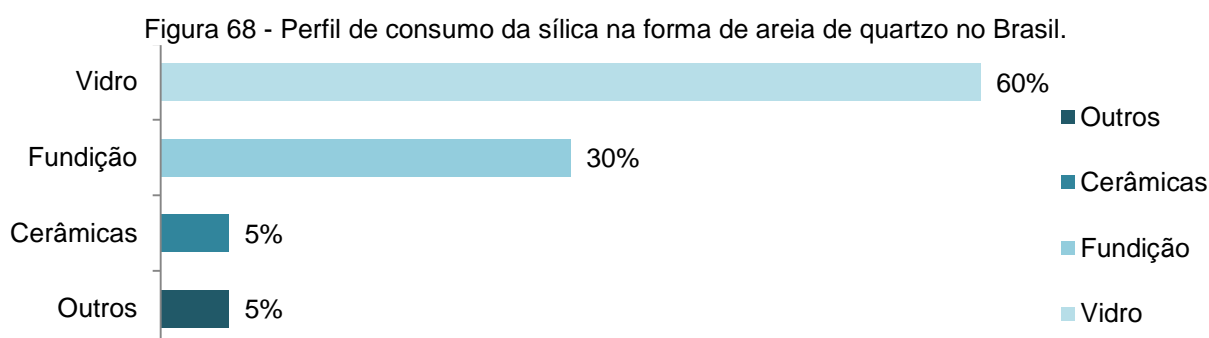
Percebe-se que alguns dos componentes como os óxidos de manganês, magnésio e sódio que se apresentavam em baixas concentrações no rejeito não foram identificados nos resíduos, o que indica a dissolução dos mesmos. Os óxidos de titânio e potássio apresentaram um leve aumento em relação às concentrações originais, aumento esse que se deve a contribuições oriundas da etapa de lixiviação (elementos presentes no ácido clorídrico utilizado).

Avaliando-se os resíduos no estágio sem lavagem e após lavagem é possível visualizar uma queda nos valores de hematita (Fe_2O_3) e de cloro (Cl), que passaram respectivamente de 11% e 3,97% para 2,93% e 0,04%. Esses valores são correspondentes ao cloreto férrico que fica aderido ao resíduo quando não há a efetiva lavagem do material.

A etapa de lavagem permite a adequação do resíduo a etapas subsequentes e ainda garante que a água ácida de lavagem possa recircular, otimizando o processo produtivo e garantindo a economicidade de reagentes.

Salienta-se que esse resíduo com a realização da etapa de lavagem e com a devida correção de pH apresenta características granulométricas e de composição que indicam potencial para sua incorporação em vários segmentos da Indústria. Diante da presença majoritária de sílica no resíduo (cerca de 90 %), há um leque de possibilidades de incorporação.

Segundo Luz e Lins (2005), as areias de quartzo (compostas majoritariamente por sílica - SiO_2) apresentam diversos usos e suas denominações são em função de suas aplicações na indústria, onde as principais especificações se referem aos teores de SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MnO_2 , CaO , TiO_2 e ZrO_2 . Segundo os mesmos autores a incorporação da sílica no Brasil se distribui conforme a Figura 68.



Fonte: Adaptado de Luz e Lins (2005).

As aplicações da sílica giram em torno das indústrias de: vidro, fundição, cerâmica/refratário, tintas, borracha e plástico, filtração e fraturamento hidráulico. As principais características da sílica nestes campos e suas especificações estão contempladas em linhas ferais na Figura 69.

Figura 69 - Especificações de uso da sílica

Segmento	Aplicação da Sílica	Teor de SiO ₂ (%)	Teor de Fe ₂ O ₃ (%)	Granulometria
Vidro	Utilizada como componente principal do vidro. Visto a variedade de vidros, os percentuais de sílica e suas propriedades variam de acordo com o tipo de vidro a ser produzido.	> 98,5	< 0,04	95% < 600 µm
Fundição	Utilizada para confecção de moldes aplicados na fundição de metais ou ligas. Tem como função resistir às solicitações térmicas, mecânicas e químicas solicitadas desde o vazamento do metal fundido até a solidificação das peças.	> 98	N.A.	< 20 µm
Cerâmica e Refratário	A sílica é essencial na composição da massa e do esmalte de vários tipos cerâmicos. Sua aplicação neste segmento se deve as seguintes características da sílica: alta dureza, alta temperatura de fusão, baixo custo e a capacidade de formar vidros.	> 93,5	0,02 - 0,08	150 - 600 µm
Tintas	É utilizada para melhorar a aparência e durabilidade das tintas; contribuindo para melhorar o desempenho de: alvura, consistência de cor, adsorção de óleo, etc.	> 99,0	0,025	1 - 10 µm
Borracha e plástico	É utilizada na produção de sílica amorfa, que é fundamental para a indústria da borracha. As características de branquidão, baixo índice de absorção de óleo e a moabilidade para granulometrias específicas apresentadas pela sílica; tornam-na insumo para este setor.	> 99,0	0,025	1 - 10 µm
Filtração	Utilizada para preparação de leitos destinados a filtração e purificação de águas e efluentes industriais.	> 99,00	N.A.	500 - 1000 µm
Fraturamento Hidráulico	Utilizada na composição de um fluido, que é bombeado sob alta pressão em formações produtoras de petróleo e gás, com a finalidade de aumentar e criar poros na rocha. O fluido é extraído e areia permanece, mantendo os poros abertos.	> 99,5	< 0,025	53 - 420 µm

Fonte: Adaptado de Luz e Lins (2005).

Avaliando as especificações gerais das principais áreas de incorporação da sílica, verifica-se que elevados teores deste componente são necessários para sua

utilização nos processos referenciados. Visto o teor de sílica apresentado pelo resíduo deste processo, é possível avaliar rotas de purificação que adéquem-no aos requisitos apresentados por tais campos. No caso da areia de sílica estágios de extração e beneficiamento são necessários; avaliar economicamente alternativas que visam a incorporação de resíduos pode ser economicamente viável e muito mais sustentável.

Ao mesmo tempo a área de produção de cerâmicas vermelhas incorpora materiais com teores de sílica acima de 48% (MACEDO, 2008), percentual no qual o resíduo deste estudo já se apresenta adequado para incorporação.

Quanto à granulometria do resíduo, ele se encontra nas faixas aplicadas para produção de vidro, cerâmica/refratário e fraturamento hidráulico. Podendo facilmente ser adequado através de etapas de moagem as características granulométricas para aplicação nas indústrias de fundição, tintas e borrachas. Dos campos citados, o resíduo não atenderia, devido a sua granulometria, a área de filtração.

O universo de aplicabilidades deste resíduo é amplo e bastante diversificado, podendo variar desde a construção civil até a síntese de nanomateriais. Contudo, qualquer aplicação exige estudos adicionais que fundamentem as melhores potencialidades e indiquem o roteiro para tratamento/incorporação deste material.

Além das características de processo e eficiência de aplicação, outra vertente importante a respeito da produção de cloreto férrico a partir de rejeitos da mineração de ferro é a viabilidade econômica destes processos. A seguir será apresentada uma análise de pré-viabilidade econômica para o processo produtivo do cloreto férrico que foi investigado neste trabalho.

