

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas –
Mestrado Profissional

Dissertação de Mestrado

OTIMIZAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO EM USINA DE
PROCESSAMENTO MINERAL COM SECAGEM E CONCENTRAÇÃO
MAGNÉTICA

Autor:
Priscilla Leão Santos

Orientador: Prof. Dr. Luiz Claudio Monteiro Montenegro

Agosto de 2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas –
Mestrado Profissional

Priscilla Leão Santos

OTIMIZAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO EM USINA DE
PROCESSAMENTO MINERAL COM SECAGEM E CONCENTRAÇÃO
MAGNÉTICA

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em
Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas – Mestrado
Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais
como requisito parcial a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Claudio Monteiro Montenegro

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2024

S237o	Santos, Priscilla Leão. Otimização da concentração de minério de ferro em usina de processamento mineral com secagem e concentração magnética [recurso eletrônico] / Priscilla Leão Santos. - 2024. 1 recurso online (157 f. : il., color.) : pdf. Orientador: Luiz Cláudio Monteiro Montenegro. Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Bibliografia: f. 152-157. 1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral. 3. Secagem - Teses. 4. Água - Uso - Teses. 5. Sustentabilidade - Teses. 6. Otimização - Teses. 7. Beneficiamento de minério - Teses. 8. Minérios de ferro - Teses. I. Montenegro, Luiz Claudio Monteiro. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título. CDU: 622(043)
-------	---



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica,
Materiais e de Minas da UFMG - Mestrado Profissional

UF **m** G

OTIMIZAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO EM USINA DE PROCESSAMENTO MINERAL COM SECAGEM E CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA

PRISCILLA LEÃO SANTOS

Dissertação de mestrado submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Aprovada em 29 de julho de 2024.

Por:

Documento assinado digitalmente
gov.br LUIZ CLAUDIO MONTEIRO MONTENEGRO
Data: 29/07/2024 22:11:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Luiz Claudio Monteiro Montenegro (UFMG)
Coorientador

Documento assinado digitalmente
gov.br LEONARDO JUNIOR FERNANDES CAMPOS
Data: 29/07/2024 16:35:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Leonardo Junior Fernandes Campos (UFMG)

Documento assinado digitalmente
gov.br LUCIANO FERNANDES DE MAGALHAES
Data: 29/07/2024 11:33:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Luciano Fernandes de Magalhães (UFMG)

Documento assinado digitalmente
gov.br ROBERTO GALERY
Data: 29/07/2024 11:29:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Roberto Galery (UFMG)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, a Deus pelas bênçãos infinitas.

Agradeço, especialmente, aos meus pais, que sempre me incentivaram a estudar e se dedicaram para que todos os filhos tivessem acesso à educação. Aos meus irmãos, que me ajudaram durante este período difícil, sempre com palavras encorajadoras.

Um agradecimento especial ao meu marido, que me proporcionou todo o suporte necessário para finalizar a minha tese, além de sempre me incentivar e auxiliar nas tomadas de decisões, das mais simples as mais complexas. Agradeço profundamente por todo o carinho demonstrado, que fez toda a diferença durante esse período.

Não posso deixar de mencionar a oportunidade proporcionada por Leonardo e Rodrigo, com quem tenho o privilégio de trabalhar e aprender diariamente.

Ao Igor Cristty, que me auxiliou durante todo o trabalho sempre com disposição e paciência.

Agradeço também a Inbras, por abrir suas portas para a realização dos testes.

Ao professor Luiz Claudio Montenegro, pelas valiosas dicas e constante atenção, e por todas as reuniões que certamente enriqueceram minha trajetória acadêmica.

Aos professores Luciano Magalhães, Roberto Galery e Leonardo Junior Fernandes Campos, agradeço pelas sugestões que contribuíram para este trabalho e pela disponibilidade.

Por fim, agradeço a UFMG por me conceder esta oportunidade, e a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

RESUMO

A mineração enfrenta desafios significativos devido a redução dos teores de ferro e ao aumento de contaminantes nos depósitos, exigindo tecnologias avançadas para manter baixo os custos operacionais e garantir uma recuperação metálica e mássica eficiente. Questões ambientais também se tornaram mais relevantes, exigindo o uso sustentável dos recursos naturais, como a redução do consumo de água e o melhor aproveitamento do minério beneficiado. Embora eficiente, o beneficiamento a úmido consome grandes volumes de água e apresenta elevados custos operacionais e ambientais. Em resposta, a concentração a seco tem emergido como uma alternativa sustentável, especialmente em regiões com escassez hídrica. O estudo teve como objetivo principal analisar e caracterizar tecnologicamente um processo de beneficiamento a seco com etapa de secagem no município de Sabinópolis, visando melhorar a recuperação mássica e metalúrgica do processo atual. Foram realizados diversos testes de concentração magnética em escala piloto, envolvendo o uso de secagem e testes híbridos, onde parte do material foi beneficiado a úmido e outra parte a seco após etapa de secagem. Os testes foram conduzidos com itabirito semi-compacto e compacto. Para semi-compacto, o melhor resultado foi obtido com o itabirito cominuído a menor que 1 mm, alcançando um concentrado final com teor aproximado de 60,4% de ferro e recuperação mássica de 49,2% e metalúrgica de 88,8%, por meio da concentração a seco com etapa de secagem. Para o itabirito compacto, que mostrou maior resistência a cominuição, foi proposta uma rota híbrida, beneficiando parte do material mais fino a úmido e o restante a seco com etapa de secagem, obtendo um concentrado final com teor aproximado de 65% de ferro e recuperação mássica de 49,7% e metalúrgica de 87,7%. Destaca-se a importância da secagem na eficiência do processo de concentração magnética. Os testes realizados com material a umidade natural não chegaram a teores de ferro e sílica favoráveis e a redução do tamanho teve um efeito deletério na separação, efeito inverso da separação a seco. Os resultados indicam que pequenas adequações na granulometria e a instalação de novos equipamentos menores podem otimizar a unidade de beneficiamento existente.

Palavras-chave: beneficiamento a seco; minério de ferro; recuperação mássica; otimização de processos; secagem; uso sustentável da água.

ABSTRACT

Mining faces significant challenges due to the reduction in iron grades and the increase in contaminants in deposits, which requires advanced technologies to keep operational costs low and ensure efficient metal and mass recovery. Environmental issues have also become more relevant, demanding the sustainable use of natural resources, such as reducing water consumption and better utilization of processed ore. Wet beneficiation, although efficient, consumes large volumes of water and presents high operational and environmental costs. In contrast, dry beneficiation has emerged as a sustainable alternative especially in regions with water scarcity. This study aimed to analyze and technologically characterize a dry beneficiation process with a drying stage in the municipality of Sabinópolis, seeking to improve the mass and metallurgical recovery of the current process. Several pilot-scale magnetic concentration tests were carried out, involving the use of drying and hybrid tests, where part of the material was processed through wet beneficiation and another part by dry beneficiation after the drying stage. The tests were conducted with semi-compact and compact itabirite. For the semi-compact itabirite, the best result was obtained with material crushed to less than 1 mm, achieving a final concentrate with approximately 60.4% iron content, 49.2% mass recovery, and 88.8% metallurgical recovery through dry beneficiation with a drying stage. For the compact itabirite, which showed greater resistance to comminution, a hybrid route was proposed, processing the finer material through wet beneficiation and the remaining material through dry beneficiation with a drying stage, obtaining a final concentrate with approximately 65% iron content, 49.7% mass recovery, and 87.7% metallurgical recovery. It is emphasized the importance of drying in the efficiency of the magnetic concentration process. Tests performed with naturally moist material did not reach favorable iron and silica grades, and reducing the particle size had a detrimental effect on separation, opposite to the effect observed in dry separation. The results indicate that small adjustments in particle size and the installation of smaller new equipment could optimize the existing beneficiation unit.

Keywords: dry beneficiation; iron ore; mass recovery; process optimization; drying; sustainable water use.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Distribuição dos elementos químicos na crosta terrestre. Em destaque o segmento relativo à proporção de Ferro Fonte: Duarte, 2019	21
Figura 2 - Produção mineral brasileira em 2021 Fonte: ANM, 2022.....	23
Figura 3- Vantagem do Beneficiamento a umidade natural Fonte: Adaptado Vale (2019)	27
Figura 4-Classificação, características e aplicações de alguns separadores magnéticos. Fonte: Adaptado de Sampaio et al (2010)	29
Figura 5-Classificação dos processos de separação magnética e os principais equipamentos utilizados. Fonte: Adaptado de Svoboda (1987)	29
Figura 6-Representação esquemática de um tambor de concentração magnética.....	30
Figura 7- Tambor magnético <i>standard</i> Fonte: Inbras, 2024.....	31
Figura 8- Concentrador magnético re-roll Fonte: Inbras, 2024.....	32
Figura 9- Concentrador magnético a úmido WD Fonte: Inbras, 2024	33
Figura 10- Concentrador magnético a úmido WDRE Fonte: Inbras, 2024	34
Figura 11-Concentrador magnético a úmido WHC Fonte: Inbras, 2024	35
Figura 12 - Diagrama esquemático de um secador rotativo Fonte: Adaptado de Silvia et al. (2012)	38
Figura 13- Esquema geral secador rotativo Fonte: Berk, 2018	38
Figura 14- localização Sabinópolis Fonte: Relatório Final de Pesquisa, 2011	39
Figura 15- Sondagem na área do projeto Fonte: Relatório final de pesquisa, 2011.....	41
Figura 16- Testemunho de sondagem Fonte: Relatório final de pesquisa, 2011.....	41
Figura 17- Corte de perfil da cava ótima Fonte: Plano de aproveitamento econômico, 2022	43
Figura 18- Fluxograma da classificação Fonte: Próprio autor	45
Figura 19- Fluxograma da concentração Fonte: Próprio autor.....	46
Figura 20- Detalhe concentrador magnético do tipo tambor Fonte: Adaptado Inbras (2023) .	47
Figura 21- Foto do prédio de concentração magnética instalada Fonte: Próprio Autor.....	48
Figura 22- Secador rotativo em fabricação Fonte: Próprio autor	49
Figura 23- Parte interna e externa do secador rotativo Fonte: Próprio autor	49
Figura 24 - Desenho esquemático do sensor de umidade Fonte: Manual Lenox, 2021	50
Figura 25 - Sensor de umidade instalado na planta Fonte: Próprio autor.....	51
Figura 26 - Umidade de entrada e saída durante 6 dias de produção Fonte: Próprio autor.....	51
Figura 27 – Acompanhamento dos resultados da produção durante 6 dias Fonte: Próprio autor	53

Figura 28 - Frente de lavra com material friável e compacto	Fonte: Próprio autor	54
Figura 29 - Coleta de amostra na frente de lavra	Fonte: Próprio autor	56
Figura 30 - Amostra de mão do material compacto	Fonte: Próprio autor	57
Figura 31 - Amostras preparadas	Fonte: Próprio autor	57
Figura 32 - Preparação da granuloquímica das amostras	Fonte: Próprio autor	58
Figura 33 - Preparação das amostras no peneiramento para análise química	Fonte: Próprio autor	59
Figura 34 - Peneiramento a úmido	Fonte: Próprio autor	60
Figura 35 - Britador de rolos (laboratório)	Fonte: Próprio autor	61
Figura 36 - Peneiramento (preparação da amostra para o teste piloto)	Fonte: Próprio autor	62
Figura 37 - Fluxograma caracterização mineral	Fonte: Próprio autor	63
Figura 38 - Secagem laboratório	Fonte: Próprio autor	65
Figura 39 - Tambor magnético 1500 Gauss (Modelo HF)	Fonte: Próprio autor	67
Figura 40 - Tambor magnético 7500 Gauss (Modelo HFRE)	Fonte: Próprio autor	67
Figura 41- Tambor magnético 14000 Gauss (Modelo RE)	Fonte: Próprio autor	68
Figura 42 - Fluxograma do teste 00	Fonte: Próprio autor	69
Figura 43 - Tambor magnético 2500 Gauss (Modelo HFRE)	Fonte: Próprio autor	70
Figura 44 - Fluxograma do teste 01	Fonte: Próprio autor	71
Figura 45 - Fluxograma do teste 02	Fonte: Próprio Autor	72
Figura 46 - Fluxograma do teste 03	Fonte: Próprio Autor	74
Figura 47 - Foto das amostras de cabeça previamente secadas com granulometria menor que 3mm, 2mm e 1mm	Fonte: Próprio Autor	75
Figura 48 - Fluxograma teste 04	Fonte: Próprio autor	77
Figura 49 - Fluxograma teste 05	Fonte: Próprio Autor	78
Figura 50 - Fluxograma Teste 06	Fonte: Próprio Autor	79
Figura 51 - Foto das amostras de cabeça a umidade natural com granulometria menor que 3mm, 2mm e 1mm	Fonte: Próprio Autor	80
Figura 52 – Teste de barra	Fonte: Próprio autor	81
Figura 53 - Tambor magnético 7500 Gauss (Modelo WDRE)	Fonte: Próprio autor	82
Figura 54 - Tambor magnético (Modelo WHC)	Fonte: Próprio autor	82
Figura 55 - Fluxograma teste 07	Fonte: Próprio Autor	83
Figura 56 - Fluxograma teste 08 e teste 09	Fonte: Próprio autor	84
Figura 57 - Fluxograma do teste 08	Fonte: Próprio autor	86
Figura 58 - Fluxograma teste 09	Fonte: Próprio autor	88

Figura 59 - Registro fotográfico das amostras que alimentaram o teste 09. A figura 01 indica a granulometria da amostra anteriormente a cominuição para menor que 1mm. Já a figura 02 demonstra toda a fração destinada para o teste a seco, que refere ao material menor que 1mm e maior que 0,3mm. Na figura 03 indica a fração menor que 0,3mm. Fonte: Próprio autor	89
Figura 60 - Comparação distribuição granulométrica das amostras FFS e FFC Fonte: Próprio autor.....	91
Figura 61- Fotomicrografias representativas das seções polidas de grãos estudadas da amostra FFS. A e B: Fração > 6,3 mm. C: Fração > 3,35mm. D: Fração > 1,18 mm. E: Fração > 0,6 mm. F: Fração > 0,3 mm. G: Fração > 0,15 mm. H: Material passante em todas todas as peneiras (Fundo). Legenda: Hem: Hematita; Mag: Magnetita; Qtz: Quartzo. Imagens em luz refletida polarizada.....	94
Figura 62- Fotomicrografias representativas das seções polidas de grãos estudadas da amostra FFC. A e B: Fração > 6,3 mm. C: Fração > 3,35mm. D: Fração > 1,18 mm. E: Fração > 0,6 mm. F: Fração > 0,3 mm. G: Fração > 0,15 mm. H: Material passante em todas todas as peneiras (Fundo). Legenda: Amp: Anfibólio; Cb: Carbonato; Hem: Hematita; Mag: Magnetita; Qtz: Quartzo. Imagens em luz refletida polarizada, com exceção da fotomicrografia B, que foi adquirida em luz transmitida com os polarizadores cruzados. Fonte: Relatório Técnico Laboratório Arkad	97
Figura 63 - Grau de liberação por granulometria Fonte: Próprio autor.....	98
Figura 64 - Relação minério por faixa granulométrica Fonte: Próprio autor	99
Figura 65 -Teor de Fe (%) por faixa granulométria (mm) Fonte: Próprio Autor	101
Figura 66 - Resultado teste 00 Fonte: Próprio autor.....	102
Figura 67 - Curva de teor do ferro e recuperação - teste 00 Fonte: Próprio Autor.....	105
Figura 68 - Curva de teor da sílica e recuperação - teste 00 Fonte: Próprio Autor	105
Figura 69 - Resultado teste 01 Fonte: Próprio Autor.....	106
Figura 70 - Curva de teor do ferro e recuperação - teste 01 Fonte: Próprio Autor.....	107
Figura 71 - Curva de teor da sílica e recuperação - teste 01 Fonte: Próprio Autor	107
Figura 72 - Resultado teste 02 Fonte: Próprio Autor.....	108
Figura 73 - Curva de teor do ferro e recuperação - teste 02 Fonte: Próprio Autor.....	109
Figura 74 - Curva de teor da sílica e recuperação - teste 02 Fonte: Próprio Autor	109
Figura 75 - Resultado teste 03 Fonte: Próprio Autor.....	110
Figura 76 - Curva de teor do ferro e recuperação - teste 03 Fonte: Próprio Autor.....	111
Figura 77 - Curva de teor da sílica e recuperação - teste 03 Fonte: Próprio Autor	111

Figura 78 - Comparação das curvas de teor e recuperação - teste 02 e 03 Fonte: Próprio Autor	112
Figura 79 -Comparação das curvas de teor e recuperação - teste 01 e 02 Fonte: Próprio Autor	113
Figura 80 - Comparação das curvas de teor e recuperação - teste 00 e teste 01 Fonte: Próprio Autor.....	115
Figura 81 - Resultado teste 04 Fonte: Próprio Autor.....	116
Figura 82 - Curva de teor do ferro e recuperação - teste 04 Fonte: Próprio Autor.....	117
Figura 83 - Curva de teor da sílica e recuperação - teste 04 Fonte: Próprio Autor	117
Figura 84 - Resultado teste 05 Fonte: Próprio Autor.....	118
Figura 85 - Curva de teor do ferro e recuperação - teste 05 Fonte: Próprio Autor.....	119
Figura 86 - Curva de teor da sílica e recuperação - teste 05 Fonte: Próprio Autor	119
Figura 87 - Resultado teste 06 Fonte: Próprio Autor.....	120
Figura 88-Curva de teor do ferro e recuperação - teste 06 Fonte: Próprio Autor.....	121
Figura 89 - Curva de teor da sílica e recuperação - teste 06 Fonte: Próprio Autor	121
Figura 90 - Alimentação do tambor com umidade Fonte: Próprio autor.....	122
Figura 91 – Foto da alimentação do tambor com umidade Fonte: Próprio autor.....	123
Figura 92 - Comparação das curvas de teor e recuperação - teste 01 e teste 04 Fonte: Próprio Autor.....	124
Figura 93 - Comparação das curvas de teor e recuperação - teste 02 e teste 05 Fonte: Próprio Autor.....	124
Figura 94 - Comparação das curvas de teor e recuperação - teste 03 e teste 06 Fonte: Próprio Autor.....	125
Figura 95 - Resultado teste 07 Fonte: Próprio autor.....	126
Figura 96 - Curva de teor do ferro e recuperação - teste 07 Fonte: Próprio Autor.....	127
Figura 97 - Curva de teor da sílica e recuperação - teste 07 Fonte: Próprio Autor	127
Figura 98 - Comparação das curvas de teor e recuperação - teste 00 e teste 07 Fonte: Próprio Autor.....	128
Figura 99 - Resultado teste 08 Fonte: Próprio autor.....	130
Figura 100 - Curva de teor do ferro e recuperação - teste 08 Fonte: Próprio Autor.....	131
Figura 101 - Curva de teor da sílica e recuperação - teste 08 Fonte: Próprio Autor	131
Figura 102 - Alimentação menor que 1 mm – teste 08 Fonte: Próprio autor	132
Figura 103- Concentrado da concentração magnética de 7500 Gauss Fonte: Próprio autor..	133
Figura 104 - Concentrado e rejeito da primeira etapa re-roll Fonte: Próprio autor.....	133

Figura 105 - Concentrado e rejeito da segunda etapa re-roll	Fonte: Próprio autor	134
Figura 106 - Teores nas peneiras 1mm e 0,15 mm (teste 01 e teste 08)	Fonte: Próprio autor	135
Figura 107 - Granuloquímica e grau de liberação por faixa granulométrica do teste 08- amostra cabeça	Fonte: Próprio autor	136
Figura 108 - Granuloquímica teste 09 - Blend Total	Fonte: Próprio autor	137
Figura 109 - Resultado teste 09	Fonte: Próprio autor	139
Figura 110 - Resultado teste 09 (parte úmida)	Fonte: Próprio Autor	140
Figura 111 - Concentrado filtrado proveniente do teste 09 (etapa úmida)	Fonte: Próprio Autor	140
Figura 112 - Curva de teor do ferro e recuperação - teste 09 (parte úmida)	Fonte: Próprio Autor	141
Figura 113 - Curva de teor da sílica e recuperação - teste 09 (parte úmida)	Fonte: Próprio Autor	141
Figura 114 - Comparação das curvas de teor e recuperação - teste 07 e teste 08 (parte úmida)	Fonte: Próprio Autor	142
Figura 115 - Resultado teste 09 (Parte seca)	Fonte: Próprio autor	143
Figura 116 - Curva de teor do ferro e recuperação - teste 09 (parte seca)	Fonte: Próprio Autor	144
Figura 117 - Curva de teor da sílica e recuperação - teste 09 (parte seca)	Fonte: Próprio Autor	144
Figura 118 - Alimentação do minério menor que 1mm e maior que 0,3mm	Fonte: Próprio autor	145
Figura 119- Concentrado do primeiro estágio teste 09	Fonte: Próprio autor	146
Figura 120 - Concentrado do segundo estágio teste 09	Fonte: Próprio autor	146
Figura 121 - Concentrado do terceiro estágio teste 09	Fonte: Próprio autor	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos de transporte na secagem Fonte: Adaptado Keey (1978).....	36
Tabela 2 - Sistemas de secagem existentes Fonte: Adaptado Weber (1995)	37
Tabela 3 - Amostras coletadas para testes em escala piloto Fonte: Próprio autor.....	56
Tabela 4 - Elementos químicos analisados Fonte: Próprio autor	60
Tabela 5- Relação das amostras preparadas Fonte: Relatório Técnico Laboratório Arkad	64
Tabela 6- Testes a seco com secagem (semi-compacto) Fonte: Próprio autor.....	66
Tabela 7 - Testes realizados a seco com umidade natural Fonte: Próprio autor	76
Tabela 8 - Teste realizado a úmido Fonte: Próprio autor	81
Tabela 9 - Teste realizado com o material compacto Fonte: Próprio autor.....	84
Tabela 10 - Teste a seco com secagem (Compacto) Fonte: Próprio Autor	85
Tabela 11 - Teste realizado de forma híbrida (seco e úmido) Fonte: Próprio autor.....	87
Tabela 12- Compilação dos resultados obtidos na amostra FFS Fonte: Relatório Técnico Laboratório Arkad	93
Tabela 13- Compilação dos resultados obtidos na amostra FFC Fonte: Relatório Técnico Laboratório Arkad	96
Tabela 14 - Análise química amostra FFS Fonte: Próprio autor	100
Tabela 15 - Análise química amostra FFC Fonte: Próprio autor.....	100
Tabela 16 - Parte 01 - Construção da curva teor e recuperação Fonte: Próprio autor.....	104
Tabela 17 - Parte 02 - Construção da curva teor e recuperação Fonte: Próprio autor.....	104
Tabela 18 - Granuloquímica amostra teste 08 Fonte: Próprio autor.....	136

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
2. OBJETIVOS	19
2.1. Objetivo geral	19
2.2. Objetivos específicos	19
3. RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA	20
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
4.1. Minério de ferro	21
4.2. Caracterização tecnológica	23
4.3. Recuperação mássica	24
4.4. Recuperação metalúrgica	24
4.5. Beneficiamento Mineral	25
4.5.1. Beneficiamento a seco com etapa de secagem	26
4.6. Concentração magnética	27
4.6.1. Concentrador magnético para operação a seco	31
4.6.2. Concentrador magnético para operação a úmido	32
4.7. Secagem	35
4.7.1. Aspectos básicos	35
4.7.2. Secador rotativo de minério	37
4.8. Caracterização geológica e definição da reserva mineral	39
4.8.1. Grupo Guanhões	40
4.8.2. Estudos em campo e sondagens	40
4.8.3. Reservas lavráveis – definição da cava ótima	41
4.9. Rota de processo instalada	43
4.9.1. Concentradores magnéticos instalados	46
4.9.2. Secador rotativo instalado	48
4.9.3. Instrumentos de controle	50

4.10. Baixa recuperação mássica e metalúrgica	52
4.11. Heterogeneidade da frente de lavra	53
5. MATERIAIS E MÉTODOS	55
5.1. Amostragem – Concentração magnética	55
5.2. Amostragem – Caracterização mineralógica	62
5.3. Secagem no laboratório para o teste piloto	64
5.4. Teste piloto de concentração magnética com itabirito semi-compacto	65
5.4.1. Testes de concentração magnética – Formação Ferrífera Bandada –Semi-compacto – Via seca com etapa de secagem	66
5.4.1.1. Testes 00 – Teste <1mm – Scavenger 1 (7500 Gauss)	66
5.4.1.2. Teste 01 – Teste <1mm – Scavenger 1 (2500 Gauss)	70
5.4.1.3. Teste 02 – Teste <2mm – Scavenger 1 (2500 Gauss)	72
5.4.1.4. Teste 03 – Teste <3mm – Scavenger 1 (2500 Gauss)	73
5.4.2. Testes de Concentração magnética – Formação Ferrífera Bandada – Semi-compacto - Via Seca a Umidade Natural	75
5.4.2.1. Teste 04 – Teste <1mm – Scavenger 1 (2500 Gauss)	76
5.4.2.2. Teste 05 – Teste <2mm – Scavenger 1 (2500 Gauss)	78
5.4.2.3. Teste 06 – Teste <3mm – Scavenger 1 (2500 Gauss)	78
5.4.3. Testes de Concentração magnética – Formação Ferrífera Bandada – Semi-compacto – Via úmido	80
5.4.3.1. Teste 07 – Teste <1mm – Scavenger 1 (13000 Gauss)	81
5.5. Teste piloto de concentração magnética com itabirito compacto	83
5.5.1. Teste de concentração magnética –Formação Ferrífera Bandada – Compacto–Via seca com etapa de secagem	85
5.5.1.1. Teste 08 – Teste P80=1mm – Scavenger 1 (2500 Gauss)	85
5.5.2. Testes de concentração magnética – Formação Ferrífera Bandada –Compacto - Híbrido (concentração a seco com secagem + concentração a úmido)	86
5.5.2.1. Teste 09 – Teste P80=1mm - Concentração híbrida	87

5.6. Redução dos erros de fechamento - programa Sort.....	89
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	91
6.1. Resultado da caracterização mineralógica.....	91
6.1.1. Amostra FFS – Caracterização	92
6.1.2. Amostra FFC – Caracterização.....	95
6.1.3. Comparação da caracterização das amostras FFS e FFC	98
6.2. Análise química da caracterização mineralógica.....	100
6.3. Resultado dos testes de concentração magnética–Formação Ferrífera Bandada– Semi-compacto–Via seca com secagem	101
6.3.1. Resultado teste 00 – Teste <1mm – Scavenger 1 (7500 Gauss).....	101
6.3.1.1 Metodologia para montagem da curva de teor e recuperação	103
6.3.2. Resultado teste 01 – Teste<1mm – Scavenger 1 (2500 Gauss).....	106
6.3.3. Resultado teste 02 – Teste<2mm – Scavenger 1 (2500 Gauss).....	108
6.3.4. Resultado teste 03 – Teste <3mm – Scavenger 1 (2500 Gauss).....	110
6.3.5. Comparação entre os testes 00, 01, 02 e 03 - Semi-compacto – Via seca com secagem	112
6.4. Resultados concentração magnética – Formação Ferrífera Bandada – Semi-compacto – Via seca a umidade natural.....	116
6.4.1. Resultado teste 04 – Teste <1mm – Scavenger 1 (2500 Gauss).....	116
6.4.2. Resultado teste 05 – Teste<2mm – Scavenger 1 (2500 Gauss).....	118
6.4.3. Resultado teste 06 – Teste <3mm – Scavenger 1 (2500 Gauss).....	120
6.4.4. Comparação entre os testes 04, 05 e 06 – Semi-compacto – Via seca a umidade natural	122
6.5. Resultado teste 7 – Formação Ferrífera Bandada – Semi-compacto – Via úmido.....	125
6.5.1. Resultado teste 07 – Teste <1mm – Scavenger 1 (13000 Gauss).....	126
6.6. Resultado dos testes de concentração magnética – Formação Ferrífera Bandada – Compacto – Via seca com secagem	129
6.6.1 Resultado teste 08 – Teste P80=1mm – Scavenger 1 (2500 Gauss)	129

6.7	Resultados concentração magnética – Formação Ferrífera Bandada – Compacto – Híbrida (concentração a seco com secagem + concentração a úmido)	137
6.7.1	Resultado teste 09 – Teste P80=1mm - Concentração híbrida.....	138
7	CONCLUSÕES.....	149
8	REFERÊNCIAS	152

1.INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a indústria da mineração, principalmente a que possui como *Core Business* o minério de ferro tem enfrentado um grande desafio, os depósitos de minério de ferro estão com teores cada vez mais baixos e com mais contaminantes. Depósitos que antes eram considerados como sem valor agregado, começaram a ser reavaliados. Isso influencia diretamente no comportamento que as empresas devem ter frente a reserva disponível, uma vez que para manter o custo de operação baixo e com uma alta recuperação metálica e mássica, devem investir em inovações voltadas ao beneficiamento do minério e na otimização do processo.

