

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

LAURA GOTELIP OLIVEIRA

TRATAMENTO DO REJEITO DE MINERAÇÃO

Uberlândia
Minas Gerais - Brasil
Novembro/2019

LAURA GOTELIP OLIVEIRA

TRATAMENTO DO REJEITO DE MINERAÇÃO

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Instituto de Ciências
Agrárias, da Universidade Federal de
Uberlândia, para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Sueli Moura Bertolino

Uberlândia
Minas Gerais - Brasil
Novembro/2019

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 .Baldes com amostras de rejeito.....	16
Figura 2 . Amostra de rejeito.....	16
Figura 3 . Fluxograma das Etapas de caracterização e concentração do material.....	17
Figura 4 . Peneira de malha 106 μ m.....	18
Figura 5 . Equipamento Riffles.	19
Figura 6 . <i>D2 Phaser</i>	19
Figura 7 . Equipamento Satmagan.....	20
Figura 8 . Equipamento Picnômetro.....	21
Figura 9 . Equipamento <i>WHIMS</i> GS-50.	22
Figura 10 . Equipamento <i>Davis Tube</i>	23
Figura 11 . Equipamento de Célula de Flotação.....	24
Figura 12 . Equipamento Mixer Mill MM 400.	24
Figura 13 .Equipamento para determinação do tamanho das partículas denominado <i>Malvern</i>	25
Figura 14 . Peneira vibratória suspensa.	25
Figura 15 . Teste Líquido Denso.	26
Figura 16 . Fluxograma Circuito 1-Teste Confirmatório.	28
Figura 17 .Fluxograma Circuito 2-Teste Confirmatório.	29
Figura 18 . Fluxograma Circuito 3-Teste Confirmatório.	30
Figura 19 . Fluxograma Circuito 4-Teste Confirmatório.	31
Figura 20 . Fluxograma Circuito Magnético 1-Teste Otimização.....	33
Figura 21 . Fluxograma Circuito Magnético 2-Teste Otimização.....	34
Figura 22 . Fluxograma Circuito Magnético 3-Teste Otimização.....	35
Figura 23 . Fluxograma Circuito Magnético 4-Teste Otimização.....	36
Figura 24 . Fluxograma Circuito Flotação-Teste Otimização.	38
Figura 25 . Size by Size do rejeito.....	40
Figura 26 .Resultado Difração por raios.....	41
Figura 27 . Difratograma de raios-X do rejeito.	41
Figura 28 . Grau de liberação por faixas de tamanho.....	42
Figura 29 . Partículas Liberadas por Fração de Tamanho.....	43
Figura 30 . Curva de correlação-teor de ferro e densidade.....	44
Figura 31 . Curva de correlação-teor de ferro e teor de sílica.	44
Figura 32 . Resultados Circuito de testes confirmatórios 1. A linha vermelha representa o teor esperado de ferro e a linha azul o teor esperado de quartzo.	47
Figura 33 . Resultados Circuito de testes confirmatórios 2.....	48
Figura 34 . Resultados Circuito de testes confirmatórios 3.....	49
Figura 35 .Resultados Circuito de testes confirmatórios 4.....	50
Figura 36 .PSDs dos Produtos de Moagem.	52
Figura 37 .Características dos Produtos da Moagem.	52
Figura 38 .Circuito de Otimização 1- Balanço de Massa.....	53
Figura 39 .Circuito de Otimização 2- Balanço de Massa.....	54
Figura 40 . Concentrado do <i>WHIMS</i> rougher.	54
Figura 41 .Circuito de Otimização 3- Balanço de Massa.....	55
Figura 42 .Circuito de Otimização 4 - Balanço de Massa.....	56
Figura 43 .Circuito de Flotação- Balanço de Massa.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros WHIMS-Teste Exploratório.	27
Tabela 2. Parâmetros Circuito 1-Teste Confirmatório.	28
Tabela 3. Parâmetros do Circuito 2-Teste Confirmatório.	29
Tabela 4. Parâmetros Circuito 3-Teste Confirmatório.	31
Tabela 5. Parâmetros Circuito 4-Teste Confirmatório. Produto da moagem P80 igual a 75µm.	32
Tabela 6. Parâmetros Circuito Magnético 1-Teste Otimização. Produto do moinho P80 igual a 75µm.	33
Tabela 7. Parâmetros aplicado no Circuito Magnético 2 do teste de otimização. Produto do moinho P80 igual a 75µm.	35
Tabela 8. Parâmetros Circuito Magnético 3-Teste Otimização. Produto do moinho P80 igual a 75µm.	36
Tabela 9. Parâmetros Circuito Magnético 4-Teste Otimização. Produto do moinho P80 igual a 75µm.	37
Tabela 10. Parâmetros Circuito Flotação-Teste Otimização.	39
Tabela 11. Resultados dos testes Heavy Liquid.	45
Tabela 12. Resultados dos testes exploratórios no WHIMS.	46
Tabela 13. Resultados do estudo MIMS.	51
Tabela 14. Size by Size do Concentrado do WHIMS Rougher.	55
Tabela 15. Comparação dos Circuitos de Separação Magnética.	57
Tabela 16. Comparação entre Circuito de Separação Magnética e Flotação.	58

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. OBJETIVO GERAL.....	10
2.1. Objetivos específicos.....	10
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	15
4.1. Coleta das amostras	15
4.2. Caracterização	17
4.2.1. Size by Size	17
4.2.2. Difração de Raios-X	19
4.2.3. Satmagan.....	19
4.2.4. Liberação	20
4.2.5. Densidade.....	20
4.3. Circuitos de Concentração.....	21
4.3.1. Equipamentos.....	21
4.3.2. Testes Exploratórios	25
4.3.3. Testes Confirmatórios	27
4.3.4. Testes de Otimização	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1. Caracterização do rejeito da mina	40
5.1.1. Size by Size	40
5.1.2. Difração por raios	41
5.1.3. Liberação	41
5.1.4. Satmagan.....	43
5.1.5. Densidade.....	43
5.2. Testes Exploratórios	45
5.2.1. Heavy Liquid	45
5.2.2. WHIMS	45
5.3. Testes Confirmatórios	47
5.3.1. Circuito 1	47
5.3.2. Circuito 2.....	48
5.3.3. Circuito 3.....	48
5.3.4. Circuito 4	49
5.4. Testes de Otimização.....	50
5.4.1. MIMS	50
5.4.2. Moagem	51
5.4.3. Circuito de Separação Magnética 1.....	53
5.4.4. Circuito de Separação Magnética 2.....	53

5.4.5.	Circuito de Separação Magnética 3.....	55
5.4.6.	Circuito de Separação Magnética 4.....	56
5.4.7.	Circuito de Flotação.....	57
6.	CONCLUSÃO.....	59
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

RESUMO

A mina em estudo possui recursos minerais de 5,6 bilhões de toneladas de minério de ferro. Produz 26 milhões de toneladas de concentrado por ano e o concentrado final apresenta teores de ferro superiores a 66% de Fe. Por outro lado, 45 milhões de toneladas de rejeitos são descartados todos os anos sem tratamento adicional. Apesar disso, é possível observar uma pequena quantidade de óxidos de ferro no interior deste material, que pode ter algum potencial de recuperação. Pensando nisso, iniciou-se um estudo com o objetivo de recuperar os óxidos de ferro dos rejeitos finais dessa mina, e ao mesmo tempo reutilizar os rejeitos gerados, diminuindo assim, os problemas ambientais. A partir deste estudo, foi possível observar que o material <106µm apresenta um bom potencial para concentração, uma vez que essa fração de tamanho mostra um grau considerável de Fe (23,55%), pouco SiO₂ (65,00%) e alto grau de liberação. Para avaliar o comportamento do material dentro de um processo de concentração, circuitos de separação magnética e de flotação foram realizados com o material <106 µm. O objetivo era atingir concentrados com mais de 66% de Fe e menos de 4% de SiO₂. Em um primeiro momento, um circuito com dois estágios de concentração (*rougher* e *cleaner*) foi avaliado, mas a quantidade de magnetita presente no material perturbou o circuito, levando a inclusão de um estágio MIMS no processo. Outro ponto observado durante o projeto foi a necessidade de aumentar o grau de liberação do concentrado do *rougher* para alcançar a qualidade desejada no concentrado final, que foi resolvido incluindo uma etapa de moagem no circuito. O circuito que apresentou os melhores resultados foi composto pelo estágio MIMS (2000 G), estágio WHIMS *rougher* (30% de sólidos, matriz de 1,5 mm, 10000 G e 1000 mL de água para lavagem) e um estágio de peneiramento (para corte a fração > 75µm do concentrado do WHIMS *rougher*), seguida de uma etapa de moagem (para moer este material a um P80 de 75µm e realimentá-lo para o WHIMS *rougher*). Com esse circuito foi possível produzir um concentrado com 67,3% de Fe e 3,87% de SiO₂, com recuperação de massa de 30,2% e recuperação de Fe de 87,8%. Alguns testes de flotação também foram realizados, mas devido a restrições de massa não foi possível realizar um estudo detalhado. O EDA foi usado como coletor e o amido como depressor. O circuito avaliado foi composto por estágios *rougher* (200g/t de coletor, 300 g/t de depressor, pH 10,5 e 35% de sólidos na polpa) e estágios *cleaner* (100g/t de coletor, 400 g/t de depressor, pH 10,5 e 35% de sólidos em polpa) e produziu um concentrado com 65,63% de Fe e 5,57% de SiO₂, com recuperação de massa de 30,8% e recuperação de Fe de 91,4%.

Palavras-chaves: Rejeitos, Concentrados, WHIMS *Rougher*, WHIMS *Cleaner*, MIMS, Flotação, Teores.

ABSTRACT

The mine in study have mineral resources of 5,6 billion tons of iron ore. Produces 26 million tons of concentrate per year and the final concentrate presents iron grades higher than 66% Fe. On the other hand, 45 million tons of tailings are discarded every year with no additional treatment. Despite this, it is possible to observe a small quantity of iron oxides inside the material, which may have some potential to be recovered. Thinking in that, a study started with the objective of recover the iron oxides from final tailings. From the study, it was possible to observe that material $<106\mu\text{m}$ presents a good potential to be concentrated once this size fraction shows a considerable Fe grade (23.55%), not so high SiO_2 (65.00%) and a high liberation degree. To assess material behavior within a concentration process, flotation and magnetic separation circuits were performed with $<106\mu\text{m}$ material. The objective was o achieve concentrates with more than 66% Fe and less than 4% SiO_2 . Some circuits of magnetic separation were evaluated. In a first moment, a circuit with two stages of concentration (rougher and cleaner) was evaluated, but the amount of magnetite present in the material disturbed the circuit, leading to the inclusion of a MIMS stage in the process. Another point observed during the project was the necessity to increase liberation degree in rougher concentrate to achieve the desired quality in concentrate, which was solved including a grinding stage in the circuit. Finally, 3 different circuits of magnetic separation produced concentrates with more than 66%Fe. Among the three circuits, the one that presented the best results was composed by MIMS stage (2000 G), WHIMS rougher stage (30% of solids, 1.5 mm matrix, 10000 G and 1000mL of water for washing) and a screening stage (to cut the fraction $>75\mu\text{m}$ of WHIMS rougher concentrate) followed by a grinding stage (to grind this material to a P80 of $75\mu\text{m}$ and refeed it into WHIMS). Using this circuit was possible to produce a concentrate with 67.3% Fe and 3.87% SiO_2 , with a mass recovery of 30.2% and Fe recovery of 87.8%. Some flotation tests were also performed but due to mass restrictions was not possible to perform a detailed study. EDA was used as collector and Starch as depressant. The circuit evaluated was composed by rougher (200g/t of collector, 300 g/t of depressant, pH 10.5 and 35% of solids in pulp) and cleaner stages (100g/t of collector, 400 g/t of depressant, pH 10.5 and 35% of solids in pulp) and produced a concentrate with 65.63% Fe and 5.57% SiO_2 , with a mass recovery of 30.8% and Fe recovery of 91.4%.

Keywords: Tailings, Concentrate, WHIMS Rougher, WHIMS Cleaner, MIMS, Flotation, Content.

1. INTRODUÇÃO

O mundo da mineração está em constante funcionamento e, ao mesmo tempo em que este setor industrial retira dos minérios matérias primas essenciais para o mundo moderno, gera também toneladas de material sem valor econômico, os chamados rejeitos. O tema dessa pesquisa será a reutilização de uma parte do rejeito gerado em uma grande Mina de minério de ferro.

A grande maioria das mineradoras de ferro existentes deposita o rejeito gerado em barragens e sem nenhum tratamento adicional, já que esse tipo de material não tem valor econômico e, portanto, só representa custos para a operação. Geralmente, estes rejeitos estão em forma de lama, pois foram submetidos a um processo de beneficiamento, que é quando ocorre a separação minério/rejeito pela rota hidrometalúrgica. A deposição desse material é um problema, devido à possibilidade de rompimento de barragens, causando impactos ambientais, sociais, à saúde humana e a economia. Um exemplo recente, foi o rompimento de uma barragem de rejeitos de minério de ferro no município de Mariana, Minas Gerais, ocorrido em 5 de novembro de 2015, causando um dos piores desastres ecológicos no Brasil. E o mesmo desastre ocorreu quatro anos depois, em Brumadinho, Minas Gerais. Após essa ocorrência, os estudos e a preocupação com a deposição e uso de rejeitos vêm aumentando cada vez mais. Outro ponto que fomenta os estudos com rejeitos é o fato de que ao longo do tempo os recursos minerais são mais complexos e com menores teores de minerais bons e úteis, tornando atrativos recuperar materiais valiosos provenientes de rejeitos gerados nas operações atuais e antigas áreas de armazenamento de rejeitos.

Portanto, o presente estudo vai nessa direção com o objetivo de criar valor a partir dos rejeitos atualmente descartados em uma das maiores mina do mundo. Nesse sentido, o projeto pode ajudar a aumentar a produção dessa planta e reduzir a geração de rejeitos, o que também significa redução nas questões ambientais relacionadas à eliminação de rejeitos (menos estresse na barragem e menor risco de colapso).

A pesquisa é de grande interesse, pois a tentativa de reutilização dos rejeitos será através da concentração do ferro existente nessa parcela até então tida como sem nenhum valor econômico. Assim, a empresa lucrará, e ao mesmo tempo reduzirá riscos ambientais com a deposição de grandes quantidades de rejeitos em barragens, que não são seguras.

2. OBJETIVO GERAL

O objetivo desta pesquisa é tratar o rejeito de uma mina de ferro através de rotas de beneficiamento mineral.

2.1. Objetivos específicos

- Caracterizar a amostra de rejeito a ser estudada, realizando todos os procedimentos de caracterização, bem como: análise química, estudo de liberação das partículas e análise de tamanho. O conhecimento da caracterização certificará se é possível ou não beneficiar o rejeito em questão.
- Definir uma melhor rota de beneficiamento, podendo ser rota de separação magnética, de flotação ou até mesmo de separação por gravidade. Com o objetivo de concentrar o minério de ferro presente neste rejeito, recuperando a maior parte possível desse material.
- Conseguir um concentrado final com 67% de teor de Ferro e 4% de teor de Sílica.
- Estimar a recuperação dos rejeitos gerados.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

A relação entre sociedade e meio ambiente sempre foi muito importante. O meio ambiente é a fonte de bens e serviços que sustenta as várias necessidades dos seres humanos. Todas as dezessete categorias de necessidades humanas conforme delineado nos objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU (ODSs), nomeadas como erradicação da pobreza; fome zero; boa saúde e bem-estar; educação de qualidade; igualdade de gênero; água limpa e saneamento; energia acessível e limpa; emprego digno e crescimento econômico; indústria, inovação e infraestrutura; redução das desigualdades; cidades e comunidades sustentáveis; consumo e produção sustentáveis; combate às alterações climáticas; vida de baixo da água; vida sobre a terra; paz, justiça e instituições forte; e parceria em prol das metas são abordados pelo meio ambiente (BRASIL. Ministério das Relações Exteriores). Consequentemente, uma ampla gama de setores de desenvolvimento foi estabelecida em todo o mundo para atender às necessidades acima. E todos esses setores dependem inteiramente do meio ambiente para o seu funcionamento.

Atividades como agricultura, pesca, mineração, turismo, transporte e comunicação, geralmente estão dentro ou muito perto de ambientes como florestas, rios, lagos, zonas úmidas e zonas de criação de animais selvagens. E deve-se ter muito cuidado com a interface sociedade, meio ambiente e desenvolvimento, já que esta representa um grande risco de danos ambientais. Esse risco continua a crescer à medida que as demandas da sociedade sobre o meio ambiente aumentam devido ao crescimento populacional (Schaltegger & Wagner, 2006).

A maioria dos setores de desenvolvimento representa um risco potencial significativo de impacto negativo no meio ambiente. No entanto, alguns setores econômicos, como a mineração, representam um risco maior em comparação a outros setores (MWAURA, 2019). A mineração está ligada a vários riscos ambientais devido à escavação, disposição de rejeitos e emissões gasosas. A gestão de resíduos provenientes de diferentes etapas dos processos de mineração é geralmente um grande desafio ambiental em todo o mundo. A preocupação com a conservação ambiental tem levado cada vez mais ao aproveitamento de rejeitos de mineração, quer pelo emprego de novas tecnologias de beneficiamento desses "minérios" de teores mais pobres ou pela utilização dos mesmos para outras aplicações (GOMES, 2011). Sem dúvida alguma, para a verificação da possibilidade do aproveitamento desses rejeitos, faz-se necessária a caracterização tecnológica dos mesmos (caracterização

mineralógica, granulométrica, química e liberação) (REIS, 2005).

