



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS - DEMIN



PAULO LUIZ GONZAGA RIBEIRO JÚNIOR

PRÉ - CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA DE MINÉRIO DE FERRO DO LESTE
EUROPEU

**Ouro Preto – MG
2024**

Paulo Luiz Gonzaga Ribeiro Júnior

PRÉ – CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA DE UM MINÉRIO DO LESTE EUROPEU

Monografia submetida à apreciação da banca examinadora de graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz.

Ouro Preto – MG
2024



FOLHA DE APROVAÇÃO

Paulo Luiz Gonzaga Ribeiro Júnior

Pré – concentração magnética de um minério do leste europeu

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em engenharia de minas

Aprovada em 25 de janeiro de 2024

Membros da banca

Dr. José Aurélio Medeiros da Luz — Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
M. Sc. Mariana Caroline Andrade Silva (Universidade Federal de Ouro Preto)
M. Sc. Jorge Carlos Guerrero Vargas (Universidade Federal de Ouro Preto)

José Aurélio Medeiros da Luz, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 06/02/2024



Documento assinado eletronicamente por **Jose Aurelio Medeiros da Luz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/02/2024, às 10:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0664017** e o código CRC **39D17E88**.

RESUMO

A motivação subjacente a este projeto reside na busca por uma nova abordagem de processamento para material refugado (pilhas de minério marginal) na mina em estudo, localizada no Leste Europeu. Uma fase de pré-concentração foi conduzida em escala de bancada e piloto, com o intuito de aprimorar o rendimento e a recuperação metalúrgica, bem como de fornecer matéria-prima para as próximas etapas do processo. Essa fase foi realizada mediante a combinação de dois equipamentos de separação magnética de médio e alto gradiente, ambos caracterizados pela capacidade de produção. Os resultados revelaram recuperação metalúrgica de 66,70 % e rendimento global de 42,20 %. Em relação aos teores de concentrado, foi alcançado valor de 54 % para o ferro e 16,5 % para a sílica. Por outro lado, os rejeitos finais apresentaram teor de 22,90 % para o ferro e 61,30 % para a sílica.

Palavras-chave: Separação Magnética, planta piloto, concentrado, teor, recuperação.

A B S T R A C T

The underlying motivation for this project is the search for a new processing approach for tailings (marginal ore piles) at the mine under study, located in Eastern Europe. A pre-concentration stage was conducted at bench and pilot scale, with the aim of improving yield and metallurgical recovery, as well as providing raw material for the next stages of the process. This phase was carried out by combining two medium and high gradient magnetic separation equipment, both characterized by their production capacity. The results revealed a metallurgical recovery of 66.70% and a global yield of 42.20 %. In terms of concentrate grades, a value of 54 % for iron and 16.5 % for silica was achieved. On the other hand, the final tailings had a grade of 22.90 % for iron and 61.30% for silica.

Keywords: Magnetic Separation, Pilot Plant, Concentrate, Iron contents, Mass Recovery

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fluxograma proposto.	9
Figura 2 - Aplicações dos separadores magnéticos	11
Figura - 3 Processo de separação magnética	12
Figura 4 - Principais etapas do projeto.	14
Figura 5 - Descrição das Unidades.	15
Figura 6 - Equipamento de redução de partículas	16
Figura 7 - Amostrador carrossel de baldes	17
Figura 8 - Divisor Gilson.....	18
Figura 9 - Divisor rotativo Rocklabs.	18
Figura 10 - Peneiramento a úmido – SINEX.....	20
Figura 11 - MasterSizer 3000	21
Figura 12 - Etapa piloto de pré-concentração.....	22
Figura 13 - Descrição do separador magnético de baixo campo <i>MIMS</i>	23
Figura 14 - <i>MIMS</i> 060B-010 15’’ X 9’’	24
Figura 15 - Esquema para amostragem amostra <i>dump</i>	25
Figura 16 - Minimag dual G 340	27
Figura 17 - Distribuição granulométrica ROM e pré – concentração	28
Figura 18 - Comparação granulométrica concentrado dump	30
Figura 19 - <i>Dump</i> - produtos separação magnética de baixo gradiente.....	31
Figura 20 - <i>Dump</i> - produtos separação magnética de alto gradiente	31
Figura 21 - Comparação de pré - concentrados	32
Figura 22 - Comparação de desempenho dos testes	34
Figura 23 - Distribuição química Fe / SiO ₂	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Força atrativa para os minerais de quartzo, hematita e magnetita.....	12
Tabela 2 - ROM - Composição Química.....	13
Tabela 3 - ROM - Composição Mineralógica.....	13
Tabela 4 - Tela utilizada na análise	19
Tabela 5 - Parâmetros separação magnética de baixo gradiente	25
Tabela 6 - Parâmetros utilizados em testes <i>MIMS</i>	26
Tabela 7 - Parâmetros separação magnética de alto gradiente	28
Tabela 8 - Estatísticas de distribuição granulométrica	29
Tabela 9 - <i>Dump</i> pré-concentração piloto	32
Tabela 10 - <i>Dump</i> pré-concentração bancada.....	33
Tabela 11 – <i>Dump</i> pré-concentração semi piloto	33

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	7
2	OBJETIVOS	9
2.1	OBJETIVO GERAL.....	9
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO.....	10
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3.1	PRÉ – CONCENTRAÇÃO	10
3.2	SEPARAÇÃO MAGNÉTICA.....	10
4	AMOSTRAS/DESCRIÇÃO DO PROCESSO	12
5	METODOLOGIA.....	15
5.1	COMINUIÇÃO DAS PARTÍCULAS EM HPGR	15
5.2	TÉCNICAS DE HOMOGENEIZAÇÃO/AMOSTRAGEM.....	16
5.3	DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS	19
5.3.1	PENEIRAMENTO	19
5.3.2	DIFRAÇÃO DE RAIOS LASER.....	20
5.4	PRÉ-CONCENTRAÇÃO.....	21
5.4.1	<i>MIMS</i>	22
5.4.2	<i>WHIMS</i>	26
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
6.1	MOAGEM ABAIXO DE 1 mm.....	28
6.2	PRÉ – CONCENTRAÇÃO	30
6.2.1	<i>DUMP</i>	30
7	CONCLUSÃO.....	35
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
	APÊNDICES.....	36

1 INTRODUÇÃO

A mina em questão faz parte de um dos maiores complexos de exploração de minérios feríferos e aço da Europa. Os principais produtos são *sinter feed* com teor de ferro de pelo menos 53,5% e minério granulado com teor de ferro de pelo menos 34%.

Produzindo um mineral bruto através de minas a céu aberto, o *run of mine* contendo magnetita é explotado desde 1959 e parte do depósito composto por hematita (minério oxidado) foi considerado não rentável, sendo estocado em áreas próximas à mina. Elevou-se o potencial de beneficiamento desse material, uma vez que possui quantidade considerável de ferro e é oneroso para as operações de mineração.

Estudos anteriores em testes de bancada mostraram que é tecnicamente viável produzir pellet feed com 63~66% Fe e 6~9% SiO₂ por separação magnética e flotação. Um teste piloto baseado em separação magnética foi realizado, e obteve um produto com 65,5% Fe, 5% SiO₂ e 76,3% de recuperação metalúrgica.

O último trabalho de teste em escala de bancada considerou a amostra “*Dump*”, de minério oxidado. Essa amostra foi totalmente caracterizada (química, mineralógica e fisicamente) antes de alimentar duas rotas de beneficiamento. O interesse desta campanha de bancada foi confirmar o potencial deste minério para obter produtos comercializáveis, ou seja, mínimo de 65,5% Fe e SiO₂ com valor inferior a 5%.

Os resultados sugeriram que essas três amostras poderiam atingir a meta proposta, atingindo até 66% de ferro com teores de contaminantes principais (SiO₂ + Al₂O₃ + TiO₂) menor que 3%.

A rota ótima a ser testada em escala piloto compreende 4 etapas principais, iniciando com britagem, seguida de pré-concentração utilizando separação magnética, moagem em moinho de bolas e concentração final com flotação em circuito fechado com separação magnética *scavenger* ao fim do processo. O presente trabalho relata esta segunda fase do projeto realizada em escala piloto.

Duas rotas de estudo foram propostas e testadas em escala de bancada. A primeira – A Rota Base e a segunda – A Rota Alternativa.

A rota base foi composta por uma etapa de pré-concentração no tamanho em 1 mm seguida de uma segunda pré-concentração a 150 µm e uma concentração final em

granulometrias de 53, 45 e 38 μm . A Rota Alternativa foi testada com uma etapa de pré-concentração a 1 mm seguida de uma concentração também em P90s de 53, 45 e 38 μm com adição de uma etapa de remoção.

Para as etapas de concentração foram avaliadas duas operações unitárias, separação magnética e flotação, enquanto nas etapas de pré-concentração foram avaliados métodos densitários e separação magnética.