Em sinergia com a otimização do processo, questões ambientais estão se tornando cada vez mais presentes na mineração, especialmente em relação ao uso da água. Nesse contexto, a concentração a seco emergiu como uma estratégia sustentável, já que consome menos água em comparação ao beneficiamento a úmido. No entanto, esse processo geralmente resulta em uma recuperação mássica menor, o que gera outra preocupação ambiental: a disposição de rejeitos. Uma recuperação mássica reduzida implica em uma necessidade de áreas maiores para pilhas de rejeitos, o que deve ser considerado no licenciamento ambiental, além de resultar em desperdício de recursos e aumento de custos.

A baixa recuperação mássica e metalúrgica pode ser justificada por diversos fatores, como: rota de processo mal dimensionada, heterogeneidade da frente de lavra e quantidade elevada de material sem valor econômico (Ganga). Com o intuito de mapear esses possíveis problemas que podem impactar nos resultados do beneficiamento é necessário a caracterização tecnológica do minério. Com os resultados da caracterização é possível entender as características do minério que está sendo processado na planta e com isso indicar possíveis maneiras de otimizar o processo.

2.OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo avaliar a eficiência de um processo de beneficiamento a seco com etapa de secagem, com base em estudos de caracterização mineralógica e testes em escala piloto, focando especialmente na baixa recuperação mássica atual da usina de beneficiamento. Será necessário compreender em detalhes os fatores que limitam o desempenho da usina e, a partir dessas análises, identificar oportunidades para otimização e aprimoramento da eficiência do beneficiamento.

2.2. Objetivos específicos

- Realizar coletas de amostras representativas do minério destinadas a alimentação da usina de beneficiamento, bem como nas etapas subsequentes.
- Caracterizar mineralogicamente e químicamente amostras de ROM (*Run of Mine*).
- Avaliar o desempenho do minério no processo de cominuição e concentração magnética.
- Identificar possíveis causas da baixa recuperação mássica, abrangendo fatores como mineralogia do minério, granulometria, e a efetividade da concentração.
- Formular estratégias de otimização da usina com base nos resultados da caracterização mineralógicas.

3.RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA

A preocupação com o uso da água, especialmente em regiões com histórico de escassez, pode limitar o desenvolvimento econômico da mineração nesses locais, por isso projetos voltados para a concentração a seco ou com baixo consumo de água têm ganhado destaque. A falta de estudos que correlacionam a eficiência da secagem no processamento a seco no contexto do minério de ferro destaca uma lacuna significativa no conhecimento, oferecendo uma solução para cenários nos quais o beneficiamento a umidade natural não é eficaz. Nesse cenário, a concentração a seco com etapa de secagem surge como uma alternativa que impacta positivamente na conservação de recursos hídricos e, ao mesmo tempo, aumenta a recuperação mássica e metalúrgica do minério.

Os benefícios da concentração a seco são múltiplos, incluindo a dispensa do tratamento de grandes volumes de água, resultando em maior eficiência energética, menores custos operacionais, redução do consumo hídrico, impactos ambientais reduzidos, entre outros aspectos positivos. Esses impactos positivos destacam a importância de explorar e desenvolver soluções inovadoras no beneficiamento de minério de ferro, ressaltando a necessidade de estudos aprofundados sobre a concentração a seco como uma alternativa viável e benéfica para a indústria mineral.

4.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão discutidos inicialmente aspectos essenciais sobre o minério de ferro, seus métodos de beneficiamento e conceitos fundamentais como caracterização tecnológica, recuperação mássica e metalúrgica. Em seguida, serão fornecidas informações abrangentes sobre a área de estudo em foco, incluindo detalhes sobre o fluxograma atual e a localização da mina. Posteriormente, será abordado o desafio representado pela heterogeneidade na frente de lavra do projeto em análise.

4.1. Minério de ferro

Entre os oito elementos mais prevalentes na crosta terrestre, o ferro está em quarto lugar, representando cerca de 5% em termos de massa. Os outros componentes incluem oxigênio (46,6%), silício (26,72%), alumínio (8,13%), cálcio (3,63%), sódio (2,83%), potássio (2,59%) e magnésio (2,09%). Juntos, esses elementos compõem aproximadamente 97,59% da massa total da crosta terrestre (DUARTE, 2019), conforme indicado na figura 1.

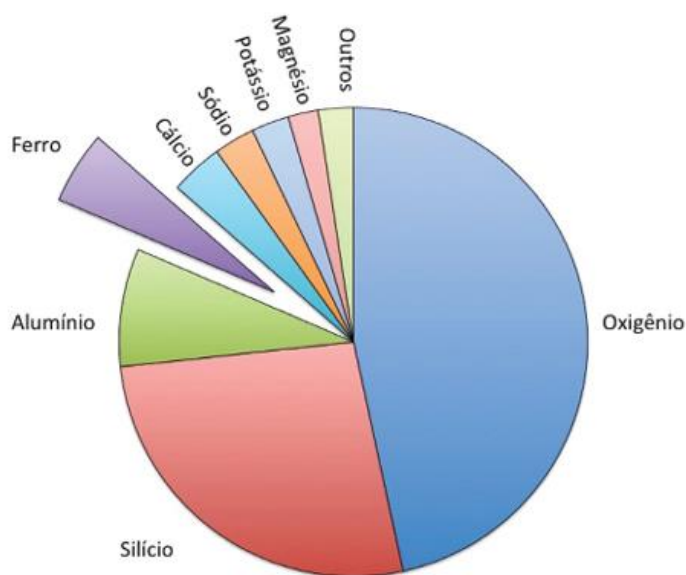


Figura 1-Distribuição dos elementos químicos na crosta terrestre. Em destaque o segmento relativo à proporção de Ferro

Fonte: Duarte, 2019

O ferro é conhecido por sua versatilidade, sendo usado em diversas aplicações em nossa vida cotidiana. Uma das características interessantes do ferro é sua capacidade de conduzir eletricidade, embora não tão eficientemente quanto alguns outros metais. Além disso, o ferro é conhecido por sua propriedade magnética, que se manifesta em temperaturas mais baixas e desaparecem a temperaturas mais elevadas, em torno de 790°C (CRISTIE & BRATHWAITE, 1997). Atualmente, o minério de ferro é o principal insumo para a indústria siderúrgica e é estimado que 98% da sua produção mundial destina-se para esta indústria (USGS, 2017).

Na natureza, o ferro é comumente encontrado em forma de óxidos, hidróxidos e oxi-hidróxidos, geralmente organizados em estruturas cristalinas. Podem estar associados a outros elementos como o carbono, oxigênio, enxofre ou silício, formando carbonatos, óxidos, sulfetos e silicatos respectivamente. Já o minério é um material natural que contém diferentes tipos de minerais dos quais podemos extrair substâncias valiosas de maneira que faça sentido economicamente. A parte do minério que não tem valor econômico é conhecida como ganga (DUARTE, 2019). A importância do ferro na economia global é notável. Em 2021, as substâncias metálicas foram responsáveis por cerca de 89% do valor total da produção mineral brasileira, conforme indicado na figura 2. Dentre essas, onze substâncias destacam-se por corresponderem a 99,7% do valor da produção metálica, sendo elas: alumínio, cobre, cromo, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel, ouro, vanádio e zinco. O valor da produção dessas substâncias totalizou 312,9 bilhões de reais, com o ferro tendo uma participação expressiva, concentrado principalmente nos estados do Pará e Minas Gerais (ANM, 2022). Dessa forma, esses dados ilustram a importância significativa do ferro na economia mineral brasileira, refletindo a sua relevância no cenário global.

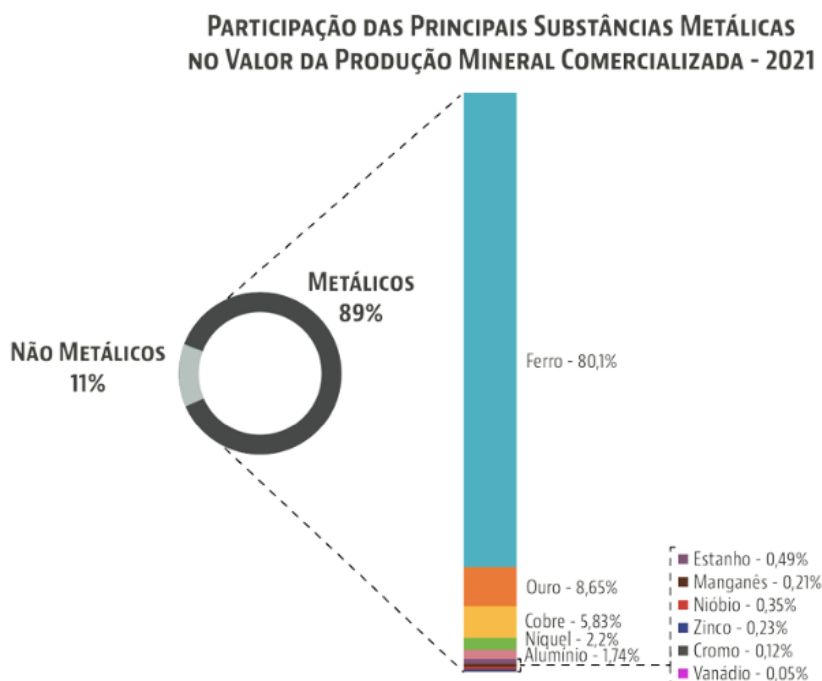


Figura 2 - Produção mineral brasileira em 2021

Fonte: ANM, 2022

4.2. Caracterização tecnológica

A caracterização tecnológica é uma etapa essencial na avaliação e aproveitamento de recursos minerais, proporcionando informações sobre as propriedades dos minérios. Esta análise é necessária para o dimensionamento adequado das rotas de processo, além de identificar ineficiências e perdas em processos existentes, o que possibilita a otimização do rendimento global de uma planta. A caracterização tecnológica, frequentemente referida como mineralogia de processos, envolve a determinação e quantificação da assembleia mineralógica, a identificação dos minerais de interesse e de ganga, e a avaliação da distribuição dos elementos úteis entre os minerais de minério (NEUMANN et al., 2010).

Analogamente a um diagnóstico médico, a caracterização tecnológica envolve uma série de análises detalhadas que visam avaliar as propriedades do material e estabelecer a rota de processo mais adequada. Diversos testes são realizados para coletar um volume substancial de informações, permitindo a formulação de uma rota de processo eficiente e que atenda as exigências do mercado consumidor. Propriedades distintivas identificadas

durante a caracterização são exploradas para otimizar a separação e o aproveitamento das espécies minerais presentes (BRANDÃO et al., 2007).

4.3. Recuperação mássica

A recuperação mássica é calculada como a razão entre a massa de minério no concentrado e a massa de minério na alimentação. Essa medida expressa a porcentagem do mineral de interesse recuperado em relação a massa total do minério introduzido no processo (ROCHA, 2008). De maneira similar, a recuperação em massa também pode ser calculada em função dos teores conforme indicado na equação 4.1.

$$R_S = \frac{M_{S_C}}{M_{S_F}} = \frac{(g_{j_F} - g_{j_T})}{(g_{j_C} - g_{j_T})} \quad (4.1)$$

R_S = recuperação do minério/sólido;

M_{S_C} = Massa ou Vazão do sólido no concentrado;

M_{S_F} = Massa ou Vazão do sólido na alimentação;

g_{j_F} = teor do mineral ou elemento químico j na alimentação;

g_{j_C} = teor do mineral ou elemento químico j no concentrado;

g_{j_T} = teor do mineral ou elemento químico j no rejeito;

A indústria mineral reconhece a importância de melhorar continuamente suas técnicas de concentração, pois qualquer queda nas recuperações mássicas pode resultar em uma redução proporcional na produtividade das plantas de beneficiamento (ROCHA, 2008). Consequentemente, à medida que novos depósitos minerais são descobertos, torna-se essencial construir novas usinas de beneficiamento para explorar eficazmente os recursos disponíveis.

4.4. Recuperação metalúrgica

Em contrapartida, a recuperação metalúrgica é uma métrica mais específica, concentrando-se na eficácia da extração do metal de interesse contido no minério durante

todas as etapas do processo metalúrgico, desde a concentração inicial até as fases de fundição e refinamento (WILLS, 2015).

Essas métricas são essenciais na avaliação e no aprimoramento dos processos de beneficiamento mineral, assegurando a máxima eficiência na separação de minerais valiosos e na recuperação de metais preciosos ao longo das etapas de processamento (WILLS, 2015). A recuperação metalúrgica é dada pela equação 4.2, que também pode ser expressa em função dos teores.

$$R_S = \frac{M_{jC}}{M_{jF}} = \frac{g_{jC}M_{SC}}{g_{jF}M_{SF}} = \frac{g_{jC}(g_{jF}-g_{jT})}{g_{jF}(g_{jC}-g_{jT})} \quad (4.2)$$

R_S = recuperação do minério/sólido;

M_{SC} = Massa ou Vazão do sólido no concentrado;

M_{SF} = Massa ou Vazão do sólido na alimentação;

M_{jC} = Massa ou Vazão do mineral ou elemento químico j no concentrado;

M_{jF} = Massa ou Vazão do mineral ou elemento químico j na alimentação;

g_{jF} = teor do mineral ou elemento químico j na alimentação;

g_{jC} = teor do mineral ou elemento químico j no concentrado;

g_{jT} = teor do mineral ou elemento químico j no rejeito;

4.5. Beneficiamento Mineral

O processo de beneficiamento mineral é indispensável para a indústria da mineração, pois permite a separação eficiente de minerais de alto teor e com elevado valor econômico. Simultaneamente, essa área busca constantemente aprimorar suas técnicas para minimizar os impactos ambientais e maximizar a eficiência econômica. Conforme estabelecido na Norma Reguladora de Mineração DNPM/MME 18/2001, o beneficiamento de minério engloba uma série de tratamentos que visam adequar o tamanho das partículas, concentrar ou purificar os minerais, tudo isso sem modificar sua composição química fundamental.

Para atingir a concentração desejada dos minerais, é crucial que eles estejam completamente liberados, o que requer etapas de redução de tamanho, como britagem e moagem, seguidas por processos de separação por tamanho, como peneiramento e classificação. Uma vez alcançada essa liberação, é possível proceder com a separação das diferentes espécies minerais, resultando na obtenção de um concentrado e do rejeito. Frequentemente, essas operações de concentração envolvem o uso de água, e é necessário remover parte dela para obter um produto que seja facilmente transportável ou adequado para a indústria química e metalúrgica. Isso requer etapas de desaguamento, como espessamento e filtragem, seguidas de secagem. No contexto específico do minério de ferro, é comum o uso de beneficiamento a úmido, que depende de água, no entanto, o beneficiamento a umidade natural está ganhando importância como uma abordagem mais sustentável. Essa estratégia responde aos desafios ambientais associados ao uso intensivo de recursos hídricos na mineração e ao risco potencial de desastres relacionados a barragens (BOMFIM, 2017).

4.5.1. Beneficiamento a seco com etapa de secagem

O processo de beneficiamento de minério envolve três abordagens principais: beneficiamento a úmido, beneficiamento a seco com etapa de secagem e beneficiamento a umidade natural. No beneficiamento a úmido, que dispõe de diversos métodos de concentração, a água é utilizada para classificar e purificar o minério de ferro, removendo impurezas como a sílica, que podem comprometer a qualidade do produto (CHAVES, 2007). Diferentemente do que ocorre no beneficiamento a umidade natural e beneficiamento a seco com etapa de secagem, onde não há adição de água. O beneficiamento a umidade natural, também conhecido como beneficiamento a seco, surge como uma alternativa diante do alto consumo de água nos métodos convencionais de tratamento de minério. Esse processo utiliza a própria umidade natural do minério, proveniente do ROM (*Run of Mine*), que usualmente está entre 5 e 8%, valor que depende das condições climáticas, evitando a necessidade de introduzir grandes volumes de água, como ocorre nos métodos de concentração usuais, como por exemplo na flotação e concentração magnética a úmido (SILVIA E SOUZA, 2015). Já o beneficiamento a seco com etapa de secagem refere-se ao aprimoramento do produto final por meio da remoção controlada da umidade presente no minério, ou seja, o minério é previamente secado e

posteriormente segue para a concentração a seco. A secagem, fundamental em diversos setores industriais, visa melhorar as propriedades físicas dos produtos (WU ET AL, 2010). No contexto do minério de ferro, a redução controlada da umidade durante o beneficiamento visa aprimorar a eficiência da concentração magnética a seco.

Um dos principais desafios da indústria mineral é a demanda por grandes volumes de água no processo de separação do minério de ferro da ganga, o que frequentemente resulta na formação de rejeitos armazenados em barragens. No Pará, por exemplo, alguns empreendimentos adotaram o beneficiamento a umidade natural como alternativa, resultando em redução substancial do consumo de água e eliminando a necessidade de construir barragens de rejeitos (VALE, 2019). O beneficiamento a umidade natural ou a seco com etapa de secagem é uma estratégia que proporciona melhorias significativas do ponto de vista socioambiental. Ao contrário do beneficiamento a úmido, que gera efluentes devido a imersão do minério em meio líquido, o beneficiamento a umidade natural não produz resíduos líquidos, contribuindo para a redução do consumo de água e, conseqüentemente, diminuindo os riscos de desastres. Na figura 3 está representada algumas vantagens encontradas no processamento a seco.

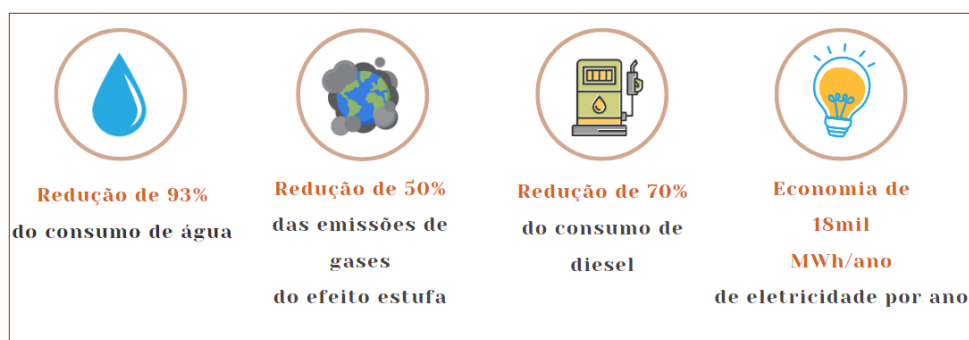


Figura 3- Vantagem do Beneficiamento a umidade natural

Fonte: Adaptado Vale (2019)

4.6. Concentração magnética

A concentração magnética, atualmente uma técnica amplamente reconhecida e utilizada no beneficiamento mineral, desempenha um papel fundamental na concentração de substâncias minerais, com ênfase especial na concentração de minerais ferrosos (LUZ ET AL., 2018). Essa abordagem versátil é aplicada tanto no beneficiamento de minério quanto na remoção de sucata, proporcionando benefícios substanciais para a indústria.

Na indústria de separadores magnéticos, é comum fazer uma distinção entre "separação magnética" e "concentração magnética". O termo "separação magnética" geralmente é usado quando o objetivo é remover um material magnético indesejado, enquanto o produto não magnético é o foco principal, como por exemplo a remoção de impurezas metálicas de produtos agrícolas. Por outro lado, o termo "concentração magnética" é mais comum em situações em que o produto de interesse consiste no fluxo contendo minerais atraídos pelo campo magnético aplicado (VALADÃO; ARAUJO, 2007).

A susceptibilidade magnética, característica essencial que determina a resposta de um mineral a um campo magnético, divide os materiais em dois grupos distintos: aqueles atraídos pelo campo magnético e os repelidos por ele. Os minerais ferromagnéticos, fortemente atraídos pelo campo, e os paramagnéticos, atraídos de maneira mais suave, pertencem a primeira categoria, enquanto os diamagnéticos ou não magnéticos compõem a segunda, sendo repelidos pelo campo (LUZ ET AL., 2018).

A concentração magnética destaca-se por sua versatilidade, sendo aplicada tanto em processos a seco quanto a úmido. Para garantir uma eficiência favorável nesse tipo de beneficiamento, é crucial considerar as propriedades físicas e químicas do material, determinando a intensidade do campo magnético e outras variáveis essenciais. Os concentradores magnéticos são categorizados com base na intensidade do campo magnético e em sua forma de aplicação, resultando em dispositivos de baixa e alta intensidades, sendo utilizado tanto em operações a seco quanto a úmido. Diversos concentradores magnéticos estão disponíveis, cada um com características únicas que determinam sua aplicabilidade na separação de minerais específicos. A classificação geral desses equipamentos, considerando operação úmida ou seca e alta ou baixa intensidade de campo, é esquematizada nas figuras 4 e 5.



Figura 4-Classificação, características e aplicações de alguns separadores magnéticos.

Fonte: Adaptado de Sampaio et al (2010)

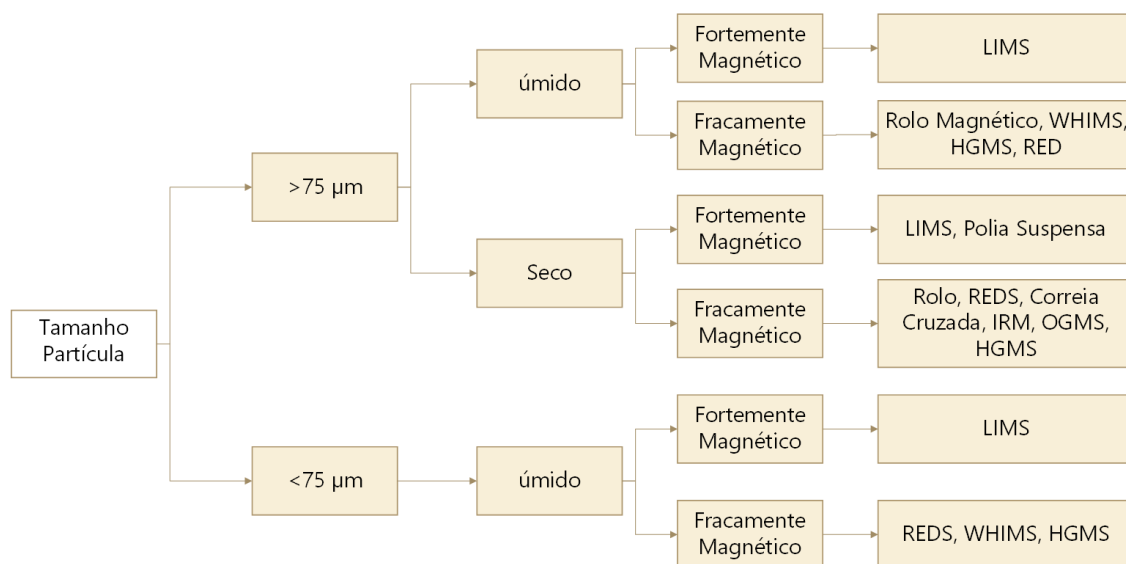


Figura 5-Classificação dos processos de separação magnética e os principais equipamentos utilizados.

Fonte: Adaptado de Svoboda (1987)

A intensidade do campo magnético é essencial para a separação de partículas minerais, considerando suas distintas susceptibilidades magnéticas. Em termos práticos, isso significa que baixas intensidades de campo magnético podem ser empregadas para separar minerais com alta susceptibilidade magnética, enquanto intensidades mais elevadas são necessárias para a separação de minerais com valores de susceptibilidade magnética mais baixos (SAMPAIO, 2004).

No contexto das aplicações dos concentradores magnéticos de baixa intensidade a seco, destacam-se diversas funcionalidades, como a purificação de materiais por meio da remoção de impurezas, a remoção de partículas fortemente magnéticas e a concentração de materiais com elevada suscetibilidade magnética (SAMPAIO, 2004). A figura 6 oferece uma representação esquemática do funcionamento de um tambor de concentração magnética, ilustrando visualmente as principais características desse processo.

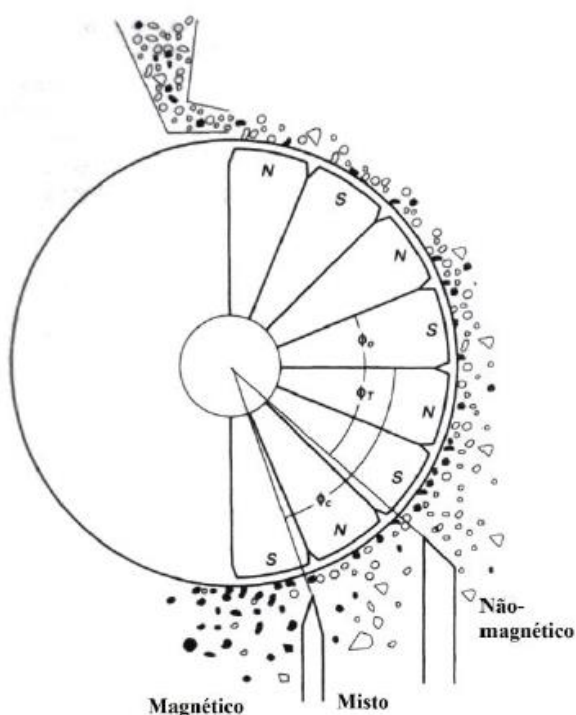


Figura 6-Representação esquemática de um tambor de concentração magnética

Fonte: Adaptado de King (2001)

4.6.1. Concentrador magnético para operação a seco

A concentração magnética a seco é amplamente utilizada na indústria, com destaque para os equipamentos oferecidos pela Inbras. Os concentradores magnéticos de ímãs permanentes são os mais comuns, com disponibilidade de diversas opções para diferentes necessidades industriais. A seleção do concentrador ideal é influenciada por vários fatores, como o tipo de minério a ser processado, a fonte do campo magnético, além do tamanho das partículas e suas propriedades magnéticas.