A caracterização da amostra é feita a fim de se conhecer o material em análise. A caracterização pode ser comparada com um médico que faz vários exames para avaliar a condição de saúde do seu paciente e assim, propor o melhor tratamento para ele. Neste caso, o paciente é o mineral em estudo e muitos “exames” devem ser feitos para se ter informações necessárias para propor um processo de concentração mais adequado possível (VALADÃO; ARAÚJO, 2007).

A caracterização mineralógica mostra de quais minerais a amostra é composta. A caracterização granulométrica indica o tamanho das partículas, onde através dessa análise é possível saber todas as faixas de tamanho existente e a quantidade de partículas presentes em cada uma dessas faixas. A caracterização química informa tanto qualitativamente quanto quantitativamente a presença de todos os elementos químicos na amostra. Já a liberação indica se as partículas estão mistas ou liberadas, ou seja, se existem partículas compostas apenas por hematita e outras apenas por quartzo, estando assim liberadas, ou se existem partículas mistas, compostas por quartzo e hematita, por exemplo.

Neste estudo, a caracterização mostrou que os resíduos tratados tinham uma composição de noventa e nove por cento de quartzo (que não possui valor econômico) e hematita (mineral de ferro, que possui alto valor econômico). Por isso, algumas rotas para tentar separar esses dois materiais e então recuperar o ferro presente nesse rejeito e diminuir a quantidade de material depositado em barragens foram traçadas.

Um dos métodos de concentração existente é o separador magnético. Esses separadores utilizam o comportamento das partículas minerais sob a ação de um campo magnético como propriedade diferenciadora. E é muito utilizado em separações minerais do tipo magnetita e/ou hematita de quartzo (VALADÃO; ARAÚJO, 2007). O campo de aplicação da separação magnética é muito amplo. É usada na concentração de vários minerais ferrosos e não ferrosos (LUZ, 2010)

A propriedade de um mineral que determina sua resposta a um campo magnético é chamada de susceptibilidade magnética. Os materiais podem ser separados em três grupos, ferromagnéticos, que são facilmente atraídos pelo ímã; paramagnéticos, que são atraídos fracamente e os diamagnéticos, que não são atraídos pelo ímã (da LUZ, 2004).

Os ferromagnéticos se caracterizam por ter uma alta susceptibilidade às forças magnéticas e por reter o magnetismo quando afastados de um campo magnético; a magnetita é um exemplo de mineral ferromagnético. Os paramagnéticos, quando submetidos a um

campo magnético, tendem a alinhar as linhas de força que são atraídas para os pontos de maior intensidade deste campo, a hematita é um mineral paramagnético. Os diamagnéticos são repelidos, ao longo das linhas da força magnética, ao ponto em que a intensidade desse campo é menor, o quartzo é um mineral diamagnético (VALADÃO; ARAÚJO, 2007). Por isso, este tipo de separação é muito usado para separar hematita e quartzo, e por esse motivo, esse tipo de separação foi usado dentro das rotas propostas para beneficiar o rejeito da mina em estudo.

Uma amostra contendo partículas magnéticas (paramagnéticas e ferromagnéticas) e não magnéticas (diamagnéticas) deve ser submetida a uma região com forças magnéticas para serem separadas. Uma região no espaço onde existam forças magnéticas atuantes é chamada de campo magnético. Se uma partícula é colocada num campo magnético de intensidade H , no seu interior será gerado um campo magnético induzido, de intensidade B . A intensidade do campo induzido é dada por $B = \mu H$, onde μ é permeabilidade magnética do material. Quando $\mu > 0$, o campo induzido tem o mesmo sentido que o campo indutor e os dois campos somam-se no interior da partícula, esses são as partículas paramagnéticas; quando $\mu < 0$, o campo induzido tem o sentido oposto ao do campo indutor e o campo induzido atenua o campo final do interior da partícula, esses são os diamagnéticos; e quando $\mu \gg 0$, trata-se de um caso particular, em que o μ é muito grande, o campo induzido reforça energeticamente o campo indutor no interior da partícula, são os ferromagnéticos (CHAVES, 2004).

Uma partícula submetida a um campo magnético apresenta um comportamento que depende fundamentalmente da geometria do campo e da permeabilidade da partícula. O fluxo magnético que atravessa a partícula é a soma dos fluxos decorrentes dos campos indutor e induzido. Como nas substâncias diamagnéticas os dois campos têm sentidos opostos, a densidade de fluxo diminui e as linhas de forças são dispersadas. Nas substâncias paramagnéticas, por sua vez, ocorre o contrário: os dois campos se somam e as linhas de força se concentram. Se a substância for ferromagnética, isso acontecerá intensamente (CHAVES, 2004).

Para haver separação magnética, o equipamento de separação deve prover um campo convergente, ou seja, deve ter um gradiente de campo. Em um campo convergente, as linhas de campo convergem em direção ao polo afilado (poder das pontas). A partícula paramagnética tende a concentrar as linhas de campo, razão pela qual seu movimento buscará adensar as linhas de campo em seu interior, ou seja, será na direção da ponta. Já a partícula

diamagnética, terá o movimento no sentido contrário.

SANTOS (2003) estudou cinco rotas de concentração em laboratório a partir de uma amostra da barragem de Germano (rejeito de ferro), com composição de 25% Fe e 62,7% SiO₂. As cinco rotas foram: i) Classificação em 37 m (peneira) e concentração magnética em um estágio; ii) Classificação em 37 m (peneira) e concentração magnética em dois estágios; iii) Classificação em 74 m (peneira), deslamagem e flotação; iv) Classificação em 74 m (peneira) e concentração magnética em um estágio e v) Concentração magnética em dois estágios *rougher* e *cleaner*. Em todas as rotas o autor obteve teores de Fe acima de 66%.

O desenvolvimento da separação magnética evoluiu para uma tecnologia que permite separar, desde materiais fortemente magnéticos a fracamente magnéticos, mesmo que sob a forma de partículas finamente dispersas. Isso resultou no desenvolvimento da separação magnética de alta intensidade (*highintensity wet magnetic separation* - WHIMS) e da separação magnética de média intensidade (*medium intensity magnetic separation* – MIMS), que consegue separar partículas ferromagnéticas de paramagnéticas.

A separação magnética é uma técnica amigável ambientalmente e pode ser usada tanto a seco como a úmido, viabilizando o seu uso em regiões áridas ou onde há disponibilidade de água. O método a seco é usado, em geral, para granulometria grossa e úmido para aquelas mais finas.

Outro método que pode ser usado para separar hematita/quartzo é a flotação. A flotação é um método de separação aplicado a partículas sólidas que exploram diferenças nas características da superfície entre as várias espécies presentes. Diferentes minerais podem ter um grau de hidrofobicidade diferente. As partículas hidrofílicas têm afinidade com a água (molhabilidade) e as partículas hidrofóbicas são o oposto. Em termos de polaridade, os compostos químicos podem ser divididos em polar e não polar. A substância polar tem afinidade com substância polar, e substância não polar tem afinidade com substância não polar. No sistema de flotação, a água é a fase líquida (polar) e o ar é a fase gasosa (não polar). Assim, as partículas hidrofóbicas podem ser caracterizadas pelo fato de possuir uma superfície não polar (mais afinidade com o gás) e partículas hidrofílicas que podem ser caracterizadas por possuir uma superfície polar (mais afinidade com a água). No processo de flotação, uma corrente de ar passa através de uma suspensão aquosa contendo as duas espécies, e as partículas hidrofóbicas são transportadas pelo ar. Este método é mais usado para materiais finos (<150µm) (ARAUJO et al., 2006).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Coleta das amostras

A mina opera 365 dias por ano e tem uma vida útil estimada de 30 anos, com duração até 2045. Os recursos minerais da mina totalizam 5,6 bilhões de toneladas. A produção atual é de 26 milhões de toneladas de concentrado por ano e o concentrado final alcança teores de ferro superiores a 66%.

O concentrado é produzido através de um processo que engloba um estágio de moagem seguido por um circuito de espirais. Todo o material é fragmentado até 1mm e, em seguida, alimentado em um circuito de espirais composto por etapas *rougher*, *cleaner* e *re-cleaner*. Os rejeitos finais são compostos pelos rejeitos da espiral *rougher* e pela fração mais fina dos rejeitos das etapas *cleaner* e *re-cleaner*.

A amostra estudada no presente trabalho corresponde ao *underflow* (UF) do hidrociclone dos rejeitos, representando cerca de 80% de todo o rejeito gerado. Atualmente, 45 milhões de toneladas de rejeitos são descartadas anualmente sem tratamento adicional (aproximadamente 80% de rejeitos grosseiros e 20% de rejeitos finos). Apesar disso, é possível observar uma pequena quantidade de óxidos de ferro nesse material, os quais podem ter algum potencial para serem recuperados. Esta foi a motivação para a realização deste projeto.

A amostra utilizada no projeto foi coletada em fevereiro de 2018 em 32 baldes de 10 a 15 kg (Figura 1).

Figura 1 .Baldes com amostras de rejeito.



Fonte:autora (2018).

O material apresenta cor cinza (Figura 2), sendo possível observar uma pequena quantidade de óxidos de ferro no mesmo.

Figura 2. Amostra de rejeito.

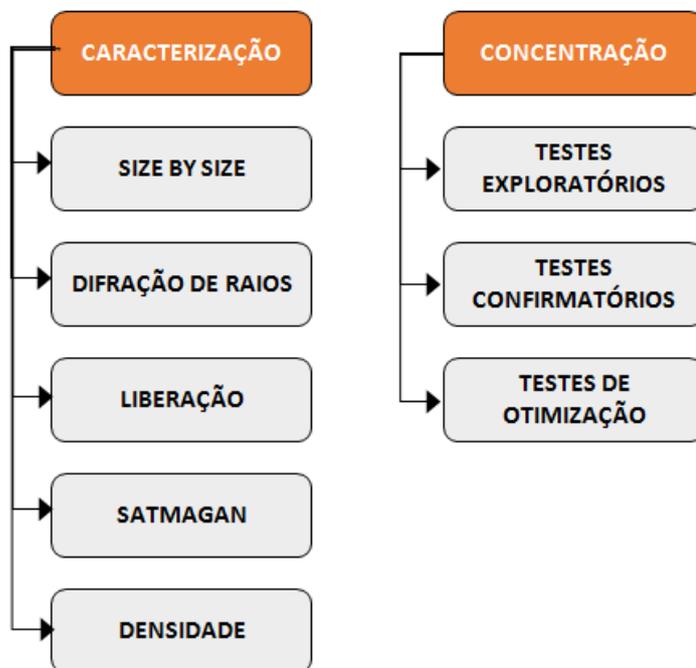


Fonte: autora (2018).

Dois etapas foram realizadas ao longo do projeto: a caracterização, e em seguida o estudo da concentração do material. A Figura 3 apresenta um fluxograma com as atividades

desenvolvidas em cada etapa. A descrição de cada atividade será apresentada na sequência.

Figura 3. Fluxograma das Etapas de caracterização e concentração do material.



Fonte: autora (2018).

4.2.Caracterização

A caracterização do rejeito foi realizada pelos ensaios *Size by size*, para determinação das frações granulométricas do material; pelos testes de difração de raios para identificação dos tipos de minerais presentes; pelo teste de *satmagan* para avaliar a quantidade de magnetita presente na amostra e pelo teste no Picnômetro para avaliar as densidades.

4.2.1. *Size by Size*

Os testes de peneiramento foram realizados utilizando-se peneiras de malhas de 1700 μ m, 1000 μ m, 850 μ m, 600 μ m, 425 μ m, 300 μ m, 212 μ m, 150 μ m, 106 μ m, 75 μ m, 53 μ m, 45 μ m e 38 μ m. Uma das peneiras utilizadas está apresentada na Figura 4.

Figura 4. Peneira de malha 106 μ m.



Fonte: autora (2018).

Em seguida, as frações de cada tamanho foram amostradas e enviadas para análises químicas. O equipamento utilizado para amostragem durante todo o projeto foi o quarteador Jones (*Rifles*) (Figura 5). Uma amostra pode ser definida como uma pequena quantidade, que deve conter todas as características e propriedades existentes na população ou no universo. Pela informação obtida a partir da amostra, é possível tirar conclusões relacionadas à população global a qual a amostra pertence, neste caso, o fluxo amostrado.

Figura 5. Equipamento Riffles.



Fonte: Reimpresso da Gilson Company, 2018.

4.2.2. Difração de Raios-X

As análises de Difração de raios foram realizadas utilizando um equipamento *D2 Phaser*, distribuído pela *Bruker* (Figura 6). Através deste teste, é possível saber quais os minerais estão presentes no material.

Figura 6. *D2 Phaser*.



Fonte: autora (2018).

4.2.3. *Satmagan*

A quantidade de magnetita na amostra foi medida utilizando o equipamento Satmagan. O tempo de medição do Satmagan é de apenas um minuto, através da média de três medidas e usando uma curva de calibração. O princípio por trás do Satmagan é a medição da força que atua na amostra em um campo magnético com um gradiente espacial. O equipamento é mostrado na Figura 7.

Figura 7. Equipamento Satmagan.



Fonte: site do fabricante (disponível em <https://www.hrt-labortechnik.com/produkte/geraete/satmagan/>)

4.2.4. Liberação

O estudo foi realizado usando uma lupa óptica modelo S8APO. Foi-se analisado em média 600 partículas para cada fração de tamanho $>850 \mu\text{m}$, $850-600 \mu\text{m}$, $600-425 \mu\text{m}$, $425-300 \mu\text{m}$, $300-212 \mu\text{m}$, $212-150 \mu\text{m}$, $150-106 \mu\text{m}$, $106-75 \mu\text{m}$, e $<75 \mu\text{m}$.

4.2.5. Densidade

A densidade do material foi medida no equipamento Picnômetro (Figura 8), sendo usada para determinar o volume real e a densidade real das amostras. O volume real de um sólido é calculado a partir da queda da pressão medida quando se permite que uma quantidade conhecida de gás se expanda para uma câmara que contém a amostra. Assim, o volume verdadeiro obtido por picnometria exclui qualquer volume de poro acessível ao gás.

Figura 8. Equipamento Picnômetro.



Fonte: site do fabricante (disponível em <https://www.micromeritics.com/Product-Showcase/AccuPyc-II-1340.aspx>)

A densidade foi calculada para todos os produtos durante o projeto, pois foi feita uma curva de correlação, que fornece aproximadamente o teor de ferro e sílica antes que os resultados das análises químicas, que são feitas na Espanha e que levam um tempo maior para ficarem prontas, cheguem.

4.3.Circuitos de Concentração

Na etapa de estudo de concentração, vários circuitos foram testados a fim de explorar, confirmar e otimizá-los, para que se chegasse nos melhores resultados possíveis.

4.3.1. Equipamentos

Para realizar estes circuitos, alguns equipamentos foram utilizados: *WHIMS (Wet High Intensity Magnetic Separation)*, *MIMS (Medium Intensity Magnetic Separation)*, Célula de flotação, Mini Moinho, *MALVERN* e peneira vibratória suspensa.

4.3.1.1.WHIMS

O equipamento utilizado para realizar os testes foi o modelo *WHIMS GS-50* (Figura 9), fornecido pela Gaustec. O *WHIMS* é um separador magnético de alta intensidade que tem como propriedade diferenciadora o comportamento das partículas sob uma ação de um campo magnético.

O campo magnético deste separador é produzido por eletro ímãs, que fornecem um alto campo magnético através do qual o minério passa. Portanto, partículas que apresentam suscetibilidade magnética positiva são fixadas às matrizes e recuperadas como concentrado após a desativação do campo magnético, enquanto partículas não magnéticas são

levadas com água e recuperadas como rejeitos (no caso do minério de ferro).

Para preparar a polpa, 40 g de amostra foi adicionado a um béquer de 500 mL, sendo agitados e em seguida alimentados na matriz que separava as partículas paramagnéticas das não magnéticas. Os produtos obtidos foram identificados e secos em estufa de secagem a 120 °C. Após este processo, as amostras foram pesadas, homogeneizadas, divididas e uma alíquota enviada para análises químicas (este processo foi seguido para todos os testes de *WHIMS* realizados neste projeto).

Figura 9. Equipamento *WHIMS* GS-50.



Fonte: autora (2018).

4.3.1.2. *MIMS* - Medium Intensity Magnetic Separation

A separação magnética de médio campo foi realizada com o auxílio do equipamento *Davis Tube*. O *Davis Tube* é um separador magnético de baixo/médio campo (Figura 10). Este equipamento possui um eletroímã que fornece até 4000 Gauss de indução de campo magnético, um mecanismo de agitação acionado por motor e um tubo de separação de vidro. Este tubo está localizado entre os polos do ímã em um ângulo de 45 °. O motor elétrico fornece um mecanismo de agitação que faz o movimento do tubo avançar e retroceder enquanto ele gira simultaneamente. Sob a ação do campo magnético, todas as partículas

magnéticas são coletadas na zona de magnetismo enquanto os não magnéticos são liberados do tubo (Procedimento *Davis Tube*, MMP). Esses testes foram realizados com 35g de cada fração, durante aproximadamente 10 minutos.

Figura 10. Equipamento *Davis Tube*.



Fonte: site do fabricante (disponível em <https://www.eriezlabequipment.com/products/magnetic-separators/davis-tube-testers/>)

4.3.1.3. Célula de Flotação

A flotação é um método de separação aplicado a partículas de sólidos que exploram diferenças nas características da superfície entre as várias espécies presentes. Diferentes minerais podem ter um grau de hidrofobicidade diferente. As partículas hidrofílicas têm afinidade com a água (molhabilidade) e as partículas hidrofóbicas são o oposto. Em termos de polaridade, os compostos químicos podem ser divididos em polar e não polar. A substância polar tem afinidade com substância polar, e substância não polar tem afinidade com substância não polar. No sistema de flotação, a água é a fase líquida (polar) e o ar é a fase gasosa (não polar). Assim, as partículas hidrofóbicas podem ser caracterizadas por apresentarem uma superfície não polar (mais afinidade com gás) e partículas hidrofílicas que podem ser caracterizadas por apresentarem uma superfície polar (maior afinidade com a água). No processo de flotação, uma corrente de ar passa através de uma suspensão aquosa contendo as duas espécies, e as partículas hidrofóbicas são transportadas pelo ar. Este método é mais usado para materiais finos ($<150\mu\text{m}$) (ARAÚJO et al., 2009).