4.5 Considerações técnicas e econômicas

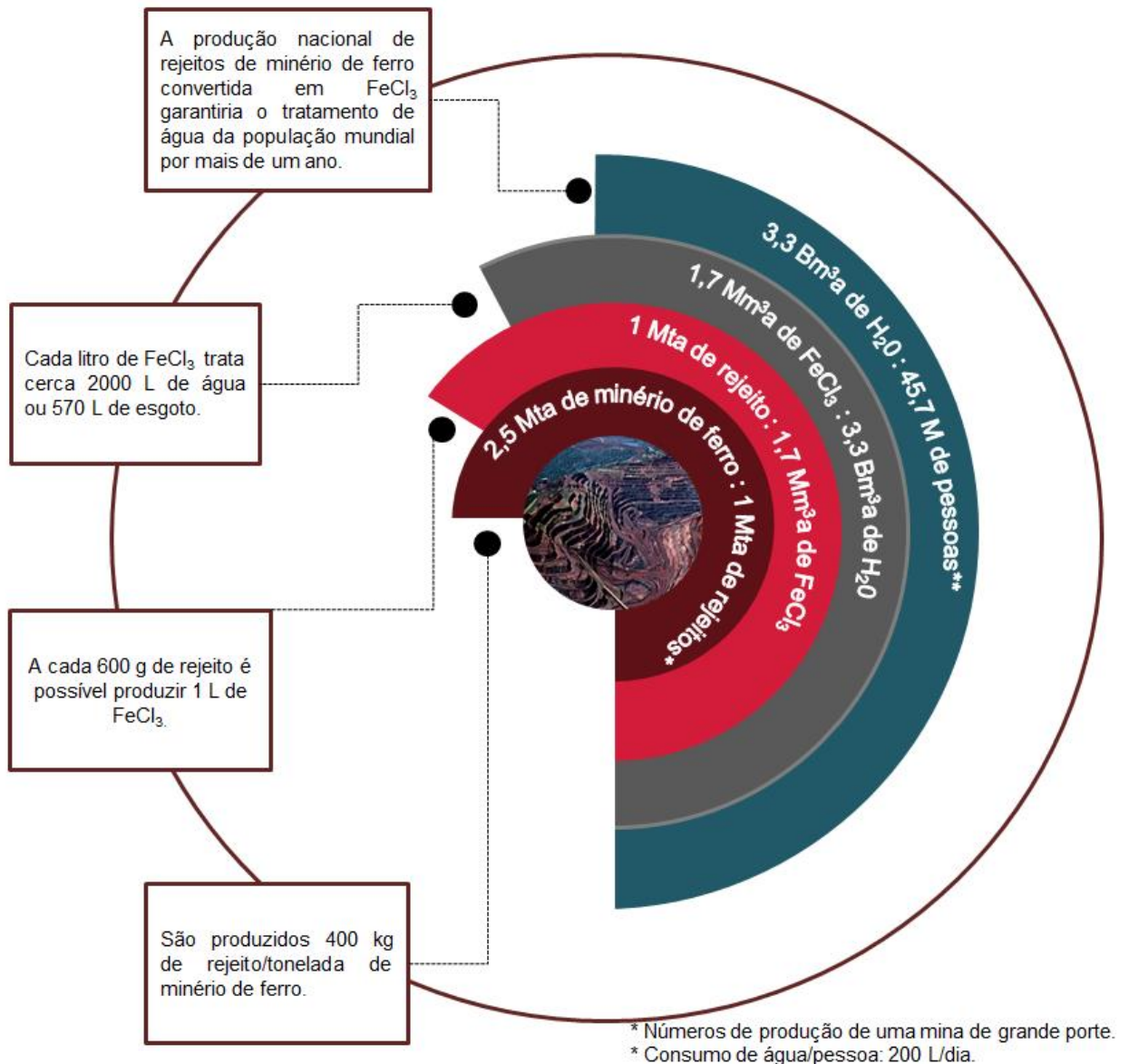
Foram avaliadas, até então, as etapas de processo e caracterização do cloreto férrico obtido a partir de resíduos da mineração de ferro. Avaliações que demonstraram a possibilidade de produção de um coagulante férrico de qualidade através da lixiviação do rejeito de minério de ferro.

Mas além da viabilidade técnica é necessário verificar a capacidade produtiva e viabilidade econômica a fim de averiguar se é viável a produção industrial de cloreto

férrico a partir das condições avaliadas neste trabalho. Visto isso, serão elencados alguns fatores de capacidade produtiva e pré-viabilidade econômica acerca do processo dissertado neste estudo.

Considerando os números de produção de rejeitos da mina que forneceu as amostras utilizadas neste trabalho, é possível verificar o quanto uma mina de grande porte pode contribuir no segmento de produção do cloreto férrico (FIGURA 70).

Figura 70 - Escala de resultados de produção de cloreto férrico a partir de rejeitos de minério de ferro.



Fonte: Autor (2019).

Pelos números desta análise verifica-se que uma mina de grande porte gera uma quantidade de rejeitos capaz de ser convertida em cloreto férrico suficiente para tratar água de abastecimento de toda a população do estado de São Paulo por um

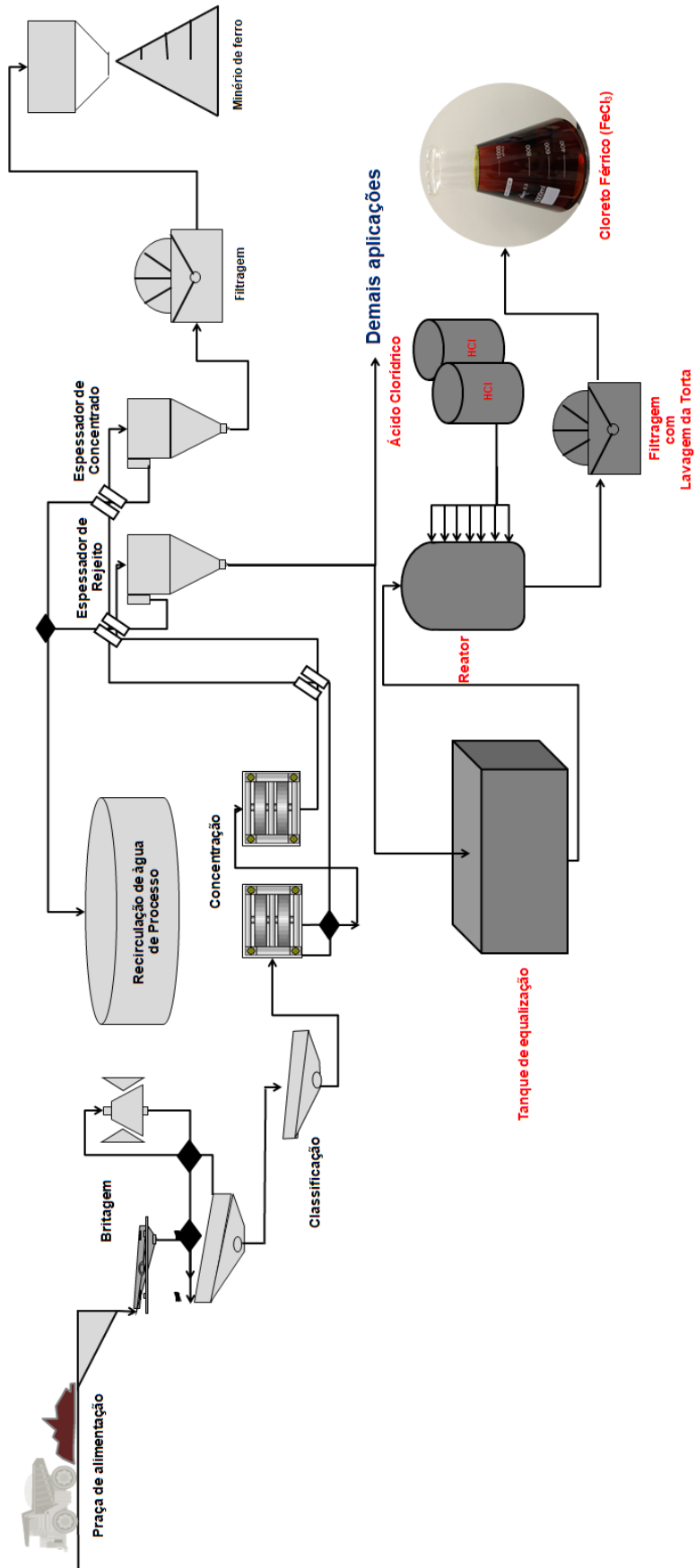
ano (considerando consumo médio de 200 L/dia conforme dados da SABESP). A mesma quantidade de cloreto férrico atenderia o tratamento de água de abastecimento do estado de Minas Gerais por dois anos. Esses números mostram o grande potencial de produção do cloreto férrico a partir dos rejeitos de minério de ferro e sua abrangência de aplicação diante de demandas populacionais em relação ao abastecimento público. Esse cenário também indica que a incorporação do rejeito de minério de ferro na produção de cloreto férrico é um nicho em potencial, mas não é suficiente para absorver a grande quantidade de resíduos gerada pelo estágio de beneficiamento do minério de ferro. Esse contexto corrobora a necessidade de pesquisas que busquem alternativas de produção que aproveitem esse material em seus processos. Além dos potenciais técnicos e de utilização, outros pontos acerca deste processo precisam ser averiguados.

Perante aos custos logísticos, a proposta mais aderente à economicidade do processo de produção do cloreto férrico a partir de rejeitos de minério de ferro é a incorporação desta rota de produção às unidades de beneficiamento mineral. Essa conexão permitirá que o insumo da unidade de beneficiamento (rejeito de minério de ferro) seja incorporado ao processo de produção do cloreto férrico sem custos logísticos adicionais.

Para a produção em escala industrial, o processo de obtenção do cloreto férrico pode absorver o rejeito na forma de polpa. Para tal, uma sugestão adequada seria a adoção de um tanque de equalização para controlar os níveis de sólidos e o percentual de água a ser balanceado no sistema.

O ataque por ácido clorídrico pode ser realizado por aspensão do rejeito no interior do reator, onde a quantidade de ácido necessária é controlada segundo a proporção de rejeitos e água disponíveis no sistema. Além dessas condições, o controle de temperatura deve ser uma variável de grande relevância dentro do estágio de produção. Após a etapa de lixiviação, a solução férrica deve passar por uma etapa de filtragem antes do estágio de envasamento do reagente férrico. O resíduo sólido da lixiviação deve passar por um estágio de lavagem, visando o máximo aproveitamento dos reagentes e também sua adequação para incorporação em processos produtivos subsequentes. Uma proposta para este esquema de produção encontra-se presente na Figura 71.