Os tambores magnéticos *standard* da Inbras, indicado na figura 7, são projetados para operação a seco e estão disponíveis em diferentes níveis de intensidade, desde baixa (1500 Gauss) até alta (aproximadamente 7000 Gauss), conforme indicado pelo próprio fabricante. Os separadores magnéticos de baixa intensidade a seco têm diversas aplicações industriais, como purificação de materiais, remoção de sucata de ferro e concentração de minerais fortemente magnéticos. Já as unidades de alta potência, são utilizadas para a concentração via seca de minerais ferrosos fracamente magnéticos. O separador magnético de tambor é comumente montado na descarga de silos, chutes ou correias transportadoras, recebendo o produto a ser processado, por gravidade. (INBRAS, 2023).



Figura 7- Tambor magnético *standard*

Fonte: Inbras, 2024

Os concentradores magnéticos de rolos, também conhecidos como separadores re-roll, são equipamentos de alta intensidade que geram um gradiente magnético extremamente alto, equipamento representado na figura 8. Eles são especialmente recomendados para o processamento de minério seco com granulometria aproximada de -2,0 mm a +200 mesh Tyler, visando a concentração magnética de minerais ferrosos finos e fracamente magnéticos presentes no minério. Equipado com ímãs permanentes do tipo ERIUM 3000®, o separador re-roll está disponível em configurações com 1, 2 ou 3 rolos de separação, dispostos em cascata na mesma estrutura. Essa disposição permite que o minério passe por cada rolo, aumentando o nível de purificação do produto final a medida que o número de rolos é acrescido (INBRAS, 2023).



Figura 8- Concentrador magnético re-roll

Fonte: Inbras, 2024

4.6.2. Concentrador magnético para operação a úmido

Os concentradores magnéticos a úmido englobam uma ampla variedade de equipamentos, cada um adequado para diferentes aplicações industriais, da mesma forma que ocorre nos concentradores magnéticos a seco. Na Inbras, por exemplo, destaca-se o concentrador magnético de tambor de baixa intensidade - Concentrador WD, projetado especificamente para a concentração magnética via úmida de minerais fortemente

magnéticos, como a magnetita, em minérios como fosfato, bauxita, nióbio, minerais pesados, cassiterita e minério de ferro. Este equipamento é adequado para processar materiais moídos com granulometria de até 2,0 mm, sendo fabricado com ímãs permanentes. (INBRAS, 2023).



Figura 9- Concentrador magnético a úmido WD

Fonte: Inbras, 2024

O concentrador magnético de tambor de alta intensidade, representado na figura 10, é conhecido como concentrador WDRE, tambor eletromagnético. Esse tambor é empregado na concentração de minério de ferro a úmido, especialmente em granulometrias de *sinter feed* e *pellet feed*, que demandam altos níveis de campo magnético, em torno de 7.000 Gauss, para serem concentrados. Este equipamento é eficaz na concentração magnética de minerais ferrosos fracamente ou moderadamente magnéticos. (INBRAS, 2023).



Figura 10- Concentrador magnético a úmido WDRE

Fonte: Inbras, 2024

O concentrador magnético de carrossel horizontal, conhecido como concentrador WHC, é utilizado para a concentração magnética via úmida de minério de ferro, como *sinter feed*, *pellet feed* ou lamas. Além disso, é empregado na concentração magnética de contaminações ferrosas fracamente magnéticas. Disponível em diferentes modelos, a linha de Concentradores WHC oferece unidades com níveis de campo magnético de 10.000 Gauss, 12.000 Gauss, 13.000 Gauss e 15.000 Gauss. O campo magnético pode ser ajustado de zero até o máximo por meio de um variador de campo magnético integrado ao painel elétrico de controle (INBRAS, 2023).



Figura 11-Concentrador magnético a úmido WHC

Fonte: Inbras, 2024

4.7. Secagem

A secagem é uma das técnicas mais antigas, originalmente desenvolvida principalmente para a conservação de alimentos. Atualmente, é amplamente empregada em diversos setores industriais para remover a umidade de materiais variados. Este processo é essencial não apenas para aprimorar a qualidade do produto final, mas também para otimizar a eficiência das etapas subsequentes de produção.

4.7.1. Aspectos básicos

O processo de secagem na indústria pode ocorrer tanto de forma natural como também artificial. A secagem natural depende das condições climáticas, como calor solar e circulação de ar, para evaporar a umidade dos materiais. Este método é frequentemente empregado em ambientes ao ar livre, como em áreas de secagem ao sol. Embora seja uma alternativa econômica, a eficiência da secagem natural pode variar conforme as condições meteorológicas e pode exigir períodos prolongados para alcançar o nível desejado de umidade (CORNEJO, 2003).

Por outro lado, a secagem artificial utiliza equipamentos para um controle mais preciso da umidade, permitindo ajustar fatores como temperatura, umidade e velocidade do ar. Esse método é aplicável independentemente das condições climáticas externas e proporciona resultados mais rápidos e consistentes em comparação com a secagem natural (CORNEJO, 2003).

Diversos métodos de secagem são utilizados para atender a necessidades específicas, variando conforme o tipo de material e a aplicação desejada. Por exemplo, técnicas distintas são empregadas para secar argilas, sementes, frutos e outros materiais, cada uma adaptada para maximizar a eficiência e a qualidade do produto. Segue na tabela 1 alguns métodos de secagem divididos segundo o meio de transporte.

Tabela 1 - Métodos de transporte na secagem

Fonte: Adaptado Keey (1978)

Método	Secador típico	Material típico
Material estático	Secador de bandeja	Grande variedade de materiais
Material que cai por gravidade	Secador rotatório	Grãos em queda livre
Material carregado em lâminas	Secador de rosca transportadora	Materiais úmidos, pasta
Material transportado em carrinhos	Secador túnel	Grande variedade de materiais
Material carregado sobre rolos	Secador de cilindro aquecido	Folhas e placas
Material carregado em esteira	Secador de esteira	Grande variedade de materiais rígidos
Material vibrado em esteira	Secador de esteira vibratória	Grão em queda livre
Material suspenso no ar	Secador de leito fluidizado	Grãos em queda livre
Material atirado através do ar	<i>Spray dryer</i>	Soluções, materiais viscosos e pastas finas

Na tabela 2, são apresentados os tipos mais comuns de sistema de secagem.

Tabela 2 - Sistemas de secagem existentes

Fonte: Adaptado Weber (1995)

Classificação	Sistema de secagem
Quanto ao tipo de fabricação	Móveis ou fixos (silos secadores, de torre)
Quanto ao sistema de carga	Intermitente ou contínuos
Quanto à ventilação	Insuflação de ar ou aspiração de ar
Quanto ao fluxo de ar	Concorrente, contracorrente, cruzado ou misto
Quanto à torre de secagem	Calhas paralelas, calhas cruzadas, de colunas e com câmara descanso
Quanto ao sistema de descarga	Descarga de bandeja mecânica, descarga pneumática, descarga de eclusas rotativas
Quanto ao combustível	Líquido, sólido ou gasoso
Ar da fornalha	Direto e indireto
Grua de automatização	Secagem com controle manual e secagem automatizada

4.7.2. Secador rotativo de minério

O secador rotativo é um equipamento amplamente utilizado na secagem artificial de minérios. Consiste em um cilindro horizontal, ligeiramente inclinado, que gira lentamente ao redor de seu eixo longitudinal. O minério úmido é introduzido na parte superior do secador e se desloca por gravidade em direção a parte inferior, onde o produto seco é descarregado (SILVA, 1995).

Dentro do cilindro, a presença de aletas facilita o movimento do material durante a rotação, conforme indicado nas figuras 12 e 13, promovendo uma distribuição uniforme e melhorando a eficiência do processo de secagem. O secador rotativo opera através do aumento da temperatura no interior do tambor, um processo realizado por um queimador que pode utilizar gás, óleo, ou uma combinação de ambos. A modulação do volume de combustível é controlada eletronicamente para regular a temperatura na saída do tambor, enquanto a mistura de ar e combustível é ajustada manualmente (SILVA, 1995).

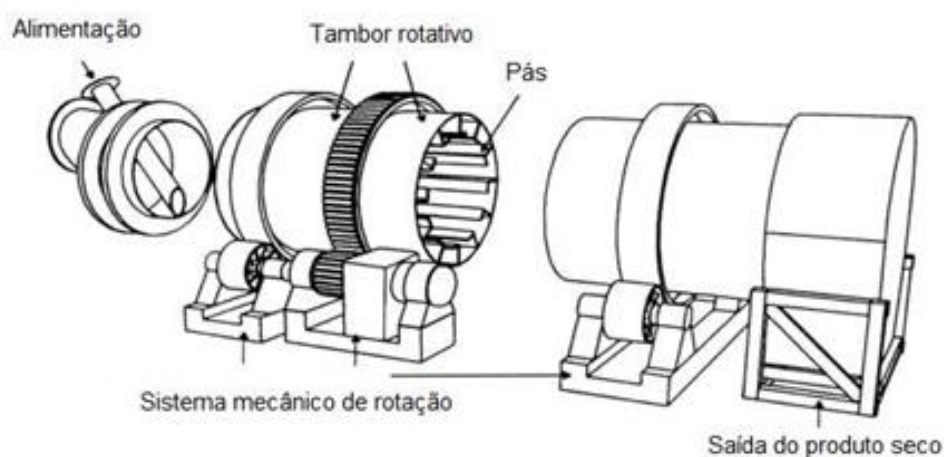


Figura 12 - Diagrama esquemático de um secador rotativo

Fonte: Adaptado de Silvia et al. (2012)

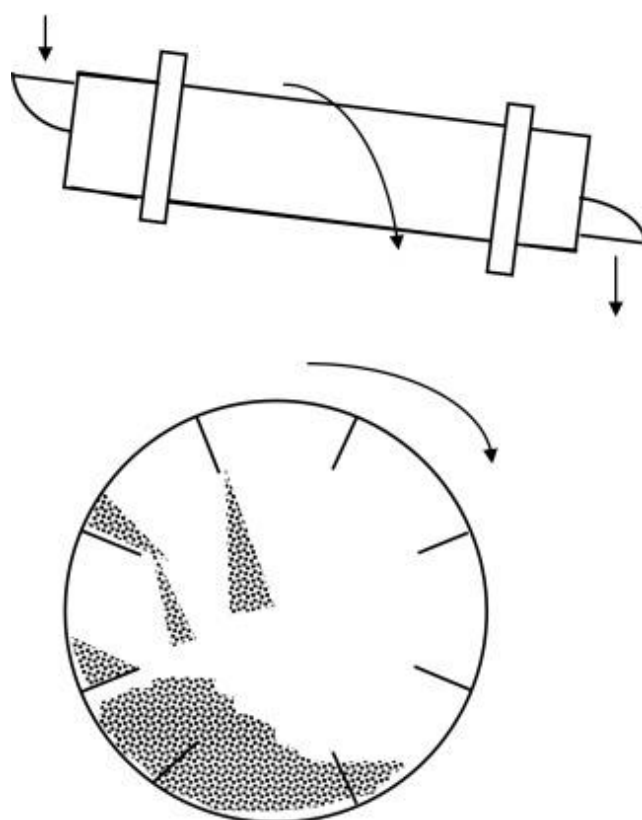


Figura 13- Esquema geral secador rotativo

Fonte: Berk, 2018

Durante a operação, o movimento contínuo do material no tambor é crucial para garantir uma secagem uniforme. As palhetas internas criam uma "película" de minério que facilita

a remoção da umidade. A velocidade de tombamento do tambor é dimensionada para assegurar que o material permaneça no secador apenas o tempo necessário para alcançar a secagem total, otimizando o consumo de energia (SILVA, 1995).

4.8. Caracterização geológica e definição da reserva mineral

Atualmente, a planta de beneficiamento do empreendimento situa-se no município de Sabinópolis, localizado na região centro-leste do estado de Minas Gerais, na direção noroeste da cidade de Guanhães, conforme indicado na figura 14. O local de extração encontra-se no contexto geológico Guanhães.

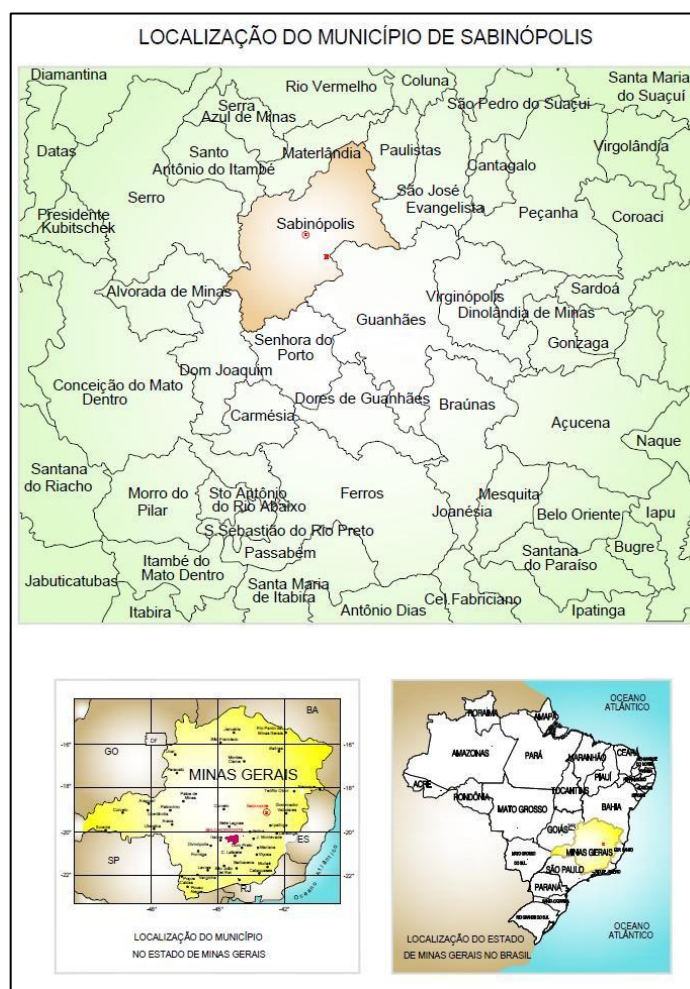


Figura 14- localização Sabinópolis
Fonte: Relatório Final de Pesquisa, 2011

4.8.1. Grupo Guanhães

A área ocupada pela folha Guanhães pertence ao distrito de Guanhães, que é constituído por rochas pré-cambrianas, dentre as quais encontra-se uma delgada formação ferrífera metassedimentar, de idade arqueana. Contém, por vezes, camadas de minério magnetítico-hematítico de alto teor. Essa formação ferrífera integra uma sequência rochosa metassedimentar-metavulcânica completamente deformada, definida como grupo Guanhães, que se assenta sobre um embasamento de rochas granitóides. O conjunto é cortado por intrusivas ultramáficas, máficas e ácidas. Outra série metassedimentar, conhecida como grupo Rio Doce, recobre as rochas supracrustais do grupo Guanhães e as rochas granitoides do embasamento, através de contato falhado por empurrão. O grupo Guanhães é dividido em três formações: 1) Inferior, unidade pouco espessa e nem sempre presente, constituída por xistos verdes (meta básicos e meta ultrabásicos) e xistos pelíticos variados, contendo lentes delgadas de itabiritos, quartzito e formação manganífera; 2) Média, com itabirito, rocha cálcio-silicática, xisto carbonático e rocha carbonática mais ou menos impura, além de quartzito e quartzito ferruginoso e 3) Superior, contendo paragneisse rico em intercalações anfibolíticas, e muito subordinadamente, quartzito e formação ferrífera. (GROSSI SAD, 1990).

4.8.2. Estudos em campo e sondagens

Anteriormente ao início da extração, diversos estudos foram realizados de forma a comprovar a existência do corpo mineral e sua viabilidade econômica, tais como: pesquisa bibliográfica, levantamento em campo, geofísica e sondagens. Com o objetivo de delimitar a área da mineralização do ferro para esse alvo, ou seja, com base nas anomalias geofísicas e a evidência de presença de minério de ferro em campo (afloramento), foram estabelecidos pontos de sondagens e a execução das mesmas conforme apresentado nas figuras 15 e 16.



Figura 15- Sondagem na área do projeto

Fonte: Relatório final de pesquisa, 2011



Figura 16- Testemunho de sondagem

Fonte: Relatório final de pesquisa, 2011

4.8.3. Reservas lavráveis – definição da cava ótima

Com os estudos realizados, foi necessário a conversão de recursos geológicos em reservas lavráveis, que constituem a base para a viabilidade de um empreendimento mineral. É um

processo que depende de uma interação complexa de diversos parâmetros geotécnicos e econômicos. Estes parâmetros englobam a competência geotécnica das formações rochosas envolvidas, determinando o ângulo crítico de talude operacional necessário para garantir a segurança durante as operações de mineração. Além disso, é importante considerar aspectos financeiros, tais como o cálculo das despesas de capital (CAPEX) e despesas operacionais (OPEX), juntamente com a elaboração de projeções econômicas específicas para o empreendimento. A eficácia desse processo está intimamente ligada a diversos fatores adicionais, incluindo as taxas de produção, os custos relacionados a extração e processamento de minério, os preços de venda dos produtos, a recuperação mássica e metalúrgica, bem como os custos variáveis associados a profundidade da exploração subterrânea ou a céu aberto. Cabe ressaltar que a interdependência entre esses elementos desempenha um papel fundamental na tomada de decisões técnicas e econômicas para garantir a viabilidade do projeto de mineração.

A aplicação de todos estes parâmetros no modelo de reservas geológicas permitiu a definição da cava ótima para o projeto em questão. O corpo de minério encontra-se próximo a superfície sustentando as encostas dos morros. O método de lavra adotado foi a lavra a céu aberto inicialmente em encosta e depois em cava devido a geometria do depósito, bem como o mergulho deste.

É importante ressaltar que a cota da cava ótima pode ser sujeita a alterações ao longo da execução do projeto, bem como durante o processo de licenciamento ambiental. Essas mudanças podem ser necessárias para acomodar os requisitos legais e ambientais em constante evolução, e adequando a estratégias operacionais.

Ilustrado na figura 17 está o perfil da cava. Na figura está representado o que se espera de material compacto e de material friável de acordo com os resultados obtidos nas sondagens.

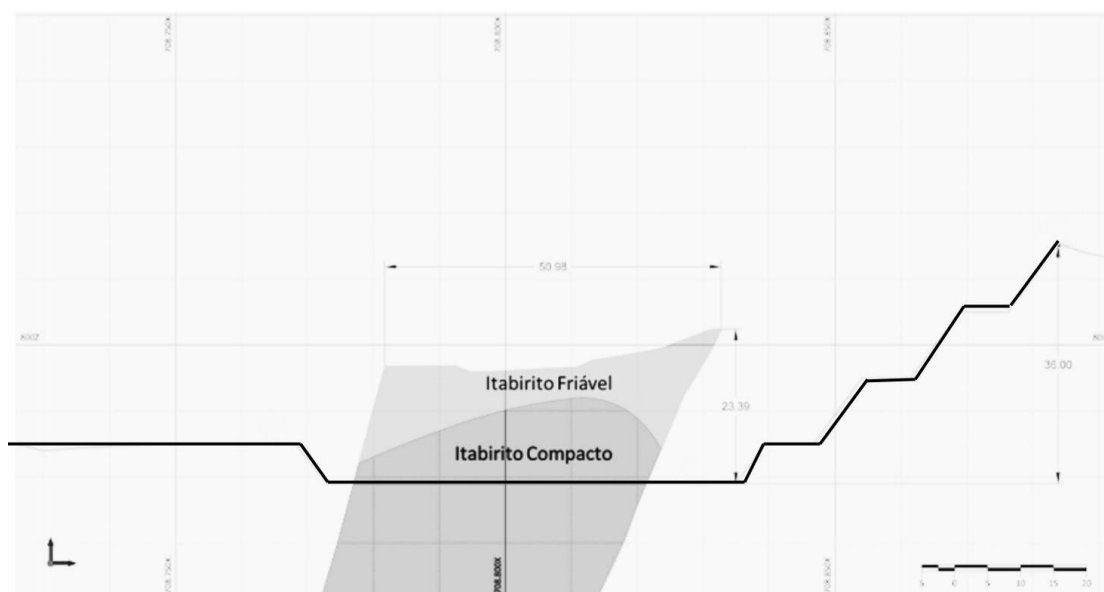


Figura 17- Corte de perfil da cava ótima

Fonte: Plano de aproveitamento econômico, 2022

A cava ótima do alvo foi construída baseada na relação estéril/minério que é a variável de maior impacto financeiro devido a geometria do corpo e o mergulho sub-vertical. Além de estar intimamente ligado a compacidade do minério, pois atualmente a rota de processo instalada não está adequada para o itabirito compacto, definindo assim a reserva dentro do itabirito friável, bem como a quantidade de itabirito compacto inerente à extração do mesmo.

4.9. Rota de processo instalada

O projeto conta com uma usina de beneficiamento a seco, já equipada com uma etapa de secagem. Nessa configuração todo o minério proveniente da etapa de cominuição e peneiramento é secado. Após a etapa de secagem, o mesmo é direcionado para a etapa de concentração a seco.

O material friável apresenta bons resultados de recuperação mássica e metálica quando submetido ao processo de beneficiamento atual. Contudo, ao processar o material compacto ou semi-compacto com o mesmo método, a recuperação mássica é inferior ao esperado, gerando custos adicionais. Há um interesse em ajustar a rota de processamento para viabilizar o tratamento do material compacto, com o objetivo de, baseado nos

resultados obtidos, expandir a exploração para todo o material compacto indicado na figura 17. Atualmente, esse material não foi incluído como reserva lavrável do projeto.

Embora uma unidade de processamento a úmido possa ser considerada, ela exige investimentos mais significativos em comparação com o método a seco. Além disso, a operação a úmido consome mais recursos naturais, como água, e requer uma maior ocupação de solo. Portanto, é necessário explorar alternativas que permitam manter o projeto com processamento a seco, porém de forma mais otimizada. Esta abordagem se justifica pela sua vantagem econômica, resultando em custos mais baixos, e pelo seu menor impacto ambiental

O processo produtivo da mina em Sabinópolis é subdividido em três macroprocessos, sendo: lavra, classificação e concentração.

No macroprocesso da lavra é realizado o desmonte do minério de ferro através da utilização de escavadeira hidráulica, e caso necessário, com o apoio de um rompedor hidráulico. Após o desmonte ocorre a separação entre estéril e minério, sendo o estéril direcionado para a pilha de estéril e o minério direcionado para a classificação.

No macroprocesso da classificação é realizada a britagem primária seguida do peneiramento separando o material em três produtos distintos: o *Sinter Feed* [- 6,3 mm], a Hematitinha [-19 + 6,3 mm] e o Granulado [- 32 +19 mm]. Os três produtos são amostrados nas pilhas e quando estão dentro da especificação comercial seguem para os processos de estocagem, carregamento, transporte, pesagem e expedição. Porém quando a Hematitinha e o Granulado encontram-se fora da especificação, são direcionados aos processos de britagem secundária e britagem terciária para posteriormente seguirem o fluxo do peneiramento e classificação novamente. Quando o *Sinter Feed* encontra-se fora da especificação comercial, é direcionado aos processos de carregamento e transporte antes de ser integrado ao próximo macroprocesso. Segue na figura 18 representação do fluxograma de classificação.

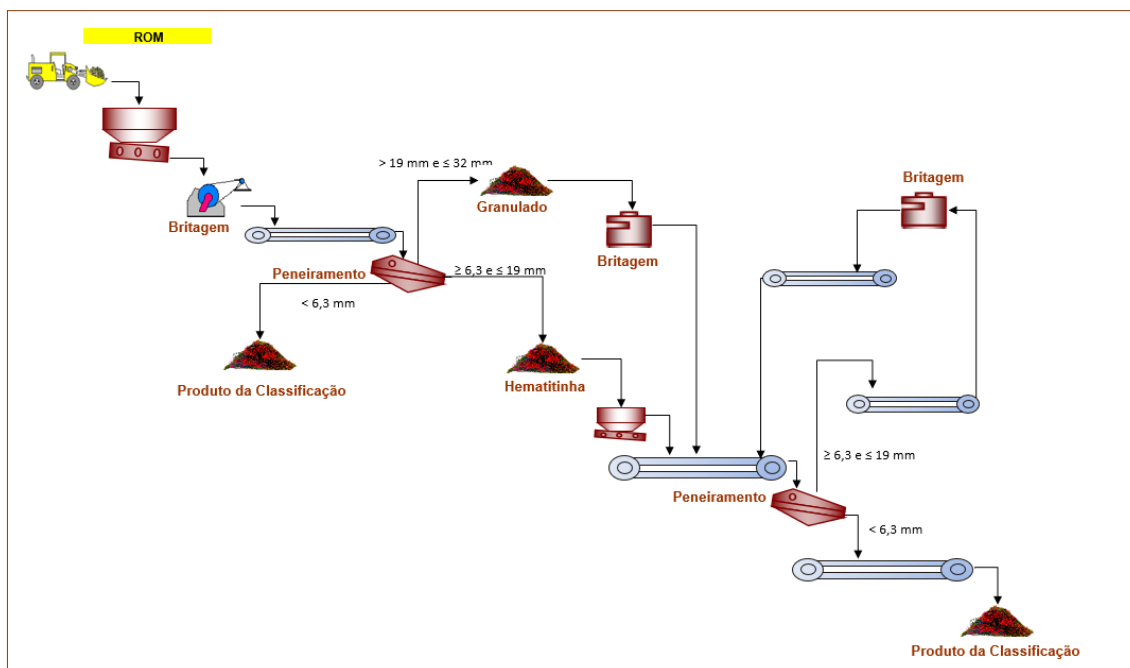


Figura 18- Fluxograma da classificação

Fonte: Próprio autor

No macroprocesso da concentração, é realizada a secagem do *Sinter Feed* proveniente da etapa anterior. Posteriormente é realizada mais uma classificação, podendo-se obter mais dois produtos, o Feijãozinho $[- 6,3 + 3,0 \text{ mm}]$ e o *Sinter Feed 2* $[- 3 \text{ mm}]$. O *Sinter Feed 2* é então direcionado para a concentração magnética podendo ser subdividido em mais dois produtos, concentrado e o rejeito. O rejeito é submetido a amostragem para posteriormente ser encaminhado aos processos de carregamento e transporte para a destinação final na pilha de rejeito. O concentrado é submetido a amostragem para posteriormente ser encaminhado aos processos de estocagem, carregamento, transporte, pesagem, amostragem e expedição. Segue na figura 19 representação do fluxograma de concentração.