Durante o projeto, a célula utilizada foi a *Floth Flotation Denver* (Figura 11).

Figura 11. Equipamento de Célula de Flotação.



Fonte: autora (2018).

4.3.1.4. Mini Moinho

Foram colocados 10 gramas de material em cada lado (pois é o limite de massa para o equipamento) e foram moídos por 1 minuto para aumentar o grau de liberação da amostra. O MiniMoinho utilizado foi o Mixer Mill MM 400, mostrado na Figura 12.

Figura 12. Equipamento Mixer Mill MM 400.



Fonte: site do fabricante (disponível em <https://www.fishersci.co.uk/shop/products/retsch-mm-400-mixer-mill-9/10573034>)

4.3.1.5. Malvern

Para a análise de tamanho foi utilizado o equipamento *Malvern* (Figura 13), que

utiliza a técnica de difração a laser para medir o tamanho das partículas. A análise é feita medindo a intensidade da luz espalhada quando um feixe de laser passa através de uma amostra particulada dispersa. Estes dados são então analisados para calcular o tamanho das partículas que criaram o padrão de dispersão.

Figura 13. Equipamento para determinação do tamanho das partículas denominado *Malvern*.



Fonte: autora (2018).

Para peneirar amostras pequenas (30 g) foi utilizado um peneirador vibratório suspenso (Figura 14). A amostra foi colocada no peneirador, e então iniciada a vibração. Após 10 minutos, a máquina foi desligada.

Figura 14. Peneira vibratória suspensa.



Fonte: autora (2018).

4.3.2. Testes Exploratórios

Os testes exploratórios foram feitos para conhecer mais sobre o comportamento

do material. Foram escolhidas três faixas de tamanhos diferentes ($<600\mu\text{m}$, entre $600\mu\text{m}$ e $106\mu\text{m}$ e $<106\mu\text{m}$), pois esses tamanhos têm um comportamento diferente em relação aos teores de ferro e sílica.

Assim, os testes WHIMS e Líquido Denso foram realizados a fim de observar o comportamento do material na separação magnética e na separação por gravidade. Após cada teste, a densidade dos produtos foi medida no Picnômetro, amostrada em *Riffles* e enviada para análises químicas.

4.3.2.1. Teste do Líquido Denso

O teste do líquido denso é uma separação por gravidade, que usa um fluido com uma densidade intermediária das espécies minerais a serem separadas, então as partículas mais densas que o fluido afundam, e as menos densas, flutuam.

O teste foi realizado com politungstato de sódio (SPT), que é um líquido pesado e tem uma densidade de $3,1\text{ g/cm}^3$. Por usar líquidos densos, que são tóxicos, todo cuidado foi tomado com segurança, usando viseira, luvas e capuz.

Depois que o líquido denso foi preparado na capela, quatro béqueres foram colocados na bancada e preenchidos com SPT e em seguida, uma amostra original do material nas faixas de tamanhos avaliadas ($> 600\mu\text{m}$; $> 106\mu\text{m}$ $<600\mu\text{m}$ e $<106\mu\text{m}$) foram adicionadas em cada béquer. E aguardou-se o tempo para que a separação ocorresse.

O ferro tem uma densidade de $7,9\text{ g/cm}^3$, o quartzo de $2,65\text{ g/cm}^3$ e o SPT $3,1\text{ g/cm}^3$, portanto, após alguns segundos, o ferro afundou e o quartzo flutuou no líquido, como mostrado na Figura 15.

Figura 15. Teste Líquido Denso.



Fonte: autora (2018).

Para finalizar o teste, o material flutuante foi removido com uma peneira muito fina, e o líquido e o material mais denso separado por filtração com papel de filtro. Após cada teste, a densidade dos produtos foi medida no Picnômetro, amostrada no *Riffles* e enviada para

análises químicas.

4.3.2.2. Separação Magnética por WHIMS

Para avaliar mais sobre o comportamento deste rejeito, foram feitos testes de separação magnética, os testes foram realizados com os tamanhos > 600 μ m, <600 μ m> 106 μ m, <106 μ m e com a amostra global (todos os tamanhos). O campo foi variado para cada tamanho (8000G, 10000G, 12000G) para analisar o que ocorria com a variação deste parâmetro. A Tabela 1 mostra os parâmetros que foram usados para os testes.

Tabela 1. Parâmetros WHIMS-Teste Exploratório.

Teste	Amostra	Tamanho (mm)	Matriz (mm)	Campo (G)	Corrente (A)	% de sólidos	Água para Lavagem (mL)
1	Global Sample	2000	5	8000	5,3	30	500
2	Global Sample	2000	5	10000	6,9	30	500
3	Global Sample	2000	5	12000	8,8	30	500
4	>600 μ m	2000	5	8000	5,3	30	500
5	>600 μ m	2000	5	10000	6,9	30	500
6	>600 μ m	2000	5	12000	8,8	30	500
7	<600 μ m >106 μ m	600	1,5	8000	2,4	30	500
8	<600 μ m >106 μ m	600	1,5	10000	3,2	30	500
9	<600 μ m >106 μ m	600	1,5	12000	4,2	30	500
10	<106 μ m	106	0,5	8000	1,9	30	500
11	<106 μ m	106	0,5	10000	2,7	30	500
12	<106 μ m	106	0,5	12000	4,0	30	500

Fonte: autora (2018).

4.3.3. Testes Confirmatórios

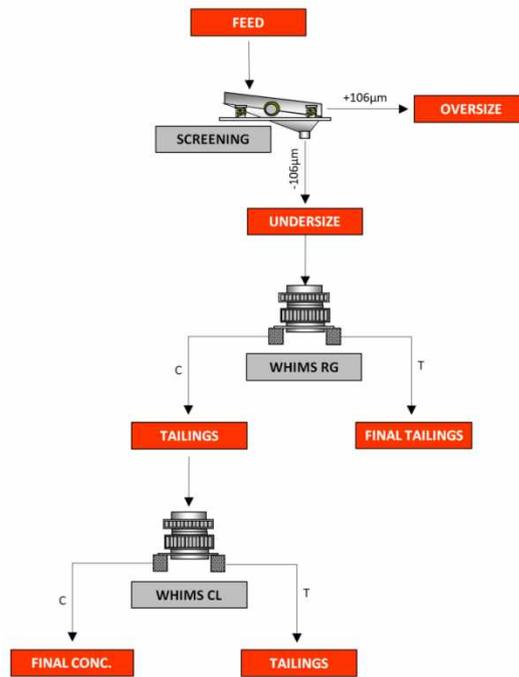
Com a caracterização e os testes exploratórios, foi possível conhecer algumas das propriedades do material. Então, depois disso, os testes confirmatórios foram realizados. Como o material é composto basicamente por hematita e quartzo, esses testes foram realizados pelo WHIMS. Após cada teste, a densidade dos produtos foi medida no Picnômetro, amostrada no Riffles e enviada para análises químicas.

4.3.3.1. Circuito 1

No primeiro circuito, os testes foram realizados com material de tamanho <106 μ m e <150 μ m. A escolha do material de tamanho <106 μ m foi devida às observações da

caracterização, onde esta faixa de tamanho obteve um bom potencial para ser concentrada, já que possui um teor considerável de ferro e teor de sílica não tão alto. Já o material com tamanho $<150\mu\text{m}$ pois, no primeiro momento, pensava-se que na planta de beneficiamento da mina já possuía hidrociclones para esse tamanho, mas depois descobriu-se que a informação não era verdadeira. Então os testes com esse tamanho foram interrompidos.

Figura 16. Fluxograma Circuito 1-Teste Confirmatório.



Fonte: autora, 2018.

Este circuito tem dois estágios, *WHIMS rougher* e *WHIMS cleaner*. Esses termos se diferem apenas pela ordem em que são dispostos no circuito. A Figura 16 mostra o fluxograma desse circuito.

Durante todos os circuitos, alguns parâmetros (campo, % de sólidos, água para lavagem e matriz) foram analisados, e os melhores foram fixados, para ter um teste com o melhor resultado (Tabela 2).

Tabela 2. Parâmetros Circuito 1-Teste Confirmatório.

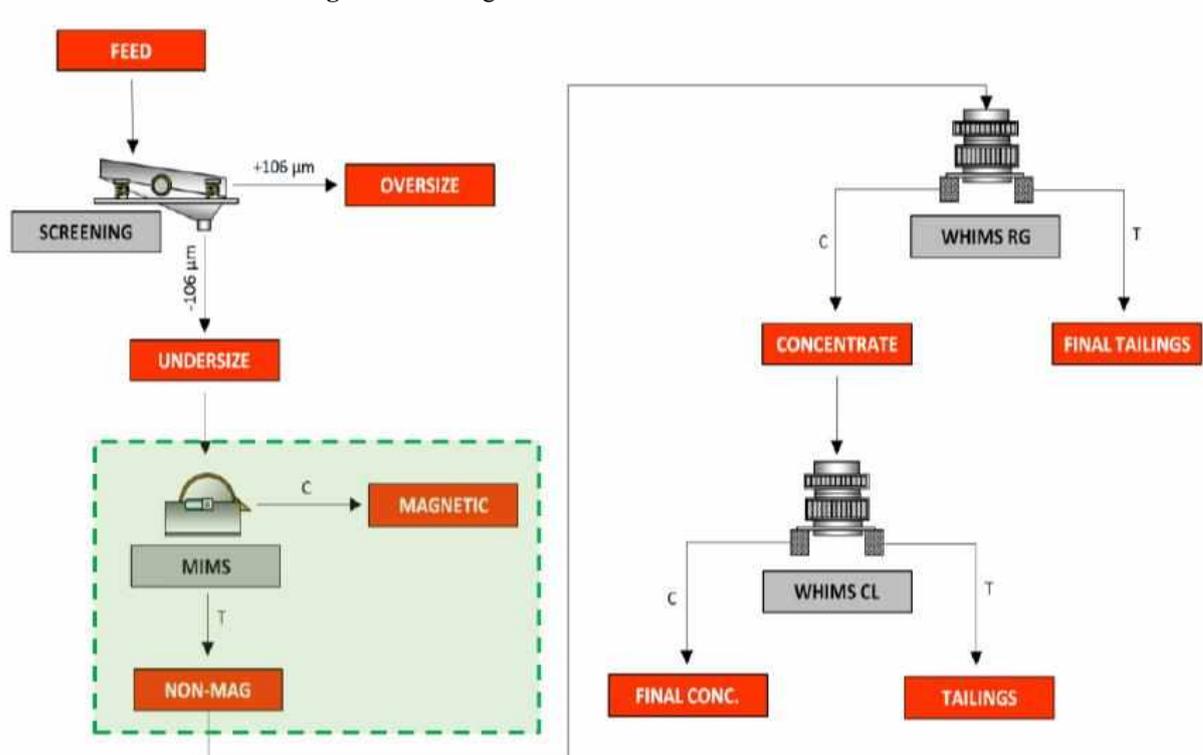
Estágio	Campo (G)	Matriz (mm)	% de Sólidos	Água de Lavagem (mL)
WHIMS Rougher	12000	1,5	30	500
WHIMS Cleaner	6000	1,5	30	500

Fonte: autora, 2018.

4.3.3.2.Circuito 2

Durante os testes do circuito1 houve alguns problemas com a pequena quantidade de magnetita na amostra, o que ocasionou o entupimento da matriz no estágio *cleaner*. Para resolver este problema, foi adicionado um novo estágio *MIMS* no circuito, como apresentado no fluxograma da Figura 17.

Figura 17. Fluxograma Circuito 2-Teste Confirmatório.



Fonte: autora, 2018.

Na primeira etapa, tentando retirar a magnetita (que é um ferromagnético), foi utilizado o *Davis Tube*, um separador magnético de baixo campo. Os parâmetros usados nesses testes estão na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros do Circuito 2-Teste Confirmatório.

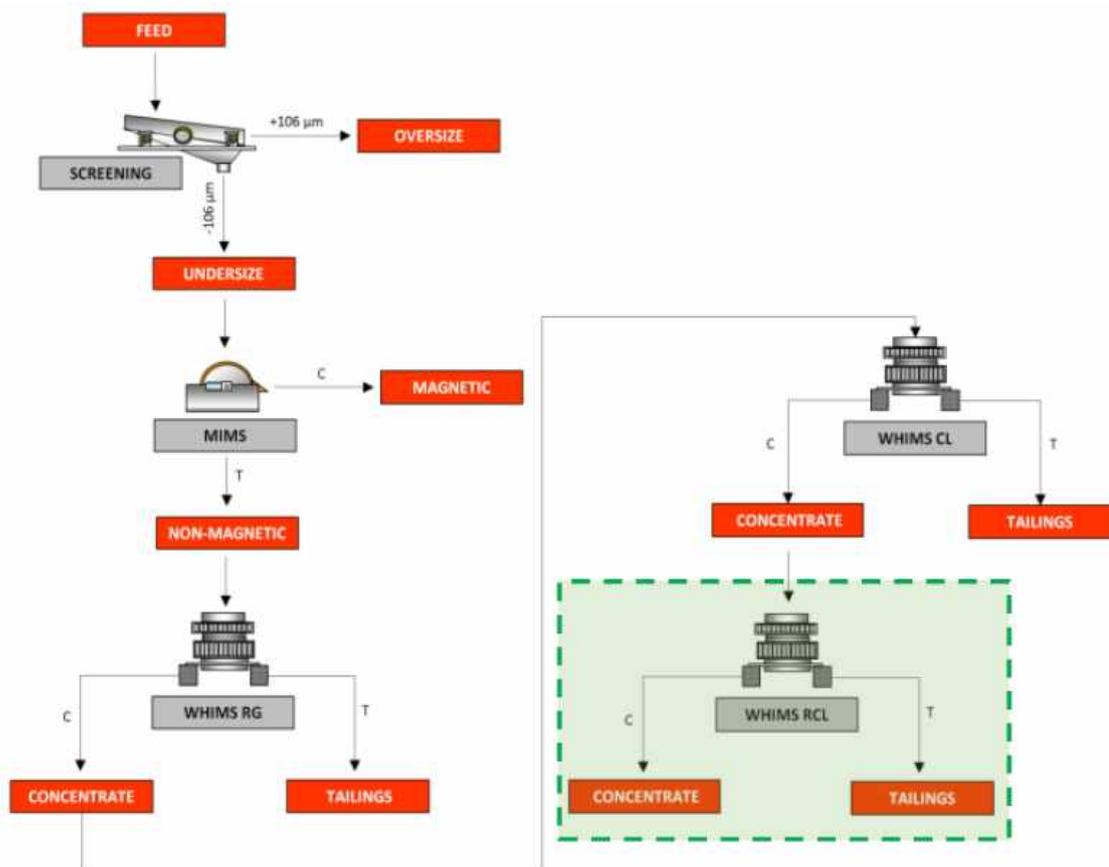
Estágio	Campo (G)	Matriz (mm)	% de Sólidos	Água de Lavagem (mL)
MIMS	4000	-	-	-
WHIMS Rougher	10000	1,5	30	500
WHIMS Cleaner	7000	2,5	30	2000

Fonte: autora, 2018.

4.3.3.3.Circuito 3

Um terceiro estágio foi adicionado ao com o objetivo de aumentar a qualidade do concentrado, sendo o circuito 3 composto por um estágio de *MIMS*, *WHIMS rougher*, *cleaner* e *Recleaner*. O fluxograma deste circuito está representado na Figura 18.

Figura 18. Fluxograma Circuito 3-Teste Confirmatório.



Fonte: autora, 2018.

Os parâmetros usados estão na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros Circuito 3-Teste Confirmatório.