As duas rotas apresentaram resultados muito semelhantes. No entanto, a Rota Alternativa foi escolhida por ter menos operações unitárias. O estágio de separação magnética com tamanho em 1 mm mostrou eficiência significativa na eliminação da ganga e na recuperação principalmente das partículas de interesse. Sobre a etapa de concentração para ambas as rotas propostas, a flotação foi o método que produziu concentrados finais elegíveis aos objetivos fixados, porém, foi necessário ajustar o circuito de flotação para aumentar o rendimento geral e manter a qualidade do concentrado final. Os resultados de rendimento global, recuperação metalúrgica global e qualidade final do concentrado mostraram que a adição de uma etapa de remoção traz benefícios para todo o circuito (cerca de 66,6% Fe e principais contaminantes ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ de 1,71%). Com essas considerações foi possível sugerir um fluxograma a ser testado em escala piloto para analisar a confiabilidade dos testes de bancada. O fluxograma proposto é apresentado na Figura 1.

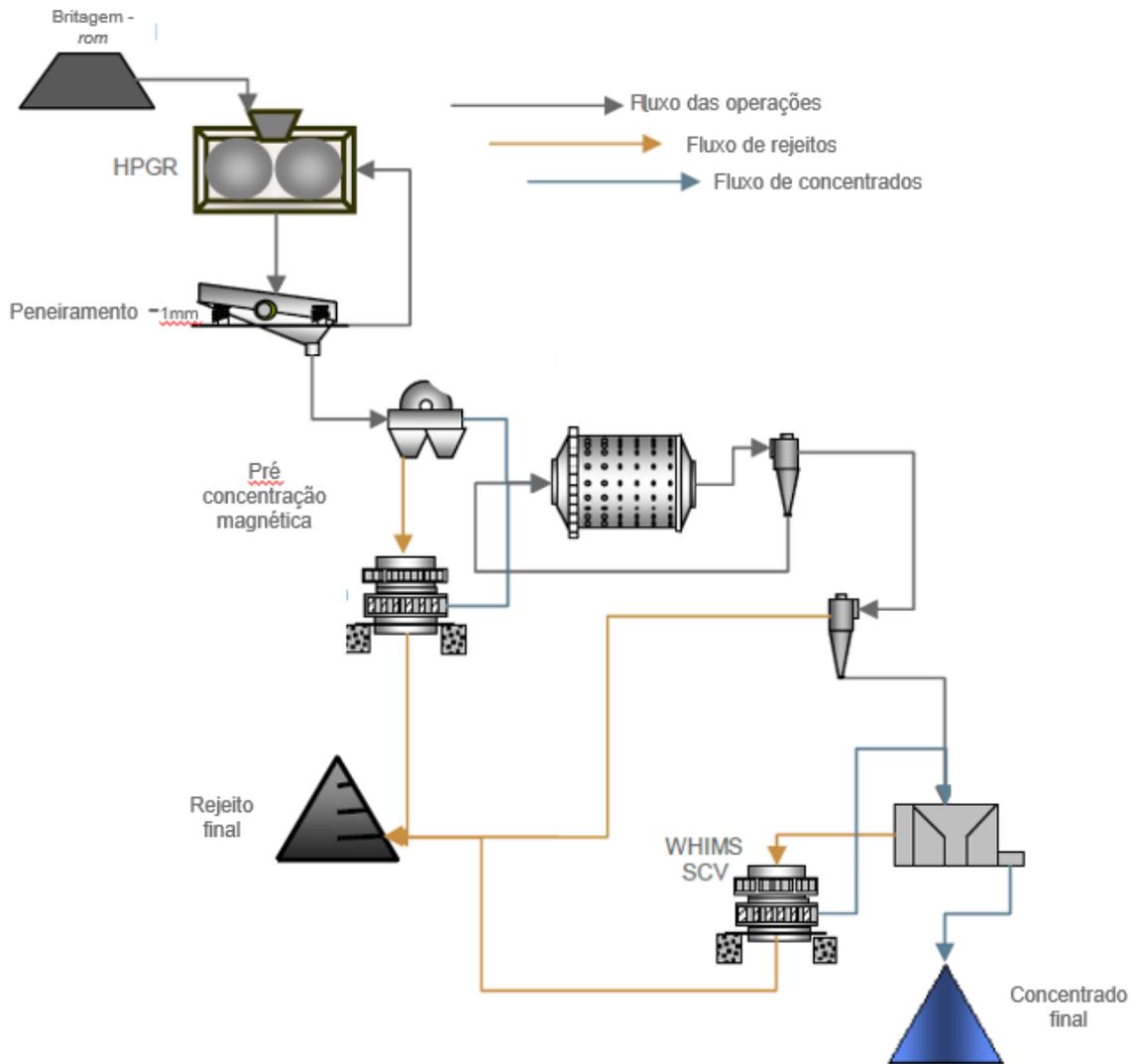


Figura 1- Fluxograma proposto.

Fonte: (AUTOR, 2024).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este estudo tem como objetivo encontrar uma nova rota de beneficiamento mineral a partir do minério oxidado e avaliar a viabilidade técnica de produzir um concentrado com no máximo 3% de contaminantes ($\text{TiO}_2 + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$).

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Produzir no mínimo 2 toneladas de concentrado e rejeitos para futuros estudos metalúrgicos e geotécnicos, respectivamente.

Testar o percurso ótimo proposto em escala piloto utilizando separação magnética como etapa de pré-concentração.

Analisar a composição química dos materiais tanto de entrada quanto de saída para avaliação dos teores de minério e ganga.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PRÉ – CONCENTRAÇÃO

A pré – concentração de acordo com Bamber (2008) e Murphy et al (2012) é uma técnica a que visa viabilizar projetos desafiadores, na tentativa de diminuir o preço de opex e maximizar a produtividade. Além disso, segundo Bergmann (2018), pode também ser considerada como descarte de material com baixo valor agregado antes da alimentação da usina de beneficiamento. A prática de pré-concentrar, pode trazer benefícios as operações unitárias como menor desgaste de equipamentos, redução em consumo energético e aumento da capacidade de entrega de produto.

Existem vários equipamentos que podem ser usados para realizar a pre-concentração como peneiramento, separação gravítica, e separação magnética (GRIGG e DELEMONTX, 2015). A escolha de cada método se dá pela propriedade diferenciadora do mineral que será beneficiado além de fatores como rendimento, *capex* e *opex*.

3.2 SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

A separação magnética pode ser descrita pela interação de um dipolo magnético e um campo magnético. Uma partícula, ao ser submetida a um campo se tornará magnetizada, uma vez que que será formada polos magnéticos em seus terminais, estes por sua vez orientados ao longo das linhas de campo (SILVA MAXIMILIANO, 2012). A aplicabilidade dessa técnica de separação é vasta, podendo ser usada em materiais ferrosos ou não ferrosos, nas remoções das

gangas magnéticas de minerais, na reciclagem de resíduos industriais etc. (SVOBODA e FUJITA, 2003).

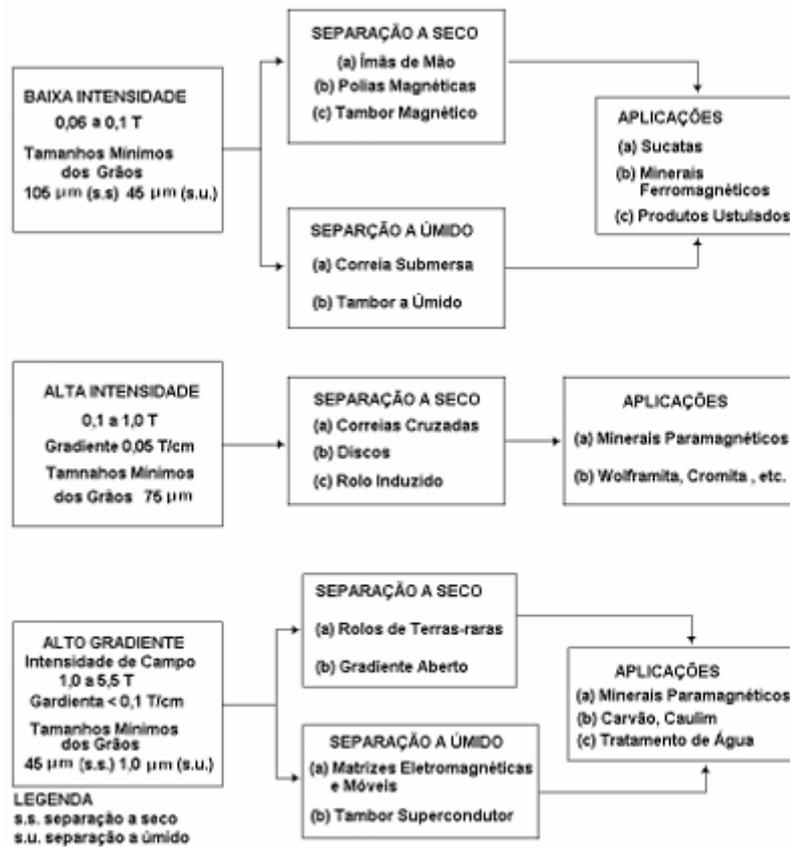


Figura 2 - Aplicações dos separadores magnéticos

Fonte: CETEM - 2002

Segundo (FUJITA, 2003), a separação de um material com características mais fortemente magnetizado de outro menos magnetizado pode ser dado por:

$$F_m^{mag} > \sum F_c^{mag} \quad e \quad F_m^{non-mag} < \sum F_c^{non-mag}$$

Em que F_c é considerada uma força de competição e F_m^{mag} e $F_m^{non-mag}$ forças que atuam em partículas mais e menos magnéticas. Para separadores magnéticos, as forças possíveis encontradas são: força magnética, força da gravidade, força centrífuga, força eletrostáticas entre partículas e arraste hidrodinâmico (VIANA JR, 1980). A Figura - 3 representa o esquema das ações individuais de cada uma delas sobre partículas submetidas a interação de um campo magnético.