Figura 71 - Esquema de processo para produção de cloreto férrico.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Visto que os custos de implantação são dependentes da capacidade de produção almejada, do grau de automação esperado para o sistema, das especificidades de cada projeto e da disponibilidade de investimento para implantação; não serão abordados nesta análise informações acerca de custos de implantação.

Quanto aos custos de produção focaremos a análise nos custos com reagentes. No caso do processo realizado em escala laboratorial, os insumos necessários foram: rejeito de minério de ferro, água purificada por osmose reversa e ácido clorídrico P.A. 37%. O preço de ácido clorídrico P.A. está em torno de R\$32,00, considerando a média de cinco fornecedores locais. Um litro de água purificada com certificação apresenta preço médio de R\$ 5,00. O litro de cloreto férrico P.A. apresenta um preço médio de R\$60,00. Salienta-se que os reagentes foram cotados na modalidade varejista, apresentando assim um valor superior ao de aquisição em grandes quantidades. A Tabela 20 contempla a quantidade de reagentes necessária para produção de um cloreto férrico de qualidade a partir de rejeitos de minério de ferro.

Tabela 20 - Custo estimado com reagentes para produção de cloreto férrico P.A.

Reagentes	Preço por litro (R\$)	Quantidade utilizada (m L ⁻¹)	Valor Gasto (R\$)
Ácido clorídrico	32,00	900	28,80
Água Destilada	5,00	100	0,50

Como o cloreto férrico P.A apresenta uma concentração de 38%; uma etapa adicional de evaporação é necessária para a obtenção de um cloreto férrico dentro das especificações de mercado. Diante disso, a cada litro de cloreto férrico obtido deverão ser evaporadas 140 mL da solução de modo a se obter a concentração férrica esperada. Com essas especificidades, o preço estimado de custos com reagentes para produção de um cloreto férrico P.A. é de R\$34,50. Os custos com reagentes correspondem a 57% do valor médio do cloreto férrico P.A. disponível no mercado, representando uma margem de lucro em torno de 42%. O que demonstra que o processo embasado nesses moldes se mostra competitivo.

Cabe destacar que esses custos com reagentes se mostram superestimados, já que ácido clorídrico pode ser adquirido por valores bem menores, como também a água pode ser produzida no próprio local, o que diluiria os custos de produção. Além disso, a pureza apresentada pelo cloreto férrico obtido pelo rejeito o torna bastante competitivo, permitindo que o seu preço esteja um pouco acima da média de

mercado. Outro fator que torna competitiva a produção do cloreto férrico é a quantidade de rejeitos disponível, o que amplia a possibilidade de produção em larga escala, o que confere menores custos de produção e permite o atendimento de grande parcela do mercado deste reagente.

A mesma análise de custos pode ser realizada para produção de cloreto férrico de grau técnico, utilizando ácido clorídrico 32%. O preço médio do ácido clorídrico 32% é em torno de R\$20,00. Considerando o uso de água de abastecimento, o custo diminui ainda mais. Segundo dados do DMAE (2015), o metro cúbico de água de abastecimento em Porto Alegre custa R\$2,99. A Tabela 21 contempla o valor dos reagentes para a obtenção de cloreto férrico em grau técnico.

Tabela 21 - Custo estimado com reagentes para produção de cloreto férrico grau técnico.

Reagentes	Preço por litro (R\$)	Quantidade utilizada (m L ⁻¹)	Valor Gasto (R\$)
Ácido clorídrico 32%	20,00	900	18,00
Água de Abastecimento	0,003	100	0,0003

Partindo destes valores o custo estimado de reagentes para produção de cloreto férrico em grau técnico sai em torno de R\$18,00. Comparando com o preço médio desse reagente no mercado, que é de R\$26,00; os custos com reagentes correspondem a aproximadamente 70% do preço médio de mercado. Valor que representa uma margem de lucro 31% frente aos valores utilizados nesta análise. O preço de mercado ainda deve cobrir custos de implantação, mão-de-obra, custo energético, retorno financeiro, entre outras despesas que serão variáveis de acordo com o empreendimento.

Esse panorama de viabilidade econômica não fornece todas as variáveis necessárias para determinação da economicidade e lucratividade deste processo em escala industrial, mas indica que o custo de produção relacionado aos reagentes mostra-se menor que os preços praticados no mercado. Vale lembrar que a incorporação do rejeito em processos de produção garante uma redução nos custos de disposição deste material, o que torna compensatório avaliar tais alternativas de investimento. Além de que a incorporação de resíduos da mineração é uma prática que precisa ser desenvolvida e ampliada visando resultados mais sustentáveis para o segmento de produção mineral.

5 CONCLUSÕES

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de minério de ferro. A revisão bibliográfica e o levantamento estatístico acerca das publicações permitiram identificar uma carência de estudos sobre rejeitos de minério de ferro tanto no Brasil como no mundo. O levantamento indicou que, no período analisado de 2014-2018, houve um montante de 12.186 publicações sobre minério de ferro e 2.182 publicações sobre rejeito de minério de ferro (aproximadamente 18%). A maior ênfase está no emprego do material para construção civil, de forma que outras possibilidades de estudos podem e precisam ser exploradas.

A caracterização da amostra de rejeito de minério de ferro empregada neste estudo demonstrou que o material é composto majoritariamente por partículas finas com distribuição granulométrica na faixa de 0,07 a 300 μm e área superficial específica de 10,6 m^2g^{-1} . A análise mineralógica do rejeito de minério de ferro indicou a presença de hematita, quartzo, goethita, caulinita, biotita e gibbsita. Informação que se confirma na Fluorescência de Raios-X, que detectou como elementos majoritários os óxidos de ferro, silício e alumínio. Pela análise elementar confirma-se que aproximadamente 31% da composição do rejeito é hematita (Fe_2O_3), 62% é sílica (SiO_2) e 7% é caulinita e outros minerais.

A alternativa adotada neste estudo para incorporação do ferro contido no rejeito foi à produção de cloreto férrico (FeCl_3) com base na lixiviação por ácido clorídrico em um ambiente de temperatura controlada. As condições que permitiram a maior recuperação de ferro foram: temperatura de 80°C, concentração de 10,8 mol L^{-1} de ácido clorídrico e um período de reação de duas horas. Nesta condição, obteve-se uma eficiência de solubilização do ferro (recuperação) de 94% em um licor com uma concentração de ferro 113 g L^{-1} ; concentração essa que atende a especificação do mercado como reagente para a área de saneamento ambiental.

A caracterização do cloreto férrico mostrou um coagulante de qualidade com baixa concentração de contaminantes. Metais como arsênio e cromo apresentaram valores de concentração muito menores que os de um coagulante comercial produzido a partir de sucata ferrosa. Ao avaliar a eficiência do coagulante no tratamento de água, foram obtidos ótimos resultados em relação aos padrões de potabilidade.

O processo de produção do cloreto férrico gera um resíduo rico em sílica que corresponde a aproximadamente 68% da massa inicial de rejeito bruto. A lavagem do material é importante para a remoção do licor aderido nas partículas contendo ainda ferro e acidez. O resíduo, após a lavagem, foi caracterizado quanto as suas propriedades físicas e químicas. Quanto à granulometria, o resíduo apresentou frações menores que as identificadas no rejeito; apresentando-se na faixa granulométrica entre 0,20 a 170 μm . Em relação à composição química, o material apresentou uma alta concentração de sílica (cerca de 90,0% de SiO_2) acompanhada por uma parcela de 2,9% de hematita (Fe_2O_3) e 7,1% de caulinita e outros minerais.

Pelas características granulométricas e de composição, o resíduo do processo avaliado neste estudo tem potencial de aplicação como areia fina da construção civil e incorporação no segmento de cerâmicas vermelhas. Destaca-se que com etapas adicionais de purificação da sílica deste resíduo o campo de aplicabilidades aumenta consideravelmente; onde se pode citar aplicação nas indústrias de: vidro, cerâmicas/refratários, borracha/plástico/tintas e também na indústria do petróleo.

A rota de produção do cloreto férrico mostra-se uma alternativa para o aproveitamento de parte do rejeito de minério de ferro com potencial de lucratividade e de aumento da sustentabilidade da produção.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliação toxicológica do rejeito de minério de ferro, visando o potencial de dano em áreas circundantes a minerações de ferro;
- Estudo de incorporação do rejeito de minério de ferro na indústria de cerâmicas vermelhas;
- Síntese de pigmentos a partir do rejeito bruto de minério de ferro;
- Produção de óxidos de ferro e sílica por lixiviação/precipitação do rejeito de minério de ferro;
- Confeção de filtros cerâmicos industriais com a aplicação do rejeito de minério de ferro;
- Aplicação do resíduo da lixiviação do cloreto férrico para síntese de sílica industrial de elevada pureza;
- Potencial de produção de sulfato férrico a partir da lixiviação do rejeito de minério de ferro com Drenagem Ácida de Minas (DAM).