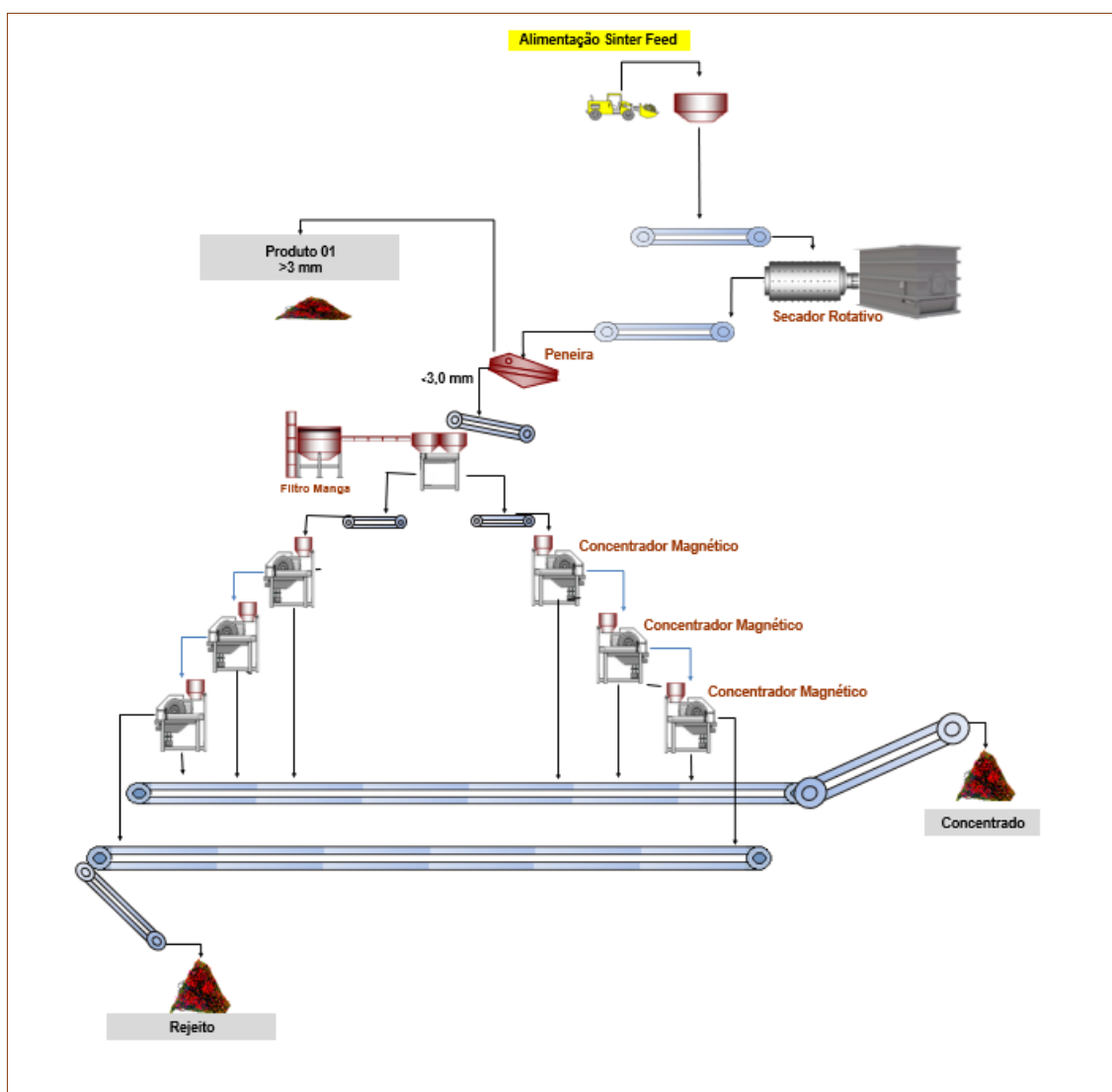


Figura 19- Fluxograma da concentração

Fonte: Próprio autor

O Feijãozinho gerado após os processos de secagem e peneiramento é submetido a amostragem para posteriormente ser encaminhado aos processos de estocagem, carregamento, transporte, pesagem e expedição.

4.9.1. Concentradores magnéticos instalados

A linha de concentradores magnéticos na planta de Sabinópolis é dupla, o que permite dividir o fluxo do material que passa pela peneira em dois. Essa abordagem estratégica aumenta a capacidade de produção, uma vez que a limitação de produção é determinada pela capacidade do concentrador magnético. As linhas são idênticas, sendo apenas uma duplicação, e incluem concentradores magnéticos do tipo tambor, com intensidades de

campo magnético de 1500 Gauss e dois níveis de 7500 Gauss. Esses concentradores operam a seco e são equipados com ímãs permanentes, conforme ilustrado na figura 20.

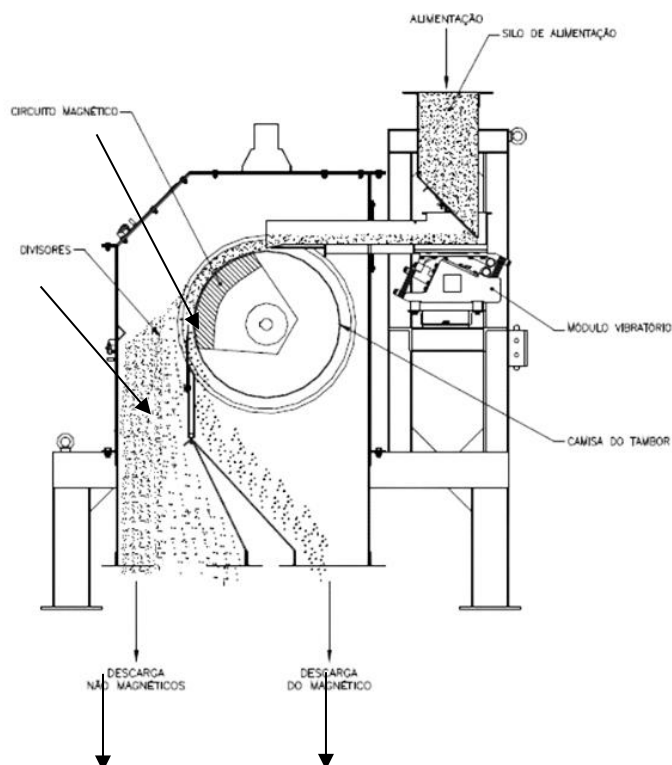


Figura 20- Detalhe concentrador magnético do tipo tambor

Fonte: Adaptado Inbras (2023)

O minério alimentado é separado em apenas dois produtos, sendo um o concentrado e o outro o rejeito, sendo assim há apenas um divisor de fluxo. Em alguns equipamentos, como no re-roll é possível também retirar uma parcela do produto misto, mas o mesmo não se aplica aos concentradores magnéticos a seco tambor *standard* utilizados na planta. Na figura 21 é indicada a disposição desses concentradores na planta de Sabinópolis.



Figura 21- Foto do prédio de concentração magnética instalada

Fonte: Próprio Autor

Conforme demonstrado no fluxograma, embora o processo envolva três concentradores magnéticos, eles convergem para produzir apenas um concentrado e um rejeito. O rejeito do concentrador de 1500 Gauss é direcionado para o concentrador de 7500 Gauss e, de maneira semelhante, o rejeito do concentrador magnético de 7500 Gauss é direcionado para o terceiro concentrador magnético. Todo o concentrado é combinado em uma única pilha, enquanto o rejeito do último concentrador é descartado separadamente.

4.9.2. Secador rotativo instalado

O secador rotativo instalado na planta desempenha um papel fundamental no processo, pois é responsável por remover a umidade do minério proveniente da etapa de classificação. Seu objetivo primário é reduzir a umidade para níveis próximos a zero, o que é essencial para garantir um desempenho eficaz na etapa subsequente de concentração magnética. A remoção eficiente da umidade pelo secador rotativo é fundamental para garantir que o material esteja em condições ideais para a concentração magnética, facilitando a separação eficaz dos minerais desejados e contribuindo para a qualidade do produto. Segue na figura 22 e 23 o secador rotativo implantado.



Figura 22- Secador rotativo em fabricação

Fonte: Próprio autor

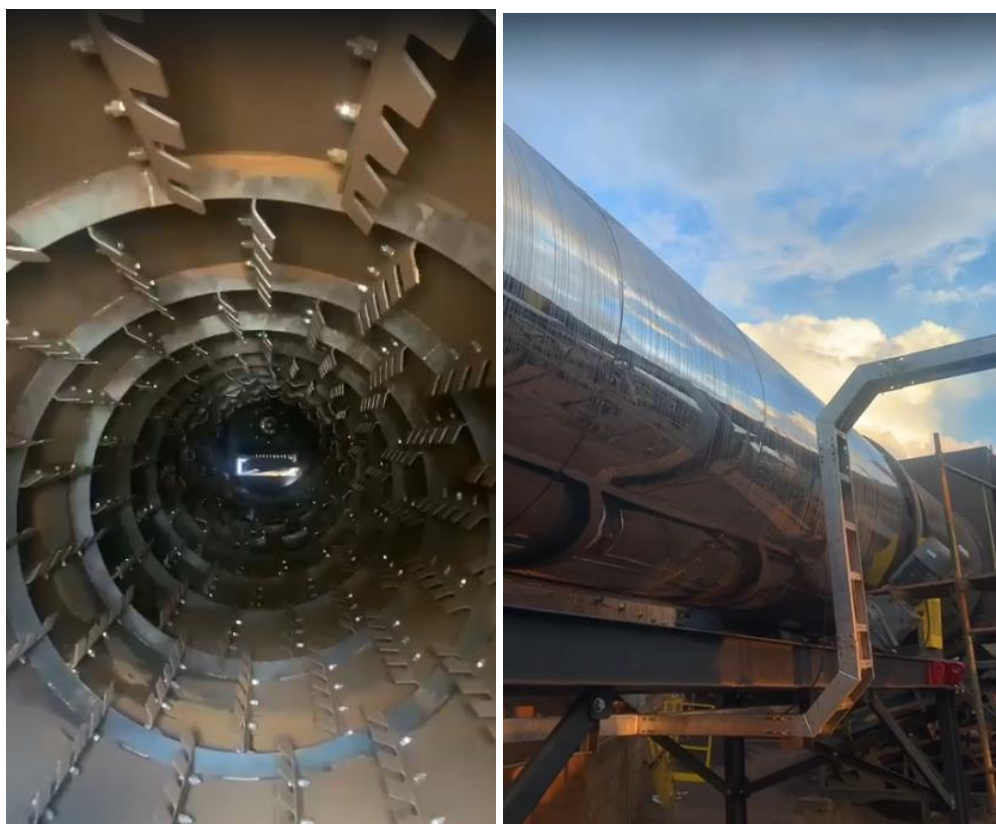


Figura 23- Parte interna e externa do secador rotativo

Fonte: Próprio autor

4.9.3. Instrumentos de controle

A planta de beneficiamento em questão possui operação automatizada e isso demanda uma série de dispositivos para garantir seu funcionamento eficiente dentro dos parâmetros estabelecidos. Entre esses dispositivos de controle, destacam-se os sensores de temperatura distribuídos ao longo da planta de concentração. É imprescindível a presença e o acompanhamento dos mesmos, pois enquanto o secador rotativo requer temperaturas mais elevadas para otimizar sua eficiência na remoção da umidade do material, os concentradores magnéticos operam de forma mais eficaz em temperatura ambiente, pois a alta temperatura, além de danificá-los, podem diminuir a eficiência de concentração.

Para assegurar a remoção eficaz da umidade do material, utiliza-se um equipamento de controle de umidade fixado nas correias transportadoras, tanto antes da secagem quanto após. Além disso, balanças integradoras estão instaladas ao longo da planta para monitorar o volume de produção de maneira contínua e precisa. Esses dispositivos são fundamentais para garantir o controle do processo e identificar propostas de melhorias.

Segue instrumento medidor de umidade representado na figura 24, bem como sua posição de instalação na figura 25.

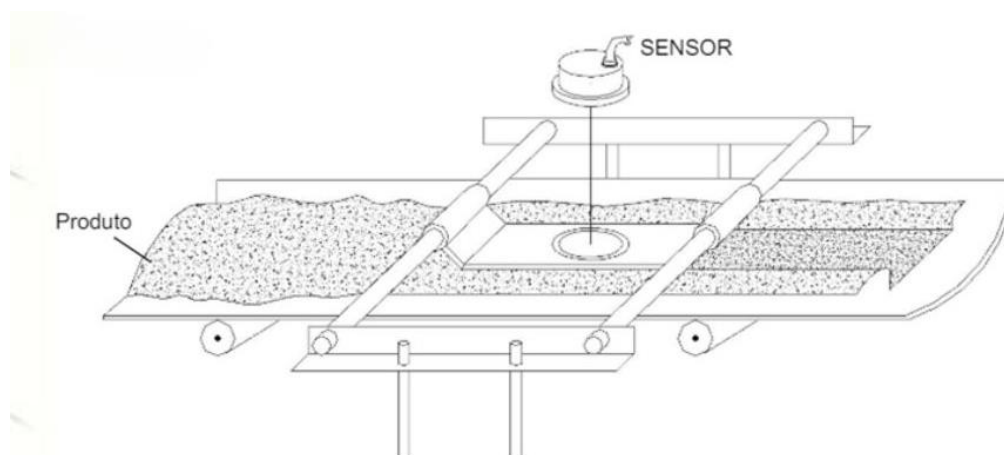


Figura 24 - Desenho esquemático do sensor de umidade

Fonte: Manual Lenox, 2021



Figura 25 - Sensor de umidade instalado na planta

Fonte: Próprio autor

Esse instrumento de controle de umidade é fundamental para acompanhar a eficiência na secagem, bem como verificar a influência da umidade durante a concentração magnética. Esses dispositivos foram instalados na correia transportadora que alimenta o secador e na correia de saída do secador. Segue na figura 26 a umidade de entrada e de saída acompanhadas durante 6 dias de produção.

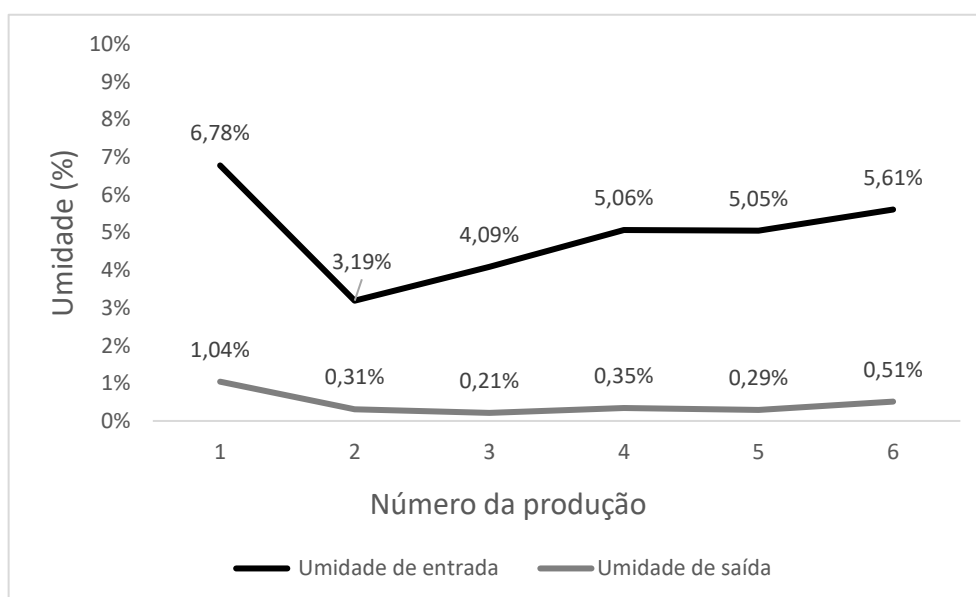


Figura 26 - Umidade de entrada e saída durante 6 dias de produção

Fonte: Próprio autor

Embora a umidade natural do minério seja relativamente baixa, apresentando uma média inferior a 6% na maioria dos dias, as análises operacionais indicam a necessidade de reduzir essa umidade para um valor próximo a 0%. Esta redução é essencial para garantir a eficiência do processo de concentração magnética a seco, particularmente para o tipo de minério característico da região.

4.10. Baixa recuperação mássica e metalúrgica

A frente de lavra apresentada nos capítulos anteriores é hoje um dos alvos responsáveis por alimentar a rota de processo apresentada. Essa frente de lavra em específico, apresenta um nível de complexidade maior e cada vez mais comum nas empresas de mineração, que é a extração do minério compacto e seu beneficiamento. É esperado que a frente de lavra seja heterogênea e que os resultados dos produtos sejam variáveis à medida que lavra avança, porém lidar com o itabirito friável e compacto pode apresentar uma cadeia de beneficiamento completamente distinta.

No caso da planta em questão, a extração do itabirito friável, em parte, resulta na remoção do compacto, e foi durante esse processo que observou-se uma redução na recuperação mássica, no que denominou-se como minério semi-compacto. À medida que se aproxima a fase destinada ao compacto, torna-se importante avaliar se a rota atual é capaz de beneficiar eficientemente esse tipo de minério, alcançando uma recuperação mássica satisfatória, ou se será necessário introduzir modificações no fluxograma indicado. A questão da baixa recuperação mássica acarreta diversos desafios para a mina. Em primeiro lugar, ela impacta a capacidade nominal da planta, resultando em uma diminuição significativa na taxa de produção, o que, por sua vez, eleva o custo por tonelada do concentrado. Além disso, a baixa recuperação exige uma extensão das áreas destinadas as pilhas de rejeitos, resultando na subutilização do recurso mineral, que não é aproveitado em sua máxima potencialidade. Esses aspectos ressaltam a necessidade de avaliação e possíveis ajustes no processo para otimizar a recuperação mássica e metalúrgica, a fim de maximizar a eficiência operacional.

Segue na figura 27 a consolidação dos resultados de acompanhamento de outros 6 dias de operação nos quais a planta foi alimentada com material semi-compacto com um média de alimentação de Fe com teor de 39% e 38% de SiO₂, nos quais obteve-se uma média de

produto com teor de ferro de 58% e de sílica de 11% com uma recuperação média mássica de 35% e recuperação metalúrgica de 53%.

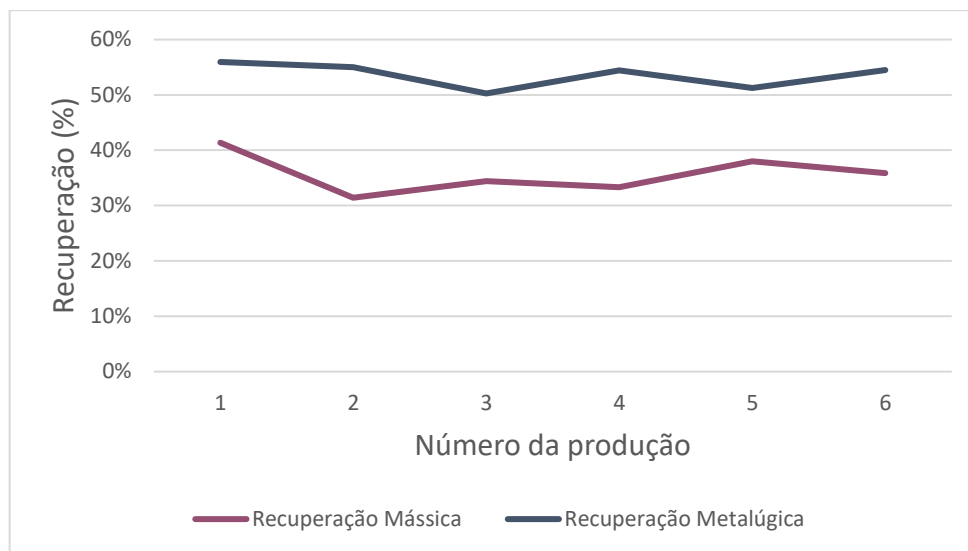


Figura 27 – Acompanhamento dos resultados da produção durante 6 dias

Fonte: Próprio autor

4.11. Heterogeneidade da frente de lavra

Na mineração é comum a heterogeneidade em frente de lavra, que se refere as diferenças nas propriedades dos depósitos minerais em uma área de exploração. Essas variações abrangem o teor de minerais valiosos, presença de impurezas, granulometria e outras características físicas e químicas do minério, como sua dureza. Essa diversidade é esperada devido a fatores geológicos, incluindo a formação rochosa, processos metamórficos e a deposição mineral desigual. O desafio surge na operação de lavra, onde parte do minério friável é extraída simultaneamente ao minério compacto, gerando variações na alimentação que afetam os resultados do processamento, mesmo com parâmetros operacionais constantes. Segue na figura 28 uma imagem que ilustra essa variabilidade na frente de lavra.



Figura 28 - Frente de lavra com material friável e compacto

Fonte: Próprio autor

5.MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão apresentados os procedimentos experimentais adotados para alcançar os objetivos propostos neste trabalho. As metodologias incluem a preparação e caracterização das amostras, bem como suas respectivas análises químicas, além de testes de concentração magnética em escala piloto em diversos cenários.

5.1. Amostragem – Concentração magnética

As amostras deste estudo foram coletadas diretamente na frente de lavra investigada, seguindo procedimentos padrão. A área de lavra apresenta uma notável heterogeneidade, com a presença de diferentes minérios de características distintas, como itabirito friável e compacto. Atualmente, a extração é predominantemente do minério friável, mas frequentemente inclui também o desmonte do compacto. Este estudo considerou dois tipos principais de amostras da frente de lavra, sendo a primeira amostra uma representação do minério semi-compacto, sendo esse o minério que possui características intermediárias entre o completamente friável e o totalmente compacto apresentando uma coesão moderada que permite certa fragmentação, mas com uma estrutura mais rígida do que o material friável. Já a segunda amostra corresponde ao material compacto com a maior rigidez identificado na frente de lavra. Dessa forma, foram desenvolvidos dois cenários para análise. As figuras 29, 30 e 31 ilustram o local de amostragem, o material compacto in situ e as amostras preparadas no laboratório, respectivamente. As amostras foram submetidas a uma série de testes para caracterização mineralógica e tecnológica, visando avaliar a eficiência do beneficiamento a seco e identificar oportunidades de otimização para ambos os tipos de materiais.

Na tabela 3 estão indicadas um resumo de todas as amostras coletadas para o teste piloto de concentração magnética, bem como a origem da amostra e o peso coletado.

Tabela 3 - Amostras coletadas para testes em escala piloto

Fonte: Próprio autor

Número do Teste	Metodologia Teste	Peso Amostra cabeça (Kg)	Granulometria	Origem	Número da Amostra
Teste 00	Teste a seco com etapa de secagem	36	<1,00 mm	Semi-compacto	Coleta 01
Teste 01	Teste a seco com etapa de secagem	10	<1,00 mm	Semi-compacto	Coleta 02
Teste 02	Teste a seco com etapa de secagem	10	<2,00 mm	Semi-compacto	Coleta 02
Teste 03	Teste a seco com etapa de secagem	10	<3,00 mm	Semi-compacto	Coleta 02
Teste 04	Teste a umidade natural	10	<1,00 mm	Semi-compacto	Coleta 02
Teste 05	Teste a umidade natural	10	<2,00 mm	Semi-compacto	Coleta 02
Teste 06	Teste a umidade natural	10	<3,00 mm	Semi-compacto	Coleta 02
Teste 07	Teste a úmido	63	<1,00 mm	Semi-compacto	Coleta 01
Teste 08	Teste a seco com etapa de secagem	10	<1,00 mm	Compacto	Coleta 03
Teste 09	Teste Rota híbrida	45	<1,00 mm	Compacto	Coleta 03



Figura 29 - Coleta de amostra na frente de lavra

Fonte: Próprio autor



Figura 30 - Amostra de mão do material compacto

Fonte: Próprio autor



Figura 31 - Amostras preparadas

Fonte: Próprio autor

Conforme detalhado na tabela 3, foram realizadas três coletas principais. A primeira coleta do itabirito semi-compacto, deu sequência aos testes 00 e 07. A segunda coleta, de maneira semelhante, forneceu as amostras para os testes 01, 02, 03, 04, 05 e 06. Por fim, a terceira e última coleta foi destinada aos testes 08 e 09, do itabirito caracterizado como compacto. O peso de cada amostra foi definido de acordo com os testes que seriam executados, bem como a preparação física das amostras no laboratório.

As amostras seguiram os procedimentos padrão para a realização da análise química e granulométrica no laboratório, conforme apresentado na Figura 32.

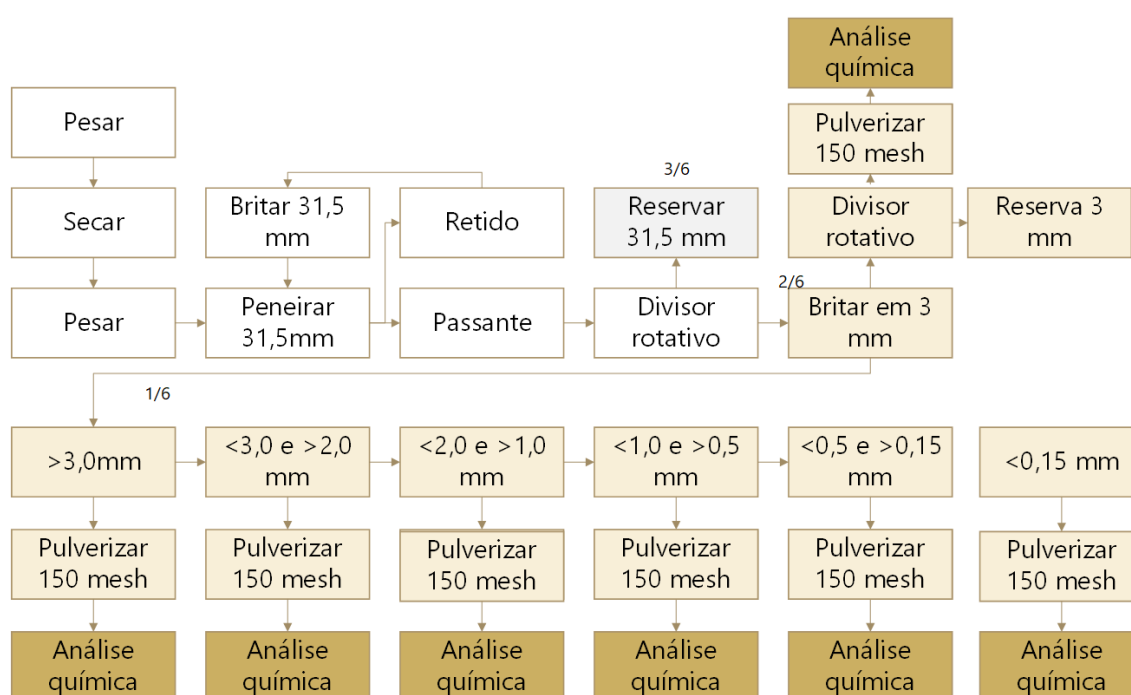


Figura 32 - Preparação da granuloquímica das amostras

Fonte: Próprio autor

Para a análise granuloquímica, foram empregadas peneiras de bancada para ensaio a seco. As amostras foram secas em estufa a 100°C por 1,5 a 2,5 horas e, posteriormente, fragmentadas para reduzir o material maior que 31,5 mm. O material passante foi então cominuído a menor 3 mm por britagem adicional. Em seguida, o material foi peneirado por aproximadamente 1 minuto, conforme especificado na figura 32. As massas retidas em cada peneira foram cuidadosamente pesadas e registradas.

Segue na figura 33 registro da preparação da amostra para análise granuloquímica.



Figura 33 - Preparação das amostras no peneiramento para análise química

Fonte: Próprio autor

Para as amostras indicadas nos testes 00 ao teste 07 foram feitas para cada amostra (cabeça, concentrado e rejeito) a granulométrica para as malhas 2,00 mm, 1,00mm, 0,150 mm e base, porém para os testes 08 e 09 foram utilizadas as malhas 1,00mm, 0,50 mm, 0,30mm, 0,212mm, 0,150mm, 0,106mm, 0,053mm e base, por ser um material ainda pouco conhecido e com maior resistência à cominuição.

Segue representado na figura 34 registro fotográfico do peneiramento a úmido, feito exclusivamente para análise visual do material. Para a análise granulométrica, foi utilizado o método de peneiramento a seco, conforme anteriormente indicado.



Figura 34 - Peneiramento a úmido

Fonte: Próprio autor

Todas as amostras geradas foram analisadas quimicamente para os seguintes elementos químicos indicados na tabela 4.

Tabela 4 - Elementos químicos analisados

Fonte: Próprio autor

Fe%	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	P%	Mn%	TiO%	CaO%	MgO%	PPC%
-----	--------------------	----------------------------------	----	-----	------	------	------	------

Conforme indicado no fluxograma na figura 32, também foram arquivadas amostras caso seja necessário reanálise de algum resultado apresentado.