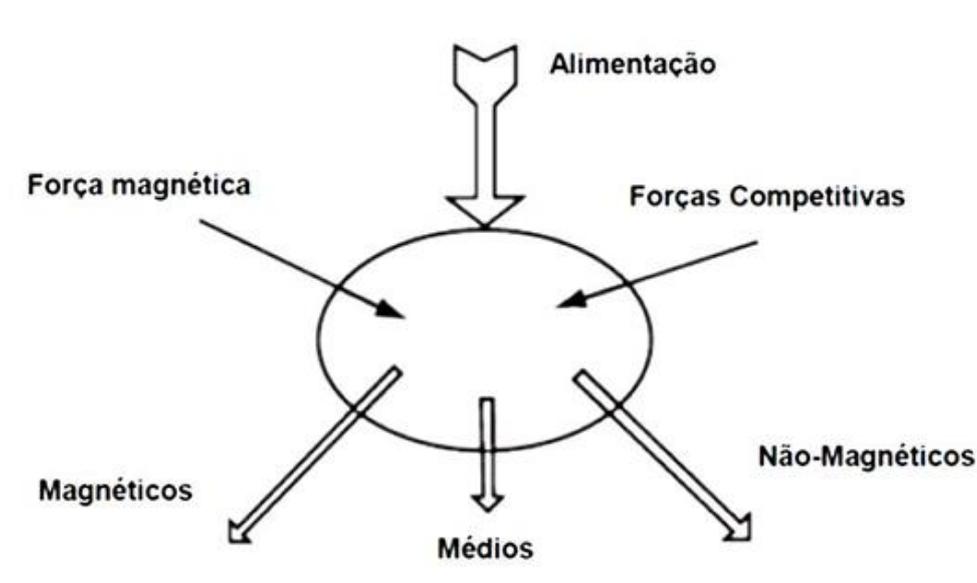


Figura - 3 Processo de separação magnética

Fonte: VIANA JR (1980)

Estudos conduzidos por (Luz, Sampaio & França, 2010) compararam as forças magnéticas presentes em diferentes gradientes de intensidade para os minerais de quartzo, hematita e magnetita. É observado na Tabela 1 o comportamento dos materiais de estudo. A magnetita apresenta maior susceptibilidade quando comparada a hematita, explicando o fato de ser necessário campos com menores gradientes para o seu beneficiamento.

Tabela 1 - Força atrativa para os minerais de quartzo, hematita e magnetita

	ENSAIO 1	ENSAIO 2
Campo (tesla)	0,18	1,80
Quartzo	-0,000154	-0,0154
Hematita	0,000643	0,643
Magnetita	15,8	158

4 AMOSTRAS/DESCRIÇÃO DO PROCESSO

Em 2020 foi realizada uma campanha de amostragem no leste europeu para que amostras representativas fossem enviadas ao centro de pesquisa e posteriormente testadas. Três pontos de amostragem foram escolhidos e cerca de 30 toneladas foram retiradas de cada um. Posteriormente, estes foram moídos com P90 em torno de 16 mm e divididos em pilhas. As informações sobre composição química e resultados de análises mineralógicas mostrou a informação sobre a amostra *dump*, principalmente nos valores de magnetita e goetita. A Tabela 2 apresenta as composições químicas do minério oxidado e a Tabela 3 as composições mineralógicas das amostras de ROM.

Tabela 2 - ROM - Composição Química.

Amostra	Dump
Feo	4,44
SiO2	44,60
Al2O3	2,05
CaO	0,18
MgO	0,78
Na2O	0,01
K2O	0,26
P	0,023
Mn	0,02
TiO2	0,06

Tabela 3 - ROM - Composição Mineralógica.

Amostra	Dump
Magnetita	1,50
Hematita	40,00
Goetita	2,00
Quartzo	45,00

O nível de magnetita é de 1,5%. A magnetita ocorre sozinha ou finalmente associada à hematita como resíduo, levando a um forte caráter magnético. Essas análises mineralógicas combinadas com os resultados obtidos nos testes preliminares de bancada permitiram especificar os parâmetros adequados para a campanha em escala piloto.

Com base nos últimos estudos, a campanha piloto considera processou a amostra *dump*. O fluxograma do projeto é apresentado na Figura 4

Optou-se por realizar etapas alternadas, ou seja, que as Pré-Concentrações do *dump* deve estar completa antes de seguir para a moagem. A mesma estratégia se aplica às etapas subsequentes.

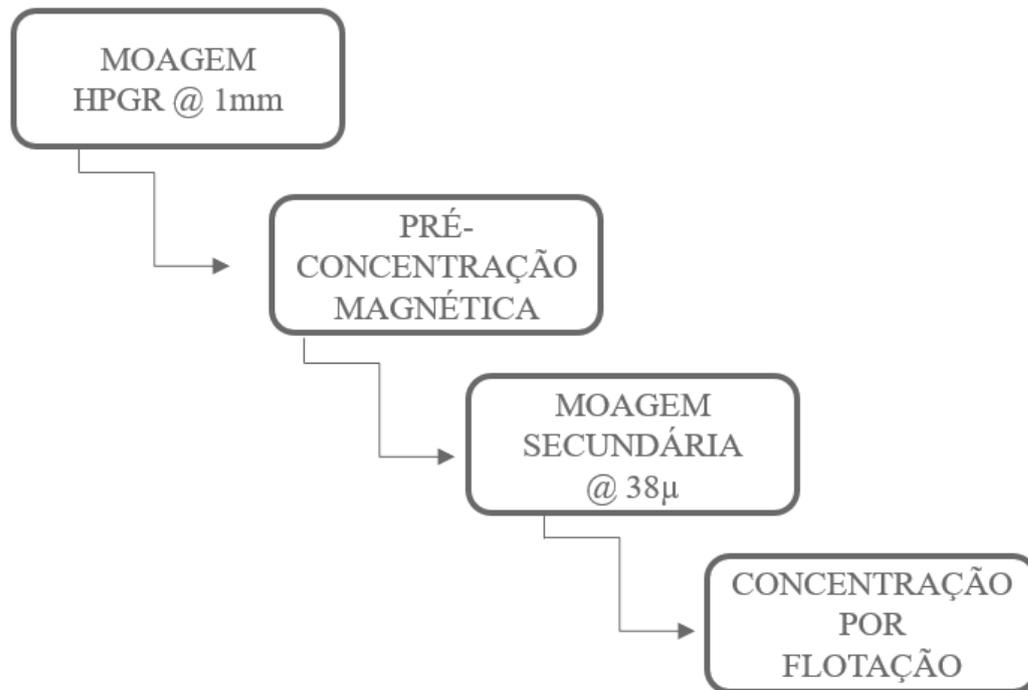


Figura 4 - Principais etapas do projeto.

Fonte: (AUTOR, 2024).

5 METODOLOGIA

3 toneladas de amostras foram trituradas em HPGR resultando P90 de 1mm para adaptar o tamanho das partículas para a próxima etapa – pré-Concentração usando *MIMS* e *WHIMS*. Foi decidido que cada amostra seria processada separadamente e em unidades alteradas, primeiramente no *MIMS*, produzindo concentrado e rejeito, que era a alimentação do *WHIMS*. A *WHIMS*, por sua vez, produzia concentrado que eram misturados ao concentrado *MIMS*, sendo seus rejeitos considerados rejeitos finais. A Figura 5 mostra as unidades alteradas desta etapa.