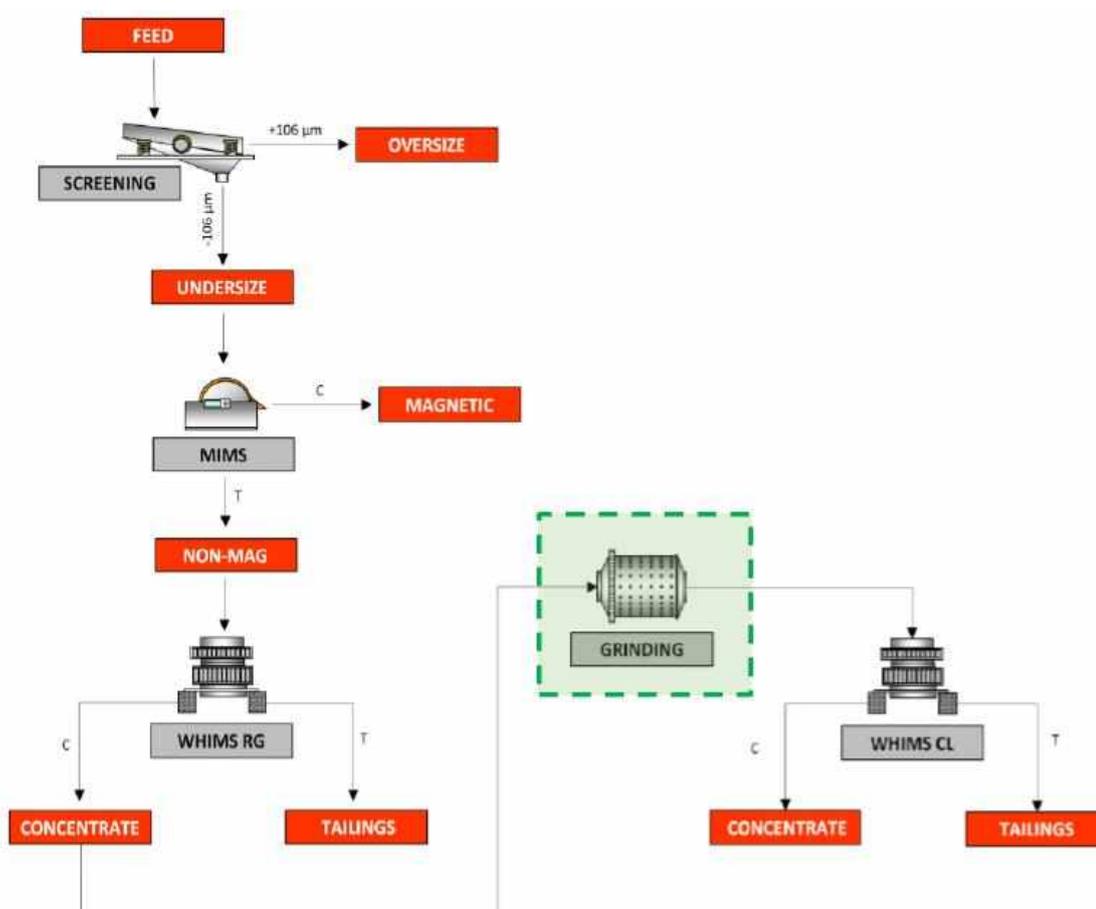
Estágio	Campo (G)	Matriz (mm)	% de Sólidos	Água de Lavagem (mL)
MIMS	4000	-	-	-
WHIMS Rougher	10000	1,5	30	1000
WHIMS Cleaner	7000	1,5	30	2000
WHIMS Recleaner	6000	1,5	30	2000

Fonte: autora, 2018.

4.3.3.4. Circuito 4

Este circuito foi realizado devido à ineficiência do estágio *re cleaner* no circuito 3, devido a problemas de liberação das partículas. Por isso, uma etapa de moagem foi adicionada. O novo circuito foi composto por um estágio de *MIMS*, *WHIMS rougher*, moagem e *WHIMS cleaner* (Figura 19).

Figura 19. Fluxograma Circuito 4-Teste Confirmatório.



Fonte: autora, 2018.

Os parâmetros analisados em cada estágio são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros Circuito 4-Teste Confirmatório. Produto da moagem P80 igual a 75 μ m.

Estágio	Campo (G)	Matriz (mm)	% de Sólidos	Água de Lavagem (mL)
MIMS	4000	-	-	-
WHIMS Rougher	10000	1,5	30	1000
WHIMS Cleaner	7000	1,5	30	2000

Fonte: autora, 2018.

O equipamento usado para moer a amostra foi o Mixer Mill MM 400. E para garantir que o P₈₀ fosse 75 μ m foi usado o *Malvern*.

4.3.4. Testes de Otimização

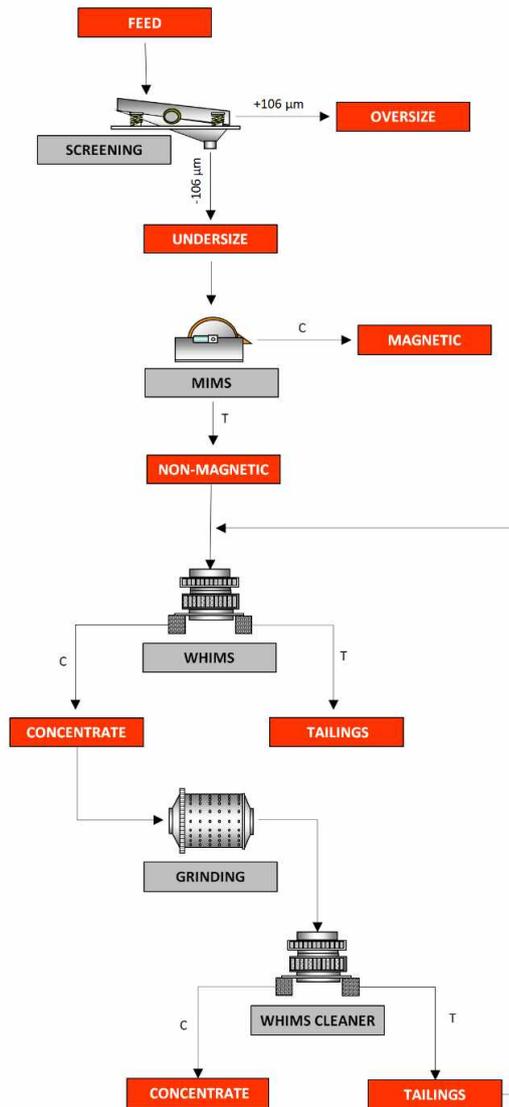
Após avaliar o comportamento do material em circuitos de separação magnética por meio de testes exploratórios e melhorar o desempenho do processo na fase de testes confirmatórios, foram realizados circuitos de otimização para definir o melhor fluxograma para concentrar a amostra de rejeitos da mina em estudo.

O balanço de massa de todos esses circuitos foi realizado no software BILCO.

4.3.4.1. Circuito Magnético 1

O primeiro circuito de otimização foi feito com um estágio de *MIMS*, *WHIMS rougher*, moagem, *WHIMS cleaner*. O rejeito do *WHIMS cleaner* é recirculado para o *WHIMS rougher* (Figura 20).

Figura 20. Fluxograma Circuito Magnético 1-Teste Otimização.



Fonte: autora, 2018.

Os parâmetros usados em cada estágio estão na Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros Circuito Magnético 1-Teste Otimização. Produto do moinho P80 igual a 75µm.

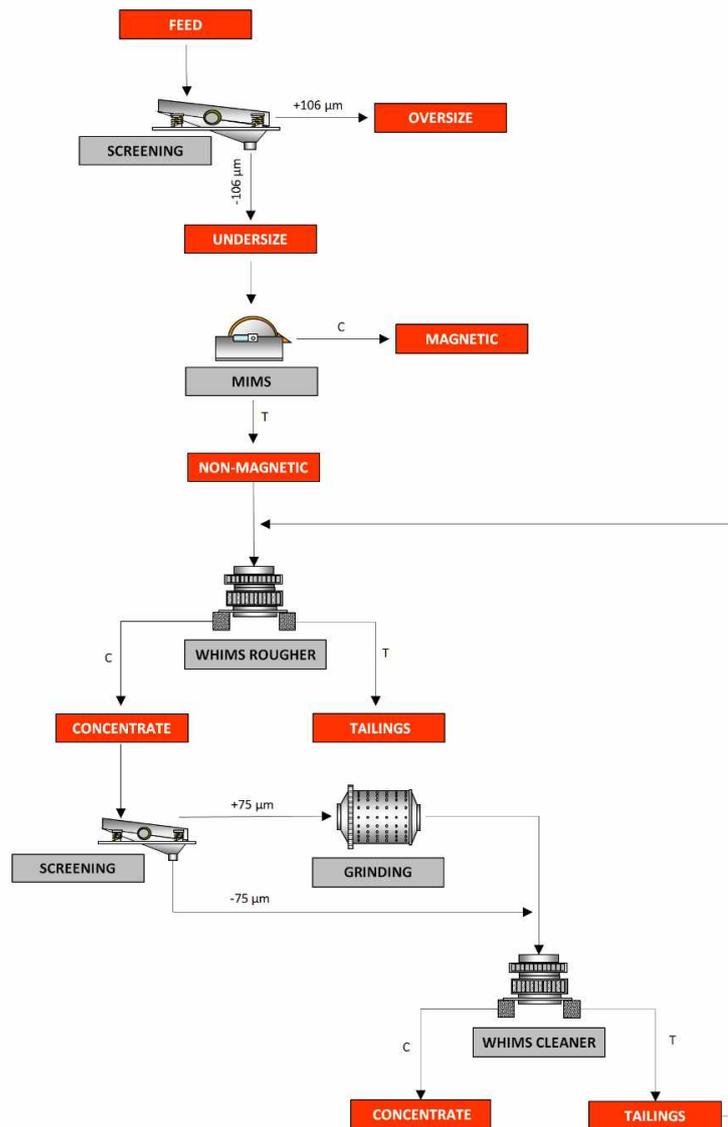
Estágio	Campo (G)	Matriz (mm)	% de Sólidos	Água de Lavagem (mL)
MIMS	2000	-	-	-
WHIMS Rougher	10000	1,5	30	1000
WHIMS Cleaner	7000	1,5	30	1000

Fonte: autora, 2018.

4.3.4.2. Circuito de Separação Magnética 2

O segundo circuito de otimização foi realizado com um estágio de *MIMS*, *WHIMS rougher*, peneiramento (75 μm), moagem (apenas partículas maiores que 75 μm) e *WHIMS cleaner*. Então, o rejeito do *WHIMS cleaner* é recirculado para o *WHIMS rougher* (Figura 21).

Figura 21. Fluxograma Circuito Magnético 2-Teste Otimização.



Fonte: autora, 2018.

O material foi moído por 30 segundos para garantir que o P_{80} tenha 75 μm , já que nesse tamanho a amostra está quase 100% liberada. Os melhores parâmetros estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Parâmetros aplicado no Circuito Magnético 2 do teste de otimização. Produto do moinho P80 igual a 75 μ m.

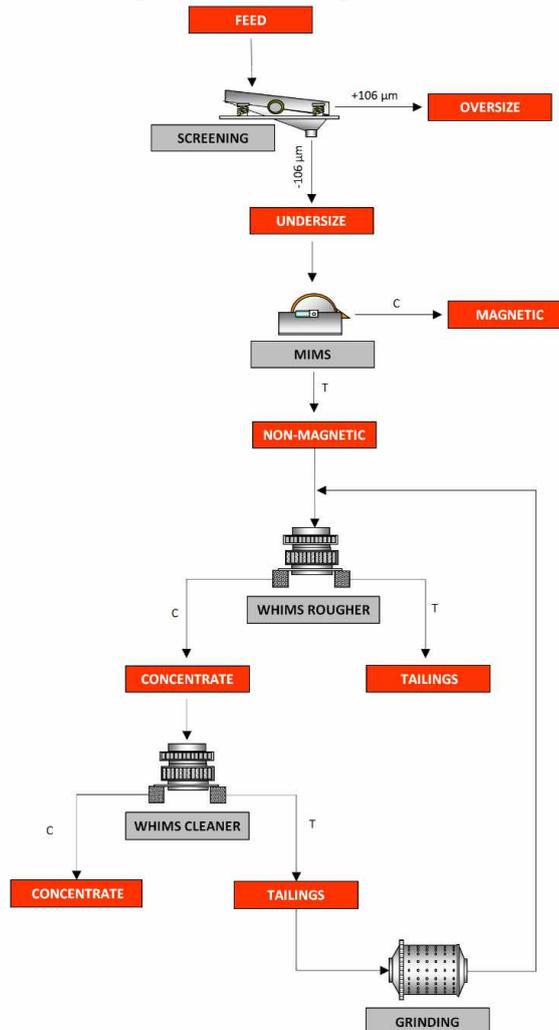
Estágio	Campo (G)	Matriz (mm)	% De Sólidos	Água de Lavagem (mL)
MIMS	2000	-	-	-
WHIMS Rougher	10000	1,5	30	1000
WHIMS Cleaner	7000	1,5	30	1000

Fonte: autora, 2018.

4.3.4.3. Circuito Magnético 3

O terceiro circuito de otimização foi feito com um estágio de *MIMS*, *WHIMS rougher*, e *WHIMS cleaner*. O rejeito do *WHIMS cleaner* foi moído (75 μ m) e recirculado para o *WHIMS rougher*. (Figura 22).

Figura 22. Fluxograma Circuito Magnético 3-Teste Otimização.



Fonte: autora, 2018.

Os parâmetros usados estão na Tabela 8.

Tabela 8. Parâmetros Circuito Magnético 3-Teste Otimização. Produto do moinho P80 igual a 75µm.

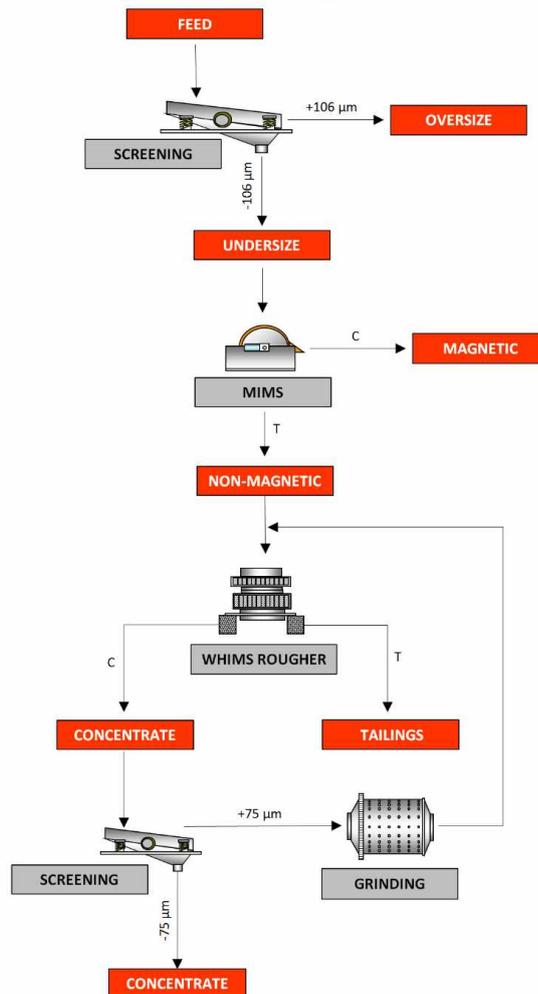
Estágio	Campo (G)	Matriz (mm)	% De Sólidos	Água de Lavagem (mL)
MIMS	2000	-	-	-
WHIMS Rougher	10000	1,5	30	1000
WHIMS Cleaner	6000	1,5	30	1000

Fonte: autora, 2018.

4.3.4.4. Circuito Magnético 4

O último circuito de otimização foi composto por um estágio de MIMS, WHIMS *rougher* e uma etapa de peneiramento. Então, o *undersize* foi diretamente para o concentrado final e o *oversize* foi para um estágio de moagem, e posteriormente recirculado para o WHIMS *rougher* (Figura 23).

Figura 23. Fluxograma Circuito Magnético 4-Teste Otimização.



Fonte: autora, 2018.

Os melhores parâmetros estão na Tabela 9.

Tabela 9. Parâmetros Circuito Magnético 4-Teste Otimização. Produto do moinho P80 igual a 75 μ m.

Estágio	Campo (G)	Matriz (mm)	% De Sólidos	Água de Lavagem (mL)
MIMS	2000	-	-	-
WHIMS Rougher	10000	1,5	30	1000

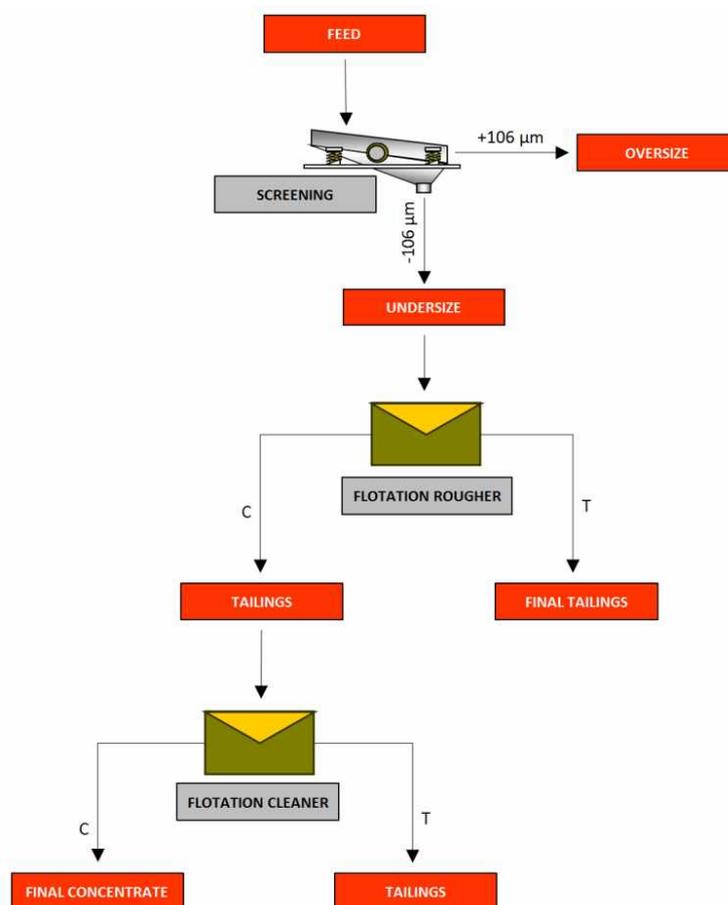
Fonte: autora, 2018.

4.3.4.5. Circuito de Flotação

Geralmente na flotação de ferro e quartzo a flotação catiônica reversa é usada, onde o quartzo (rejeito) é recuperado na espuma de flotação. Na flotação catiônica reversa, a flotação do quartzo é conduzida na presença de eteraminas. Por serem insolúveis em água, as eteraminas são normalmente comercializadas com grau de neutralização na faixa entre 25 e 30% com ácido acético, para aumentar sua solubilidade. A adsorção de eteraminas em quartzo, a partir de soluções alcalinas, leva em consideração as espécies iônicas do surfactante e também a sua forma molecular. Como resultado, colóides de amina podem precipitar na superfície do quartzo, tornando-o hidrofóbico (PEÇANHA & SCHNEIDER, 2016). Já os minerais de ferro, são normalmente deprimidos com amido, uma mistura composta por amilopectina e amilose. Para tal finalidade, o amido é gelatinizado com hidróxido de sódio (ARAUJO et al., 2013)

O quartzo foi flotado com aminas e o ferro foi deprimido com amido. O fluxograma deste circuito está na Figura 24, composto por dois estágios, flotação *rougher* e flotação *cleaner*.