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Amostragem de resíduos sólidos. NBR 10.007**. Rio de Janeiro, 25p., 2004d.

ALMEIDA, V. O.; SCHNEIDER, I. A. H. **Desafios rumo ao gerenciamento e aplicação sustentável dos rejeitos da indústria mineral: um estudo estatístico dos rejeitos das produções acadêmicas e inovações no segmento**. In: 11º Simpósio Internacional de qualidade ambiental, Porto Alegre, 2018.

AMARAL, A. J. R.; FILHO, C. A. L. **Mineração**. 2014. DNPM. Disponível em: <<http://www.dnmp-pe.gov.br/Geologia/Mineracao.php>>. Acesso em: 21 ago. 2018.

ANA. **Encarte especial sobre a bacia do rio Doce: rompimento da barragem em Mariana/MG: Informe 2015**. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/RioDoce/EncarteRioDoce_22_03_2016v2.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2019.

ANJOS, P. S.. **Aplicação de sulfato de alumínio e taninos vegetais na coagulação-floculação de efluentes de curtume**. Porto Alegre, 114 f. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2016.

ASSIS, D. M.; QUEIROGA, F. O. C. S.; MENDES, J. C. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro na fabricação de tijolos maciços**. *Ágora*, v. 3, n. 1, p. 191-200, 2018.

AUGUSTO, T. M.; CHAGAS, P.; SANGIORGE, D. L.; LEOD, T. C. O. M.; OLIVEIRA, L. C. A.; CASTRO, S. C. **Iron ore tailings as catalysts for oxidation of the drug paracetamol and dyes by heterogeneous Fenton**. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 6, n. 5, p. 6545-6553, 2018.

AWWA-APHA-WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. Editado por Eaton, A.D.; Clesceri, L.S.; Rice, E.W.; Greenberg, A.E. 21th Edition. Washington: American Public Health Association, 2017.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO (BNDES). **Desafios da mineração: desenvolvimento e inovação para redução dos impactos ambientais e sociais**. 2017. Disponível em:

<<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/noticias/noticia/inovacao-tecnologia-mineracao-metais>>. Acesso em: 21 ago. 2018.

BEDI, A.; SINGH, B. R.; DESHMUKH, S. K.; ADHOLEYA, A. BARROW, C. J. **An *Aspergillus aculateus* strain was capable of producing agriculturally useful nanoparticles via bioremediation of iron ore tailings.** Journal of Environmental Management, v.215, n.1, p. 100-107, 2018.

BELAN, F. I. **Water Treatment.** Moscow: Mir Publishers, 3 ed. 1980.

BEZERRA, C. G. **Caracterização do Rejeito de Minério de Ferro (IOT) e Avaliação da sua Influência no Comportamento Físico-Químico e Mecânico de Pastas de Cimento.** Rio de Janeiro, 158 f. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

BORBA, L. R. **Viabilidade do uso da moringa *oleiferalam* no tratamento simplificado de água para pequenas comunidades.** João Pessoa, 76f. Dissertação de Mestrado - Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente - Centro de Ciências exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba - UFPB, João Pessoa. 2001.

BRASIL. **Lei n 12.305**, de 02 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Brasília, DF, ago. 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 430**, de 13 de mai. de 2011. Brasília, DF, maio de 2011.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 2.914**, de 12 de dezembro de 2011, Brasília, DF, dezembro de 2011.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria de Consolidação N° 5**, de 28 de setembro de 2017. Brasília, DF, setembro de 2017.

BRATBY, J. **Coagulation and Flocculation: with emphasis on water and wastewater treatment.** Croydon: Uplands Press Ltd, 1980, 354p.

CAI, L.; MA, B. LI, X.; LV, Y.; LIU, Z.; JIAN, S. **Mechanical and hydration characteristics of autoclaved aerated concrete (AAC) containing iron-tailings:**

Effect of content and fineness. Construction and Building Materials, v. 128, p. 361-372, 2016.

CANTISANO, G. M. **Impacto da variabilidade do preço transoceânico de minério de ferro nos projetos da cadeia logística: uma abordagem pela simulação estocástica.** Rio de Janeiro, 95 f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da PUC - Rio. Rio de Janeiro, 2012.

CARAVELLI, A.; GREGORIO, C.; ZARITZKY, N. E. **Effect of operating conditions on the chemical phosphorus removal using ferric chloride by evaluating orthophosphate precipitation and sedimentation of formed precipitates in batch and continuous systems.** Chemical Engineering Journal, v. 209, p. 469-477, 2012.

CAVALCANTI, J. E. **Manual de tratamento de efluentes industriais.** São Paulo: Engenho, 2 ed., 2016.

CELE, E. N.; MABOETA, M. **A greenhouse Trial to investigate the ameliorative properties of biosolids and plants on physicochemical conditions of iron ore tailings: Implications for a iron ore mine site remediation.** Journal of Environmental Management, v.165, n.1, p. 167-174, 2016.

CHEN, Y.; ZHANG, Y.; CHEN, T.; LIU, T.; HUANG, J. **Preparation and Characterization of red porcelain tiles with hematite tailings.** Construction and Building Materials, v.38, p. 1083-1088, 2013.

COMISSÃO EUROPÉIA. **Comunicação da comissão ao parlamento europeu, ao conselho, ao comitê econômico e social europeu e ao comitê das regiões-Para uma economia circular: programa para acabar com os resíduos na Europa.** Bruxelas, 17 p., 2014.

CORNELL, R. M.; SCHERTMANN, U. **The iron oxides.** New York: Wiley-VCH, 2 ed. 1996, 705 p.

DAREZERESHKI, E.; DARBAN, A. K.; ABDOLLAHY, M.; JAMSHIDI, A. **Synthesis of magnetite nanoparticles from iron ore tailings using a novel reduction-precipitation method.** Journal of Alloys and Compounds, v. 749, n.1, p. 336-343, 2018.

DAS, S. K.; KUMAR, S.; RAMACHANDRARAO, P. **Exploitation of iron ore tailing for the development of ceramic tiles.** Waste Management, v. 20, n. 8, p. 725-729, 2000.

DAVIES, M. P. **Tailings Impoundment Failures: Are Geotechnical engineers listening?** Waste Geotechnics, p. 31- 36, 2002.

DAVIES, M. P.; MARTIN, T. E. **Mine tailings dams: when things go wrong in proceedings of tailing dams.** Las Vegas: Association of State Dam Safety Officials, U.S. Committee on Large Dams, p. 261-273, 2000.

DAVIES, M. P.; MARTIN, T. E. **Mining Market cycles and tailings dam incidentes.** AMEC Earth & environmental. In: Proceeding of the Thirteenth International Conference on Tailings and Mine Waste, Canadá, 2009.

DENARI, G. B.; CAVALHEIRO, E. T. G. **Princípios e Aplicações de Análise Térmica.** Material de Apoio. São Carlos: Universidade de São Paulo, Instituto de Química de São Carlos, 2012.

DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUAS E ESGOTOS - DMAE. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Porto Alegre.** DMAE, Porto Alegre, 2015.

DNPM. **Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas.** Brasília, 2017.

_____. **Ferro.** In: Sumário Mineral / Coordenadores: Thiers Muniz Lima, Carlos Augusto Ramos Neves. Brasília: DNPM, 2014. 141p.

_____. **Ferro/Aço.** Brasília: DNPM, 2013. 18p.

DUTRA, M. B. **Produção de concreto com areia de granulometria ótima obtida do resíduo da mineração de quartzo.** Ouro Preto, 2015. 89 f. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto.

ECKENFELDER, W. W. **Industrial water pollution control.** New York: McGraw-Hill, 2 ed., 1989. 400 p

EDRAKI, M.; BAUMGARTL, T.; MANLAPIG, E.; BRADSHAW, D.; FRANCOS, D.; MORAN. **Designing mine tailings for better environmental, social and economic out comes: a review of alternative approaches.** Journal of Cleaner Production, v. 84, p.411-420, 2014.

ESPÓSITO, T. J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construída por aterro hidráulico.** Brasília, 363 f. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília, Brasília, 2000.

FEAM. **Inventário de Resíduos Sólidos Industriais - Ano Base 2010.** Disponível em: <<http://www.feam.br>> Acesso em: 21 ago. 2018.

FEAM. **Inventário de Barragem do Estado de Minas Gerais – Ano Base 2017.** Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/2018/BARRAGENS/Invent%C3%A1rio_de_Barragens_2017.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2019.

FEAM. **Inventário de Resíduos Sólidos da Mineração - Ano Base 2016.** Disponível em: <<http://www.feam.br>> Acesso em: 21 ago. 2018.

FEAM. **Dados sobre a forma de disposição de rejeitos no estado de Minas Gerais.** Dados disponibilizados por e-mail, 2018.

FINCH, J. A.; DOBBY, G. S. **Colunn flotation.** Great Britain: Pergamon Press, 1 ed., 1990.