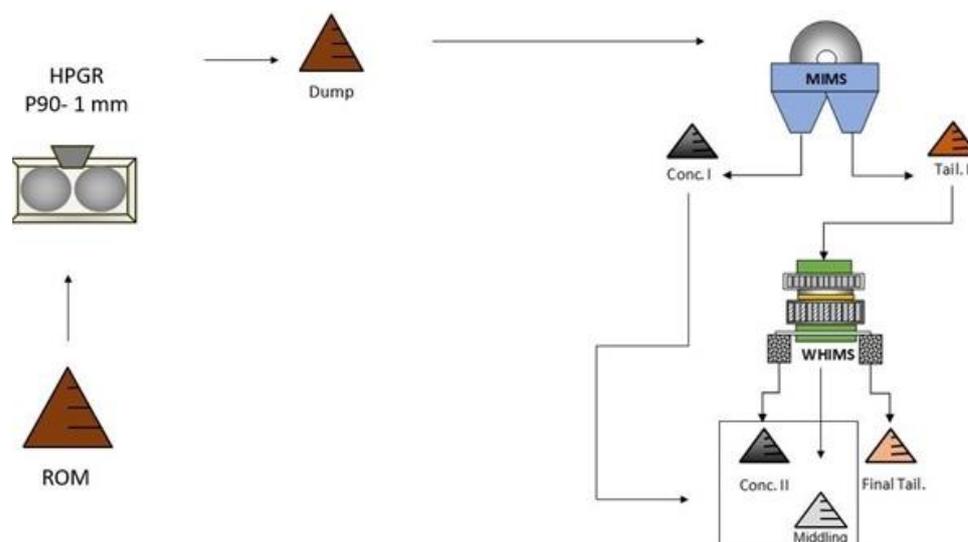


Figura 5 - Descrição das Unidades.

Fonte: (AUTOR, 2024).

5.1 COMINUIÇÃO DAS PARTÍCULAS EM HPGR

O *dump*, foi processado chegando à frações abaixo de 33 mm pela ThyssenKrupp na Alemanha. O equipamento é mostrado na Figura 6.

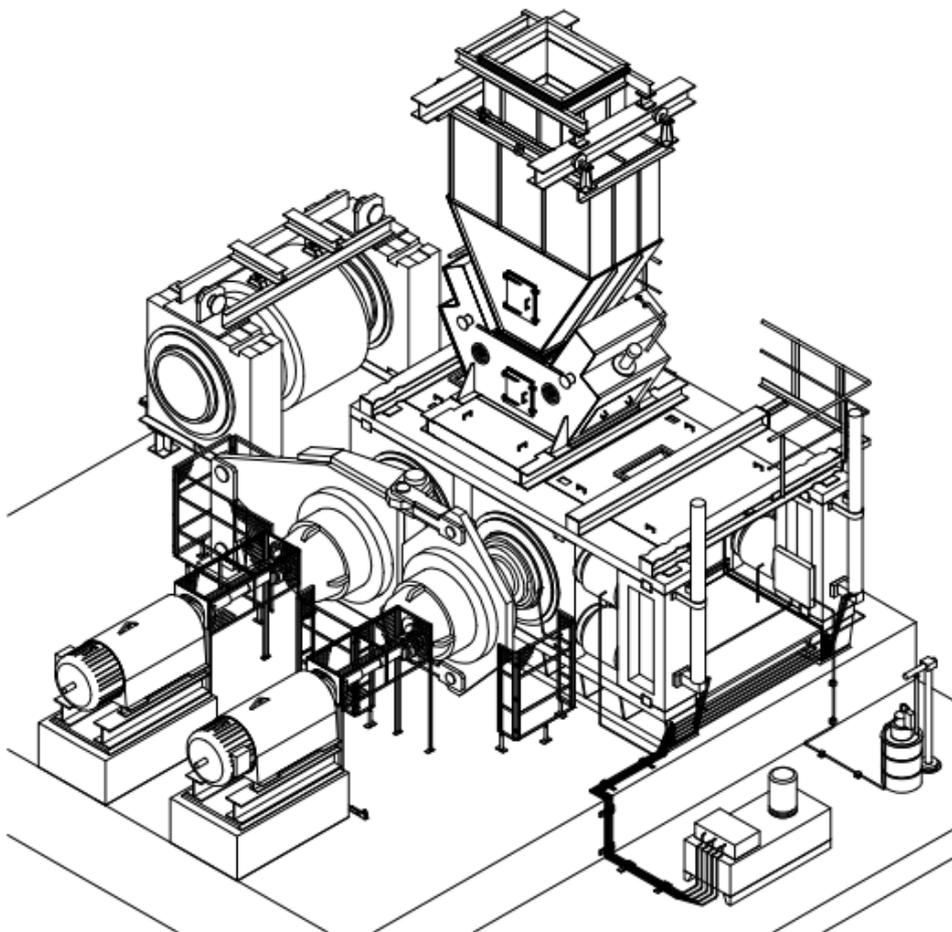


Figura 6 - Equipamento de redução de partículas

Fonte: - Machine manual en-PM.CPT.001.C

Dentro do sistema de classificação de ar do mesmo equipamento, as partículas mais grossas caem no estágio estático e uma fração mais fina é elevada para o estágio dinâmico. O rotor horizontal do estágio dinâmico separa o produto intermediário do estágio estático em rejeitos e produto do circuito.

5.2 TÉCNICAS DE HOMOGENEIZAÇÃO/AMOSTRAGEM

Para garantir a representatividade das amostras pós estágio de cominuição realizou-se quarteamento em baldes para torná-la representativa.

O amostrador de carrossel de baldes, conforme mostrado na Figura 7, foi usado para homogeneizar as amostras. Este equipamento tem capacidade para processar um volume em torno de 150 L de sólidos secos e possui um silo com sistema vibratório e uma calha que alimenta dezesseis baldes que gira em velocidade variável. Para considerar que toda a amostra global foi homogeneizada, essa divisão foi realizada 3 vezes.



Figura 7 - Amostrador carrossel de baldes

Fonte: (AUTOR, 2024).

Com relação ao manuseio dos produtos intermediários, após cada unidade de processamento, esses produtos deveriam ser secos em estufas industriais, armazenados em caçambas para facilitar a pesagem e o manuseio do material. Todos os produtos intermediários foram pesados com a chamada “balança conectada”, que foi uma ferramenta desenvolvida pelo departamento de mineração para o registro de todas as massas que foram processadas.

Após o manuseio, foi necessária amostragem para caracterizar os produtos intermediários. Para pouca quantidade de material (da ordem de 1kg a 5kg), a homogeneização e amostragem foram feitas com o Gilson Divisor mostrado na Figura 8. O divisor rotativo – *Rocklabs* (18) foi utilizado para obter alíquotas representativas, múltiplos de 5, a partir de 5% a 50% da massa inicial. Este equipamento tem capacidade para lidar com amostras em torno de 1kg e foi utilizado principalmente para preparo de amostras para análises químicas.



Figura 8 - Divisor Gilson

Fonte: (AUTOR, 2024).



Figura 9 - Divisor rotativo Rocklabs.

Fonte: (AUTOR, 2024).

5.3 DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS

5.3.1 PENEIRAMENTO

A análise granulométrica foi realizada com agitação contínua usando *SINEX* equipamento de peneiramento representado na Figura 10 que separou as frações até 0,038 mm. A Tabela 4 mostra as aberturas de tela usadas para distribuição granulométrica. As peneiras selecionadas são colocadas sobre a tela superior e a agitação é iniciada com o auxílio de escoamento de água. Os produtos foram peneirados a úmido, secos e pesados para obtenção da curva granulométrica.

Tabela 4 - Tela utilizada na análise

ABERTURA (mm)	
1,700	0,106
0,850	0,075
0,600	0,053
0,425	0,045
0,300	0,038
0,212	0,025

Fonte: (AUTOR, 2024).



Figura 10 - Peneiramento a úmido – SINEX

Fonte: (AUTOR, 2024).

5.3.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS LASER

O Mastersizer3000 mostrado na Figura 11 foi usado para analisar o percentual de finos da amostra, frações abaixo de 0,025 mm. A gama deste equipamento permite medir partículas entre 0,01 e 3500 μm . A máquina usa a técnica de difração a laser para medir a distribuição de tamanho de partícula de sólidos ($< 1 \text{ mm}$). A amostra dispersa passa pela área de medição da bancada óptica, onde um feixe de laser atinge as partículas. Uma série de detectores mede a intensidade da luz espalhada pelas partículas. O aparato composto pela bancada óptica, unidade de espalhamento e *software*, realiza três ou mais análises com intervalo de 5 segundos cada, tirando uma média dessas análises para chegar a um resultado da distribuição granulométrica.



Figura 11 - MasterSizer 3000

Fonte: (AUTOR, 2024).