Figura 24. Fluxograma Circuito Flotação-Teste Otimização.



Fonte: autora, 2018.

Os reagentes utilizados foram Amina EDA (coletor) e Amido (depressor). Foram utilizados aproximadamente 500 g de amostra para cada teste. Antes de iniciar os testes, os reagentes e a água com pH 10,5 foram preparados.

Para preparar o depressor foi pesado 2 g de amido, colocado dentro de um béquer e adicionados 20mL de água, em seguida, foi pesado 0,5 g de NaOH, colocado dentro de um béquer e adicionados 20mL de água. Posteriormente, as duas soluções foram colocadas juntas em um béquer maior. Esta solução foi agitada durante 5 minutos para dissolver e parecer como uma gelatina. Em seguida, foi colocado em um frasco de 500mL e completado com água. Para o coletor, foram pesados apenas 2 g de EDA, colocados em um frasco de 500 mL e completados com água. E para a água, ajustou-se apenas o pH com NaOH.

Para realizar esses testes, seguiu-se a seguinte metodologia : primeiro a água de torneira para condicionamento depressivo foi colocada dentro da célula de flotação; então a

agitação (1200 rpm) foi ativada; o material foi colocado na célula (foi agitado por 5 minutos) e o pH foi medido. Depois disto, o depressor foi adicionado ao sistema, deixando agitar durante 5 minutos, e depois o pH foi medido. A água para o condicionamento do coletor foi colocada dentro da célula de flotação, o pH foi ajustado para 10,5. Em seguida, a solução com coletor foi adicionada ao sistema (foi agitado por 5 minutos), e o pH foi medido. Depois, abaixou a agitação, ligou o fluxo de ar e começou a coletar a espuma.

Foram realizados três testes diferentes no estágio Rougher, variando a dosagem do coletor e a dosagem do depressor, Tabela 10.

Tabela 10. Parâmetros Circuito Flotação-Teste Otimização.

Estágio	Coletor (g/t)	Depresante (g/t)	pH	% De Sólidos
Rougher	200	300	10,5	35
Cleaner	100	400	10,5	35

Fonte: autora, 2018.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

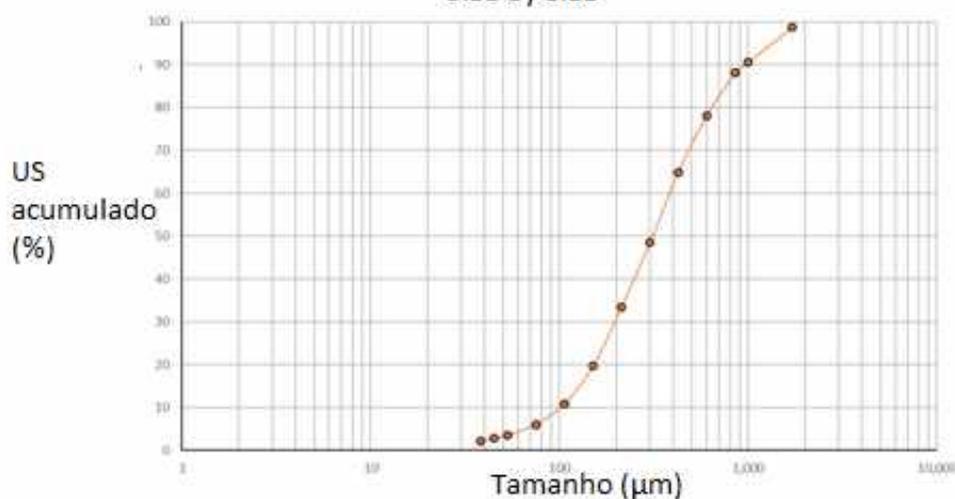
Os resultados da caracterização e dos circuitos de concentração serão discutidos neste tópico.

5.1. Caracterização do rejeito da mina

5.1.1. Size by Size

O peneiramento foi realizado gerando uma curva de distribuição granulométrica que é apresentada na Figura 25. A curva revela um material composto principalmente por finos, já que 50% do material estão abaixo de 300 μm .

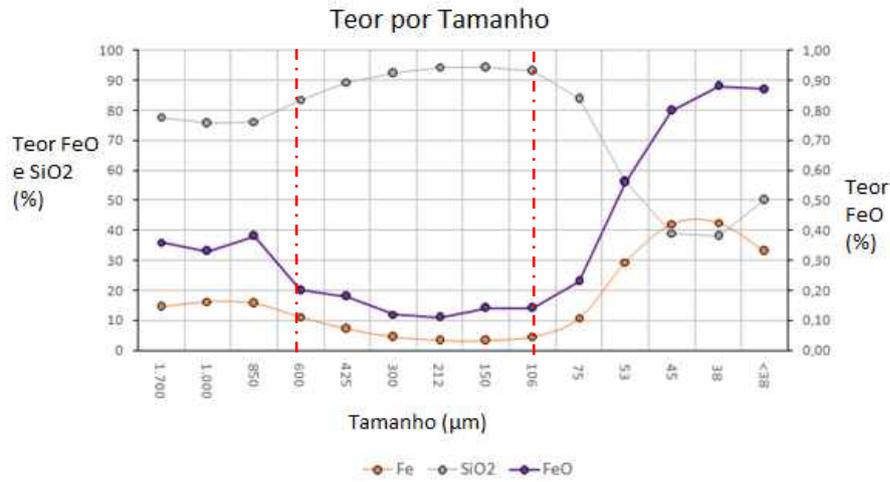
Figura 25. Size by Size do rejeito.
Size by Size



Fonte: autora, 2018.

Em relação ao teor e ao tamanho, é possível ver que o material possui três comportamentos diferentes (Figura 26), o material $>600\mu\text{m}$ tem baixos teores de ferro e altos teores de sílica, o tamanho entre $600\mu\text{m}$ e $106\mu\text{m}$ também possui baixo teor de ferro, mas menor ainda que a faixa de tamanho anterior e altos teores de sílica, já o tamanho $<106\mu\text{m}$ possui um teor mais elevado de ferro e teor mais reduzido de sílica. Por este motivo, os testes exploratórios foram feitos com três diferentes faixas de tamanho. E por causa deste estudo, os testes de concentração foram feitos com o tamanho menor que $106\mu\text{m}$, visto que este tamanho tem um bom potencial para ser concentrado.

Figura 26. Resultado Difração por raios.

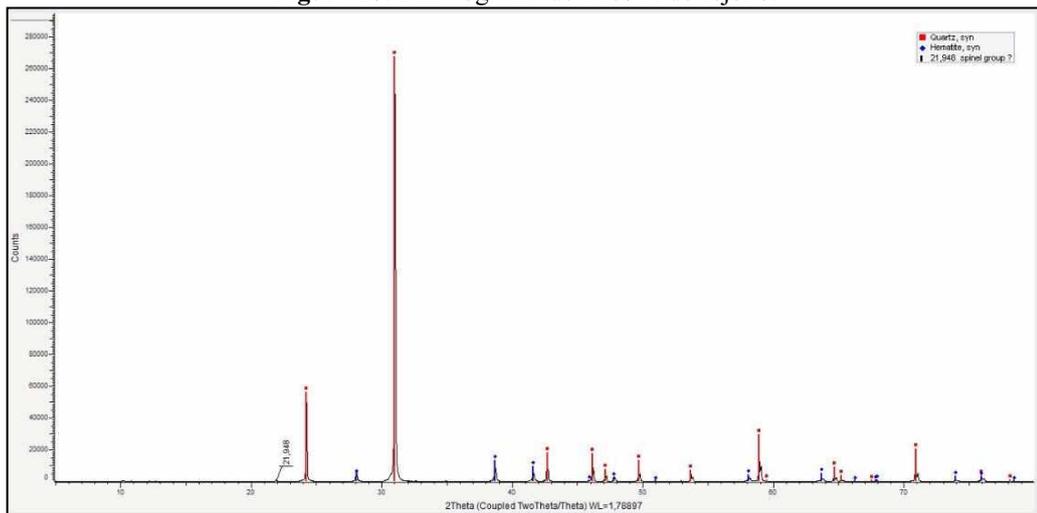


Fonte: autora, 2018.

5.1.2. Difração por raios

Pela caracterização do material por difração de raios (Figura 27) observou-se A alguns picos de quartzo (em vermelho) e alguns de hematita (em azul). Este é basicamente um sistema binário composto apenas por quartzo e hematita, que somando-se, SiO₂ (quartzo) e Fe₂O₃ (hematita), obtemos um saldo final de 99%. O outro 1% é composto por albita, apatita, calcita, clorita, epídoto, gibsite, hornblenda, caulinita, muscovita e ortoclásio.

Figura 27. Difratograma de raios-X do rejeito.



Fonte: autora, 2018.

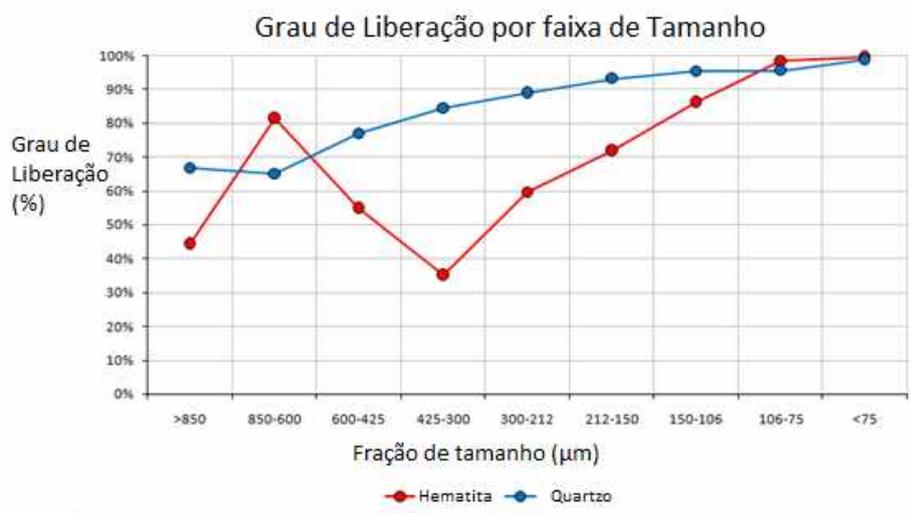
5.1.3. Liberação

A Figura 28 apresenta o grau de liberação por tamanho do rejeito. É possível

observar que o material menor que 106 μm está praticamente todo liberado. Isso é algo importante, porque as espirais têm uma boa eficiência para material entre 100 μm e 500 μm , então todo o material menor que 106 μm está indo diretamente para o rejeito.

Pelo gráfico observa-se que as partículas de quartzo seguem o comportamento esperado e o grau de liberação aumenta conforme o tamanho diminui. Por outro lado, para partículas de hematita, é possível observar uma queda entre 600 μm e 106 μm . Nesta região do gráfico, o número de partículas liberadas de hematita diminui, o que pode ser explicado pelas características da concentração realizada nas espirais, que tem boa eficiência para partículas entre 100 μm e 500 μm . Apesar disso, na fração fina, onde o equipamento apresenta baixa eficiência, a quantidade de partículas liberadas de hematita é alta.

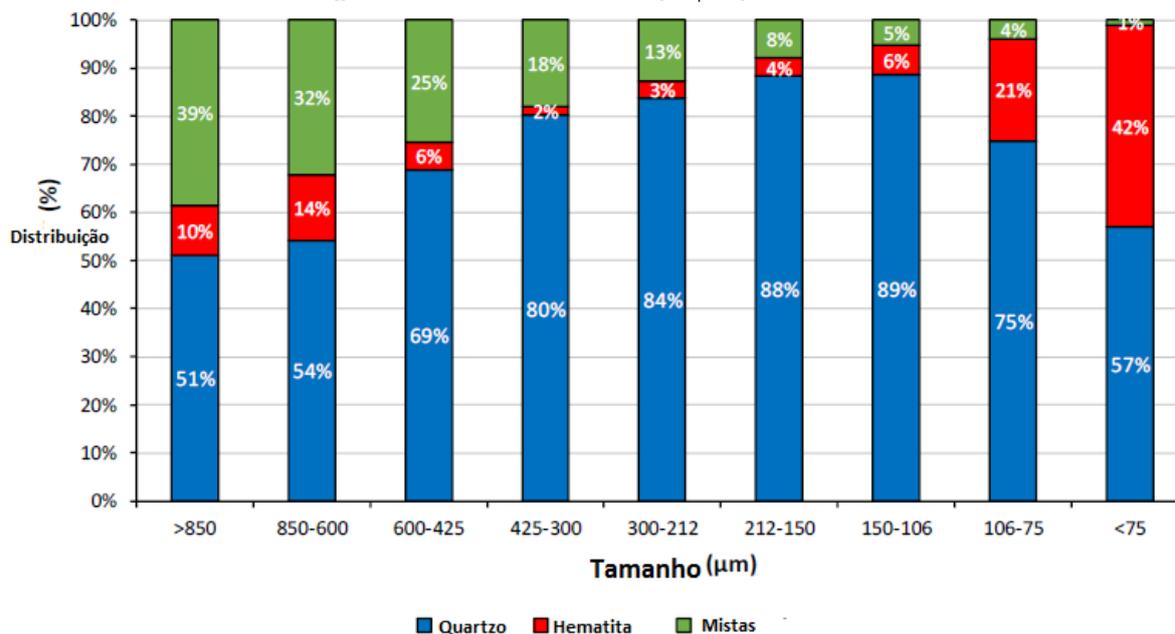
Figura 28. Grau de liberação por faixas de tamanho.



Fonte: autora, 2018.

A Figura 29 apresenta a distribuição de partículas por fração de tamanho. Como é possível observar, o tamanho da liberação dos rejeitos da mina é 75 μm , uma vez que praticamente 100% das partículas são liberadas abaixo desse tamanho. Além disso, o material <106 μm apresenta um grande potencial para processos de concentração, uma vez que existe uma quantidade considerável de partículas liberadas nessa fração.

Figura 29. Partículas Liberadas por Fração de Tamanho.



Fonte: autora, 2018.

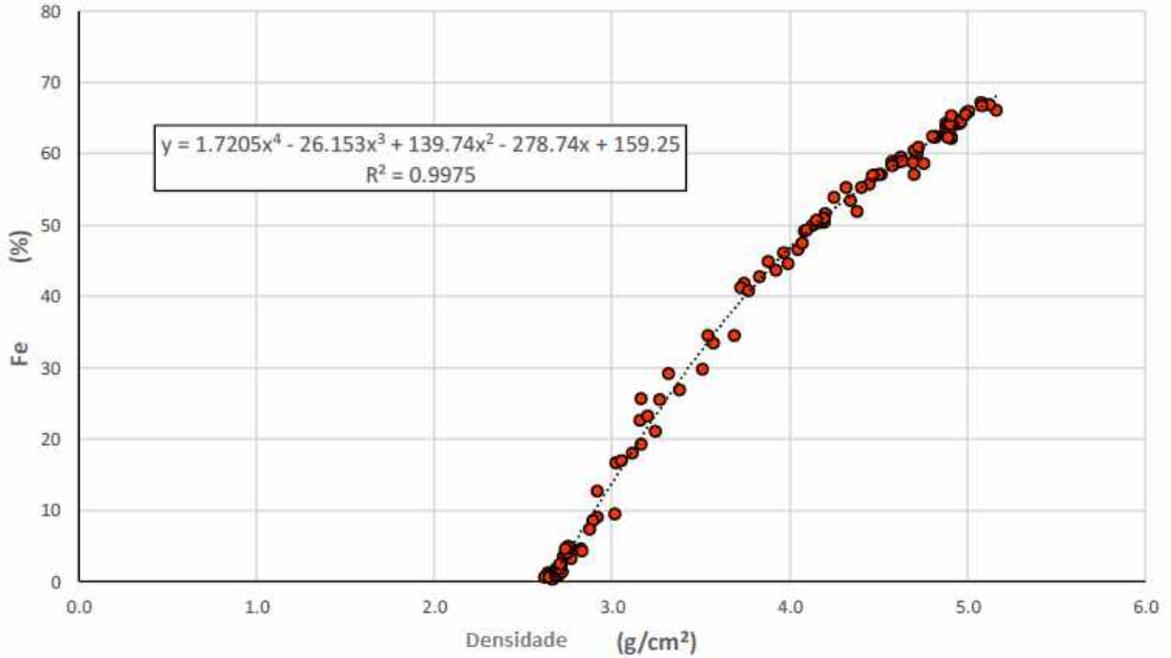
5.1.4. *Satmagan*

Os ensaios de Satmagan informa a quantidade de magnetita presente na amostra. A caracterização química do material indicou 0,5% de teor de magnetita e 0,46% de teor de óxido de ferro (FeO). Apesar da pequena quantidade de magnetita presente na amostra, teve grande influência nos testes de separação magnética.

5.1.5. *Densidade*

Com os dados de densidade medidos no picnômetro, foi possível construir uma curva de correlação entre o teor de ferro e a densidade da amostra, apresentada na Figura 30.