FONTES, W. C.; MENDES, J. C.; SILVA, S. N. D.; PEIXOTO, R. A. F. **Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams.** Construction and Building Materials, v. 112, p. 988-995, 2016.

G1. **Brumadinho antes e depois: veja imagens do rompimento de barragem da Vale.** Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/01/25/antes-e-depois-veja-imagens-do-rompimento-de-barragem-da-vale-em-brumadinho-mg.ghtml>>. Acesso em: 31 jan. 2019.

GALVÃO, J. L. B.; ANDRADE, H. D.; BRIGOLINI, G. J.; PEIXOTO, R. A. F.; MENDES, J. C. **Reuse of iron tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints.** Journal of Cleaner Production, v.200, p. 412-422, 2018.

GOMES, L. E. O.; CORREA, L. B.; SÁ, F.; NETO, R. R.; BERNARDINO, A. F. **The impacts of the Samarco mine tailings pill on the Rio Doce estuary, Eastern Brazil.** Marine Pollution Bulletin, v. 120, p. 28-36, 2017.

GOVERNMENT OF WESTERN AUSTRALIA. **Iron Ore Profile.** Austrália, junho de 2018.

GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas.** 2011. 129 f. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2011.

HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. **Introductory Mining Engineering.** 2^oed. New Jersey: John Wiley & Sons, INC., 2002.

IBAMA. **Rompimento de barragem da Vale em Brumadinho (MG) destruiu 269,84 hectares.** Disponível em: < <http://www.ibama.gov.br/noticias/730-2019/1881-rompimento-de-barragem-da-vale-em-brumadinho-mg-destruiu-269-84-hectares>> Acesso em: 31 jan. 2019.

IBRAM. **Informações e análises da economia mineral brasileira.** Brasília, 2016. Disponível em: < <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002806.pdf>>. Acesso em 07 fev. 2019.

IBRAM. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração.** Brasília, 2016. Disponível em: <www.ibram.org.br> Acesso em: 21 ago. 2018.

ICOLD - International Commission on Large Dams. **Tailings dams: risk of dangerous occurrences, lessons learnt from practical experiences.** France: Bulletin 121. 2001. 144 p.

IPEA. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas.** Brasília, 2012.

JONES, H.; BOGER, D. V. **Sustainability and waste management in the resource industries**. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 51, p. 10057 - 10065, 2012.

KURANCHIE, F. A. **Characterisation and Applications of Iron Ore Tailings in Building and Construction Projects**. 2015. 200f. Tese de doutorado - Edith Cowan University, Austrália, 2015.

LEONARDO, A. M.; IZOTON, J. P. L.; VALLIN, H. **Rompimento da barragem do Fundão (SAMARCO/VALE/BHP BILLITON) e os efeitos do desastre na foz do Rio Doce, distritos de Regência e Povoação, Linhares (ES)**. Vitória: GEPEDES, 2017.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água**. Campinas: Editora Átomo, 3 ed., 2010.

LIMA JÚNIOR, R. N.; ABREU, F. O. M. S. **Produtos Naturais Utilizados como Coagulantes e Floculantes para Tratamento de Águas: Uma Revisão sobre benefícios e Potencialidades**. Revista Virtual de Química, v. 10, n. 3, p. 709-735, 2018.

LINS, F. F.; ADAMIAN, R. **Minerais Coloidais, Teoria DLVO Estendida e Forças Estruturais**. CETEM: Série Tecnologia Mineira, 78, 2000.

LORENZO, M. **A importância da mineração para o desenvolvimento de uma sociedade**. 2015. Disponível em: <<http://www.geoexplorerconsultoria.com/#!a-importancia-da-mineracao/cd22>>. Acesso em: 21 ago. 2018.

LUZ, A. B.; SAMPAIO J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Tratamento de minérios**. CETEM: Rio de Janeiro, 2004.

LUZ, A. B.; LINS, F. F. **Rochas e minerais industriais**. CETEM: Rio de Janeiro, 2005.

MACEDO, R. S.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H.C. **Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha**. Cerâmica, v. 54, n. 331, p.411-417, 2008.

MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, F. **Reuso da água**. Barueri: Manuelie, 3ª ed., 2003.

MASCIA, L. S. V. **Curso de Tratamento de Águas pela Indústria Química Máscia**. Disponível em: < [http:// www.mascia.com.br /cms/arquivos/curso_tratamento_aguas.pdf](http://www.mascia.com.br/cms/arquivos/curso_tratamento_aguas.pdf)>. Acesso em: 06 fev. 2019.

MATOS, V. E. **Seletividade de reagentes na flotação reversa de minério de ferro**. Belo Horizonte, 116 f., 2017. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais.

MEGER, D. G. **Material particulado suspenso e macroconstituintes iônicos em um reservatório de abastecimento: o caso do rio Passaúna, Curitiba, Paraná, Brasil**. Curitiba, 144 f., 2007. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Gestão Ambiental do Centro Universitário Positivo.

MENEZES, J. C. S. S. **Produção de Coagulantes férricos na mineração de carvão**. Porto Alegre, 120 f., 2009. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering. Treatment and Reuse**. Boston: McGrawHill, 2003.

MINAS GERAIS. **Decreto n. 46.993**, de maio de 2016. Instituição de Auditorias Extraordinárias de Segurança de Barragem e dá outras providencias. Belo Horizonte, MG, maio de 2016.

MUDD, G. M. **One Australian perspective on sustainable mining: Declining ore grades and increasing waste volumes**. In: XI International conference on and mine waste, held in Vail, Colorado, U.S.A., p. 359-369, 2004.

OLIVEIRA, L. C. A., FABRIS, J. D., PEREIRA, M. C., **Óxidos de ferro e suas aplicações em processos catalíticos: uma revisão**. Química Nova, v. 36, n. 1, p. 123-130, 2013.

OMACHI, C. Y.; SIANI, S. M.; CHAGAS, F. M.; MASCAGNI, M. L. CORDEIRO, M.; GARCIA, G. D.; THOMPSON, C. C.; SIEGLE, E.; THOMPSON, F. L. **Atlantic Forest loss caused by the world's largest tailing dam collapse (Fundão Dam, Mariana, Brazil)**. Remote Sensing Applications: Society and Environment, v. 12, p. 30-34, 2018.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Arsenic**. Disponível em: <<https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>>. Acesso em: 06 fev. 2019.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Chromium**. Disponível em :<<http://apps.who.int/bookorders/anglais/detart1.jsp?codlan=1&codcol=16&codcch=61>>. Acesso em: 06 fev. 2019.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 247 f.

PRETTY, G. **Brumadinho pode ser maior acidente de trabalho do Brasil**. Disponível:<<https://g1.globo.com/mg/minasgerais/noticia/2019/01/29/brumadinho-pode-ser-maior-acidente-de-trabalho-do-brasil.ghtml>>. Acesso em: 31 de jan. de 2019.

PRYOR, M. J.; EVANS, U. R. **The passivity of metals. Part IX. The Solubility product of freshly precipitated ferric hydroxide**. Journal os the Chemical Society, 1949.

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências de polpa e torta**. Belo Horizonte, 180 p., 2013. Dissertação de mestrado em Geotecnia e Transportes – Universidade Federal de Minas Gerais.

QUARESMA, L. F. **Relatório Técnico 18: Perfil da Mineração de Ferro**. J. Mendo Consultoria. Belo Horizonte, 2009.

RAFAEL, H. M. A. M. **Análise do Potencial de Liquefação de uma Barragem de Rejeito**. Rio de Janeiro, 103 p., 2012. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-RIO.

RAVINA, L. **Everything you want to know about Coagulation & Flocculation**. Staunton: Zeta-Meter Inc., 1993, 36p.

RIBERO, J. L. D.; CATEN, C. S. T. **Projeto de Experimentos: Série Monográfica Qualidade**. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Escola de Engenharia de Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014. 169 p.

ROYAL SOCIETY OF ARTS. **Investigating the role of design in the circular economy**. The Great Recovery Project - Report 01. Londres: RSA, 2014.

SAAE. **Esgoto - Curiosidades**. Disponível em: < <http://www.saaeara.com.br/informacao/esgoto---curiosidades/>>. Acesso em: 06 fev. 2019.

SABESP. **Pregão SABESP online N° 90.597/14: aquisição de cloreto férrico**. Disponível em: < <https://www.imprensaoficial.com.br/Enegocios/BaixaEdital.aspx?LicitacaoID=965580&EventoLicitacaoID=2934649>>. Acesso em: 06 fev. 2019.

SABESP. **Dicas de economia**. Disponível em: < <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=140>>. Acesso em: 07 fev. 2019.

SAMARCO MINERAÇÃO S/A. LEONEL, C. M. L.; ALMEIDA, A. P.; RIELLA, H. G.; CARVALHO, E. F. U. **Processo de Obtenção de Cloreto Férrico a partir o subproduto resultante do beneficiamento de minério de ferro**. BR n. PI:1103933-7 A2, 17 de agosto de 2011, 17 de julho de 2031.