As amostras foram destinadas para testes de concentração magnética na empresa Inbras, sendo cada teste realizado de forma duplicado, e para tal foram preparadas com base nas especificações técnicas requeridas. O material coletado foi submetido ao processo de cominuição para reduzi-lo a granulometrias abaixo de 3 mm, 2 mm e 1 mm, conforme necessário. Essa etapa de britagem foi realizada em um britador de rolos, conforme indicado na figura 35.



Figura 35 - Britador de rolos (laboratório)

Fonte: Próprio autor

Posteriormente, o material foi submetido ao peneiramento para assegurar que no mínimo 80% da amostra estivesse dentro das granulometrias desejadas. Indicado na figura 36 imagens da preparação no peneiramento.



Figura 36 - Peneiramento (preparação da amostra para o teste piloto)

Fonte: Próprio autor

5.2. Amostragem – Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica demandou amostragem tanto do material friável quanto do compacto, seguindo o fluxograma da figura 37. Nesse contexto, procedeu-se a pulverização de um terço de cada amostra, abrangendo diversas granulometrias. Em seguida, realizou-se a análise química do material.

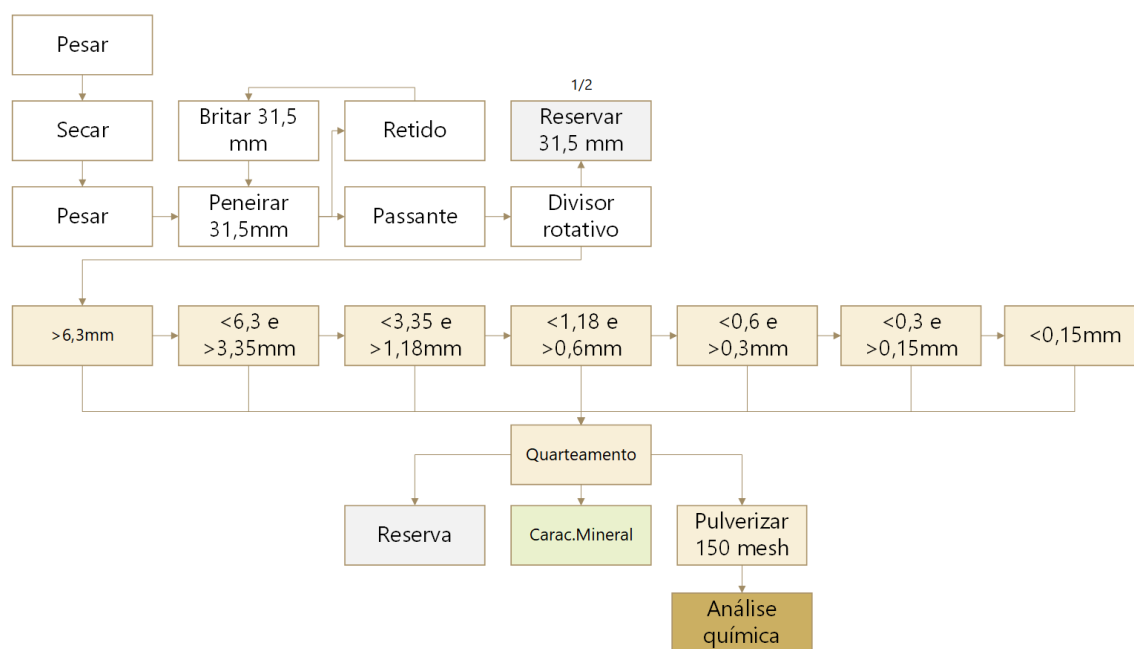


Figura 37 - Fluxograma caracterização mineral

Fonte: Próprio autor

Duas amostras de formações ferríferas bandadas (nomeadas FFS e FFC) foram previamente selecionadas para este estudo. Uma refere-se ao material friável (FFS) e outra ao material compacto (FFC). Ambas foram submetidas a um processo de britagem e peneiramento, que utilizou as seguintes peneiras para particionar o material: 6,3 mm; 3,35 mm; 1,18 mm; 0,6 mm; 0,3 mm e 0,15 mm.

Após o material ser britado e peneirado, 8 lâminas delgadas polidas de grãos foram confeccionadas para cada amostra. Para cada fração foi-se confeccionada uma lâmina, com exceção da amostra retida na peneira 6,3 mm, onde foram preparadas duas lâminas devido ao material ter uma granulometria muito grossa para ser representado somente por uma lâmina. Além do material retido na peneira, foi-se preparada uma lâmina para o material passante em todas as peneiras, que é chamado de fundo. Uma relação das lâminas delgadas polidas de grãos confeccionadas e descritas se encontra na tabela 05.

Tabela 5- Relação das amostras preparadas

Fonte: Relatório Técnico Laboratório Arkad

Fração (mm)	>6,3	>3,35	>1,18	>0,6	>0,3	>0,15	FUNDO
Número de lâminas por fração	2	1	1	1	1	1	1
Nomenclatura para a amostra FFC	FFC>6,3	FFC>3,35	FFC>1,18	FFC>0,6	FFC>0,3	FFC>0,15	FFC-FUNDO
Nomenclatura para a amostra FFS	FFS>6,3	FFS>3,35	FFS>1,18	FFS>0,6	FFS>0,3	FFS>0,15	FFS-FUNDO

Após as lâminas estarem prontas, as mesmas foram estudadas em luz transmitida e refletida no microscópio Zeiss Axioplan. Os estudos foram focados em compreender a mineralogia presente nas amostras e no grau de liberação mineral pelo Método de Gaudin.

5.3. Secagem no laboratório para o teste piloto

No âmbito laboratorial, as amostras foram submetidas a secagem em forno conforme indicado na figura 38, a uma temperatura de $100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, seguida da medição da umidade. Embora esse procedimento não reflita precisamente as condições industriais, onde as variáveis são influenciadas por uma série de fatores, como o tempo de residência e as características do processo em escala, é válido ressaltar que a abordagem experimental permite uma aproximação dos resultados encontrados na secagem industrial.



Figura 38 - Secagem laboratório

Fonte: Próprio autor

Ao compararmos a secagem em laboratório com a escala industrial, é importante considerar que, mesmo em ambientes controlados como o laboratório, certos parâmetros são monitorados e ajustados para simular condições próximas às encontradas na produção em larga escala. A utilização de sensores de temperatura e umidade em ambientes industriais contribui para a obtenção de resultados comparáveis, embora reconheçamos as diferenças inerentes aos contextos de aplicação.

Para as amostras utilizadas nos ensaios a umidade natural, especificamente nos testes 04, 05 e 06, não houve processo de secagem. As amostras foram apenas submetidas a pesagem e a medição da porcentagem de umidade.

5.4. Teste piloto de concentração magnética com itabirito semi-compacto

Foram realizados testes de concentração magnética na empresa Inbras – Equipamentos Magnéticos e Vibratórios, localizada em Diadema, São Paulo, abrangendo diversas faixas granulométricas para compreender a influência da granulometria na eficácia da concentração magnética, bem como na liberação dos minerais. Foram conduzidos

também testes em diferentes intensidades magnéticas para avaliar quais configurações proporcionarão os melhores resultados, com maior recuperação mássica e metalúrgica.

Para simular a planta instalada, foram realizados testes em que o material foi previamente secado antes de ir para a concentração, replicando assim as condições atuais da planta. Além disso, foram feitos testes com o material a umidade natural, ou seja, sem a etapa de secagem, como forma de validação do fluxograma atual e sua eficácia. Além disso, também foram propostos testes a úmido para avaliar diferentes cenários operacionais e analisar seu desempenho.

5.4.1. Testes de concentração magnética – Formação Ferrífera Bandada –Semi-compacto – Via seca com etapa de secagem

Foram realizados inicialmente 4 testes na empresa Inbras buscando reproduzir em escala piloto tanto a rota existente quanto rotas alternativas que otimizem o processo existente, conforme indicado na tabela 6.

Tabela 6- Testes a seco com secagem (semi-compacto)

Fonte: Próprio autor

Número do Teste	Metodologia Teste	Peso Amostra cabeça (Kg)	Granulometria	Origem
Teste 00	Teste a seco com etapa de secagem	36	<1,00 mm	Semi-compacto
Teste 01	Teste a seco com etapa de secagem	10	<1,00 mm	Semi-compacto
Teste 02	Teste a seco com etapa de secagem	10	<2,00 mm	Semi-compacto
Teste 03	Teste a seco com etapa de secagem	10	<3,00 mm	Semi-compacto

5.4.1.1. Testes 00 – Teste <1mm – Scavenger 1 (7500 Gauss)

Para o teste 00, que foi o primeiro teste realizado na Inbras, utilizou-se a mesma configuração encontrada hoje na planta. Tanto a sequência magnética dos tambores como as rotações foram mantidas. Empregou-se o concentrador magnético HF e HFRE, conforme figuras 39 e 40, caracterizado pela própria empresa como de baixa e alta intensidade, operando a uma intensidade magnética de aproximadamente 1500 e 7500

Gauss. Esse concentrador é do tipo tambor e sua fonte de campo magnético é de imã permanente.



Figura 39 - Tambor magnético 1500 Gauss (Modelo HF)

Fonte: Próprio autor



Figura 40 - Tambor magnético 7500 Gauss (Modelo HFRE)

Fonte: Próprio autor

Foi proposto também um acréscimo da fase do re-roll que não há na planta atual, com o intuito de aumentar a recuperação mássica, visto que se trata de um equipamento com altíssimo gradiente magnético. Trata-se de um concentrador magnético de terras raras do tipo ERIUM 3000® com intensidade aproximada de 14000 Gauss, representado na figura 41.



Figura 41- Tambor magnético 14000 Gauss (Modelo RE)

Fonte: Próprio autor

Neste teste, optou-se por uma granulometria menor em comparação com a aplicada na planta existente, que atualmente concentra o minério -3 mm. A proposta foi conduzida para partículas menores que 1 mm, considerando que a planta atual não alcança resultados satisfatórios industrialmente. Segue na figura 42 o fluxograma seguido para a realização do teste 00.

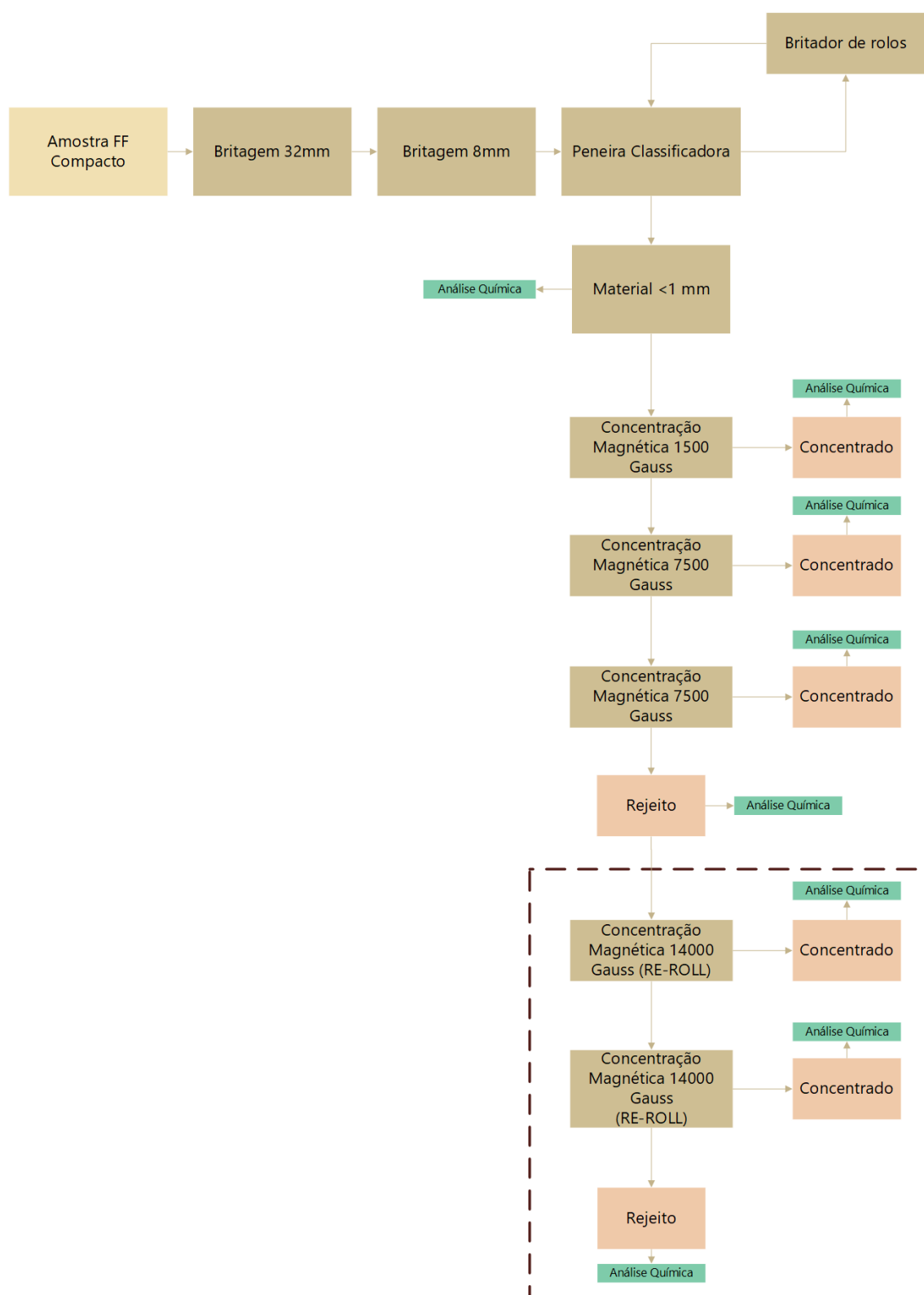


Figura 42 - Fluxograma do teste 00

Fonte: Próprio autor

5.4.1.2. Teste 01 – Teste <1mm – Scavenger 1 (2500 Gauss)

Para o teste 01, que também foi realizado na Inbras, utilizou-se uma configuração semelhante ao teste 00, só que ao invés de apresentar duas etapas de alta intensidade, uma delas foi substituída por um concentrador de média intensidade, com o intuito de retirar do processo minerais com diferentes susceptibilidades magnética. Os concentradores são do tipo tambor e sua fonte de campo magnético é de imã permanente. Nesse teste também foram indicadas duas etapas re-roll com o intuito de aumentar a recuperação mássica e metalúrgica.

Segue na figura 43 o tambor magnético de aproximadamente 2500 Gauss.



Figura 43 - Tambor magnético 2500 Gauss (Modelo HFRE)

Fonte: Próprio autor

Segue na figura 44 o fluxograma dos testes 01.

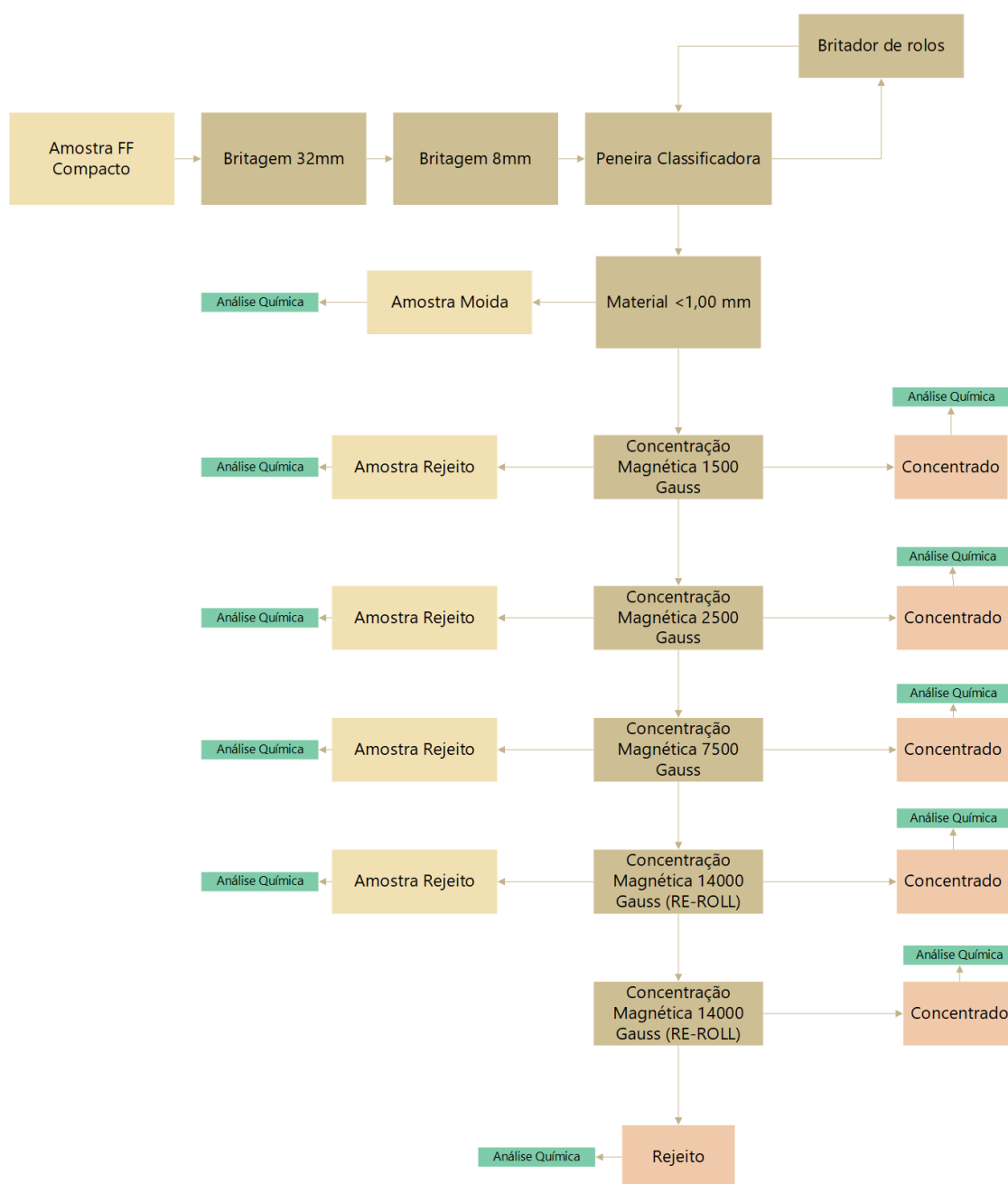


Figura 44 - Fluxograma do teste 01

Fonte: Próprio autor

5.4.1.3. Teste 02 – Teste <2mm – Scavenger 1 (2500 Gauss)

O teste 02, também realizado na Inbras, seguiu um procedimento parecido ao do teste 01, mas com uma diferença que neste teste o material foi cominuído para menor que 2 mm. A intenção era analisar como a granulometria afeta os teores de ferro no concentrado e a recuperação mássica e metalúrgica. Segue o fluxograma do teste na figura 45.

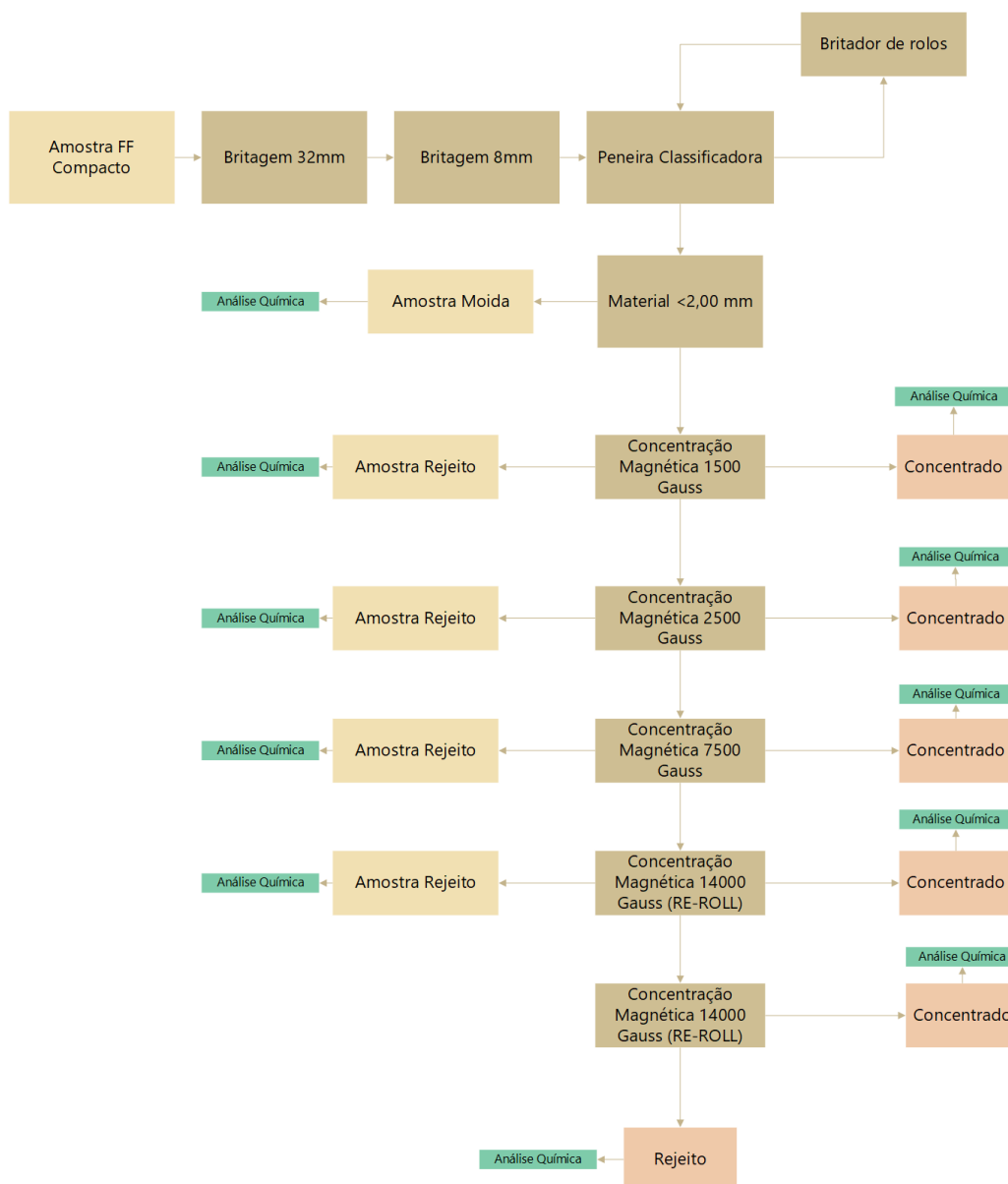


Figura 45 - Fluxograma do teste 02

Fonte: Próprio Autor

5.4.1.4. Teste 03 – Teste <3mm – Scavenger 1 (2500 Gauss)

Para o teste 03, semelhante ao apresentado para o teste 01 e 02, esse teste utilizou a mesma configuração dos testes anteriores e dessa vez o material foi cominuído para menor que 3mm. O teste em questão visa tanto analisar a influência da granulometria no processo de concentração como também entender como o material que hoje alimenta a planta se comportaria com a alteração de um alto campo para um médio campo, visto que a granulometria do teste 03 é a mesma utilizada industrialmente. Segue na figura 46 o fluxograma do teste indicado.

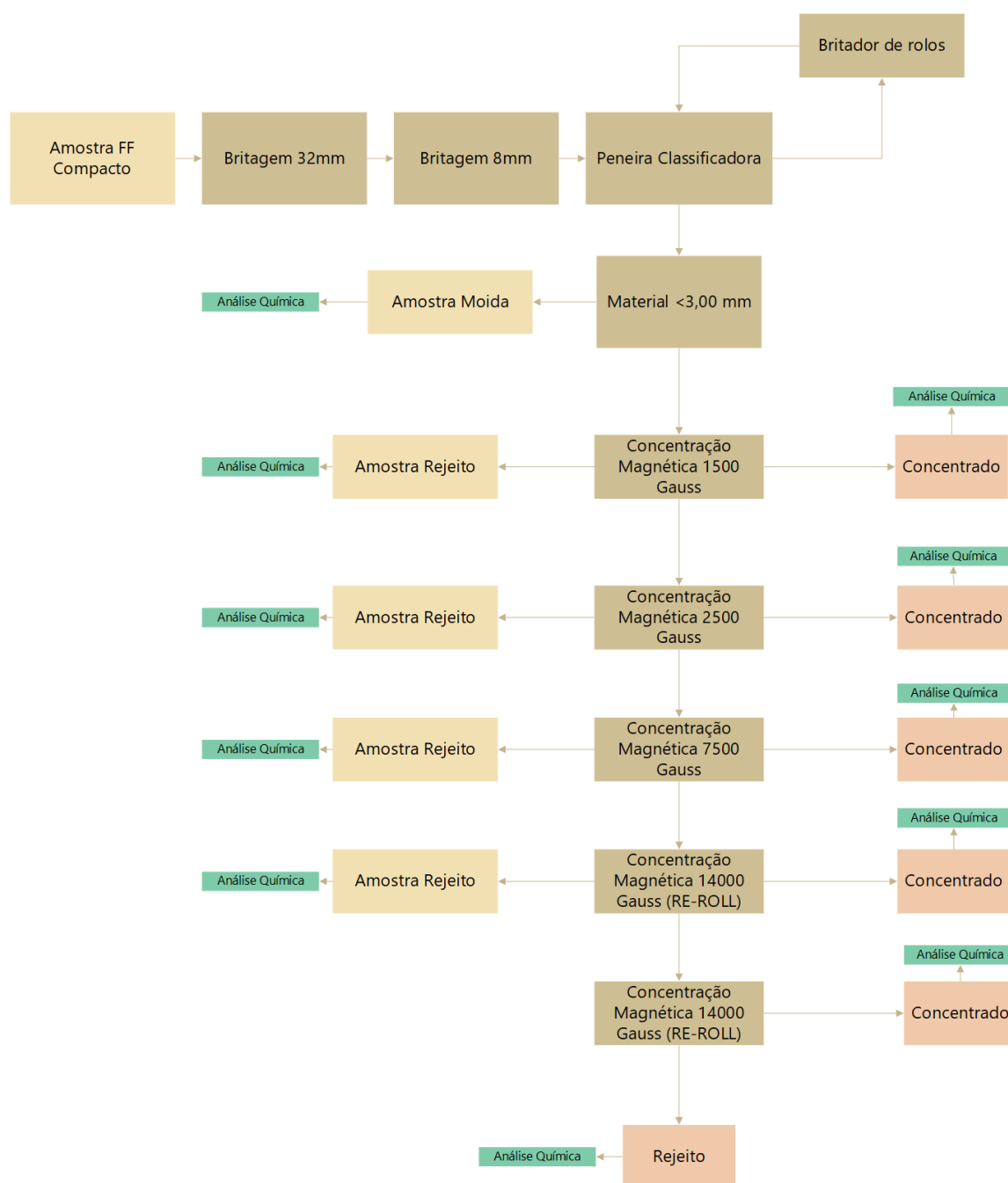


Figura 46 - Fluxograma do teste 03

Fonte: Próprio Autor

Segue na figura 47 registro fotográfico das amostras que alimentaram os testes 01, 02 e 03.