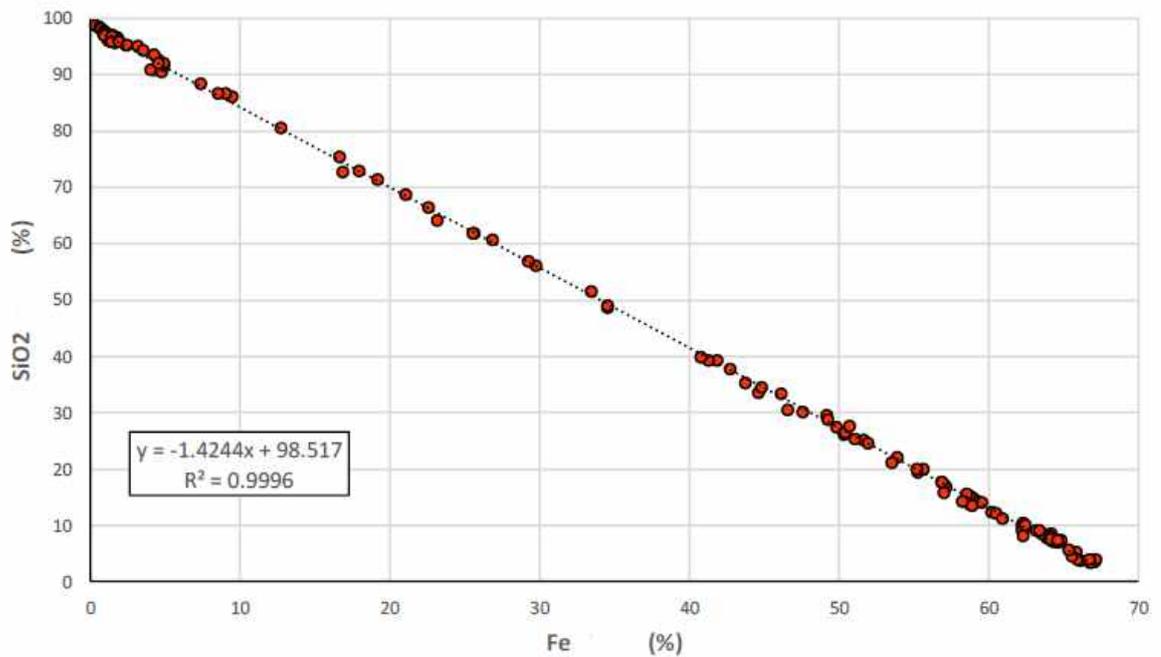
Figura 30. Curva de correlação-teor de ferro e densidade.



Fonte: autora, 2018.

Além disso, também foi criada uma curva de correlação entre o teor de ferro e o teor de sílica do material, apresentada na Figura 31.

Figura 31. Curva de correlação-teor de ferro e teor de sílica.



Fonte: autora, 2018.

Como a medição de densidade no picnômetro dura apenas 10 minutos, os resultados foram de extrema importância na tomada de decisões durante o projeto, já que os

resultados das análises químicas levavam um tempo maior para ficarem prontas.

5.2. Testes Exploratórios

5.2.1. Heavy Liquid

Os resultados dos testes *Heavy Liquid* estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. Resultados dos testes Heavy Liquid.

Amostra	Produto	Distribuição (%)			Teor (%)	
		Massa	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂
Amostra Global	Alimentação	100,0	100,0	100,0	9,0	86,1
	Concentrado	16,7	83,0	6,5	44,7	33,5
	Rejeito	83,3	17,0	93,5	1,8	96,6
> 600 µm	Alimentação	100,0	100,0	100,0	14,8	78,1
	Concentrado	29,3	82,9	14,7	41,9	39,3
	Rejeito	70,7	17,1	85,3	3,6	94,2
< 600 >106 µm	Alimentação	100,0	100,0	100,0	4,5	92,4
	Concentrado	7,9	60,6	4,2	34,6	49,0
	Rejeito	92,1	39,4	95,8	1,9	96,1
< 106 µm	Alimentação	100,0	100,0	100,0	24,1	64,6
	Concentrado	35,0	95,8	2,8	65,9	5,2
	Rejeito	65,0	4,2	97,2	1,6	96,5

Fonte: autora, 2018.

Os resultados reforçam que a amostra < 106 µm está bastante liberada, já que foi a amostra que obteve maior teor de Ferro.

5.2.2. WHIMS

Pelos resultados dos testes WHIMS (Tabela 12) vê-se que a separação magnética apresenta um bom potencial para concentrar os rejeitos da mina, produzindo rejeitos extremamente pobres. Mais uma vez, a fração <106µm apresentou bons resultados e o campo magnético teve um efeito importante no processo de concentração. Porém, a partir destes testes exploratórios, foi possível concluir que, usando apenas um estágio de separação magnética, não é possível atingir os requisitos de qualidade de concentração requeridos (67% Fe e 4% SiO₂).

Tabela 12. Resultados dos testes exploratórios no WHIMS.

Amostra	Produto	8000 G					10000 G					12000 G				
		Distribuição (%)			Teor (%)		Distribuição (%)			Teor (%)		Distribuição (%)			Teor (%)	
		Massa	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	Massa	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	Massa	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂
Amostra Global	Alimentação	100,0	100,0	100,0	7,2	88,2	100,0	100,0	100,0	8,9	86,8	100,0	100,0	100,0	8,9	86,5
	Concentrado	10,5	43,6	6,7	29,8	56,0	15,8	59,5	9,3	33,5	51,4	18,3	71,0	10,3	34,5	48,6
	Rejeito	89,5	56,4	93,3	4,6	92,6	84,2	40,5	90,7	4,3	93,4	81,7	29,0	89,7	3,1	95,0
> 600 µm	Alimentação	100,0	100,0	100,0	13,1	80,4	100,0	100,0	100,0	13,3	79,8	100,0	100,0	100,0	13,3	79,8
	Concentrado	33,8	54,4	28,8	21,1	68,6	26,1	52,6	19,8	26,9	60,6	55,5	75,1	50,7	18,0	72,8
	Rejeito	66,2	45,6	71,2	9,0	86,5	73,9	47,4	80,2	8,5	86,5	44,5	24,9	49,3	7,4	88,3
< 600 >106 µm	Alimentação	100,0	100,0	100,0	4,3	92,8	100,0	100,0	100,0	4,3	92,9	100,0	100,0	100,0	4,4	92,5
	Concentrado	14,5	64,6	11,1	19,2	71,4	18,5	71,6	15,0	16,7	75,3	26,8	77,3	23,3	12,7	80,4
	Rejeito	85,5	35,4	88,9	1,8	96,4	81,5	28,4	85,0	1,5	96,9	73,2	22,7	76,7	1,4	96,9
< 106 µm	Alimentação	100,0	100,0	100,0	21,6	67,8	100,0	100,0	100,0	22,0	67,2	100,0	100,0	100,0	22,5	66,3
	Concentrado	38,7	96,4	12,5	53,7	21,8	43,1	98,6	16,7	50,4	26,1	51,0	99,3	27,1	43,8	35,2
	Rejeito	61,3	3,6	87,5	1,3	96,9	56,9	1,4	83,3	0,5	98,4	49,0	0,7	72,9	0,3	98,7

Fonte: autora, 2018.

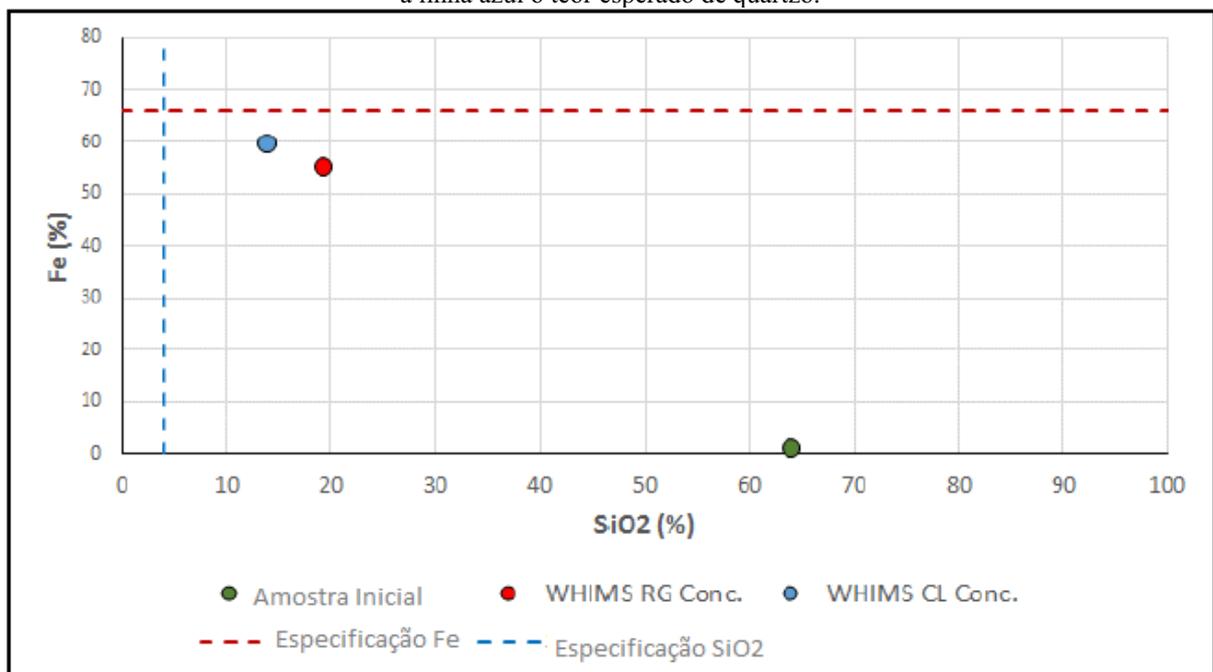
5.3. Testes Confirmatórios

Os testes confirmatórios foram realizados para verificar se seria possível produzir um concentrado final com mais de 66% de Fe e com menos que 4% de SiO₂ usando separação magnética. Nas seções abaixo, apenas os principais resultados são apresentados.

5.3.1. Circuito 1

Após realização do Circuito 1 que consistia em uma etapa *WHIMS rougher* e uma segunda etapa *WHIMS cleaner*. As características finais do concentrado são apresentadas na Figura 32.

Figura 32. Resultados Circuito de testes confirmatórios 1. A linha vermelha representa o teor esperado de ferro e a linha azul o teor esperado de quartzo.



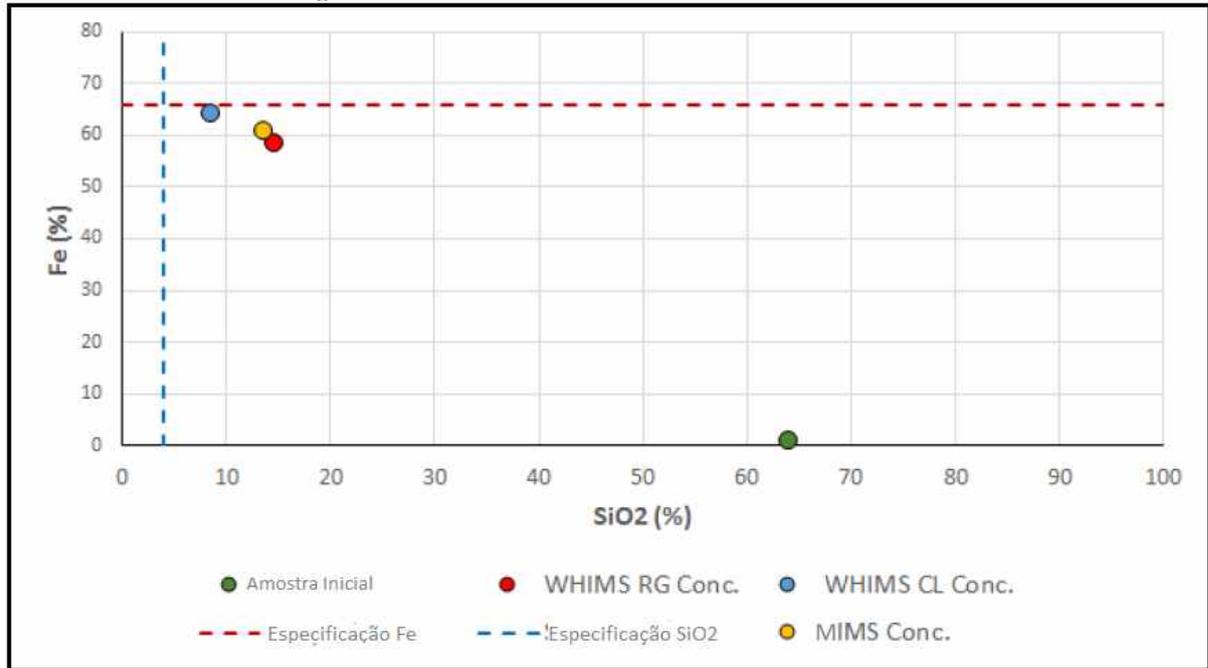
Fonte: autora, 2018.

Nesta configuração de concentração não foi possível alcançar os objetivos esperados. Da amostra inicial para o concentrado do *WHIMS rougher*, é possível observar um aumento considerável da qualidade, o que não é observado do estágio *rougher* para o *cleaner*. Esse fato ocorreu porque partículas de magnetita foram acumuladas no concentrado do *rougher*, entupindo a matriz no estágio *cleaner* e comprometendo assim, a sua qualidade. Por esse motivo, um circuito *MIMS* foi adicionado configurando no fluxograma do circuito 2.

5.3.2. Circuito 2

O circuito 2 distinguia do circuito 1 pela introdução do estágio MIMS que poderia possibilitar a retirada da magnetita, melhorando os resultados. As características desse concentrado estão representadas na Figura 33.

Figura 33. Resultados Circuito de testes confirmatórios 2.



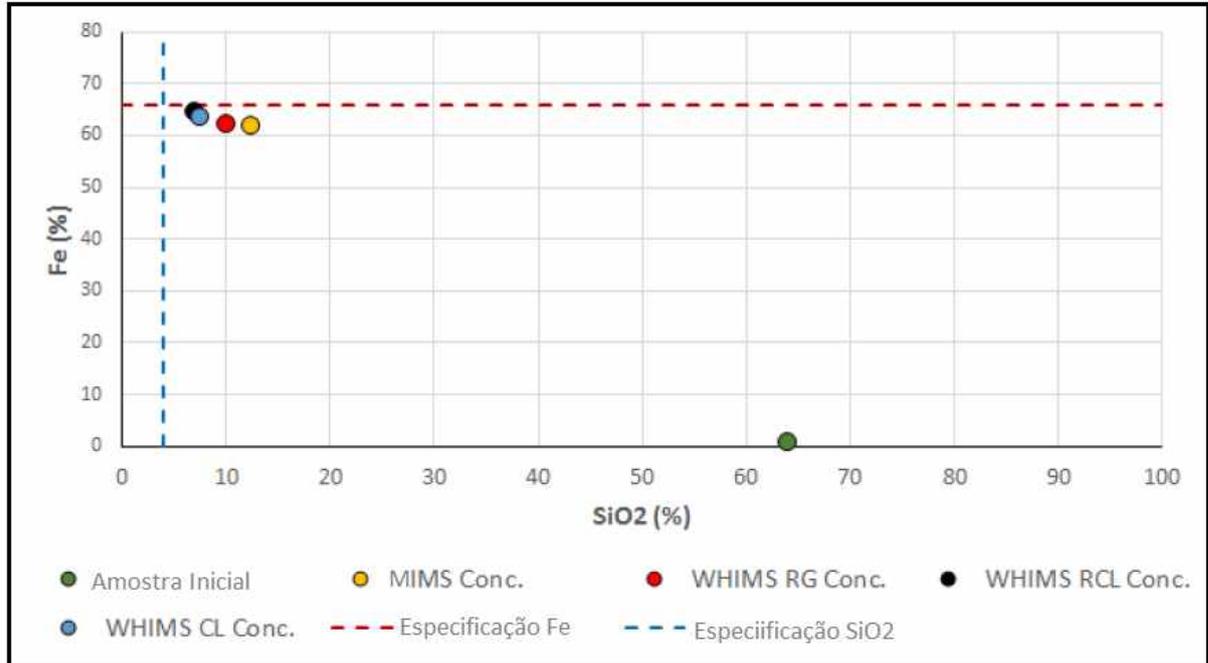
Fonte: autora, 2018.

A introdução do estágio MIMS aumentou consideravelmente o desempenho do processo, mas não foi capaz de garantir um concentrado com a qualidade desejada. Por esse motivo, um estágio *releaner* foi testado configurando no fluxograma do circuito 3.

5.3.3. Circuito 3

O estágio *releaner* foi adicionado ao circuito na intenção de adicionar mais uma etapa de concentração para aumentar os teores de ferro. A Figura 34 mostra a qualidade do concentrado deste circuito.

Figura 34. Resultados Circuito de testes confirmatórios 3.