5.4 PRÉ-CONCENTRAÇÃO

A etapa de pré-concentração tem como principal unidade de operação a separação magnética. Para gerar massa para as próximas etapas e melhorar a recuperação metalúrgica, foi realizada a pré- concentração piloto com combinação de *MIMS* e *WHIMS* (*Medium Intensity e Wet High Intensity Magnetic Separations*, respectivamente). O principal objetivo da etapa *MIMS* é remover as partículas de magnetita para evitar o bloqueio das matrizes nos testes *WHIMS* seguintes. A expectativa de concentração pré-magnética é remover a ganga grossa para beneficiar apenas as partículas de interesse. Esta seção descreve os testes piloto de pré-concentração e é mostrada no fluxograma esquematizado na Figura 12.

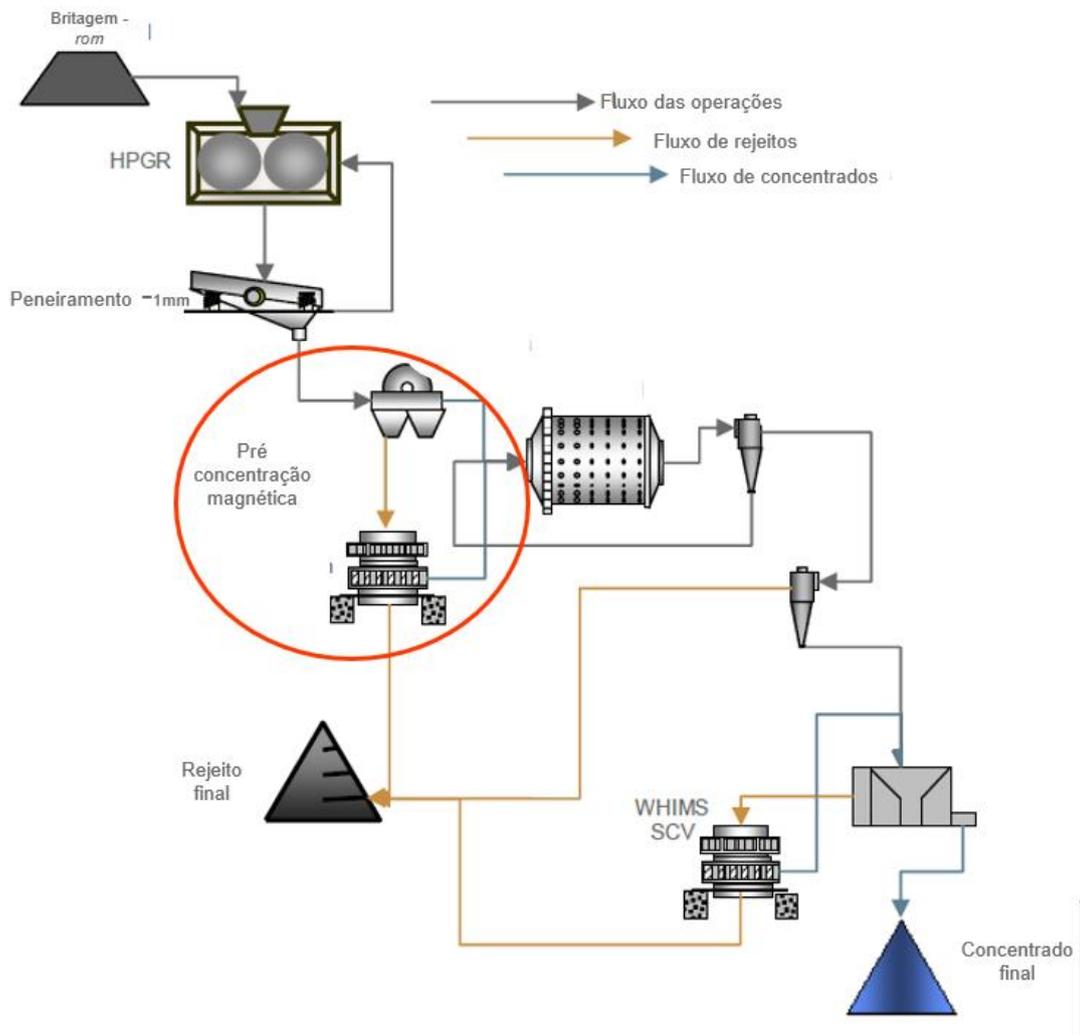


Figura 12 - Etapa piloto de pré-concentração

Fonte: (AUTOR, 2024).

5.4.1 MIMS

O *MIMS* (*Medium Intensity Magnetic Separator*) é utilizado para recuperar partículas magnéticas, transportadas em suspensão líquida em concentração de minério de ferro. A importância deste equipamento nesta pré-concentração é a remoção da maior parte da magnetita presente nas amostras. A magnetita é conhecida por ter alta suscetibilidade magnética, o que permite ser recuperada em campos magnéticos de menor intensidade e conseqüentemente, menor gradiente como nos equipamentos *MIMS*. O separador é alimentado com polpa preparada com uma alimentação contínua de sólidos e água dentro de uma bomba vertical. A polpa é injetada no vaso do equipamento, cujo nível deve ficar em contato com a

superfície do tambor. A Figura 13 representa de forma simplificada a descrição do equipamento utilizado e os pontos de saídas dos produtos gerados, concentrados e rejeitos.

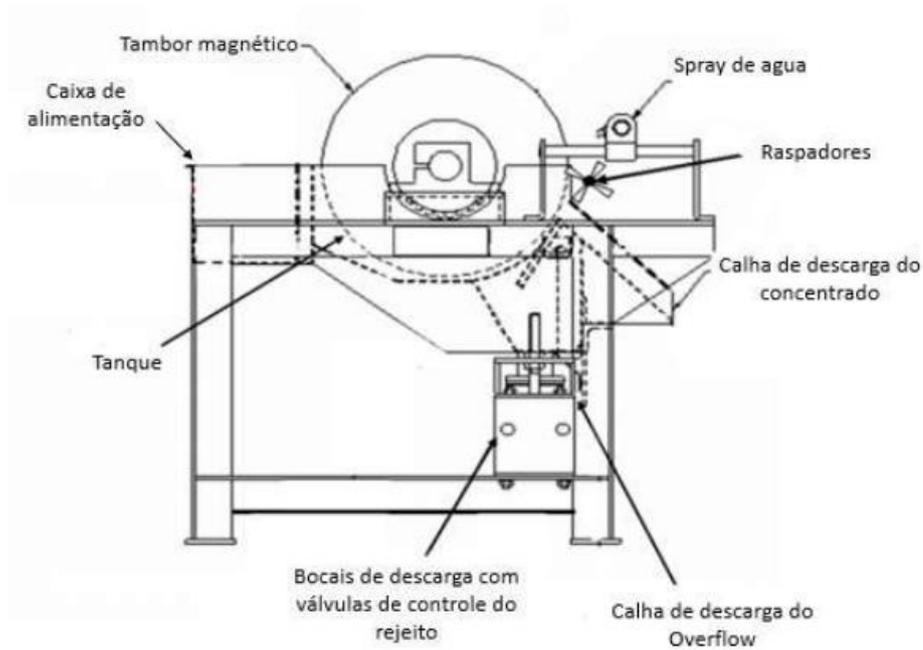


Figura 13 - Descrição do separador magnético de baixo campo *MIMS*

Fonte: (GAUSTEC, 2024).

O tambor utilizado possui um ímã permanente de aproximadamente 0,36 T em sua parte interna, este, evidenciado na página 24. A força magnética atrai partículas que são lavadas na saída do concentrado. A fração que não contém material magnético é descarregada na saída de rejeitos. Figura 14 demonstra o equipamento utilizado para a realização dos ensaios.



Figura 14 - *MIMS* 060B-010 15'' X 9''

Fonte: (AUTOR, 2024).

Um silo vibratório foi utilizado como sistema de alimentação de sólidos. A polpa foi então produzida com adição de água de processo para que atingisse o percentual ótimo de sólidos de alimentação. Além disso, um conjunto de tubulação foi necessário para alimentar um distribuidor de vazão que dividiu o material em dois fluxos: um para alimentar o *MIMS* e outro para ser um *by-pass* capaz de retornar à bomba. Essa manobra garantiu um melhor controle do nível de polpa dentro da bomba e ao mesmo tempo continuar misturando o material para evitar a sedimentação das partículas. Os dois produtos (concentrados e rejeitos) foram recuperados em caixas coletoras. O concentrado foi armazenado para compor o concentrado global e os rejeitos foram coletados para alimentar a próxima etapa de separação magnética (*WHIMS*).