SÁNCHEZ, L. E. **Mineração e Meio Ambiente**. In: Tendências tecnológicas Brasil 2015: geociências e tecnologia mineral. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p.196-213, 2007.

SAWYER, C. N.; McCARTY, P. L. **Chemistry for Environmental Engineers**. New York: Mc Graw Hill Book Company, 4ed, 1994.

SCHNEIDER, I. A. H. **Tratamento primário de um efluente contendo proteínas de soja por flotação por ar dissolvido e sedimentação**. Porto Alegre, 135 f., 1991. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SCHOENBERGER, E. **Environmentally sustainable mining: The case of tailings storage facilities**. Resources Policy, v. 49, n. 1, p. 119-128, 2016.

SCHWERTMANN, U.; Taylor, R. M. **Iron oxides**. In: Minerals in soil environments. Soil Science Society of America Journal, 2 ed., p. 379-438, 1989.

SCIENCE DIRECT. **Search for peer-reviewed journals, articles, book chapters and open access content**. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com>>
Acesso em: 18 nov. 2018.

SHETTIMA, A. U; HUSSIN, M. W.; AHMAD, Y.; MIRZA, J. **Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete**. Construction and Building Materials, v. 120, p. 72-79, 2016.

SHI, Y.; FAN, M.; BROWN, R. C.; SUNG, S.; LEEUWEN, J. V. **Comparison of corrosivity of polymeric sulfate ferric and ferric chloride as coagulants in water treatment**. Chemical Engineering and Processing, v. 43, p. 955-964, 2004.

SILVA, F. A.N. G. **Estudos de Caracterização Tecnológica e beneficiamento do Caulim da Região de Borborema - Seridó**. Rio de Janeiro, 2007. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PEMM) da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SILVA, L. A. **Síntese e Caracterização de nanopartículas de hematita e de ferro zerovalente sintetizadas a partir de cloreto férrico**. Florianópolis, 128 f., 2015. Tese de doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina.

SILVA, M. S. S. **Sinterização em escala de bancada de minério de ferro goethítico calcinado**. Ouro Preto, 163 f., 2014. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

SILVA, R. G. **Produção do coagulante cloreto férrico a partir de carepa da indústria siderúrgica**. Porto Alegre, 81 f., 2013. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SIMA, T. V.; LETSHWENYO, M. W.; LEBOGANG, L. **Efficiency of waste clinker ash and iron oxide tailings for phosphorus removal from tertiary wastewater: Batch studies.** Environmental Technology & Innovation, v. 11, p. 49-63, 2018.

SURANA, V. S. **Leaching of Goethite in Acid Solutions.** Canadá, 103 f., 1969. Tese apresentada ao Departamento de Metalurgia da Universidade British Columbia.

TAVARES, F. **Determinação de densidade de material sólido brita sintética.** Universidade do Estado do Amapá: Laboratório de Resistência de Materiais, Amapá, 2009.

THOMÉ, R.; PASSINI, M. L. **Barragens de rejeitos de mineração: características do método de alteamento para montante que fundamentaram a suspensão de sua utilização em Minas Gerais.** Ciências Sociais aplicadas em Revista, v. 18, n. 34, p. 49-65. 2018.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **EPA Method 3052. Microwave Assisted Acid Digestion of Siliceous and Organically Biomatrices.** Washington, D. C., 1996. Disponível em: <<https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/3052.pdf>>. Acesso em: 05 de jan. de 2019.

VALE. **Esclarecimentos sobre a Barragem I da Mina de Córrego do Feijão.** Disponível em: <<http://brumadinho.vale.com/Esclarecimentos-sobre-a-barragem-I-da-Mina-de-Corrego-do-feijao.html>> Acesso em: 31 jan. 2019.

VAN NIEKERK, H. J.; VIJOEN, M. J. **Causes and consequences of the Merries pruit and other tailings - dam failures.** Land Degradation and Development, v.16, n.2, p. 201-212, 2005.

VIEIRA, P. A.; ALEGRE, H. **Estações de tratamento de água para consumo humano em Portugal.** Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2007.

VILLETTI, P. I. C. **Produção de coagulante férrico a partir da lixiviação de concentrado de pirita da mineração de carvão via cristalização/solubilização de sulfato ferroso - Estudo comparativo entre rejeitos de duas jazidas.** Porto Alegre, 92 f., 2017. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

VOGEL, A. I. **Química Analítica Quantitativa.** São Paulo: Editora Mestre, 5 ed., 1981. 216 p.

WILLS, B. A. **Mineral Processing Technology.** Exeter: BPCG Pergamon Wheatons Limited, 5.ed., 1992.

YANG, D.; KRASOWSKA, M.; SEDEV, R.; RALSTON, J. **The unusual surface Chemistry of α -Al₂O₃.** Physical Chemistry Chemical Physics, v. 12, p. 13724-13729, 2010.

YELLISHETTY, M., RANJITH, P. G., THARUMARAJAH, A., **Iron ore and steel production trends and material flows in the world: Is this really sustainable?** Resources, Conservation and Recycling, v. 54, p. 1084-1094, 2010.

ZENDRON, R. **Mecanismos de neurotoxicidade e doenças neurológicas relacionadas à intoxicação por metais pesados.** Revista Brasileira de nutrição funcional, v. 15, n. 64, p. 45-51, 2015

ANEXOS

ANEXO I - Método de determinação de Fe_{total}

- 1) Pipetar 1 mL (líquida) ou 0,2g (sólido) da amostra em um Erlenmayer de 300mL;
- 2) Adicionar 15 mL de ácido clorídrico concentrado;
- 3) Adicionar 2 mL de solução de cloreto de estanho (II) 15%;
- 4) Ferver de 7 a 10 minutos (considerando após o começo da ebulição). Manter o volume reacional constante com água destilada;
- 5) Adicionar solução de clorato de sódio de 0,68%(gota a gota- até a tonalidade ficar amarela);
- 6) Ferver novamente de 7 a 10 minutos (considerando após o começo da ebulição). Manter o volume reacional constante com água destilada;
- 7) Adicionar solução de cloreto estanoso 15% (gota a gota- até a tonalidade as solução ficar incolor.
- 8) Deixar esfriar em temperatura ambiente;
- 9) Adicionar 15 mL de cloreto de mercúrio 5%. Esperar a formação de um precipitado branco sedoso, se for cinza ou preto, a solução deve ser desprezada, pois indica excesso de cloreto estanoso.
- 10) Adicionar 15 mL de mistura ácida (15% ácido clorídrico, 15% ácido fosfórico-v/v);
- 11) Adicionar 7 ou 8 gotas da solução indicadora de difenilaminosulfonato de sódio 0,2%;
- 12) Titular com solução de Bicromato de potássio 0,1 N (para amostras concentradas) e 0,01 N (para amostras menos concentradas).
- 13) Perto do ponto final a solução torna-se esverdeada. Adicionar lentamente a solução de Bicromato de potássio até a mudança de cor para violeta azul intenso.
- 14) Cálculo da concentração de Fe_{total}:

$$[\text{Fe}_{\text{total}}] = \frac{\text{V1} \times \text{N} \times 0,05584 \times 1000}{\text{V2}}$$

V₁= Volume da solução de Bicromato de potássio gasto na titulação (em mL);

N= Normalidade da solução de Bicromato de potássio;

V₂= Volume da amostra (em mL) ou massa (em g).

*Realizar todos os passos em capela e com os devidos EPIs

ANEXO II - Método de determinação de Fe²⁺

- 1) Pipetar 1 mL (líquida) ou 0,2g (sólido) da amostra em um Erlenmeyer de 300mL;
- 2) Adicionar 10 mL de ácido clorídrico (HCl) 4N;
- 3) Adicionar 5 mL de ácido fosfórico (H₃PO₄) concentrado;
- 4) Adicionar 7 ou 8 gotas da solução indicadora de difenilaminosulfonato de sódio 0,2%;
- 5) Titular com solução de Bicromato de potássio 0,1 N (para amostras concentradas) e 0,01 N (para amostras menos concentradas).
- 6) Cálculo da concentração de Fe²⁺:

$$[\text{Fe}_{\text{total}}] = \frac{\mathbf{V1 \times N \times 0,05584 \times 1000}}{\mathbf{V2}}$$

V₁= Volume da solução de Bicromato de potássio gasto na titulação (em mL);

N= Normalidade da solução de Bicromato de potássio;

V₂= Volume da amostra (em mL) ou massa (em g).