Figura 47 - Foto das amostras de cabeça previamente secadas com granulometria menor que 3mm, 2mm e 1mm

Fonte: Próprio Autor

5.4.2. Testes de Concentração magnética – Formação Ferrífera Bandada – Semi-compacto - Via Seca a Umidade Natural

É esperado que a etapa de secagem, anterior ao processo de concentração magnética a seco, resulte em produtos com teores elevados, contribuindo para a melhoria da eficiência do processo a seco. Com o propósito de comparar a eficácia da secagem, os testes 01, 02 e 03 foram replicados nesta etapa, porém os materiais não foram submetidos a secagem no forno. Os testes realizados foram o teste 04, com granulometria -1 mm, o teste 05 com granulometria -2 mm, e por último, o teste 06 menor que 3 mm, conforme exposto na tabela 7.

Tabela 7 - Testes realizados a seco com umidade natural

Fonte: Próprio autor

Número do Teste	Metodologia Teste	Peso Amostra cabeça (Kg)	Granulometria	Origem
Teste 04	Teste a umidade natural	10	<1,00 mm	Semi-compacto
Teste 05	Teste a umidade natural	10	<2,00 mm	Semi-compacto
Teste 06	Teste a umidade natural	10	<3,00 mm	Semi-compacto

5.4.2.1. Teste 04 – Teste <1mm – Scavenger 1 (2500 Gauss)

O primeiro teste realizado foi com o minério <1 mm, com o mesmo fluxograma aplicado no teste 01, conforme indicado na figura 48.

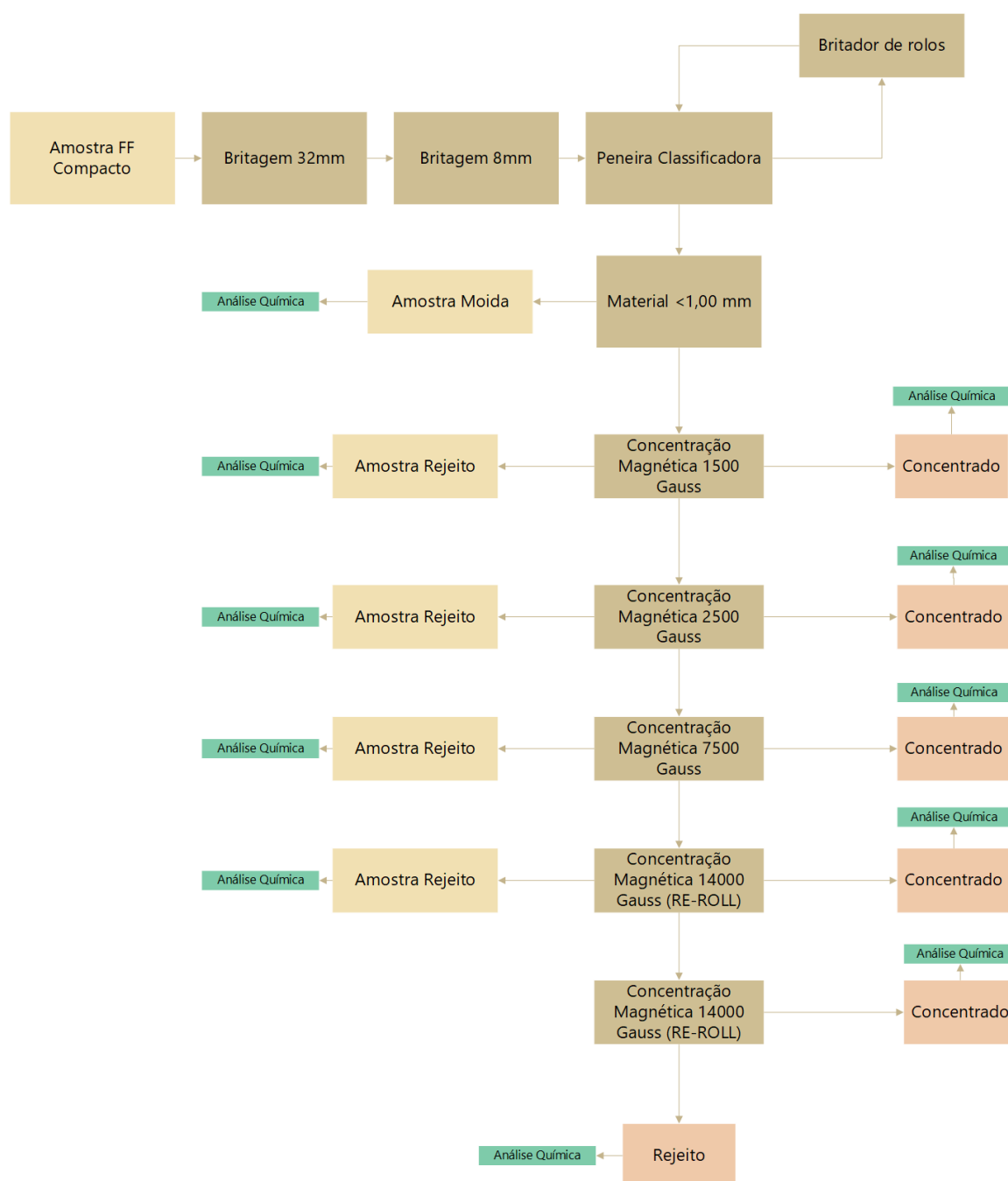


Figura 48 - Fluxograma teste 04

Fonte: Próprio autor

5.4.2.2. Teste 05 – Teste <2mm – Scavenger 1 (2500 Gauss)

Para o teste 05, toda a amostra foi cominuído para menor que 2 mm conforme indicado na figura 49.

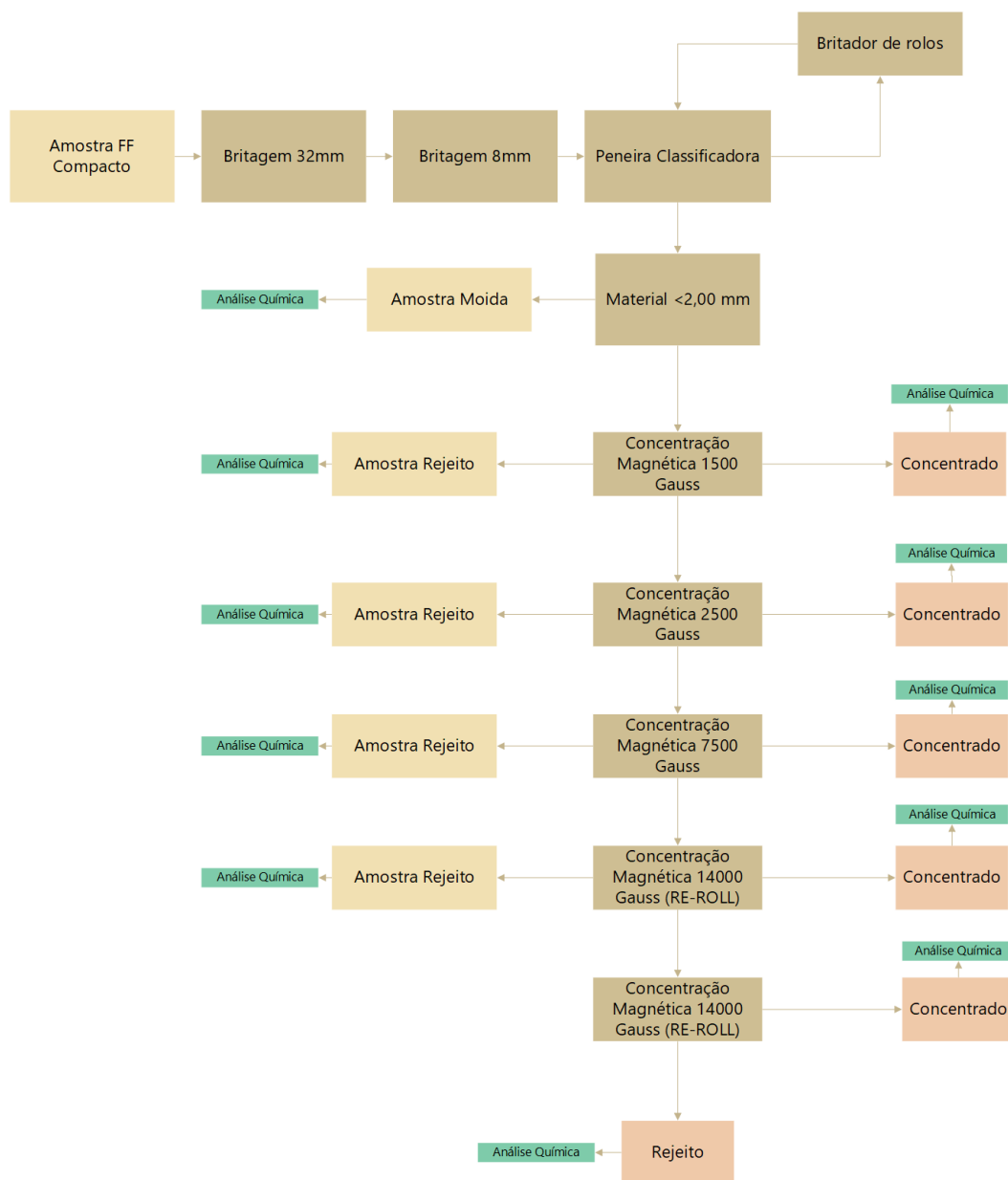


Figura 49 - Fluxograma teste 05

Fonte: Próprio Autor

5.4.2.3. Teste 06 – Teste <3mm – Scavenger 1 (2500 Gauss)

De forma semelhante ao teste 05, foi realizado o teste 06, só que o minério foi cominuído para menor que 3mm, conforme indicado na figura 50.

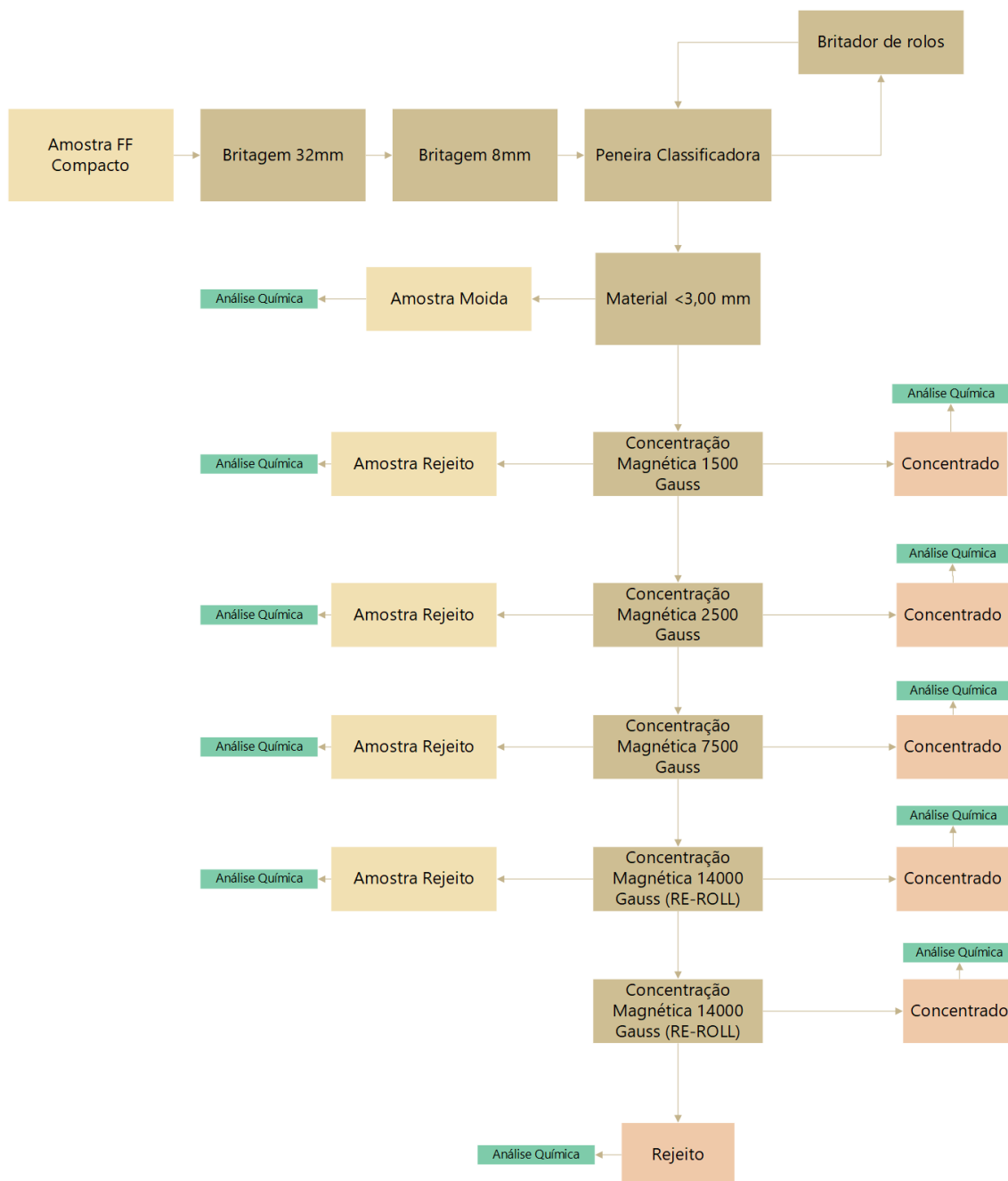


Figura 50 - Fluxograma Teste 06

Fonte: Próprio Autor

Segue na figura 51 registro fotográfico das amostras que alimentaram o teste 04, 05 e 06.



Figura 51 - Foto das amostras de cabeça a umidade natural com granulometria menor que 3mm, 2mm e 1mm

Fonte: Próprio Autor

5.4.3. Testes de Concentração magnética – Formação Ferrífera Bandada – Semi-compacto – Via úmido

Apesar de a concepção da unidade de tratamento de minério em Sabinópolis é ser uma unidade com concentração a seco, que inclui uma fase de secagem, optou-se por testes adicionais para o minério menor que 1 mm, que é a análise do comportamento do material via concentração magnética a úmido. Embora não seja uma opção inicialmente planejada para o empreendimento, devido ao consumo elevado de água e a introdução de estágios adicionais ao fluxograma, bem como, implica em custos mais elevados, o teste colaborará para analisar o comportamento do minério alimentado na usina em diferentes aplicações, estabelecendo uma comparação entre os métodos de concentração a seco e a úmido. Essa abordagem visa evidenciar a eficácia dos processos em diferentes condições, mesmo considerando os desafios associados a concentração a úmido.

Tabela 8 - Teste realizado a úmido

Fonte: Próprio autor

Número do Teste	Metodologia Teste	Peso Amostra cabeça (Kg)	Granulometria	Origem
Teste 07	Teste a úmido	63	<1,00 mm	Semi-compacto

5.4.3.1. Teste 07 – Teste <1mm – Scavenger 1 (13000 Gauss)

O teste 07 foi uma rota proposta a úmido, para o minério <1 mm, da coleta originária do minério com característica semi-compacto. Para a definição dos equipamentos que seriam utilizados nesse teste, foi feito anteriormente um teste de barras, que indicou os melhores equipamentos para essa rota conforme figura 52. Os testes de concentração magnética também foram realizados na Inbras e utilizou os concentradores WDRE de aproximadamente 7500 Gauss e o WHC de 13000 Gauss. Os equipamentos WDRE são concentradores magnéticos de média intensidade, enquanto os WHC são concentradores eletromagnéticos de alta intensidade do tipo carrossel. Segue as figuras dos equipamentos utilizados nos testes, figura 53 e figura 54.



Figura 52 – Teste de barra

Fonte: Próprio autor

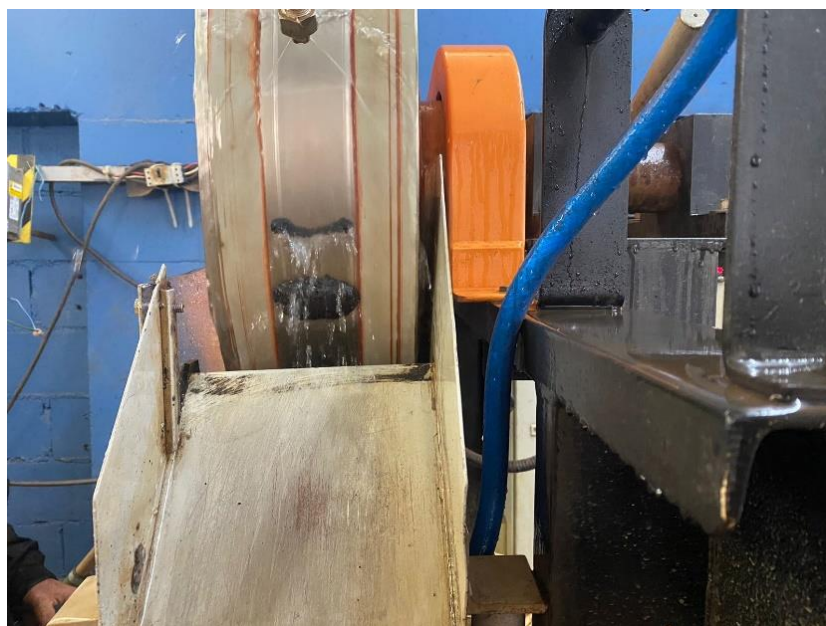


Figura 53 - Tambor magnético 7500 Gauss (Modelo WDRE)

Fonte: Próprio autor



Figura 54 - Tambor magnético (Modelo WHC)

Fonte: Próprio autor

Para o teste 07 foi proposto o fluxograma indicado na figura 55:

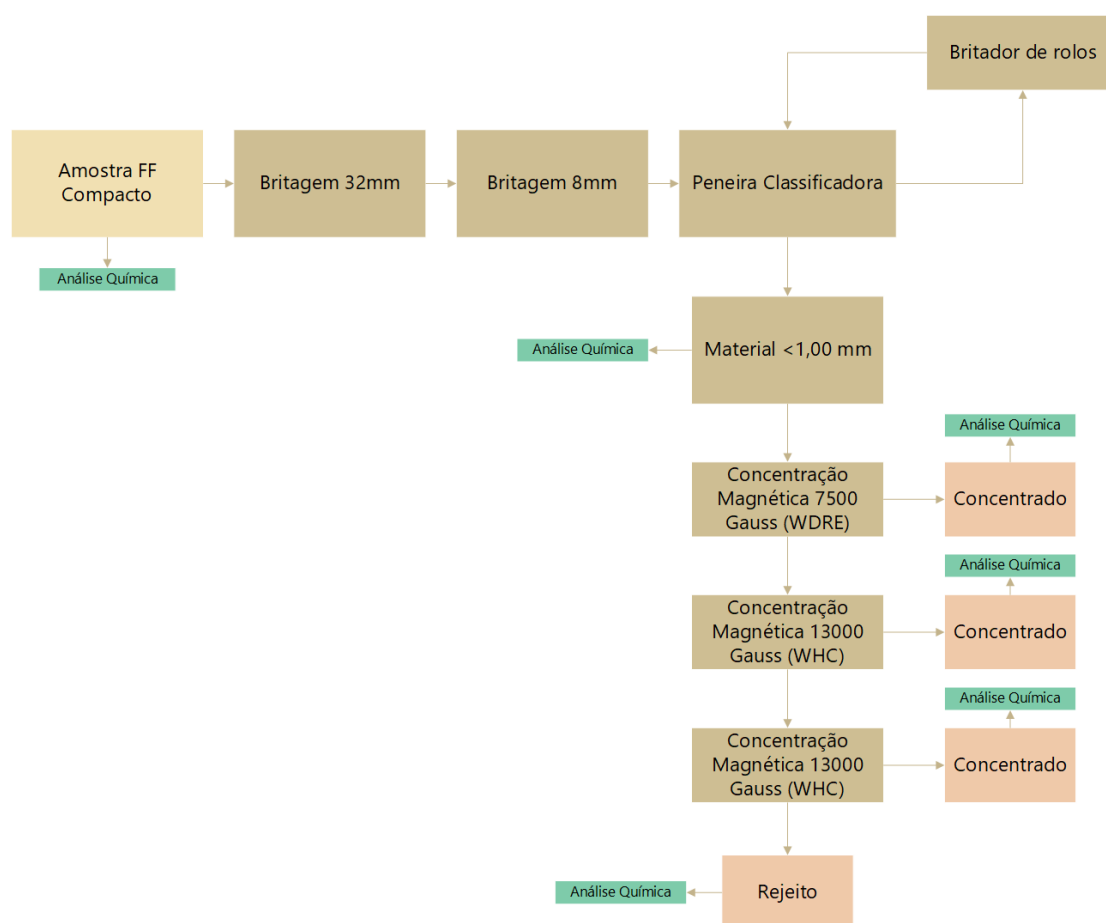


Figura 55 - Fluxograma teste 07

Fonte: Próprio Autor

5.5. Teste piloto de concentração magnética com itabirito compacto

Conforme indicado anteriormente, a frente de lavra atual contém materiais com características distintas, incluindo itabirito friável, itabirito semi-compacto e itabirito compacto. O itabirito semi-compacto apresenta características intermediárias entre o friável e o compacto. Atualmente, o processo de desmonte tem gerado material com essas características intermediárias.

No entanto, devido a previsão de aumento na predominância do minério compacto, foram propostos testes específicos para este tipo de material. Selecionou-se o cenário mais desafiador, focando no minério de maior dureza. Para avaliar sua resposta ao processo de concentração magnética, foram realizados teste a seco com etapa de secagem e teste híbrido, conforme apresentado na tabela 09. Essa amostra tem como intuito apresentar o pior cenário do material que será lavrado.

Tabela 9 - Teste realizado com o material compacto

Fonte: Próprio autor

Número do Teste	Metodologia Teste	Peso Amostra cabeça (Kg)	Granulometria	Origem	Número da Amostra
Teste 08	Teste a seco com etapa de secagem	10	<1,00 mm	Compacto	Coleta 03
Teste 09	Teste Rota híbrida	45	<1,00 mm	Compacto	Coleta 03

O fluxograma dos testes com o minério compacto, que será detalhado nos capítulos seguintes, é apresentado na figura 56.

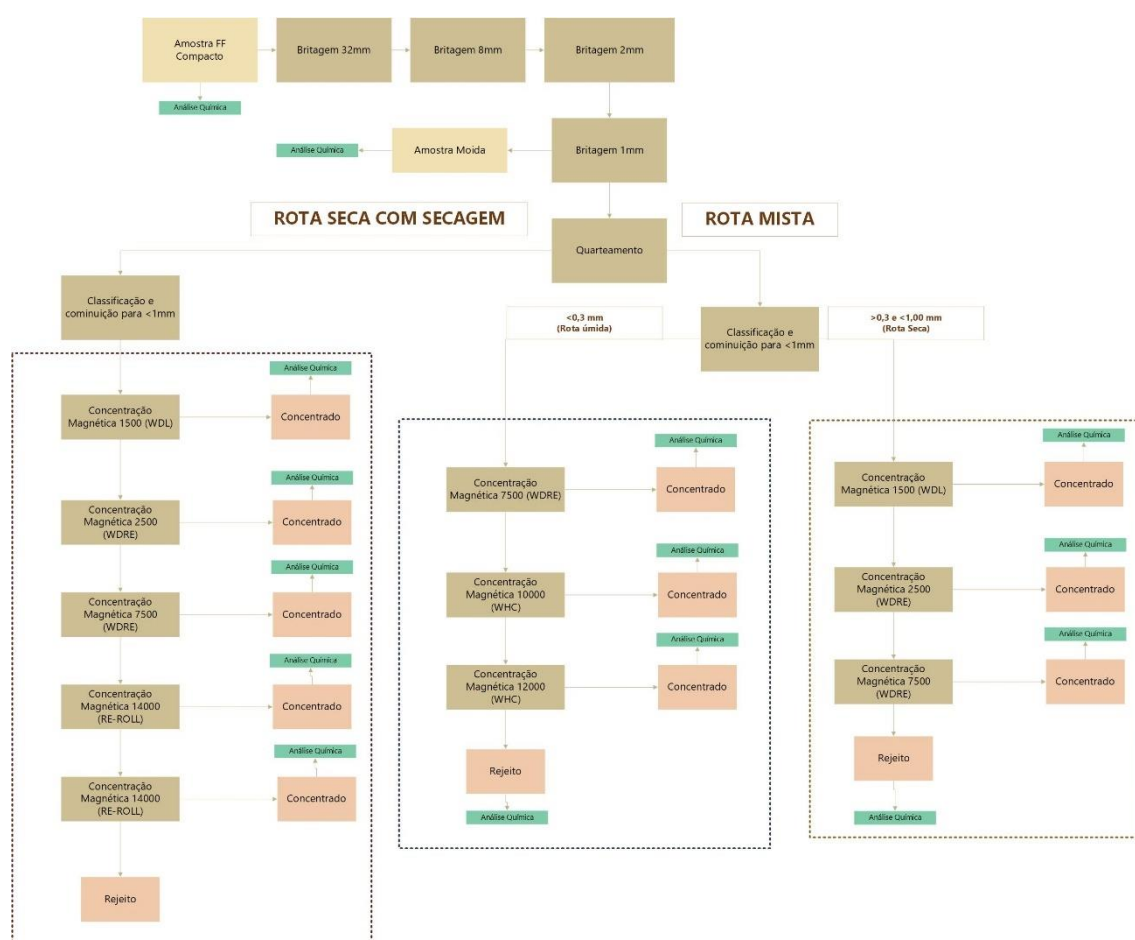


Figura 56 - Fluxograma teste 08 e teste 09

Fonte: Próprio autor

5.5.1. Teste de concentração magnética –Formação Ferrífera Bandada – Compacto–Via seca com etapa de secagem

Utilizando o mesmo fluxograma do teste 01, o procedimento foi replicado no teste 08, para avaliar o impacto da substituição do itabirito semi-compacto pelo compacto na alimentação da usina. Segue na tabela 10 informações do teste realizado a seco com etapa de secagem.