5.4.1.1 AMOSTRA *DUMP*

Programou-se 8 testes para o processamento de 2,2 toneladas de sólidos secos. Os parâmetros utilizados são evidenciados na Tabela 5 - Parâmetros separação magnética de baixo gradiente. Durante os testes *MIMS* do *dump*, não foi possível realizar amostragens programadas para compor uma amostra global caracterizando os produtos. Foi necessário desenvolver um plano de amostragem para recuperar amostra representativa após a secagem do material. A

Figura 15 demonstra o procedimento definido para retirar alíquotas representativas dos produtos gerados pelos ensaios.

Tabela 5 - Parâmetros separação magnética de baixo gradiente

Parametros	Teste 1 -Dump	Teste 2 - Dump	Teste 3 - Dump	Teste 4 - Dump
Equipamento	MIMS	MIMS	MIMS	MIMS
Agua (l/min)	7,9	4,8	6,8	6
Alimentação (kg/hr)	2,6	1,2	1,7	1,5
Campo (Teslas)	0,36	0,36	0,36	0,36
Polpa (l/h)	519,3	308,5	437,1	385,6
Parametros	Teste 1 -Dump	Teste 2 - Dump	Teste 3 - Dump	Teste 4 - Dump
Equipamento	MIMS	MIMS	MIMS	MIMS
Agua (l/min)	7,6	13,1	19,5	19,5
Alimentação (kg/hr)	1,3	3,1	4,1	4
Campo (Teslas)	0,36	0,36	0,36	0,36
Polpa (l/h)	476,1	840,1	1240,1	1240,1

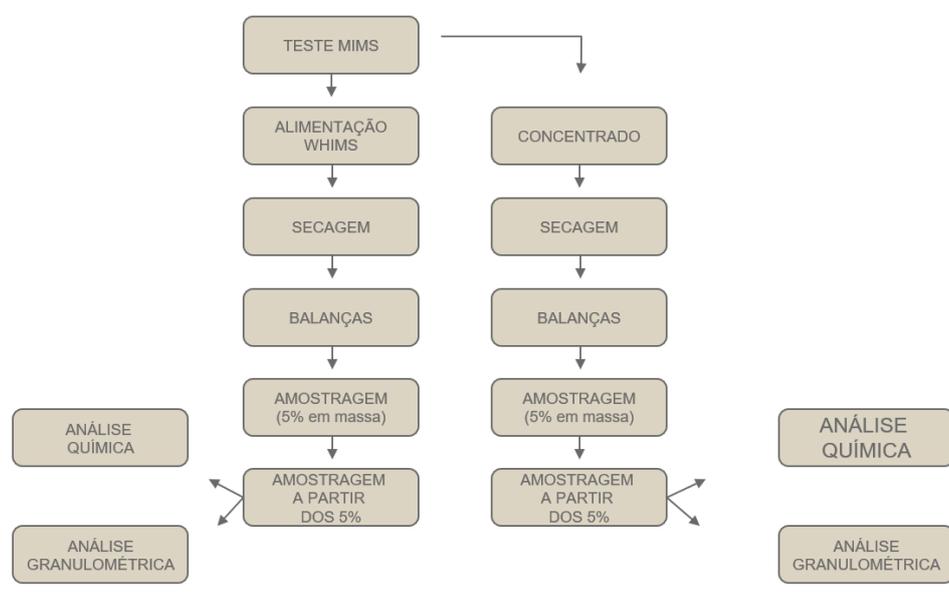


Figura 15 - Esquema para amostragem amostra *dump*

Fonte: (AUTOR, 2024).

A Tabela 6, por outro lado, demonstra os parâmetros escolhidos para a realização dos ensaios utilizando equipamento com baixo gradiente operacional. Para processar as 2,2 toneladas de material pré-existentes, foram necessárias 7 campanhas de testes piloto.

Tabela 6 - Parâmetros utilizados em testes *MIMS*

Parâmetros	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7
Equipamento	MIMS						
% sólidos	19%	19%	20%	19%	17%	17%	20%
Água (l/min)	1,00	1,30	1,10	1,00	0,88	0,88	1,10
Alimentação (kg/hr)	3,40	4,46	3,60	3,40	3,70	3,60	3,60
Campo (Tesla)	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
Polpa (l/h)	209,1	267,7	220	206,2	222,4	219,9	218,4

5.4.2 *WHIMS*

Os rejeitos do *MIMS* alimentaram a separação magnética úmida por meio do equipamento representado pela Figura 16. Esse dispositivo é capaz de gerar um campo magnético de alto gradiente (1,4T) e foi projetado para remoção ou concentração contínua de minerais paramagnéticos. Nesta classe de equipamentos, a força magnética é proporcional à variabilidade da corrente elétrica aplicada. O campo magnético gerado é amplificado dentro das matrizes, onde as partículas paramagnéticas são aprisionadas. Um conjunto de 8 matrizes compõe um carrossel rotativo, que recebe a alimentação pelo lado do concentrador sob a influência do campo magnético. É importante ressaltar que o desempenho da separação da máquina está atrelado à escolha da matriz, que está relacionada ao tamanho do material (cerca de 2,5 vezes maior).



Figura 16 - Minimag dual G 340

Fonte: (AUTOR, 2024).

5.4.2.1 AMOSTRA *DUMP*

A Tabela 7 apresenta os parâmetros utilizados nos testes com alto gradiente. É possível notar que alguns deles possuem valores fixos como tamanho da matriz, intensidade do campo magnético e velocidade do carrossel. Os concentrados e rejeitos dos testes foram coletados, secos, pesados e armazenados. Este é considerado o rejeito final desta etapa de pré-concentração.

Tabela 7 - Parâmetros separação magnética de alto gradiente

Parâmetros	Teste 1 - Dump	Teste 2 - Dump	Teste 3 - Dump	Teste 4 - Dump	Teste 5 - Dump
Equipamento	Minimag G-340				
Matriz (mm)	3,80	3,80	3,80	3,80	3,80
% Sólidos	30,00	32,00	25,00	27,00	22,00
Água (l/min)	7,80	7,80	7,80	7,80	7,80
Alimentação (kg/h)	3,10	3,30	3,20	3,90	3,00
Campo Magnético (T)	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Velocidade de carrossel (rpm)	4	4	4	4	4

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 MOAGEM ABAIXO DE 1 mm

A moagem e homogeneização foram realizadas e é possível ver que todas as amostras atingiram o alvo (P90 em 1mm). A Figura 17 demonstra a distribuição e tamanho de partículas realizada em HGPR. Ou seja, amostras pré e pós moagem realizada em alta pressão.

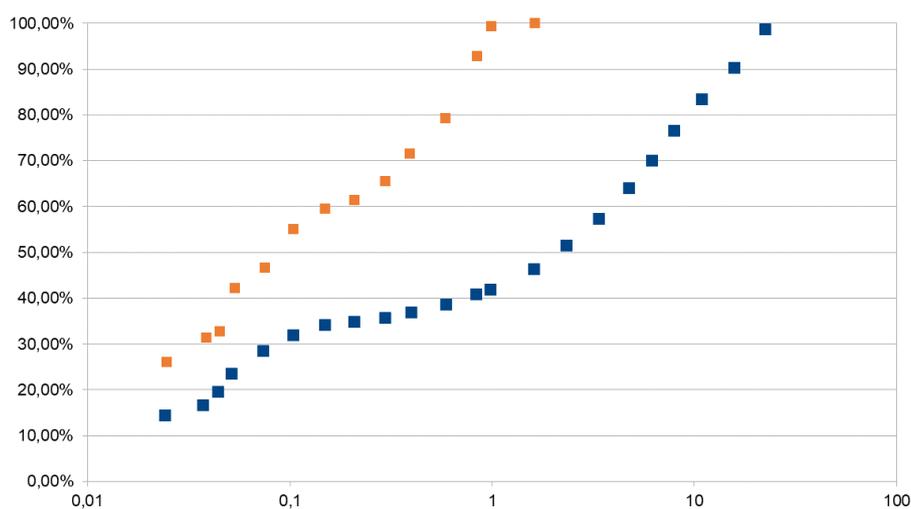


Figura 17 - Distribuição granulométrica ROM e pré – concentração

Fonte: (AUTOR, 2024).

A Tabela 8, por sua vez, apresenta o p80 das amostras processadas antes da sua moagem em HGPR.

Tabela 8 - Estatísticas de distribuição granulométrica

PSD - ROM	DUMP
F80	8,00
PSD - ROM	DUMP
P80	0,600

6.2 PRÉ – CONCENTRAÇÃO

Esta sessão apresentará os resultados da etapa piloto de pré-concentração em ordem cronológica. Primeiro da amostra *dump*. Os resultados desta campanha piloto serão comparados com resultados de testes anteriores obtidos em bancada.