*Realizar todos os passos em capela e com os devidos EPIs

ANEXO III - Laudo da análise de Água Bruta



RELATÓRIO DE ENSAIO - R. E. 091308/2018

Cliente		CNPJ
JORGE RUBIO		334.252.720-04
Endereço:		
AV. BENTO GONCALVES, 9500 - Porto Alegre/RS - CEP 91501970		
Contato	Departamento	Fone / Celular
Vitor	NI	51 998841030
E-mail		
vitor01almeida@hotmail.com		
Ordem de Serviço	Proposta Comercial	Emissão
5608	P. C. 6455/2018-1	07/01/2019

Dados da Amostra

N° da Amostra	Material
ECO.050466/2018	Água - Consumo Humano
Início Data e Hora da Coleta	Fim Data e Hora da Coleta
20/12/2018	NA
Local da Amostragem	Recebimento
AV. BENTO GONCALVES, 9500 - AGRONOMIA POA/RS	21/12/2018 10:30
Identificação do Projeto	Ponto da coleta
NI	Água de Abastecimento Bruto

Resultados Analíticos

Compostos Orgânicos Voláteis

Parâmetro	Unidade	Resultado	LQ	VMP ⁽¹⁾	Metodologia	Final Ensaio
Clorobenzeno (Mono)	µg/L	<3	3	120	PO-102	04/01/2019

Inorgânicos

Parâmetro	Unidade	Resultado	LQ	VMP ⁽¹⁾	Metodologia	Final Ensaio
Alcalinidade Total	mg/L	54,46	0,5	NA	PO-001	0
Amônia	mg/L	8,488	0,2	1,5	PO-039	07/01/2019
Cianeto total	mg/L	< 0,02	0,02	0,07	PO-004	26/12/2018
Cloreto	mg/L	13,33	0,1	250	PO-005	26/12/2018
Cor Aparente	uH	< 5	5	15	PO-007	27/12/2018
Demanda Química de Oxigênio	mg/L	39,17	13	NA	PO-036	26/12/2018
Dureza Total	mg/L	44,5	1,5	500	PO-011	26/12/2018
Fluoreto	mg/L	0,432	0,1	1,5	PO-062	28/12/2018
Nitrato	mg/L	0,307	0,1	NA	PO-017	26/12/2018
Nitrito	mg/L	0,529	0,01	NA	PO-018	26/12/2018
Sólidos Sedimentáveis	mL/L	1	0,1	NA	PO-024	03/01/2019



RELATÓRIO DE ENSAIO - R. E. 091308/2018

Sólidos Suspensos	mg/L	20	10	NA	PO-025	27/12/2018
Sólidos Totais Dissolvidos	mg/L	164	12	1000	PO-038	27/12/2018
Subst. que reagem ao azul de metileno-Surfactantes	mg/L	0,67	0,2	0,5	PO-030	26/12/2018
Sulfato	mg/L	5,769	2	250	PO-027	27/12/2018
Sulfeto de Hidrogênio	mg/L	0,167	0,1	0,1	PO-028	07/01/2019
Turbidez	uT	8,39	1	5	PO-031	27/12/2018

Metais

Parâmetro	Unidade	Resultado	LQ	VMP ⁽¹⁾	Metodologia	Final Ensaio
Alumínio	mg/L	0,812	0,05	0,2	PO-091	03/01/2019
Antimônio	mg/L	< 0,005	0,005	0,005	PO-091	03/01/2019
Arsênio	mg/L	< 0,01	0,01	0,01	PO-091	03/01/2019
Bário	mg/L	0,072	0,01	0,7	PO-091	03/01/2019
Cádmio	mg/L	< 0,004	0,004	0,005	PO-091	03/01/2019
Chumbo	mg/L	< 0,006	0,006	0,01	PO-091	03/01/2019
Cobre	mg/L	0,011	0,01	2	PO-091	03/01/2019
Cromo	mg/L	< 0,009	0,009	0,05	PO-091	03/01/2019
Ferro	mg/L	1,029	0,06	0,3	PO-091	03/01/2019
Fósforo	mg/L	0,649	0,1	NA	PO-091	03/01/2019
Manganês	mg/L	0,125	0,01	0,1	PO-091	03/01/2019
Mercúrio	µg/L	< 0,1	0,1	0,001	PO-091	03/01/2019
Níquel	mg/L	< 0,01	0,01	0,07	PO-091	03/01/2019
Selênio	mg/L	< 0,01	0,01	0,01	PO-091	03/01/2019
Sódio	mg/L	14,7	0,8	200	PO-091	03/01/2019
Zinco	mg/L	0,082	0,05	5	PO-091	03/01/2019

Microbiológico

Parâmetro	Unidade	Resultado	LQ	VMP ⁽¹⁾	Metodologia	Final Ensaio
Coliformes Termotolerantes	em 100 mL	Presença	NA	NA	PO-054	03/01/2019
Coliformes Totais	em 100 mL	Presença	NA	Ausência em 100 mL	PO-054	22/12/2018

(1) Portaria de Consolidação Nº 5 de 2017

Emendas

A amostra está fora da temperatura de preservação conforme Tabela 1060-1 do Standard Methods 23ª Edição, podendo afetar a validade dos ensaios.



RELATÓRIO DE ENSAIO - R. E. 091308/2018

Referências Técnicas

PO-102 - SMWW 23ª Ed. 2017 - Method 8410B/EPA 8260C, 2006/EPA 5120A, 2003/EPA3510C, 1996/EPA 8270D, 2007/PO-102 Rev. 7.
 PO-001 - SMWW 22ª Ed.2012. Method 2320 B.
 PO-039 - SMWW 23ª Ed.2017 Method 4500-Norg B e C e Método Colorimétrico 18ª Ed. Método 4500-NH3 B e C.
 PO-004 - SMWW 23ª Ed. 2017, Method 4500-CN-C e E.
 PO-005 - SMWW 23ª Ed.2017, Method 4500 B
 PO-007 - SMWW, 23ª Ed 2017, Method 2120 C.
 PO-038 - SMWW, 23ª Ed. 2017, Method 5220 D.
 PO-011 - SMWW 23ª Ed. 2017. Method 2340C
 PO-062 - SMWW 23ª Ed. 2017, Method 4500-F, B/D.
 PO-017 - ABNT NBR 12620/92
 PO-018 - SMWW 23ª Ed. 2017. Method 4500-NO2 B.
 PO-024 - SMWW, 23ª Ed. 2017., Method 2540 F.
 PO-025 - SMWW 23ª Ed. 2017. Method 2540 D e E.
 PO-038 - SMWW, 23ª Ed. 2017, Method 2540 C
 PO-030 - SMWW, 23ª Ed. 2017, Method 5540 C.
 PO-027 - SMWW 23ª Ed. 2017. Method 4500-SO4-2 E.
 PO-028 - SMWW, 23ª Edição 2017, Método 4500-S2- H.
 PO-031 - SMWW 23ª Ed. 2017, Method 2130 B
 PO-091 - SMWW, 23ª Ed. Mét 3030I e 3120B/ EPA Mét 3015 A e 6010 C,2007/PO-091 Rev.11.
 PO-054 - SMWW, 23ª Ed.2017, Method 9223B

Dados de amostragem

Coleta realizada pelo Cliente
 Condições ambientais: NI
 Temperatura da amostra: NI
 Temperatura do ar: NI
 Profundidade: NI m
 Cloro residual livre: NI
 Amostrado por: NI
 pH: NI
 Resultados dos ensaios aplicam-se a amostra conforme recebido

Legenda

(C) - Ensaio realizado em campo
 IM - Incerteza de medição
 LD - Limite de detecção
 LQ - Limite de quantificação
 NA - Não aplicável
 NI - Não informado
 NMP - Número Mais Provável
 SMWW - Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water
 UFC - Unidade formadora de colônia
 VMP - Valor máximo permitido

Declaração de Conformidade

VR ⁽¹⁾: O(s) parâmetro(s) Alumínio, Amônia, Ferro, Manganês, Subst. que reagem ao azul de metileno-Surfactantes, Turbidez, Coliformes Totais, Sulfeto de Hidrogênio não atende(m) aos padrões estabelecidos pelo(a) Portaria de Consolidação N° 5 de 2017.



RELATÓRIO DE ENSAIO - R. E. 091308/2018

Considerações Finais

Os resultados das análises referem-se somente aos itens de ensaio analisados. Este relatório de ensaio não pode ser alterado e nem reproduzido de forma parcial.

O plano de amostragem e o procedimento de amostragem são de responsabilidade do cliente.

Incerteza de Medição: A incerteza expandida de medição relatada (U) é declarada como incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência "k", que para a distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

Responsáveis pela(s) Análise(s)

Edu Ricardo Beltrame
Responsável Técnico
CRQ 05301723
Assinado eletronicamente

Giovani Zandoná
Signatário autorizado
Assinado eletronicamente

Final do Relatório de Ensaio

Código de Validação: 4cd8bf244747544401a62e5c77e93ae4. A verificação deste Relatório de Ensaio poderá ser realizada através endereço "labonline.econsulting.com.br", selecionando a opção "Validar Relatório".