Tabela 10 - Teste a seco com secagem (Compacto)

Fonte: Próprio Autor

Número do Teste	Metodologia Teste	Peso Amostra cabeça (Kg)	Granulometria	Origem
Teste 08	Teste a seco com etapa de secagem	10	<1,00 mm	Compacto

5.5.1.1. Teste 08 – Teste P80=1mm – Scavenger 1 (2500 Gauss)

Conforme especificado, para o teste 08, empregou-se como amostra o itabirito compacto de maior dureza, visando avaliar sua performance na rota de processo. A fim de comparar seus resultados foi imprescindível manter a mesma sequência de processamento utilizada no teste 01, permitindo uma análise direta da influência da dureza ao longo da mesma linha de beneficiamento. Segue na figura 57 o fluxograma utilizado:

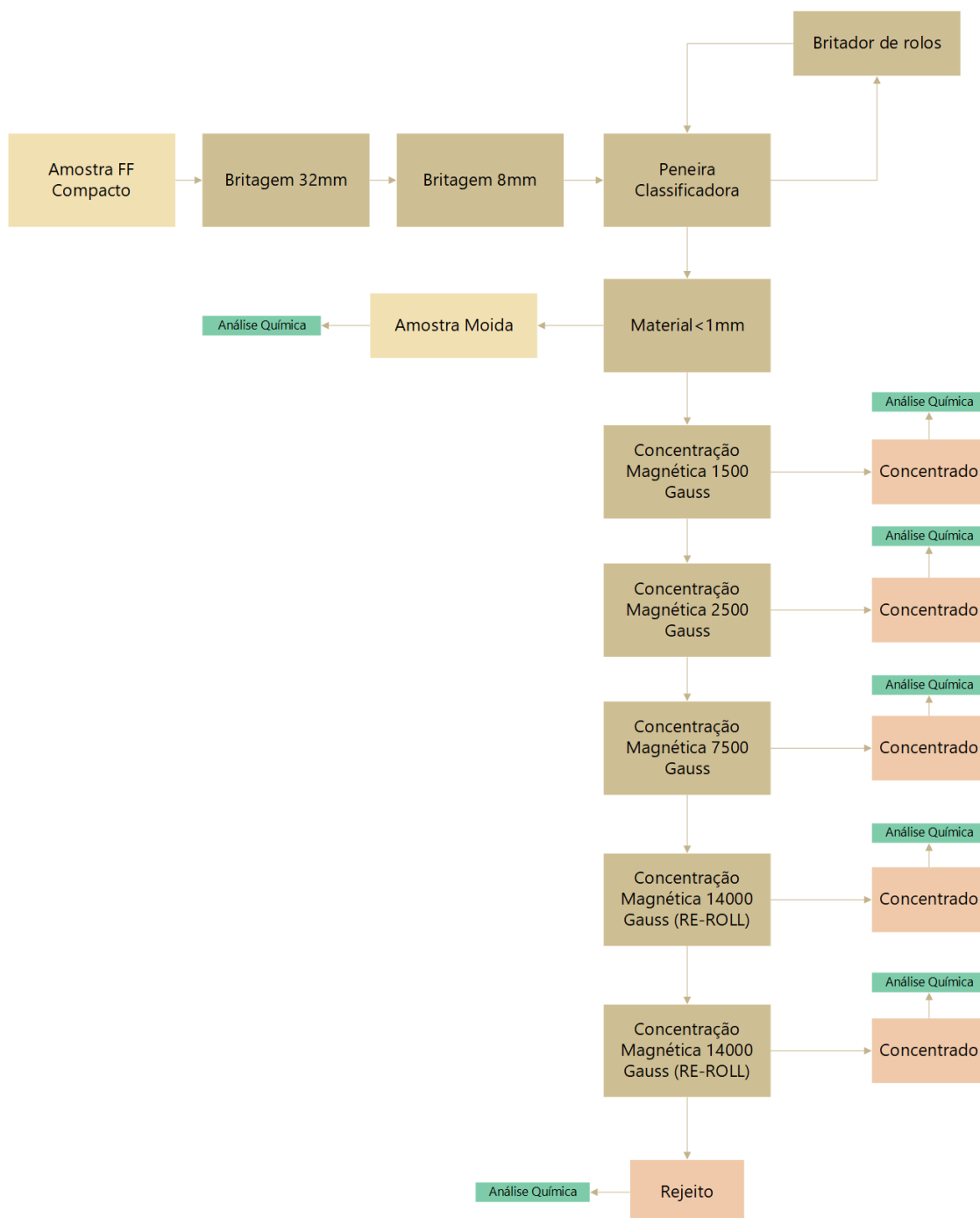


Figura 57 - Fluxograma do teste 08

Fonte: Próprio autor

5.5.2. Testes de concentração magnética – Formação Ferrífera Bandada – Compacto - Híbrido (concentração a seco com secagem + concentração a úmido)

A concentração magnética a seco é preferencial para granulometrias mais grosseiras devido a maior facilidade de separação das partículas maiores mediante a aplicação de

diferentes campos magnéticos. Por sua vez, a concentração magnética a úmido é mais adequada para partículas finas devido a presença do meio líquido que auxilia na suspensão e separação mais eficiente dessas partículas menores. Partículas finas, ao serem tratadas na concentração magnética a seco, apresentam maior aderência entre si, dificultando a separação eficiente e afetando a recuperação dos minerais de interesse. Além disso, devido a menor capacidade de resposta ao campo magnético, essas partículas podem não ser adequadamente concentradas, resultando em produtos finais com teores abaixo do desejado. Por outro lado, partículas grossas na concentração magnética a úmido também apresentam desafios significativos. Partículas maiores tendem a comportar-se de maneira diferente em suspensões aquosas, o que pode comprometer a eficiência do processo. A movimentação inadequada dessas partículas na suspensão pode levar a uma menor taxa de recuperação dos minerais desejados, bem como produtos com teores insatisfatórios.

Com o intuito de aumentar a recuperação mássica e o teor, foi proposto um teste híbrido para as amostras do material compacto, nos quais as partículas mais grossas serão encaminhadas para a concentração magnética a seco com secagem e por outro lado, as partículas mais finas irão compor o processo de concentração magnética a úmido. Ao indicar uma junção entre os dois métodos de concentração espera-se encontrar uma alternativa otimizada para beneficiamento de minério com baixo consumo de água e com alto teor e recuperação mássica. Segue na tabela 11 o teste que será realizado.

Tabela 11 - Teste realizado de forma híbrida (seco e úmido)

Fonte: Próprio autor

Número do Teste	Metodologia Teste	Peso Amostra cabeça (Kg)	Granulometria	Origem
Teste 09	Teste Rota híbrida	45	<1,00 mm	Compacto

5.5.2.1. Teste 09 – Teste P80=1mm - Concentração híbrida

Para o teste 09 foi proposta uma rota híbrida, no qual todo o minério foi cominuído para menor que 1 mm. A fração correspondente a $[-0,3 \text{ mm}]$ alimentou a concentração a úmido, já o $[-1,0 + 0,3 \text{ mm}]$ alimentou a concentração a seco. O minério que alimentou a concentração a seco foi previamente secado. A amostra que alimentou esse teste foi a mesma amostra apresentada no teste 08, ou seja, um material compacto com alta dureza.

Para a definição de qual rota úmida seria adequada para o teste, foram feitos novamente alguns testes de barras. Segue o fluxograma do teste indicado na figura 58.

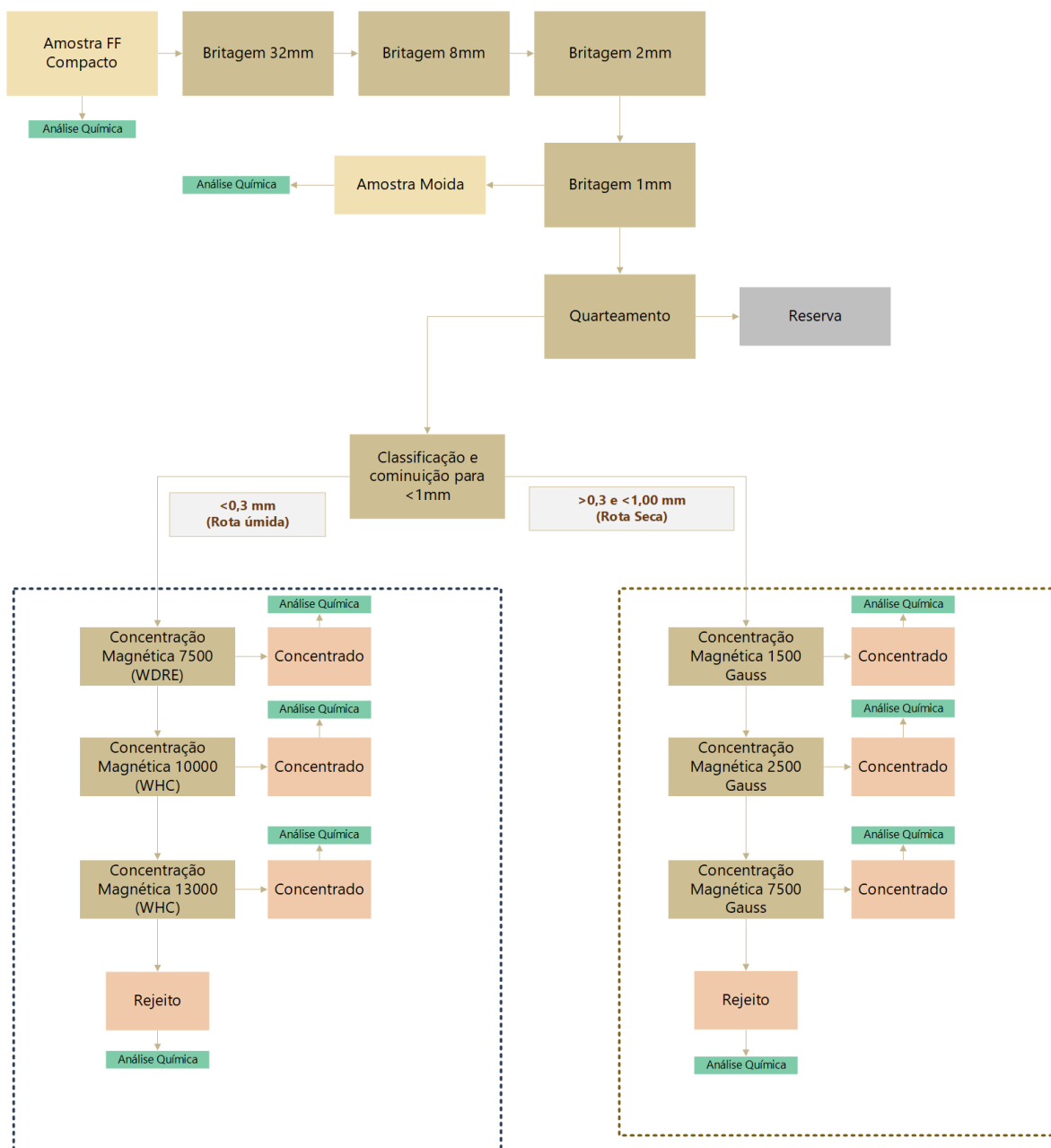


Figura 58 - Fluxograma teste 09

Fonte: Próprio autor

Segue na figura 59 registro fotográfico das amostras que alimentaram o teste 09.

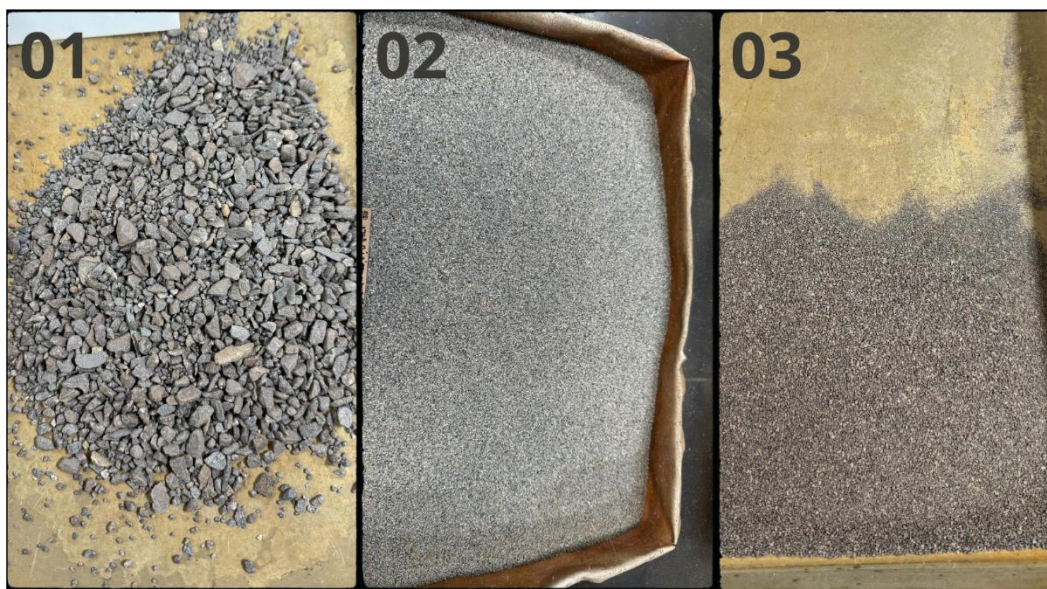


Figura 59 - Registro fotográfico das amostras que alimentaram o teste 09. A figura 01 indica a granulometria da amostra anteriormente a cominuição para menor que 1mm. Já a figura 02 demonstra toda a fração destinada para o teste a seco, que refere ao material menor que 1mm e maior que 0,3mm. Na figura 03 indica a fração menor que 0,3mm.

Fonte: Próprio autor

5.6. Redução dos erros de fechamento - programa Sort

Para todos os resultados que serão obtidos através dos testes piloto, foi proposto também uma etapa utilizando o programa Sort® com o intuito de reduzir possíveis erros de fechamento de balanço de massa e dessa forma, trazendo maior confiabilidade aos dados que serão apresentados.

O programa Sort® foi desenvolvido pela UFMG e é um programa de balanço de massa que permite o ajuste sistêmico dos resultados do balanço de massa em todos os níveis, ou seja, nível 1 (polpa), nível 2 (minério e água), nível 3 (classe de tamanho, classe mineral e/ou elementos químicos), nível 4 (minério e/ou elemento químico por classe de tamanho) e nível 5 (classes de liberação).

Ressalta-se a importância de o fechamento do balanço de massa ser realizado tendo como objetivo a acurácia dos resultados. Teores são obtidos em etapas de amostragem e medida. O erro de amostragem e medida é inerente ao processo. Mesmo pequenas variações nos teores da alimentação, concentrado e rejeito podem alterar de forma significativa a

recuperação em massa e consequentemente a recuperação metalúrgica do processo, podendo levar a decisões equivocadas. Dentre as soluções possíveis, a melhor é a que reconhece os dados com maior acurácia e usa para corrigir os possíveis erros de fechamento de balanço de massa, estratégia utilizada pelo programa Sort®. Existe uma hierarquia no balanço de massa. Pelas razões expostas, a massa tem hierarquia sobre o teor e dentre os teores aqueles com menor erro fundamental e de medida tem hierarquia sobre os demais teores.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados encontrados foram apresentados nos itens 6.1 ao 6.7, divididos nos tópicos de caracterização tecnológica, análise química e resultado dos testes de concentração em escala piloto.

6.1. Resultado da caracterização mineralógica

As amostras FFS e FFC, proveniente do minério com característica friável e compacto respectivamente, foram submetidas ao peneiramento e pesagem para determinar a quantidade de material retido em cada fração. A figura 60 apresenta os resultados desses testes, demonstrando a distribuição granulométrica específica de cada amostra e a comparação entre elas.

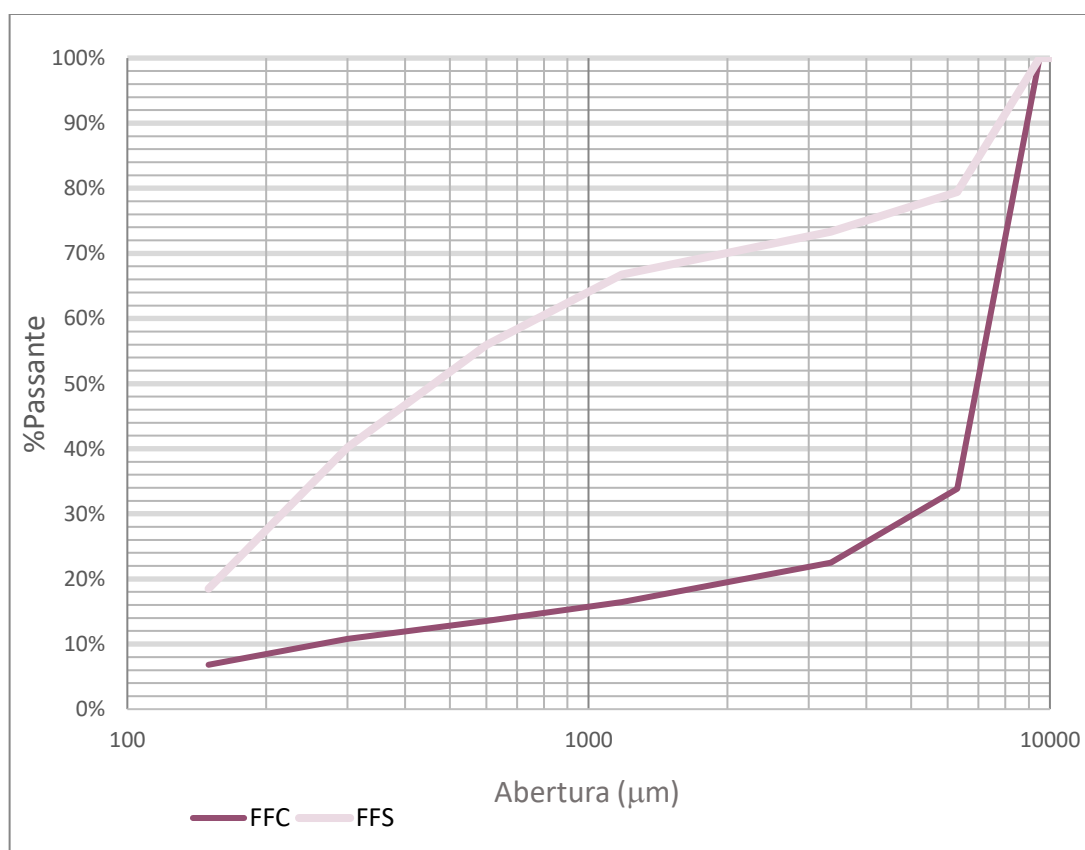


Figura 60 - Comparação distribuição granulométrica das amostras FFS e FFC

Fonte: Próprio autor

O gráfico de distribuição granulométrica demonstra diferenças significativas entre as amostras FFS e FFC. A amostra FFS, caracterizada por uma granulometria mais fina,

apresenta uma curva que indica uma retenção predominante nas peneiras com malhas mais finas. Em contraste, a amostra FFC exibe uma curva com uma maior proporção de partículas retidas nas peneiras de malhas mais grossas. Isso sugere que a amostra FFC contém uma maior quantidade de partículas com granulometrias maiores, em comparação com a amostra FFS e que conseqüentemente, foi mais resistente ao processo de britagem.

Conforme apresentado, as amostras foram analisadas em luz transmitida e refletida utilizando o microscópio Zeiss Axioplan. Os estudos focaram na caracterização mineralógica das amostras e na determinação do grau de liberação mineral, aplicando o método de Gaudin. A origem dos resultados advém de análises mineralógicas diretas conduzidas por meio de microscopia óptica, permitindo a observação detalhada das texturas e da liberação dos minerais presentes

6.1.1. Amostra FFS – Caracterização

A amostra FFS é formada por fragmentos de uma formação ferrífera bandada composta por uma intercalação de camadas ricas em óxidos de ferro (principalmente hematita Fe_2O_3 , com magnetita Fe_3O_4 associada), quartzo SiO_2 e anfibólios. Além destes minerais, também ocorrem goethita $\text{FeO}(\text{OH})$, clinopiroxênio, feldspato, apatita, epidoto, biotita, muscovita, Mg-Clorita, sericita e carbonato, que ocorrem associados principalmente as bandas mais quartzosas, com exceção do clinopiroxênio, que ocorre associado as bandas anfibolíticas. É possível observar em algumas porções que partículas de feldspato são substituídas para sericita e carbonato, enquanto partículas de hornblenda ocorrem substituídas para biotita, epidoto, Mg-clorita e carbonato. Goethita substitui localmente algumas partículas compostas por hematita e magnetita. Os principais minerais minério que ocorrem são hematita e magnetita, que ocorrem associados entre si e a outros minerais de ganga, como quartzo e anfibólios. Ocorrem três tipos de hematita: martítica (substituindo magnetita), granular e lamelar.

Foi possível observar que as partes bandadas se fragmentam menos que as partes menos bandadas da rocha. Nas amostras de granulometria maior $[-6,3 + 3,35 \text{ mm}]$ é possível notar a predominância de regiões bandadas, onde se predomina hematitas lamelares, enquanto nas amostras que representam granulometrias menores, abaixo de 1,18 mm, foi-observado uma predominância de regiões menos bandadas da rocha, onde predominam

outros tipos de hematita. Estes óxidos de ferro presentes nas regiões menos bandadas aparentemente se fragmentam mais facilmente do que nas regiões mais bandadas.

As partículas começam a ser liberadas abaixo da granulometria -3,35 mm, porém são partículas heterogêneas, formadas por hematita e magnetita. Partículas monominerálicas de óxidos de ferro só começam a serem liberadas a partir da granulometria -1,18 mm.

Uma compilação dos resultados obtidos da amostra FFS se encontra na tabela 12 e fotomicrografias representativas da amostra FFS são mostradas na figura 61.

Tabela 12- Compilação dos resultados obtidos na amostra FFS

Fonte: Relatório Técnico Laboratório Arkad

Amostra							
	FFS>6,3	FFS>3,35	FFS>1,18	FFS>0,6	FFS>0,3	FFS>0,15	FFS-Fundo
Relação minério/ganga (%)							
Minério	38	42	55	58	52	54	40
Ganga	62	58	45	42	48	46	60
Mineral minério (%)							
Hematita	36	28	32	40	40	46	35
Magnetita	2	14	21	17	11	7	4
Goethita	<1	<1	2	1	1	1	1
Tipo de hematita (%)							
Martítica	<1	2	9	23	26	27	27
Granular	19	21	22	16	13	18	17
Lamelar	16	5	1	1	1	1	1
Grau de liberação (%)							
	0	17.54	52.15	85.75	86	90.8	98.17

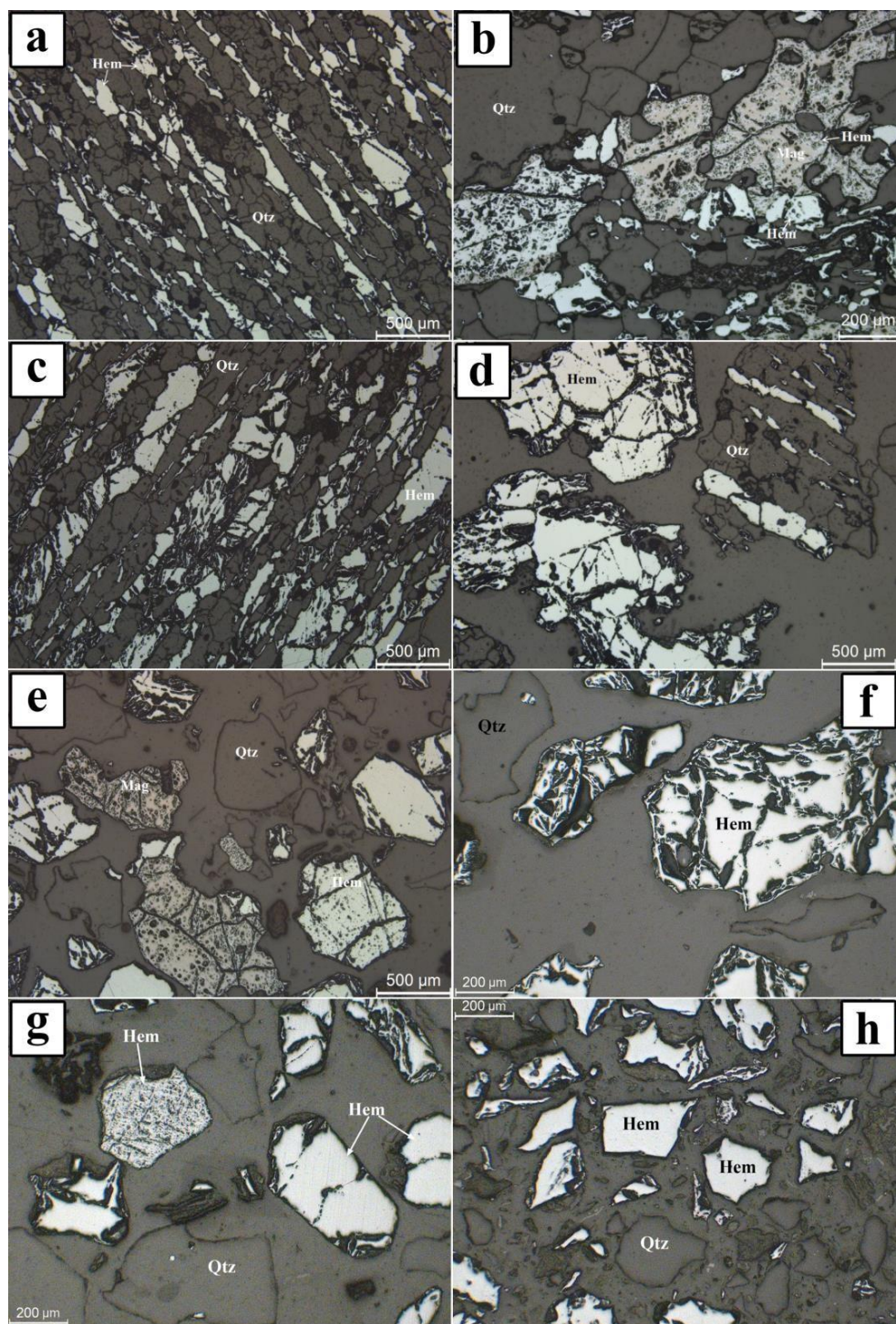


Figura 61- Fotomicrografias representativas das seções polidas de grãos estudadas da amostra FFS. A e B: Fração > 6,3 mm. C: Fração > 3,35mm. D: Fração > 1,18 mm. E: Fração > 0,6 mm. F: Fração > 0,3 mm. G: Fração > 0,15 mm. H: Material passante em todas as peneiras (Fundo). Legenda: Hem: Hematita; Mag: Magnetita; Qtz: Quartzo. Imagens em luz refletida polarizada.

Fonte: Relatório Técnico Laboratório Arkad

6.1.2. Amostra FFC – Caracterização

A amostra FFC é semelhante a amostra FFS, sendo também composta por partículas de uma formação ferrífera bandada formada por uma intercalação de camadas ricas em óxidos de ferro (principalmente hematita Fe_2O_3 , com magnetita Fe_3O_4 associada), bandas ricas em quartzo e bandas anfíbolíticas (formadas por grunerita, tremolita-actinolita e hornblenda). Goethita, feldspatos, clinopiroxênio, biotita, estiplomelano, muscovita, sericita, apatita, carbonato, Mg-clorita e pirita também ocorrem, principalmente nas bandas mais quartzosas, com exceção do clinopiroxênio, que ocorre mais associado as bandas anfíbolíticas. É possível observar algumas partículas de feldspatos localmente substituídas por sericita e carbonato e partículas de óxidos de ferro localmente substituídas por goethita.

Os principais minerais minério são hematita e magnetita, ocorrendo três tipos de hematita: martítica (substituindo magnetita), granular e lamelar.

Assim como na amostra FFS, é possível observar que nas granulometrias maiores ocorre um predomínio de partículas de formação ferrífera bandada (até a amostra $>1,18$ mm), onde predominam hematitas lamelares, enquanto nas partículas de granulometria menor (a partir da amostra $-0,6$ mm) ocorre predomínio de partículas que não apresentam o bandamento metamórfico, onde predominam outros tipos de hematita, que aparentemente são mais friáveis. As partículas de óxidos de ferro começam a ser liberadas a partir da amostra $-1,18$ mm, sendo as partículas de magnetita mais facilmente liberadas nestas amostras, enquanto as partículas de hematita começam a ser mais facilmente liberadas a partir da amostra $-0,6$ mm. Uma compilação dos resultados obtidos da amostra FFC se encontra na tabela 13, enquanto fotomicrografias representativas da amostra FFC são mostradas na figura 62.