6.2.1 DUMP

6.2.1.1 MIMS + WHIMS

As linhas tracejadas apresentadas na Figura 18 indicam as duas amostras de alimentação (*Dump Crushed Rom e Dump MIMS Tailings*) que foram processadas durante o teste e produziram os produtos indicados pelas linhas contínuas. A Figura 18 indica que um concentrado *MIMS* é o produto mais grosso, com P80 em torno de 1 mm, e os rejeitos *WHIMS* são os mais finos, com P80 em torno de 0,075 mm. Tal diferença pode ser explicada pela remoção das partículas grosseiras restantes realizada em *MIMS*. É possível visualizar através da Figura 19 e Figura 20 a diferença de tamanho existente entre elas.

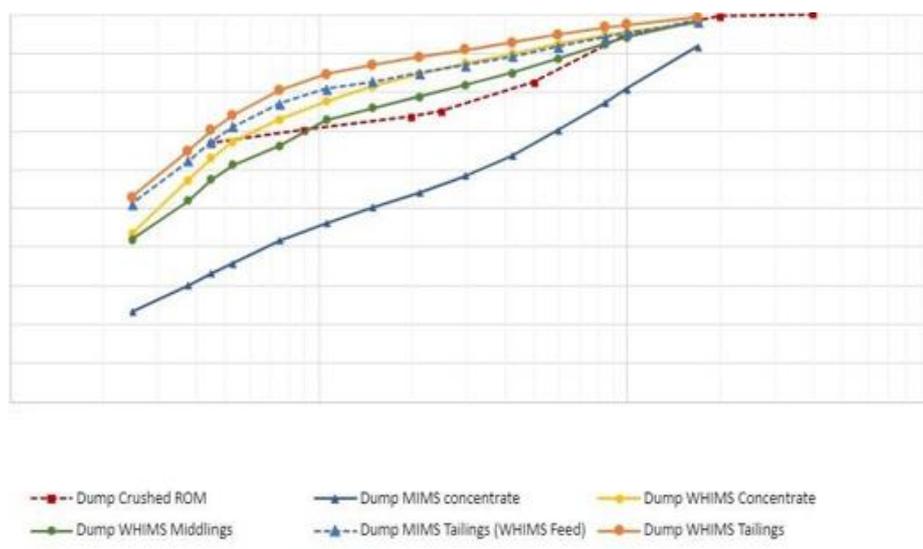


Figura 18 - Comparação granulométrica concentrado dump



Figura 19 - *Dump* - produtos separação magnética de baixo gradiente

Fonte: (AUTOR, 2024).



Figura 20 - *Dump* - produtos separação magnética de alto gradiente

Fonte: (AUTOR, 2024).

Considerando a dificuldade da tarefa de misturar os 3 produtos para formar o pré- concentrado final para posteriormente obter uma amostra representativa, preferiu-se construir a curva de distribuição granulométrica e a qualidade química por meio geométrico. A curva obtida da mistura (concentrado *MIMS* + concentrado *WHIMS* + *MIDDLEINGS*) foi calculada e pode ser vista pela linha tracejada na Figura 21 sugere um P80 em 0,212 mm.

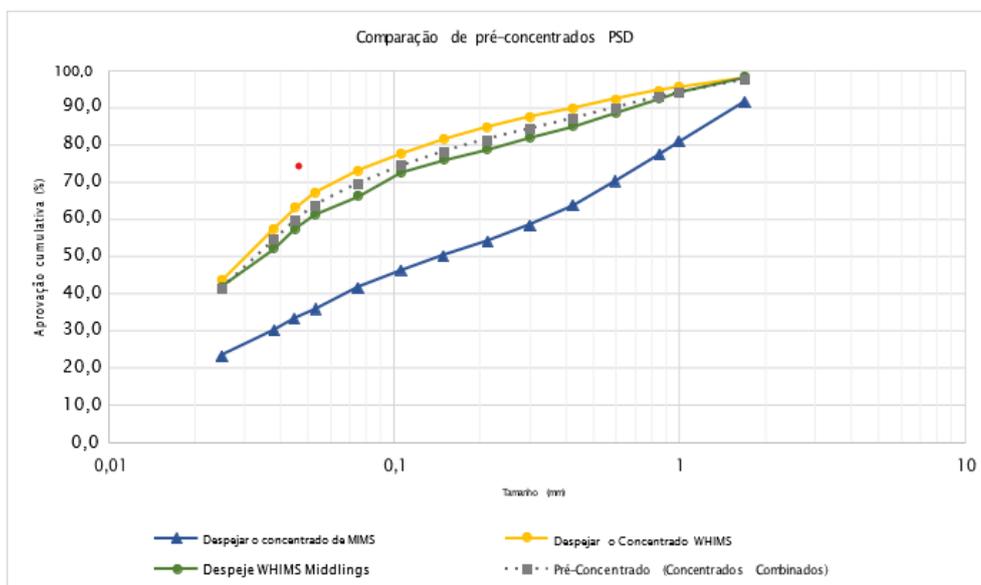


Figura 21 - Comparação de pré - concentrados

Os resultados obtidos para o teste piloto de pré-concentração de separação magnética para a amostra *dump* são apresentados na Tabela 9 a seguir. O pré-concentrado final obtido com o concentrado *MIMS*, concentrado *WHIMS* atingiu 54% de Fe com uma recuperação metalúrgica de 66,7%. O rejeito final *WHIMS* apresentou 58% da massa de alimentação com 22% Fe e 61,3% SiO₂.

Tabela 9 - *Dump* pré-concentração piloto

Amostra	Equipamento	Recuperação em peso (%)	Recuperação metalúrgica (%)	Recuperação Global (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)
nentação medida	-	-	-	100%	34,80	44,60	2,05	0,06
Alimentação calculada	-	100,00%	-	100%	34,30	44,58	2,25	0,06
Concentrado I	MIMS 0,36T	3,30%	4,70%	3,30%	47,80	26,50	1,21	0,07
Rejeito I		96,70%	-	96,70%	33,80	45,20	2,29	0,06
Alimentação calculada	-	100,00%	-	96,70%	35,10	42,70	2,22	0,07
Concentrado II	MINIMAG 1,4T	32,20%	62,30%	36,00%	57,40	12,25	2,04	0,08
Medio		3,00%	2,20%	2,90%	25,50	57,00	2,64	0,06
Rejeito II		59,80%	40,00%	57,80%	22,90	61,30	2,36	0,06
Alimentação calculada	-	100,00%	-	100,00%	36,20	42,37	2,21	0,07
CI + CII + Medio	-	42,00%	66,70%	42,20%	54,40	16,47	2,06	0,08
Rejeito II	-	58,00%	-	57,80%	22,90	61,30	2,36	0,06

A Tabela 10 apresenta os resultados da separação magnética realizada em escala de bancada para amostra *dump*. Com os resultados obtidos aplicando diferentes campos magnéticos (1,4 T, 0,5 T, 0,8 T, 1,2T, 1,4 T) foi possível determinar a curva de aplicabilidade que determinou os parâmetros necessários para o funcionamento ótimo. As amostras foram primeiramente submetidas a um *LIMS* (separação magnética de baixa intensidade) seco em estudos anteriores a este trabalho. Os *middlings* do *LIMS* alimentaram o *MIMS* seco e ambos os rejeitos alimentaram o *WHIMS*. O concentrado final foi composto por todo concentrado

obtido com *WHIMS*, esta etapa permitiu melhorar a recuperação metalúrgica chegando a 77% como valor final como evidenciado na Tabela 11.

Tabela 10 - *Dump* pré-concentração bancada

Amostra	Campo Magnético (T)	Recuperação em peso	Recuperação metalúrgica	Recuperação Global	Fe	SiO2	Al2O3	TiO2
Alimentação	-	-	-	100%	34,80	44,60	2,05	0,06
Alimentação calculada	-	-	-	-	34,50	45,00	2,06	0,06
Concentrado I	1,4 T	5,70%	8,00%	5,70%	48,80	25,00	1,35	0,07
Rejeito I		94,30%	-	94,30%	33,60	46,20	2,11	0,10
Concentrado II		1,80%	2,60%	1,70%	47,70	21,80	1,56	0,10
Rejeito II		98,20%	-	92,60%	33,30	46,66	2,12	0,06
CI + CII			10,80%	7,40%	48,50	24,25	1,39	0,08
Concentrado III	0,8 T	9,20%	16,50%	8,50%	60,10	9,89	0,92	0,06
Rejeito III		90,80%	-	84,10%	30,60	50,36	2,24	0,06
CI + CII + CIII			26,00%	15,90%	54,70	16,58	1,14	0,07
Concentrado IV	1,2 T	40,80%	58,00%	34,30%	43,60	30,70	2,75	0,08
Rejeito IV		59,20%	-	49,80%	21,70	63,90	1,89	0,05
CI + CII + CIII + C IV + CV			80,50%	59,10%	46,90	26,20	2,37	0,06
Rejeito V	1,5 T	82,10%	-	40,90%	16,50	72,20	1,63	0,04