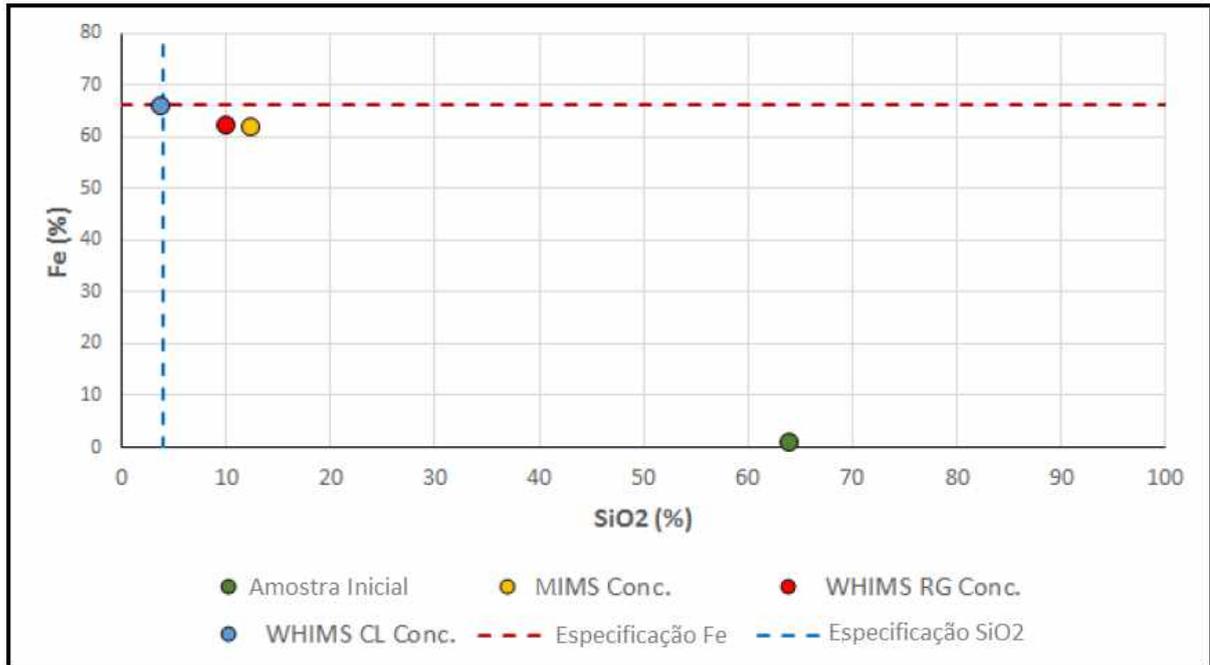
Fonte: autora, 2018.

A adição do estágio *releaner* não aumentou o desempenho do processo e os resultados mantiveram o mesmo do circuito 2, o que indicava que o problema estava relacionado a liberação do concentrado do WHIMS *rougher*. Pensando nisso, uma etapa de moagem foi adicionada configurando no fluxograma do circuito 4.

5.3.4. Circuito 4

Usando um estágio de moagem para moer o concentrado do WHIMS *rougher* até o tamanho da liberação (75 μ m) e realizar um estágio *cleaner* subsequente, foi possível obter um concentrado dentro das especificações (66 % Fe e 4% SiO₂) (Figura 35). Estes resultados provaram que é possível concentrar rejeitos através de separação magnética. Dessa forma, a próxima etapa do projeto foi focada na otimização desse circuito, com o objetivo de definir os melhores parâmetros e fluxograma para fazê-lo.

Figura 35. Resultados Circuito de testes confirmatórios 4.



Fonte: autora, 2018.

5.4. Testes de Otimização

Os testes confirmatórios mostraram que para produzir um concentrado com mais de 66% de Fe usando separação magnética, é necessário ter um estágio *MIMS* e etapa de moagem. Assim, com base nesse fato, os testes foram focados na otimização do fluxograma e nos resultados alcançados na fase de testes confirmatórios, a fim de obter alta qualidade e boa recuperação no concentrado final.

Antes de apresentar os resultados dos circuitos avaliados na fase de otimização é feita uma breve explicação sobre os resultados do *MIMS* e dos estágios de moagem.

5.4.1. *MIMS*

Para avaliar a influência do campo magnético no estágio *MIMS*, foram realizados testes no *Davis Tube* com dois campos diferentes. Os resultados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13. Resultados do estudo MIMS.

Campo Magnético	Produto	Distribuição (%)			Teor (%)	
		Massa	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂
2000 G	Alimentação	100,00	100,00	100,00	23,74	65,24
	Concentrado	1,80	4,70	0,30	62,45	12,30
	Rejeito	98,20	95,30	99,70	23,04	66,20
4000 G	Alimentação	100,00	100,00	100,00	23,15	65,40
	Concentrado	2,00	5,40	0,40	61,88	12,35
	Rejeito	98,00	94,60	99,60	22,35	66,50

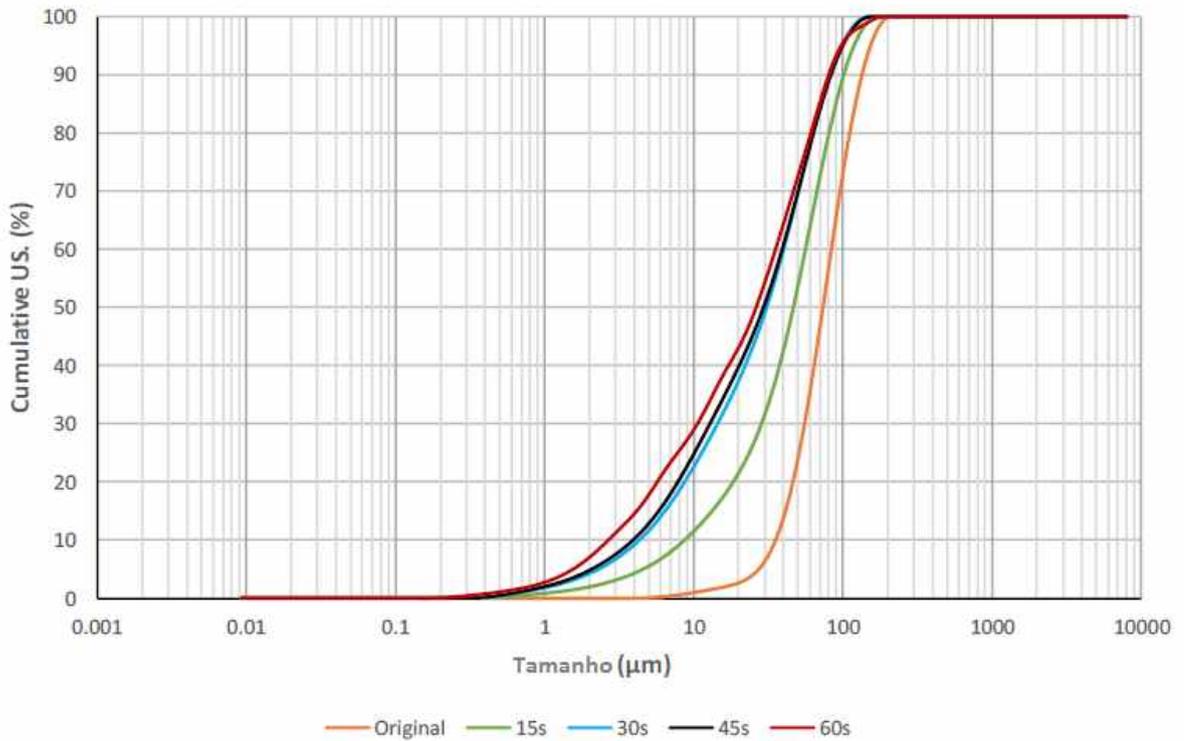
Fonte: autora, 2018.

Como é possível ver, os resultados são bastante semelhantes com um pequeno aumento na qualidade do concentrado quando se utiliza um campo de 2000 G. Por outro lado, testes com 4000 G apresentaram maiores recuperações de massa e Fe. Apesar das diferenças, os resultados são tão próximos que o campo de 2000 G foi adotado. Este parâmetro garante uma melhor qualidade no concentrado, sendo a maior parte das partículas de magnetita já removidas da alimentação do *WHIMS*. Um fato importante a ser destacado é a liberação de partículas de magnetita, que parece ser baixa na fração <106µm, devido à quantidade de sílica observada no concentrado.

5.4.2. Moagem

O estudo de moagem foi realizado para definir o tempo de moagem necessário para obter um produto com P80 próximo a 75µm e também para evitar a geração de finos durante o processo. Dessa forma, diferentes tempos de permanência no moinho foram avaliados. A Figura36 apresenta os PSDs definir sigla dos produtos de moagem construídos através de análises no *Malvern*.

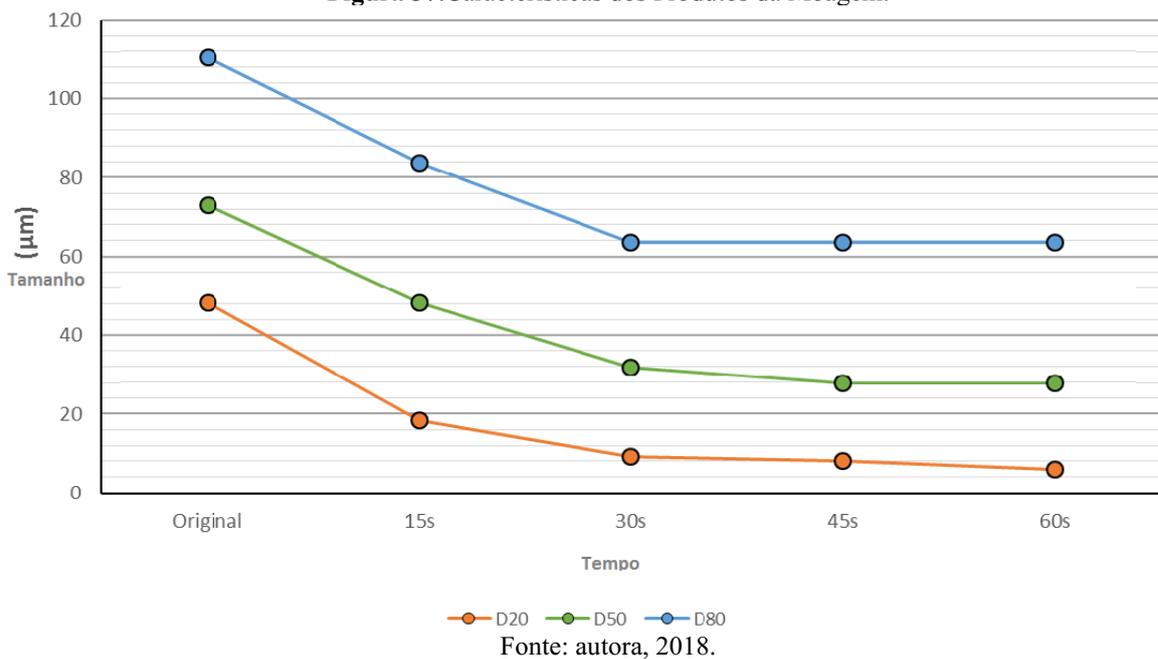
Figura 36.PSDs dos Produtos de Moagem.



Fonte: autora, 2018.

O tempo de 30 segundos foi escolhido porque, com esse tempo, o P80 já está próximo do desejado e não gera uma grande quantidade de partículas finas (Figura 37).

Figura 37.Características dos Produtos da Moagem.



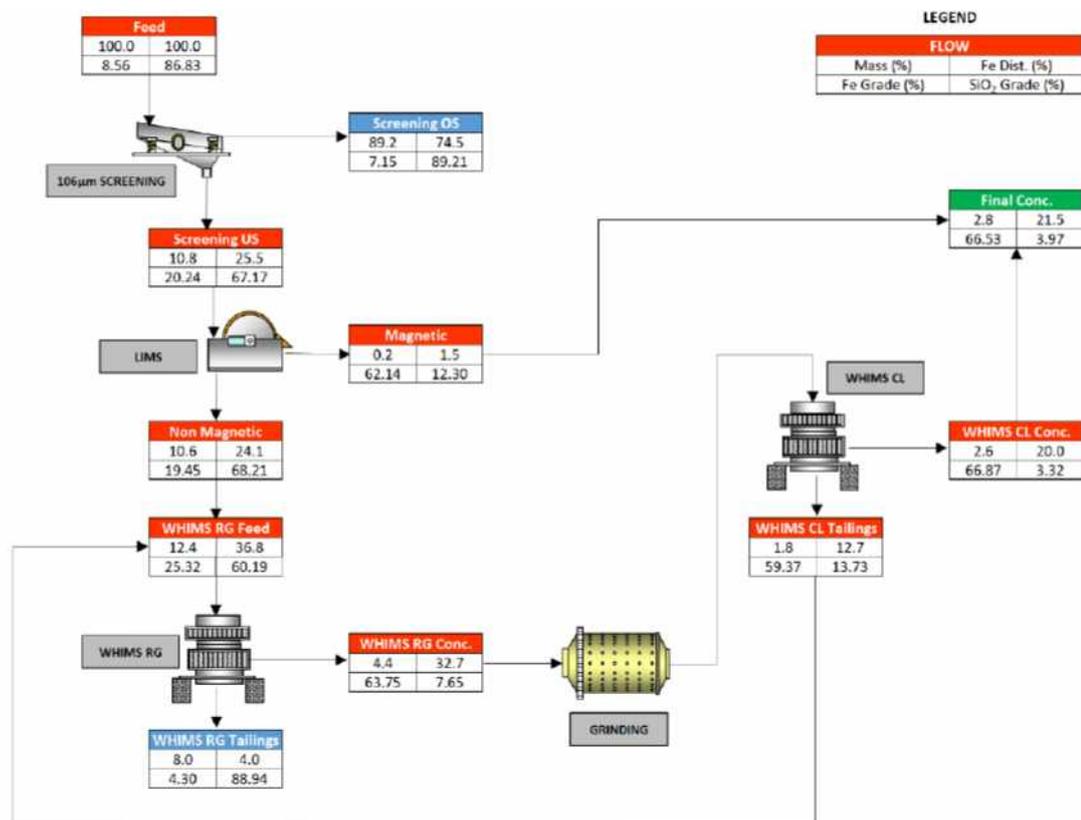
Fonte: autora, 2018.

Os estudos de MIMS e moagens foram adotados para todos os circuitos.

5.4.3. Circuito de Separação Magnética 1

O balanço de massa do Circuito 1 está apresentado na Figura 38. É importante notar que todos os balanços de massa apresentados neste relatório foram realizados no *software* BILCO. Com este circuito foi possível obter um concentrado com 66,5% Fe e 3,97% SiO₂, ainda fora das especificações.

Figura 38. Circuito de Otimização 1- Balanço de Massa.

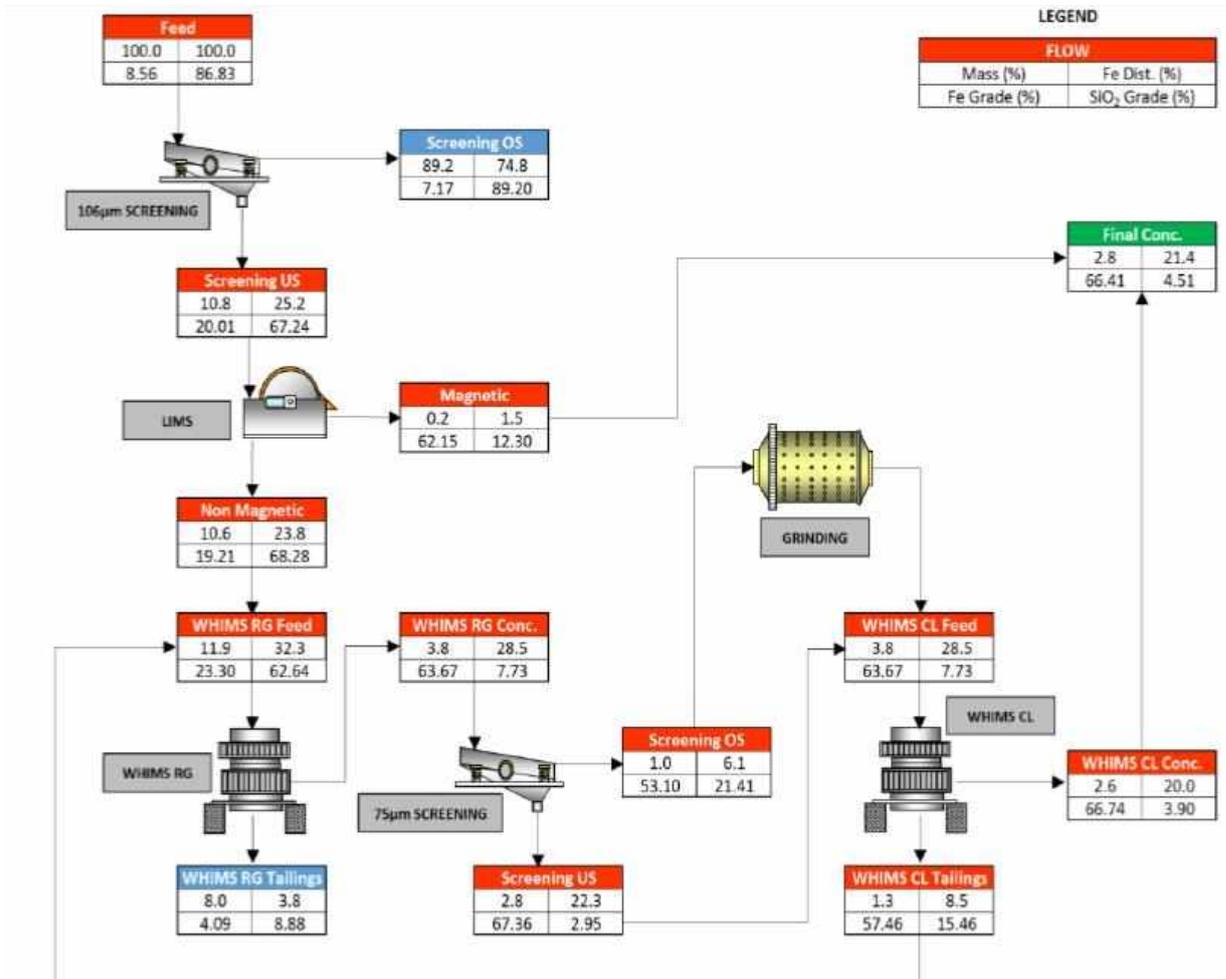


Fonte: autora, 2018.

5.4.4. Circuito de Separação Magnética 2

O balanço de massa do circuito 2 está representado na Figura 39. Com este circuito foi possível obter um concentrado com 66,4% Fe e 4,51% SiO₂, ainda fora das especificações.