ANEXO IV - Laudo da análise de água tratada com cloreto férrico



RELATÓRIO DE ENSAIO - R. E. 091309/2018.1

Cliente		CNPJ
JORGE RUBIO		334.252.720-04
Endereço:		
AV. BENTO GONCALVES, 9500 - Porto Alegre/RS - CEP 91501970		
Contato	Departamento	Fone / Celular
Vitor	NI	51 996841030
E-mail		
vitor01almeida@hotmail.com		
Ordem de Serviço	Proposta Comercial	Emissão
5608	P. C. 6455/2018-1	11/01/2019

Dados da Amostra

N° da Amostra	Material
ECO.050467/2018	Água - Consumo Humano
Início Data e Hora da Coleta	Fim Data e Hora da Coleta
20/12/2018	NA
Local da Amostragem	Recebimento
AV. BENTO GONCALVES, 9500 - AGRONOMIA POA/RS	21/12/2018 10:30
Identificação do Projeto	Ponto da coleta
NI	Água de Abastecimento Tratado

Resultados Analíticos

Compostos Orgânicos Voláteis

Parâmetro	Unidade	Resultado	LQ	VMP ⁽¹⁾	Metodologia	Final Ensaio
Clorobenzeno (Mono)	µg/L	<3	3	120	PO-102	04/01/2019

Inorgânicos

Parâmetro	Unidade	Resultado	LQ	VMP ⁽¹⁾	Metodologia	Final Ensaio
Alcalinidade Total	mg/L	25,67	0,5	NA	PO-001	0
Amônia	mg/L	6,208	0,2	1,5	PO-039	07/01/2019
Cianeto total	mg/L	< 0,02	0,02	0,07	PO-004	26/12/2018
Cloreto	mg/L	190,9	0,1	250	PO-005	26/12/2018
Cor Aparente	uH	< 5	5	15	PO-007	27/12/2018
Demanda Química de Oxigênio	mg/L	13,66	13	NA	PO-036	26/12/2018
Dureza Total	mg/L	34,3	1,5	500	PO-011	26/12/2018
Fluoreto	mg/L	< 0,1	0,1	1,5	PO-062	28/12/2018
Nitrato	mg/L	0,597	0,1	NA	PO-017	26/12/2018
Nítrito	mg/L	0,289	0,01	NA	PO-018	26/12/2018
Sólidos Sedimentáveis	mL/L	< 0,1	0,1	NA	PO-024	03/01/2019



RELATÓRIO DE ENSAIO - R. E. 091309/2018.1

Sólidos Suspensos	mg/L	< 10	10	NA	PO-025	27/12/2018
Sólidos Totais Dissolvidos	mg/L	112	12	1000	PO-038	27/12/2018
Subst. que reagem ao azul de metileno-Surfactantes	mg/L	0,32	0,2	0,5	PO-030	26/12/2018
Sulfato	mg/L	4,74	2	250	PO-027	09/01/2019
Sulfeto de Hidrogênio	mg/L	< 0,1	0,1	0,1	PO-028	07/01/2019
Turbidez	uT	< 1	1	5	PO-031	11/01/2019

Metais

Parâmetro	Unidade	Resultado	LQ	VMP ⁽¹⁾	Metodologia	Final Ensaio
Alumínio	mg/L	< 0,05	0,05	0,2	PO-091	03/01/2019
Antimônio	mg/L	< 0,005	0,005	0,005	PO-091	03/01/2019
Arsênio	mg/L	< 0,01	0,01	0,01	PO-091	03/01/2019
Bário	mg/L	0,017	0,01	0,7	PO-091	03/01/2019
Cádmio	mg/L	< 0,004	0,004	0,005	PO-091	03/01/2019
Chumbo	mg/L	< 0,006	0,006	0,01	PO-091	03/01/2019
Cobre	mg/L	< 0,01	0,01	2	PO-091	03/01/2019
Cromo	mg/L	< 0,009	0,009	0,05	PO-091	03/01/2019
Ferro	mg/L	< 0,06	0,06	0,3	PO-091	03/01/2019
Fósforo	mg/L	< 0,1	0,1	NA	PO-091	03/01/2019
Manganês	mg/L	0,03	0,01	0,1	PO-091	03/01/2019
Mercurio	µg/L	< 0,1	0,1	0,001	PO-091	03/01/2019
Níquel	mg/L	< 0,01	0,01	0,07	PO-091	03/01/2019
Selênio	mg/L	< 0,01	0,01	0,01	PO-091	03/01/2019
Sódio	mg/L	102,9	0,6	200	PO-091	08/01/2019
Zinco	mg/L	< 0,05	0,05	5	PO-091	03/01/2019

Microbiológico

Parâmetro	Unidade	Resultado	LQ	VMP ⁽¹⁾	Metodologia	Final Ensaio
Coliformes Termotolerantes	em 100 mL	Presença	NA	NA	PO-054	03/01/2019
Coliformes Totais	em 100 mL	Presença	NA	Ausência em 100 mL	PO-054	22/12/2018

(1) Portaria de Consolidação Nº 5 de 2017

Relato de opiniões / Interpretações

As opiniões e interpretações expressas abaixo não fazem parte do escopo da acreditação deste laboratório.



RELATÓRIO DE ENSAIO - R. E. 091309/2018.1

Referências Técnicas

PO-102 - SMWW 23ª Ed. 2017 - Method 6410B/EPA 8260C, 2006/EPA 5120A, 2003/EPA3510C, 1996/EPA 8270D, 2007/PO-102 Rev. 7.
 PO-001 - SMWW 22ª Ed.2012. Method 2320 B.
 PO-039 - SMWW 23ª Ed.2017 Method 4500-Norg B e C e Método Colorimétrico 18ª Ed. Método 4500-NH3 B e C.
 PO-004 - SMWW 23ª Ed. 2017, Method 4500-CN-C e E.
 PO-005 - SMWW 23ª Ed.2017, Method 4500 B
 PO-007 - SMWW, 23ª Ed 2017, Method 2120 C.
 PO-036 - SMWW, 23ª Ed. 2017, Method 5220 D.
 PO-011 - SMWW 23ª Ed. 2017. Method 2340C
 PO-062 - SMWW 23ª Ed. 2017, Method 4500-F, B/D.
 PO-017 - ABNT NBR 12620/92
 PO-018 - SMWW 23ª Ed. 2017. Method 4500-NO2 B.
 PO-024 - SMWW, 23ª Ed. 2017., Method 2540 F.
 PO-025 - SMWW 23ª Ed. 2017. Method 2540 D e E.
 PO-038 - SMWW, 23ª Ed. 2017, Method 2540 C
 PO-030 - SMWW, 23ª Ed. 2017, Method 5540 C.
 PO-027 - SMWW 23ª Ed. 2017. Method 4500-SO4-2 E.
 PO-028 - SMWW, 23ª Edição 2017, Método 4500-S2- H.
 PO-031 - SMWW 23ª Ed. 2017, Method 2130 B
 PO-091 - SMWW, 23ª Ed, Mét 3030I e 3120B/ EPA Mét 3015 A e 6010 C,2007/PO-091 Rev.11.
 PO-054 - SMWW, 23ª Ed.2017, Method 9223B

Dados de amostragem

Coleta realizada pelo Cliente
 Condições ambientais: NI
 Temperatura da amostra: NI
 Temperatura do ar: NI
 Profundidade: NI m
 Cloro residual livre: NI
 Amostrado por: NI
 pH: NI
 Resultados dos ensaios aplicam-se a amostra conforme recebido

Legenda

(C) - Ensaio realizado em campo
 IM - Incerteza de medição
 LD - Limite de detecção
 LQ - Limite de quantificação
 NA - Não aplicável
 NI - Não informado
 NMP - Número Mais Provável
 SMWW - Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water
 UFC - Unidade formadora de colônia
 VMP - Valor máximo permitido

Declaração de Conformidade

VR ⁽¹⁾: O(s) parâmetro(s) Amônia, Coliformes Totais não atende(m) aos padrões estabelecidos pelo(a) Portaria de Consolidação Nº 5 de 2017.

Ressalva

A amostra está fora da temperatura de preservação conforme Tabela 1060-1 do Standard Methods 23ª Edição, podendo afetar a validade dos ensaios.



RELATÓRIO DE ENSAIO - R. E. 091309/2018.1

Emenda

Relatório revisado para o parâmetro turbidez por erro de digitação .

Considerações Finais

Os resultados das análises referem-se somente aos itens de ensaio analisados. Este relatório de ensaio não pode ser alterado e nem reproduzido de forma parcial.

Este relatório de ensaio cancela e substitui o relatório R. E. 091309/2018, emitido em 10/01/2019.

O plano de amostragem e o procedimento de amostragem são de responsabilidade do cliente.

Incerteza de Medição: A incerteza expandida de medição relatada (U) é declarada como incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência "k", que para a distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

Responsáveis pela(s) Análise(s)

Edú Ricardo Beltrame
Responsável Técnico
CRQ 05301723
Assinado eletronicamente

Giovani Zandoná
Signatário autorizado
Assinado eletronicamente

Final do Relatório de Ensaio

Código de Validação: 0fb323a4170f7ada25769b8ce6dc632f. A verificação deste Relatório de Ensaio poderá ser realizada através endereço "labonline.econsulting.com.br", selecionando a opção "Validar Relatório".