Tabela 11 – *Dump* pré-concentração semi piloto

Amostra	Campo Magnético (T)	Recuperação em peso	Recuperação metalúrgica	Recuperação Global	Fe	SiO2	Al2O3	TiO2
Alimentação Calculada	-	-	-	-	34,80%	44,80%	2,16%	0,06%
Concentrado I	RG 1,4 T	3,50%	4,10%	3,50%	40,80%	35,10%	1,72%	0,06%
Médio I		16,8	-	16,80%	30,40%	52,96%	1,40%	0,03%
Rejeito I		79,70%	-	79,70%	35,50%	43,50%	2,35%	0,06%
Concentrado II	SCV 0,3 T	11,10%	15,50%	1,90%	42,60%	33,40%	1,72%	0,07%
Rejeito II		89,90%	-	15,00%	28,80%	55,40%	1,36%	0,03%
CI + CII	-	-	6,40%	5,40%	41,40%	34,51%	1,72%	0,06%
R I + RII	-	-	-	94,60%	34,50%	45,38%	2,19%	0,07%
Concentrado III	SCV 1,4T	56,10%	74,50%	55,10%	47,70%	25,20%	2,26%	0,05%
Médio III		3,60%	-	3,50%	20,20%	66,50%	2,16%	0,04%
Rejeito III		40,30%	-	39,50%	21,00%	66,00%	1,92%	0,07%
CI + CII + C III	-	-	77,00%	60,50%	45,90%	27,86%	2,23%	0,07%
Rejeito III	-	-	-	39,50%	21,00%	66,00%	1,92%	0,04%

O teor de ferro foi superior cerca de 8% nos testes realizados em equipamentos de menor escala, 54,70% contra 45,90%. Resultados esperados visto que recuperação metalúrgica e teor são magnitudes inversamente proporcionais. É notável que o rendimento foi significativamente reduzido em escala piloto em comparação com os outros 2 testes. Isso pode ser explicado pelo entupimento das bombas, que eram necessárias para esvaziar o recipiente de enchimento, implicando no descarte da polpa. Além disso, o bloqueio de matrizes durante os testes *WHIMS*, acarretado pelo controle de fluxo de polpa, afetou o sistema de alimentação do equipamento, desperdiçando o material processado. Por fim, houve perda de material durante a amostragem de rejeitos *MIMS*. Considerando que os testes em escala piloto estão sujeitos a muitas variáveis externas para controle quando comparados aos testes de bancada e que ela movimentava maior quantidade de material, qualquer interferência em sua estabilidade resulta em

grandes perdas. Esses fatores contribuíram para uma diminuição significativa da recuperação de massa. A Figura 22 compara os valores obtidos para recuperação metalúrgica, recuperação global e teores de sílica e ferro alcançados durante os estudos.

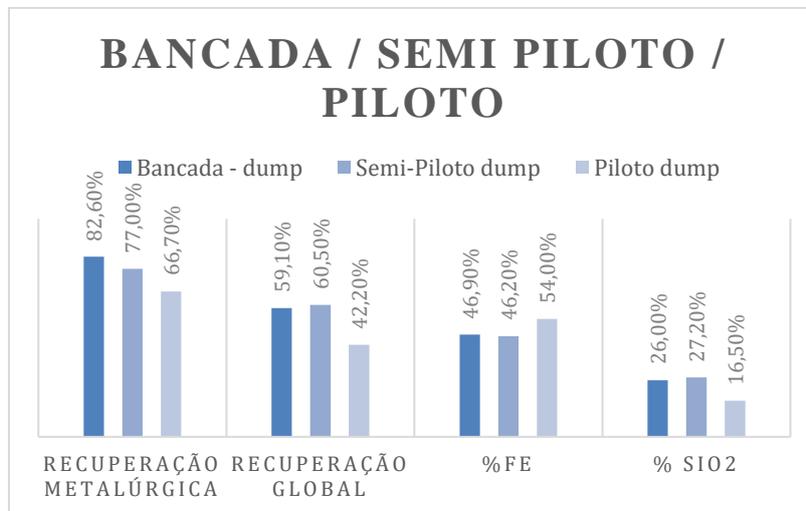


Figura 22 - Comparação de desempenho dos testes

Fonte: (AUTOR, 2024).

Por fim, o teor de ferro e sílica nas frações finais do rejeito dos testes de bancada, semi piloto e piloto são demonstrados na Figura 23. A quantidade de Fe nos rejeitos do *dump* atingiu 22,90% e 61,30% de SiO₂, 5% a menos que os testes semi piloto.

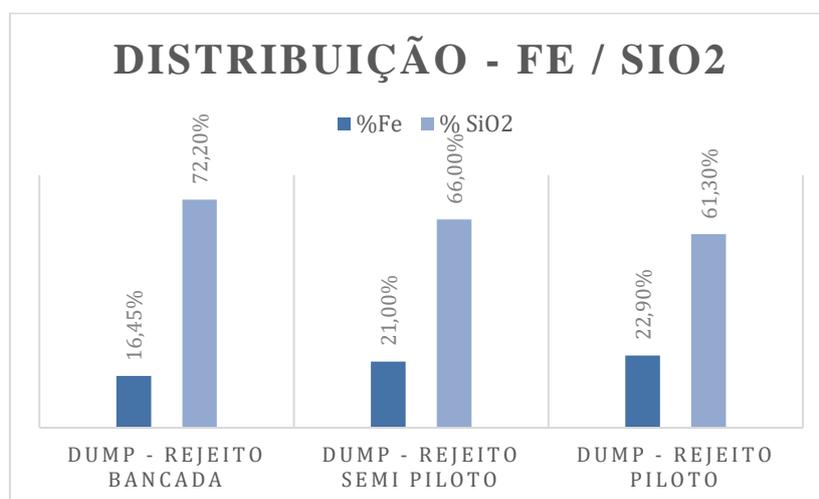


Figura 23 - Distribuição química Fe / SiO₂

7 CONCLUSÃO

A campanha piloto para a amostra *dump* apresentou resultados significativos como alto teor de ferro, que atingiu 54% para o pré-concentrado global final. A quantidade de amostra processada, foi capaz de alcançar os mínimos valores em massa para testes geotécnicos e metalúrgicos. Simulações realizadas em programas para balanços de massa, demonstraram que é possível tecnicamente chegar as especificações pré-estabelecidas para fabricação de *sinter feed*. Isso significa que a qualidade desta etapa apresentou melhores resultados em comparação à bancada e semi piloto.

A comparação dos resultados entre os testes anteriores e a etapa piloto concluiu que o *WHIMS* representa o principal responsável pelo processamento das amostras na etapa de pré-concentração.

A quantidade de sílica nos rejeitos atingiu 61,30%, significando que mais ganga ainda poderia ser eliminada na etapa de pré-concentração.

A recuperação de massa apresentou valores 18% menores na campanha piloto sugerindo que a perda de massa durante a operação afetou diretamente os resultados esperados.

Alguns ajustes de operação podem ser explorados para melhorar os resultados alcançados. Aumentar o campo magnético do *WHIMS* por exemplo, para valores acima de 1,4 T pode atingir os alvos atingidos anteriormente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Manual de instruções de operação do separador magnético de tambor úmido de 15" x 9" Manual MINIMAG – GAUSTEC – Dual G 340

ThyssenKrupp - Relatório de Teste HGPR

SILVA, Maximiliano Batista da. Separação magnética de ultrafinos hematíticos. 2012. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

APA: Jan Svoboda Toyohisa Fujita (2003) Innovation in Magnetic Techniques of Material Treatment: Technology at a Crossroad

VIANA JR., A. et alii. Métodos Físicos de Concentração de Minérios. In: Coelho, E. M. (ed.). Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia in Memoriam Professor Paulo Abib Andery. Recife: Instituto Tecnológico do estado de Pernambuco, 1980.

CETEM. Rio de Janeiro – RJ, 2002. MAATEM, L. V. D.; POSTMA, E.

VALADÃO, G. E.; & ARAUJO, A. C. Introdução ao Tratamento de Minérios. Belo Horizonte. UFMG, 2012.

Bergmann, Mauricio Guimarães; José Neto, Dimas; Horta, Daniela Gomes; Sanches, Julia Guimarães. PRÉ-CONCENTRAÇÃO DE UM MINÉRIO DE ZINCO E SUA INFLUÊNCIA NA FLOTAÇÃO, p. 379-390. In: 19º Simpósio de Mineração, São Paulo, 2018.

ISSN: 2594-357X, DOI 10.5151/2594-357X-31923

Grigg, N and Georges J Delemontex. “The Pre-Concentration Of Precious And Base Metal Deposits Using The Inline Pressure Jig (IPJ) ; Higher Feed Grades And More Metal.” (2015).

Machine manual en-PM.CPT.001.C

APÊNDICES