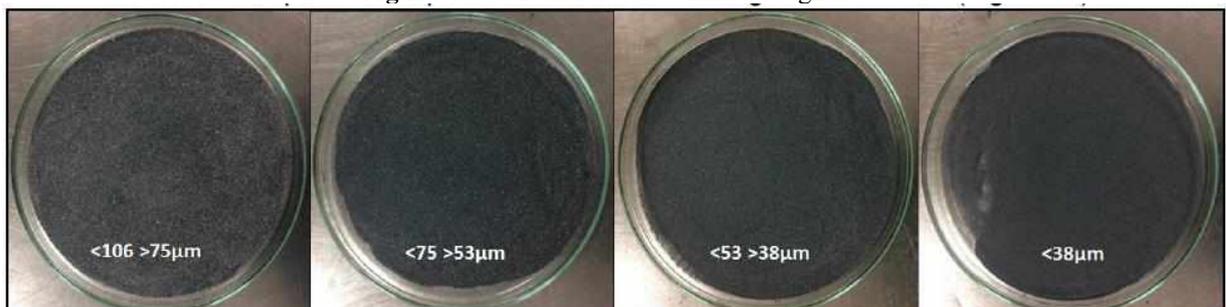
Figura 39. Circuito de Otimização 2- Balanço de Massa.



Fonte: autora, 2018.

Durante a realização dos testes do circuito 2, a inspeção visual nos produtos de peneiramento mostrou uma considerável diferença entre as frações $> 75\mu\text{m}$ e $< 75\mu\text{m}$ do concentrado do WHIMS *rougher* (Figura 40).

Figura 40. Concentrado do WHIMS *rougher*.



Fonte: autora, 2018.

A partir dessa observação, foi realizada uma análise *size by size* que mostrou que o material $> 75\mu\text{m}$ é consideravelmente mais pobre do que o contido na fração $<75\mu\text{m}$ (Tabela 14). A partir deste fato, decidiu-se testar o circuito 4, peneirando o concentrado *rougher* ($75\mu\text{m}$).

Tabela 14. Size by Size do Concentrado do WHIMS Rougher.

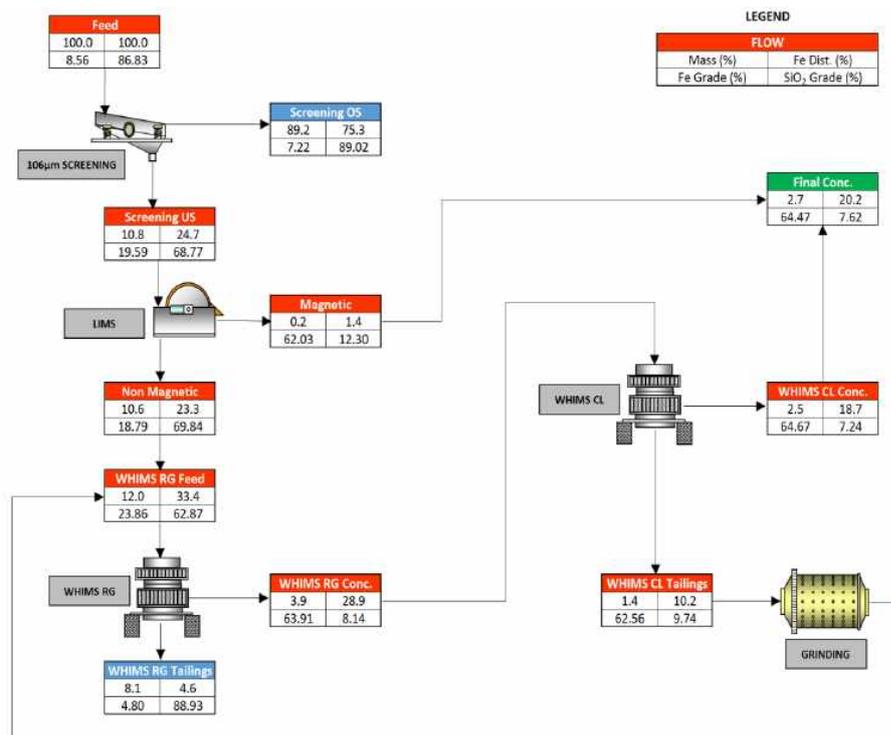
Tamanho (μm)	Teor (%)	
	Fe	SiO ₂
75	53,11	22,6
53	65,83	5,26
38	69,17	1,88
<38	69,24	1,49
Alimentação	63,5	8,85

Fonte: autora, 2018.

5.4.5. Circuito de Separação Magnética 3

O balanço de massa do circuito 3 está representado na Figura 41, os resultados desse circuito foram os piores entre os circuitos de otimização, com 64,47% Fe e 7,62% SiO₂.

Figura 41. Circuito de Otimização 3- Balanço de Massa.

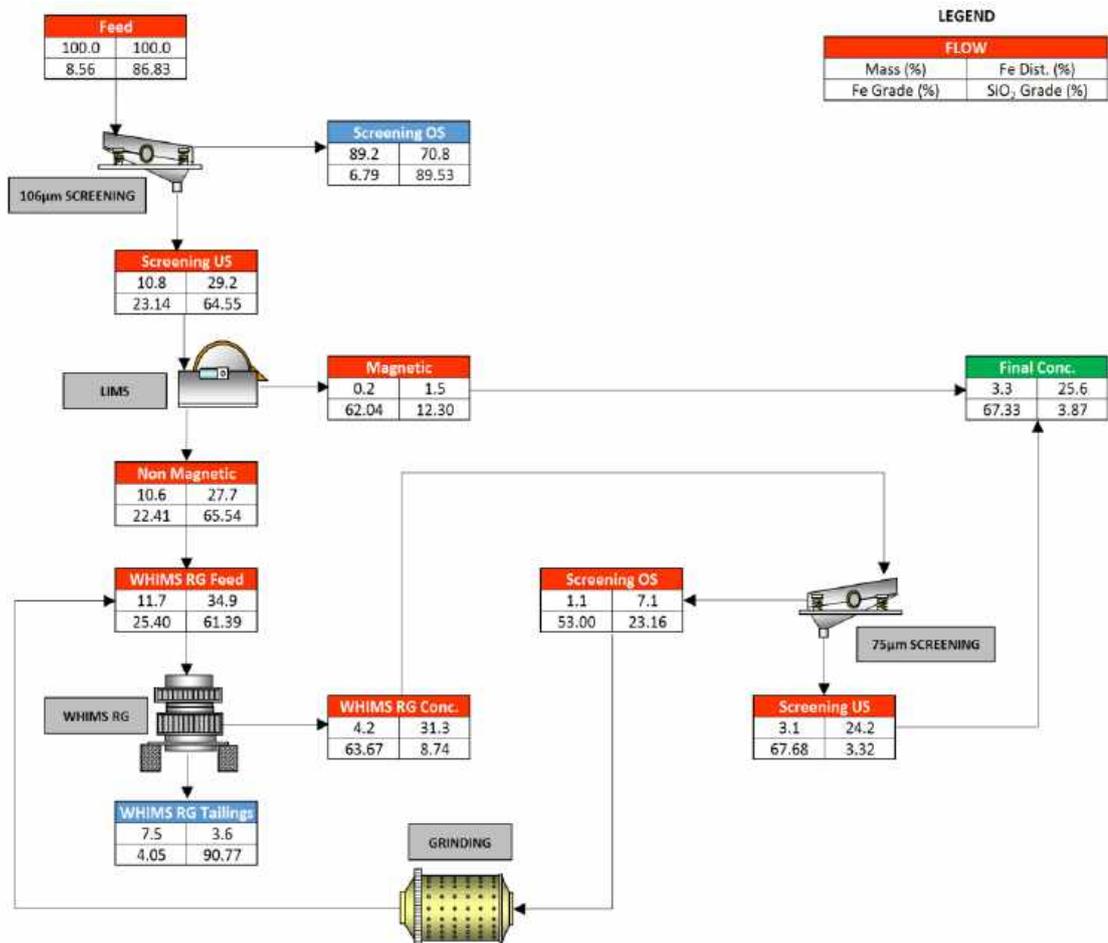


Fonte: autora, 2018.

5.4.6. Circuito de Separação Magnética 4

O balanço de massa do circuito 4 está representado na Figura 42. Com este circuito foi possível obter um concentrado com 67,33% Fe e 3,87% SiO₂, resultados dentro das especificações requeridas.

Figura 42. Circuito de Otimização 4 - Balanço de Massa.



Fonte: autora, 2018.

Entre todos os circuitos magnéticos testados, o circuito 4 foi o mais simples e também apresentou os melhores resultados em termos de qualidade e recuperação (Tabela 15).

Tabela 15. Comparação dos Circuitos de Separação Magnética.

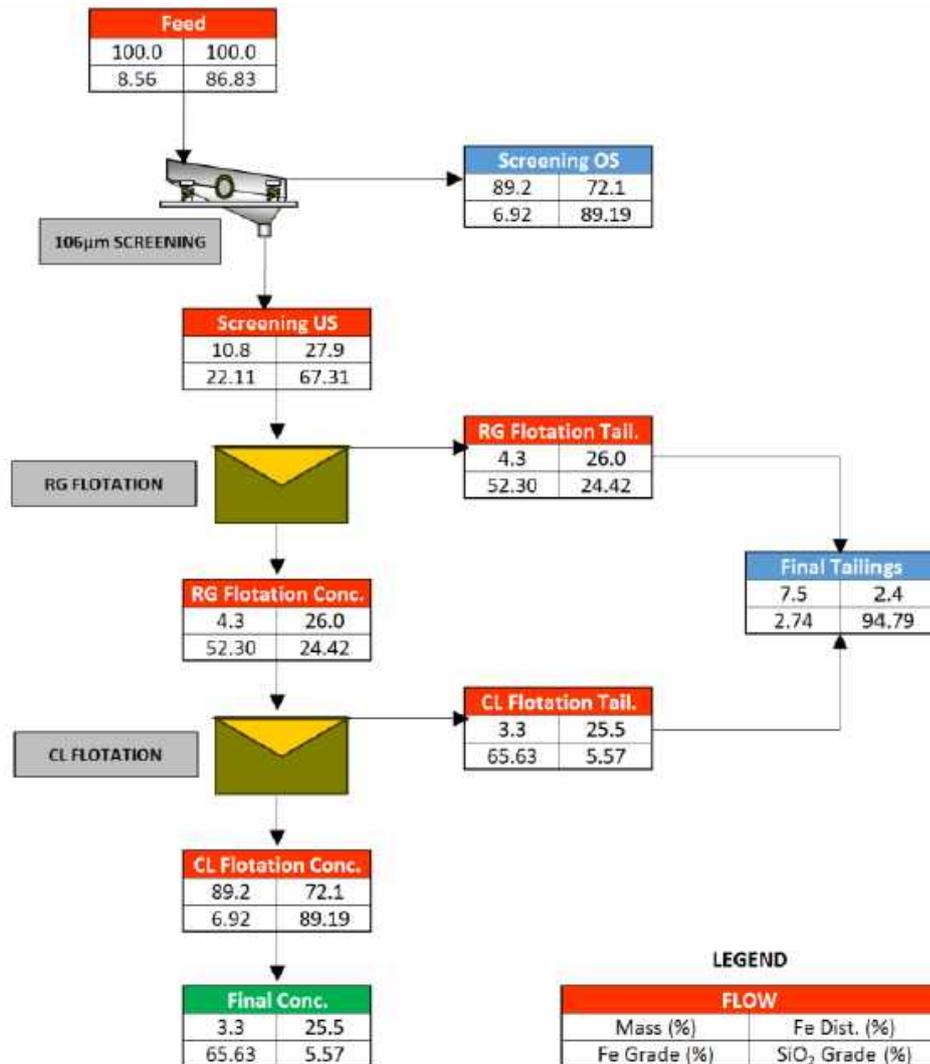
Circuito	Distribuição (%)			Teor (%)	
	Massa	Fe	SiO2	Fe	SiO2
Circuito Magnético 1	2,8	21,5	0,1	66,53	3,97
Circuito Magnético 2	2,8	21,4	0,1	66,41	4,51
Circuito Magnético 3	2,7	20,2	0,2	64,47	7,62
Circuito Magnético 4	3,3	25,6	0,1	67,33	3,87

Fonte: autora, 2018.

5.4.7. Circuito de Flotação

O balanço de massa do circuito de flotação está representado na Figura 43.

Figura 43. Circuito de Flotação- Balanço de Massa.



Fonte: autora, 2018.

Não foi possível alcançar a qualidade esperada do concentrado usando flotação.

Isso pode ter acontecido provavelmente devido à presença de partículas mistas no material. Infelizmente, devido a restrições de massa, não foi possível investigar de maneira mais detalhada o processo de flotação e outras opções de fluxogramas. Para finalizar, a Tabela 16 apresenta uma comparação entre os resultados alcançados com o circuito magnético 4 e com a flotação, mostrando a superioridade dos resultados da separação magnética.

Tabela 16. Comparação entre Circuito de Separação Magnética e Flotação.

Circuito	Produto	Distribuição (%)			Teor (%)	
		Massa	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂
Separação Magnética 4	Concentrado	7,30	25,60	0,10	67,33	3,87
	Rejeito	7,50	3,60	7,90	4,04	90,70
Flotação	Concentrado	3,30	25,50	0,20	65,63	5,57
	Rejeito	7,50	2,40	8,20	4,56	91,90

Fonte: autora, 2018.

6. CONCLUSÃO

O presente estudo mostrou que o rejeito da mina estudada é um material binário composto quase apenas por quartzo e hematita. As partículas são completamente liberadas abaixo de $75\mu\text{m}$ e o teor de ferro aumenta no material abaixo de $106\mu\text{m}$.

Testes de concentração em escala de bancada provaram que é possível concentrar a fração fina desse rejeito ($<106\mu\text{m}$) através de separação magnética.

Utilizando um circuito composto por MIMS, WHIMS, foi possível produzir um concentrado com 67,33% Fe / 3,78% SiO_2 e rejeitos com 4,05% Fe. A recuperação de massa e ferro do circuito foi de 30,2% e 87,8%, respectivamente, o que representa 3,3% e 25,6% de toda a amostra de rejeitos. Além disso, o teor de magnetita e o grau de liberação foram os principais desafios para alcançar as especificações exigidas no concentrado final.

O estudo mostra que o projeto é altamente viável, com expectativa de aumentar a produção da mina em aproximadamente 9%, com o benefício de reduzir a geração de rejeitos em aproximadamente 5%. Com este projeto é possível aumentar a eficiência operacional da planta, reduzir as questões ambientais relacionadas ao descarte de rejeitos (menos estresse na barragem e menor risco de colapso) e usar o concentrado para melhorar a produtividade na planta de pelotização.

Em relação à flotação, apenas quatro testes de flotação foram realizados devido a restrições de massa e os resultados foram promissores. Além disso, é extremamente recomendável aprofundar-se nos estudos de flotação e avaliar outras opções de fluxogramas e dosagens de reagentes.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, A. C. et al. A flotação de minérios de ferro. **Teoria e prática do tratamento de minérios: Flotação: O Estado da Arte no Brasil**, v. 4, p. 317-329, 2006.

BORGES, Sérgio. The Tailings Dam Disaster in Mariana, Minas Gerais: Socio-Environmental and Management Aspects of Mining Resources Exploration. **Cuadernos de Geografía-Revista Colombiana de Geografía**, v. 27, n. 2, p. 301-312, 2018.

CHAVES, A. P.; CHAVES FILHO, R. C. **Teoria e prática do tratamento de minérios: separação densitária**. 2013.

DWORZANOWSKI, M. Maximizing haematite recovery within a fine and wide particle-size distribution using wet high-intensity magnetic separation. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 114, n. 7, p. 559-568, 2014.

GOMES, Marcos Antônio; PEREIRA, Carlos Alberto; PERES, Antônio Eduardo Clark. Caracterização tecnológica de rejeito de minério de ferro. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 64, n. 2, p. 233-236, 2011.

LUZ, Adão B.; SAMPAIO, João A.; DE ALMEIDA, Salvador LM. Tratamento de minérios. **Rio de Janeiro: CETEM**, 2004.

LUZ, AB da et al. Tratamento de Minérios–5ª edição. **Rio de Janeiro: CETEM/MCT**, 2010.

MILANEZ, Bruno; MAGNO, Lucas; PINTO, Raquel Giffoni. Da política fraca à política privada: o papel do setor mineral nas mudanças da política ambiental em Minas Gerais, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 35, p. e00051219, 2019.

MWAURA, F. An audit of environmental impact assessments for mining projects in Kenya. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 119, n. 5, p. 484-493, 2019.

SANTOS, Ivan José dos. Estudo da produção de concentrados de minério de ferro a partir dos rejeitos da barragem de germano. 2003.

VALADÃO, G. E. Sales; ARAUJO, A. C. de. Introdução ao tratamento de minérios. **Belo Horizonte: Editora UFMG**, 2007.

ARAUJO, A. C.; PERES, A. E. C.; VIANA, P. R. M.; OLIVEIR, J. F. **Flotação de minérios de ferro**. In: A. P. Chaves (Org). Teoria e prática do tratamento de minérios. Editora Oficina de Textos. 3ª Edição. 2013.

BRASIL. Ministério das Relações Exteriores. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)**. [s.d.]. Disponível em: <http://www.itamaraty.gov.br/pt-BR/politica-externa/desenvolvimento-sustentavel-e-meio-ambiente/134-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-ods>. Acessado em 05 de dez. de 2019.

PEÇANHA, Elayne Rohem; SCHNEIDER, Claudio Luiz. **Interações hematita-quartzo e**

suas implicações na recuperação de finos de hematita. 2016.