Tabela 13- Compilação dos resultados obtidos na amostra FFC

Fonte: Relatório Técnico Laboratório Arkad

Amostra							
	FFC>6,3	FFC>3,35	FFC>1,18	FFC>0,6	FFC>0,3	FFC>0,15	FFC-Fundo
Relação minério/ganga (%)							
Minério	34	18	22	30	41	34	24
Ganga	66	82	78	70	59	66	76
Mineral minério (%)							
Hematita	32	17	15	21	33	28	19
Magnetita	2	1	7	9	8	6	4
Goethita	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1
Tipo de hematita (%)							
Martítica	11	5	3	8	16	13	9
Granular	13	10	9	11	16	14	9
Lamelar	8	2	3	2	1	1	1
Grau de liberação (%)							
	0	0	16.72	47.72	65.69	84.85	96.91

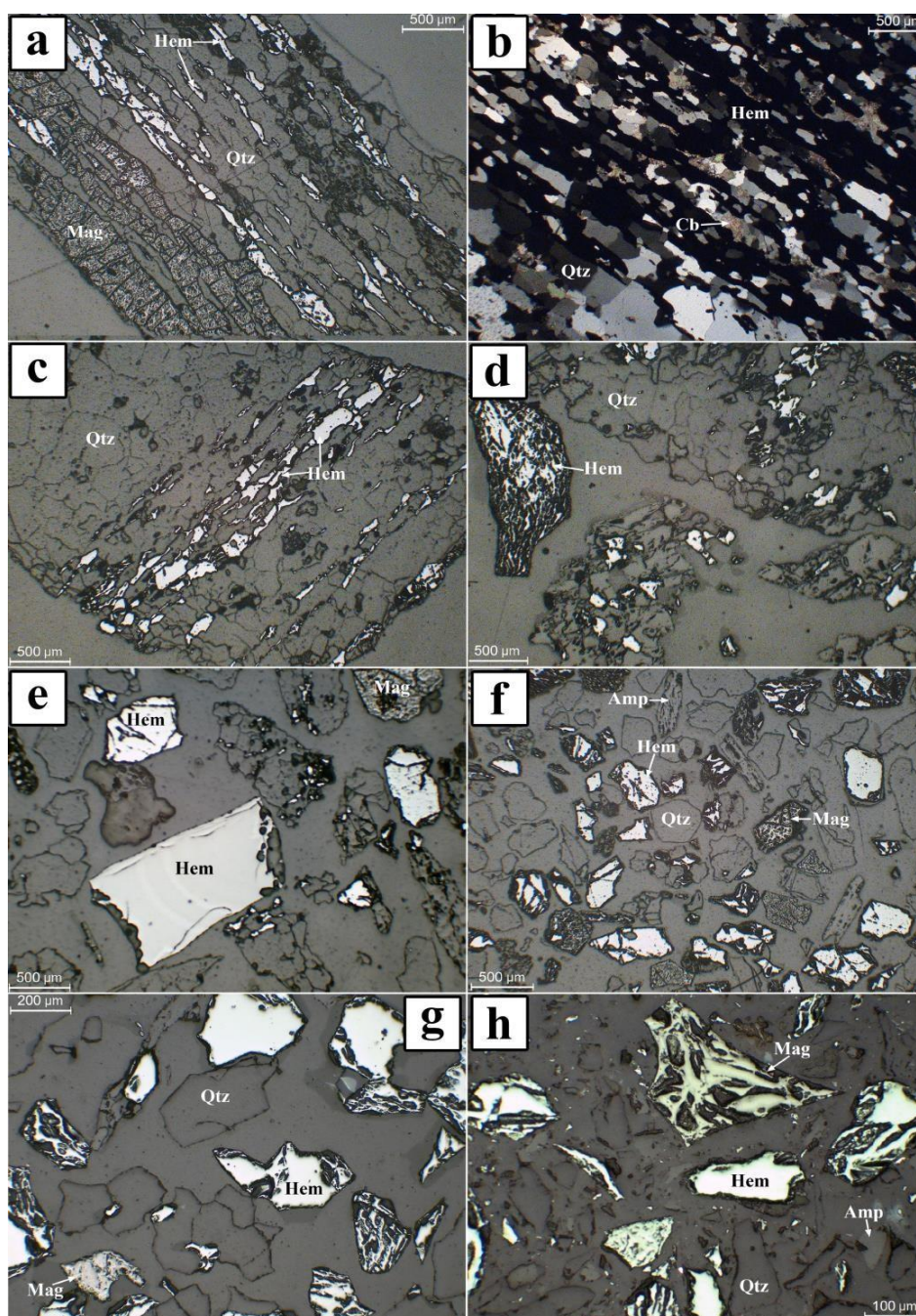


Figura 62- Fotomicrografias representativas das seções polidas de grãos estudadas da amostra FFC. A e B: Fração > 6,3 mm. C: Fração > 3,35mm. D: Fração > 1,18 mm. E: Fração > 0,6 mm. F: Fração > 0,3 mm. G: Fração > 0,15 mm. H: Material passante em todas as peneiras (Fundo). Legenda: Amp: Anfibólio; Cb: Carbonato; Hem: Hematita; Mag: Magnetita; Qtz: Quartzo. Imagens em luz refletida polarizada, com exceção da fotomicrografia B, que foi adquirida em luz transmitida com os polarizadores cruzados.

Fonte: Relatório Técnico Laboratório Arkad

6.1.3. Comparação da caracterização das amostras FFS e FFC

O estudo das amostras FFS e FFC mostrou como ambas as amostras se comportam durante o processo de beneficiamento mineral, principalmente no processo de cominuição. Comparando as duas amostras, a amostra FFC foi mais resistente ao processo do que a amostra FFS, que se cominuiu mais facilmente, ocorrendo partículas de óxidos de ferro já liberadas na fração 3,35 mm, enquanto a amostra FFC mostrou partículas de óxidos de ferro liberadas somente a partir da fração 1,18 mm, conforme indicado na figura 63.

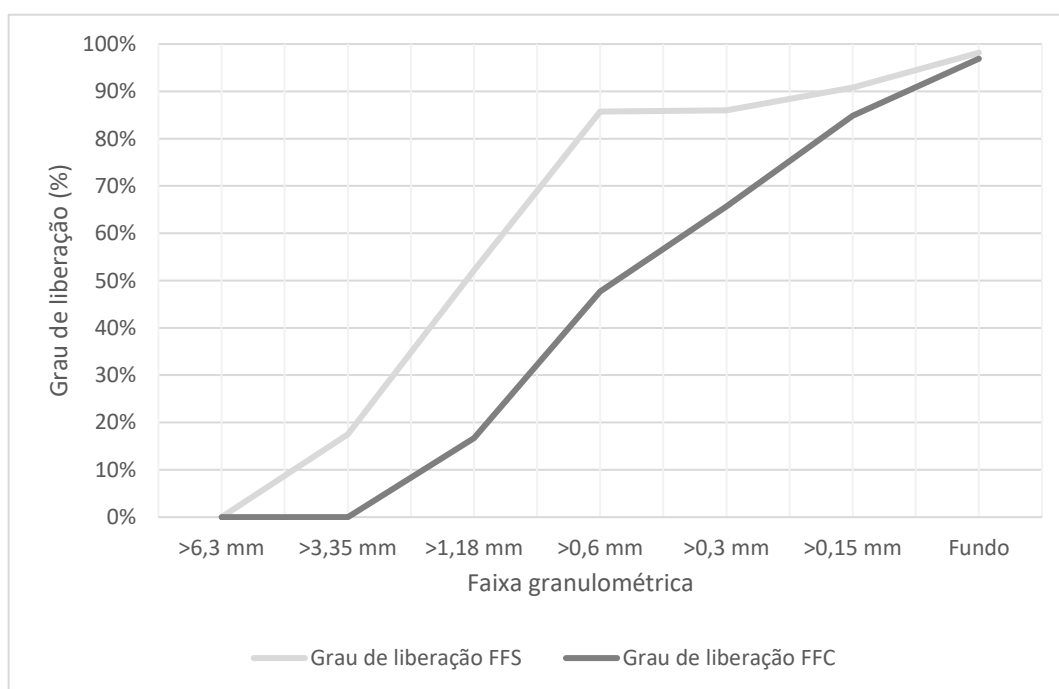


Figura 63 - Grau de liberação por granulometria

Fonte: Próprio autor

Além disso, a amostra FFS mostrou maior grau de liberação mineral em todas as frações. Um fator que pode ter influenciado nesta maior resistência foi a presença das bandas anfíbolíticas, que aparentemente tornam as formações ferríferas bandadas mais resistentes ao processo de beneficiamento.

Em relação a composição granulométrica das amostras FFS e FFC, conforme representado na figura 63, constata-se que a amostra FFS exibe uma predominância significativa de minério em algumas distribuições granulométricas, inclusive em algumas

faixas onde a quantidade de minério supera a presença de ganga. Por outro lado, a amostra FFC revela uma proporção substancialmente menor de minério, enquanto a ganga se mostra mais representativa em todas as faixas granulométricas. Essa distinção evidencia características distintas entre as amostras, sugerindo possíveis impactos na eficácia do processo de beneficiamento mineral e na qualidade dos produtos resultantes.

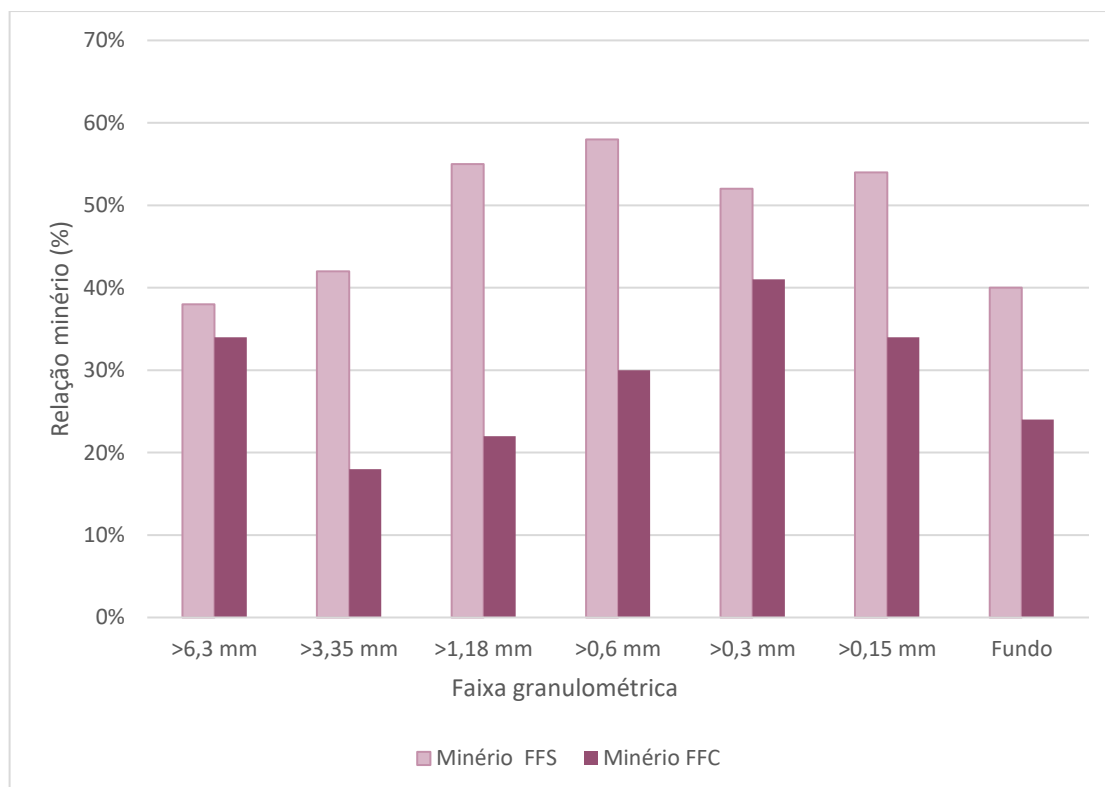


Figura 64 - Relação minério por faixa granulométrica

Fonte: Próprio autor

Com base nos resultados obtidos, destaca-se que a amostra FFC, objeto central do estudo, apresenta uma concentração majoritária de minério na faixa granulométrica inferior a 0,3 mm. Contudo, ao analisar a distribuição granulométrica, verifica-se que a fração mais significativa da amostra é retida na peneira de 6,3 mm, enquanto a porção menor que 0,3 mm representa uma parcela relativamente pequena em relação ao peso total da amostra.

As amostras de granulação maior podem apresentar maiores erros na estimativa devido a menor quantidade de grãos utilizados na estatística e pelo fato de o tamanho dos grãos serem bem discrepantes. Nos estudos de liberação mineral por microscopia ótica é sempre recomendado usar faixas mais estreitas durante o peneiramento.

6.2. Análise química da caracterização mineralógica

Ambas as amostras, FFS e FFC, juntamente com a amostra de cabeça e cada fração retida nas peneiras, passaram por análise química utilizando a técnica de fluorescência de raios-X. Esse procedimento permitiu a determinação precisa da composição e concentração dos elementos presentes nas amostras, proporcionando uma caracterização detalhada da sua composição mineralógica e química. As tabelas 14 e 15, indicam os resultados obtidos para a amostra FFS e FFC respectivamente.

Tabela 14 - Análise química amostra FFS

Fonte: Próprio autor

Amostra	Fe%	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	P%	Mn%	TiO ₂ %	CaO%	MgO%	Cr ₂ O ₃ %	K ₂ O%	Na ₂ O%	PPC
FFS - Cabeça	40,92	39,03	0,68	0,03	0,31	0,06	0,38	0,54	0,01	<0,01	<0,1	0,70
FFS>6,35 mm	32,33	50,85	0,29	0,06	0,10	0,01	1,05	1,11	0,01	<0,01	<0,1	0,09
FFS>3,35 mm	35,19	45,99	1,34	0,04	0,18	0,25	0,69	0,66	0,02	<0,01	<0,1	0,22
FFS>1,18 mm	42,30	36,24	1,60	0,03	0,39	0,05	0,40	0,51	0,02	<0,01	<0,1	0,27
FFS>0,6 mm	44,91	33,84	0,73	0,02	0,29	0,06	0,14	0,23	0,02	<0,01	<0,1	0,23
FFS>0,3 mm	47,59	30,57	0,44	0,02	0,20	0,06	0,07	0,16	0,02	<0,01	<0,1	0,29
FFS>0,15 mm	44,20	35,19	1,02	0,02	0,20	0,04	0,07	<0,1	0,02	<0,01	<0,1	0,35
FFS<0,15 mm	38,97	38,50	1,86	0,06	0,79	0,05	0,24	0,53	0,01	<0,01	<0,1	1,80

Tabela 15 - Análise química amostra FFC

Fonte: Próprio autor

Amostra	Fe%	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	P%	Mn%	TiO ₂ %	CaO%	MgO%	Cr ₂ O ₃ %	K ₂ O%	Na ₂ O%	PPC
FFC - Cabeça	28,95	45,65	0,73	0,04	0,14	0,01	5,43	4,55	0,02	<0,01	<0,1	1,73
FFC>6,35 mm	28,47	46,01	0,59	0,04	0,12	<0,01	5,62	4,83	0,01	<0,01	<0,1	1,86
FFC>3,35 mm	28,86	46,43	0,29	0,04	0,13	0,01	5,50	4,95	0,02	<0,01	<0,1	1,72
FFC>1,18 mm	26,84	47,97	0,29	0,03	0,14	0,01	5,79	5,29	0,02	<0,01	<0,1	1,90
FFC>0,6 mm	30,76	44,16	0,34	0,03	0,16	0,01	5,17	4,55	0,02	<0,01	<0,1	1,81
FFC>0,3 mm	35,68	40,09	0,29	0,02	0,13	0,01	3,86	3,27	0,02	<0,01	<0,1	1,36
FFC>0,15 mm	40,37	35,47	0,30	0,02	0,09	0,01	2,90	2,30	0,01	<0,01	<0,1	1,05
FFC<0,15 mm	32,20	41,48	0,29	0,08	0,23	0,02	5,10	4,48	0,02	<0,01	<0,1	2,16

Na figura 65 é apresentada para a amostra FFS e FFC o teor de ferro de acordo com a distribuição granulométrica.

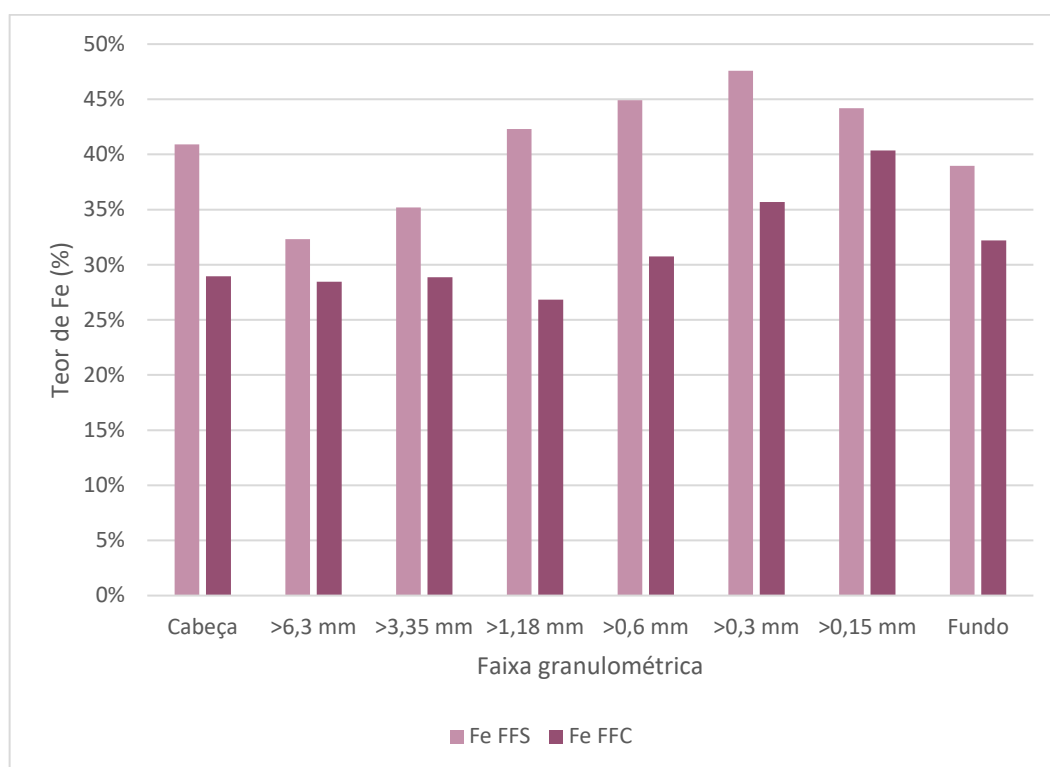


Figura 65 -Teor de Fe (%) por faixa granulométrica (mm)

Fonte: Próprio Autor

6.3. Resultado dos testes de concentração magnética–Formação Ferrífera Bandada–Semi-compacto–Via seca com secagem

Nos resultados dos testes piloto que serão apresentados em forma de figuras serão indicados por Fe o teor do ferro em porcentagem e da mesma forma para a sílica, que será indicada como SiO₂. A recuperação mássica será apresentada como “Rec.M” e a recuperação metalúrgica como “Rec.Met”.

Foram propostos 4 testes de concentração magnética com secagem, conforme previamente apresentado, com o intuito de avaliar a influência da granulometria na concentração magnética. De forma adicional, também foi proposto testes alterando uma das etapas de alta intensidade por uma de média intensidade.

6.3.1. Resultado teste 00 – Teste <1mm – Scavenger 1 (7500 Gauss)

Conforme indicado anteriormente, foram realizados testes na Inbras utilizando a mesma configuração atual da planta instalada. Apenas a etapa do re-roll que foi adicionada com o objetivo de aumentar a recuperação mássica. Além disso, hoje os concentradores

magnéticos da planta são alimentados com minério -3mm e visto os resultados apresentados na caracterização mineralógica foi sugerido que o teste fosse realizado com -1mm. Segue na figura 66 os resultados obtidos e ajustados utilizando o programa Sort®.

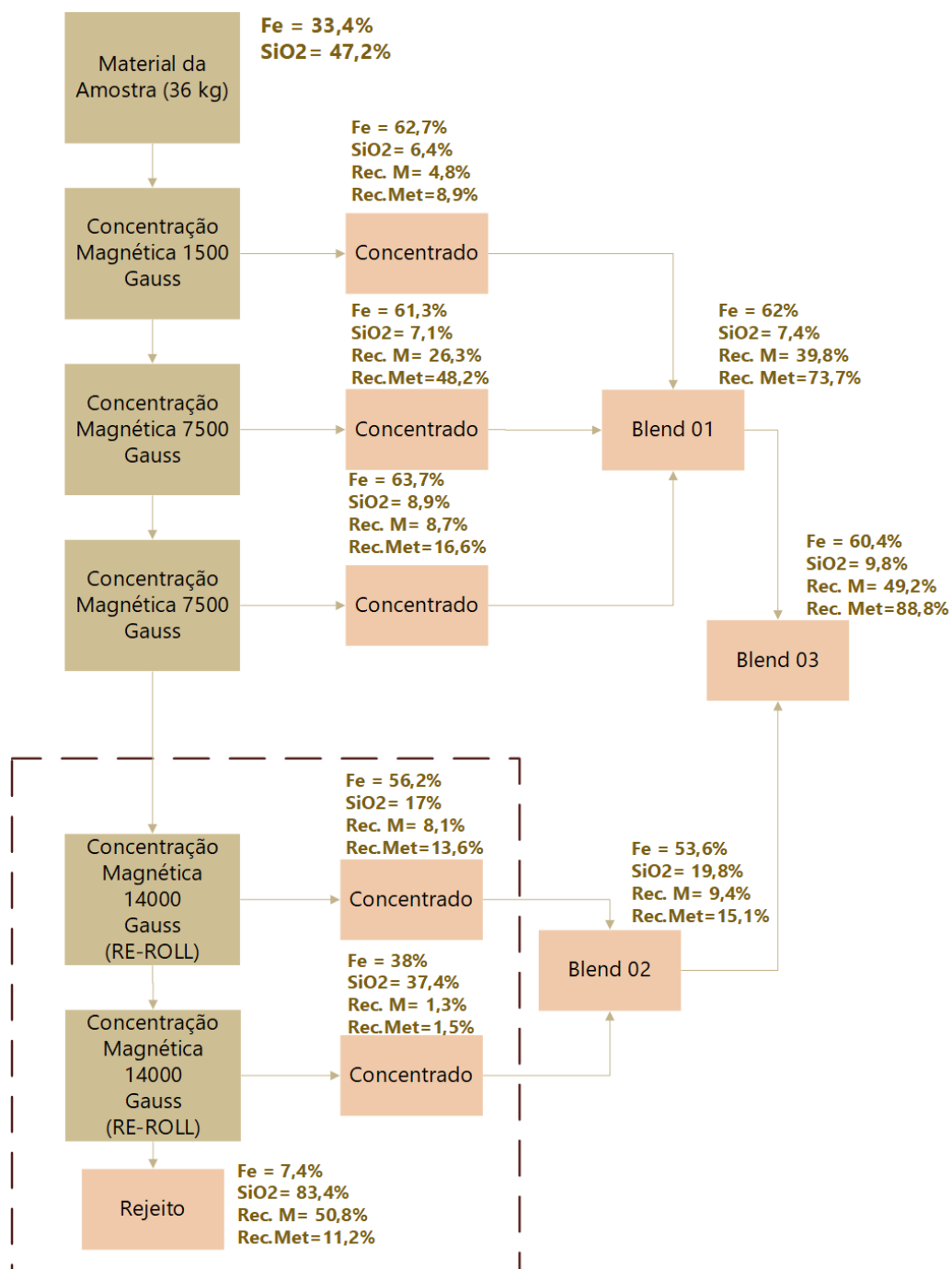


Figura 66 - Resultado teste 00

Fonte: Próprio autor

Conforme previsto pela análise mineralógica, que evidenciou a liberação dos minerais na faixa menor 1 mm, o teste realizado com essa granulometria apresentou resultado melhor frente ao encontrado na planta industrial atualmente. Como resultado, observou-se uma recuperação mássica de aproximadamente 40% para o primeiro blend (parte 1 do teste) com teor de 62% de Fe e 7,4% de SiO₂, atendendo assim os padrões de qualidade exigidos pelo mercado, além de uma recuperação metalúrgica de 73,7%. Para o blend 03, que resulta da combinação do blend 01 com os concentrados dos re-rolls, observa-se um aumento na recuperação mássica. No entanto, esse aumento é acompanhado por uma redução no teor de ferro e elevação no teor de sílica. O objetivo do re-roll neste fluxograma é aumentar a recuperação mássica e metalúrgica, considerando que sua aplicação nessa sequência dificilmente resultará em um produto com teor adequado para o mercado. Assim, o blend total proporcionou o aumento da recuperação mássica de 39,8% para 49,2% e da recuperação metalúrgica de 73,7% para 88,8%. No entanto, o teor médio ponderado de ferro no blend é de 60,4%, enquanto o teor de sílica é de 9,8%.

Os resultados obtidos na primeira etapa do teste, blend 01 com teor de Fe de 62% e de SiO₂ 7,4% com um recuperação mássica de aproximadamente 40%, indicou uma melhora em relação ao desempenho atual da planta em Sabinópolis, no qual apresenta um teor médio de Fe de 58% e SiO₂ de 11% e um recuperação mássica e metalúrgica de 35% e 53% respectivamente, alcançada simplesmente reduzindo a granulometria da alimentação de -3mm para -1mm, mantendo os demais parâmetros operacionais conforme mencionados anteriormente.

É reconhecido que um teor de ferro satisfatório para mercado deve ser superior a 60% de Fe, com o teor de SiO₂ abaixo de 10%. Embora outros elementos químicos também devam ser considerados para atender aos critérios de aceitação do mercado, o foco deste trabalho está apenas no teor de ferro e sílica.

6.3.1.1 Metodologia para montagem da curva de teor e recuperação

Para cada teste indicado será apresentado além dos resultados ajustados também a curva de teor e recuperação.

Para a construção da curva de teor e recuperação dos testes, os resultados brutos foram ajustados utilizando o programa SORT. Esses resultados foram organizados em tabelas, como por exemplo a tabela 16, que apresenta o teor de ferro e sílica, bem como as recuperações mássica e metalúrgica. Nessa tabela, o rejeito final é listado como o primeiro item, seguido pelos concentrados, dispostos em ordem decrescente de teor de ferro.

Os resultados foram calculados de acordo com o balanço de massa e teor para cada produto gerado após o descarte dos produtos de menor teor, conforme a tabela 16. Neste contexto, foram considerados, em sequência, os rejeitos 2 (rej 2), concentrado 5 (conc 5), concentrado 4 (conc 4), concentrado 2 (conc 2), concentrado 1 (conc 1) e concentrado 3 (conc 3). Dessa forma, os resultados são apresentados na Tabela 17.

Tabela 16 - Parte 01 - Construção da curva teor e recuperação

Fonte: Próprio autor

Etapa	Teor Fe (%)	Rec. Met	Rec. Massa
Rej. 2	7,38%	11,21%	50,80%
Conc. 5	37,95%	1,49%	1,31%
Conc. 4	56,19%	13,61%	8,10%
Conc. 2	61,26%	48,19%	26,32%
Conc. 1	62,68%	8,92%	4,76%
Conc. 3	63,72%	16,59%	8,71%

Tabela 17 - Parte 02 - Construção da curva teor e recuperação

Fonte: Próprio autor

Etapa	Teor Fe (%)	Rec. Met	Rec. Massa
Alim.	33,45%	100,00%	100,00%
Rej. 2	60,38%	88,79%	49,20%
Conc. 5	60,99%	87,31%	47,89%
Conc. 4	61,97%	73,70%	39,79%
Conc. 2	63,35%	25,51%	13,47%
Conc. 1	63,72%	16,59%	8,71%

Segue na figura 67 e figura 68 a curva de teor e recuperação obtidas por meio do fechamento do balanço de massa e seguindo a metodologia exposta.

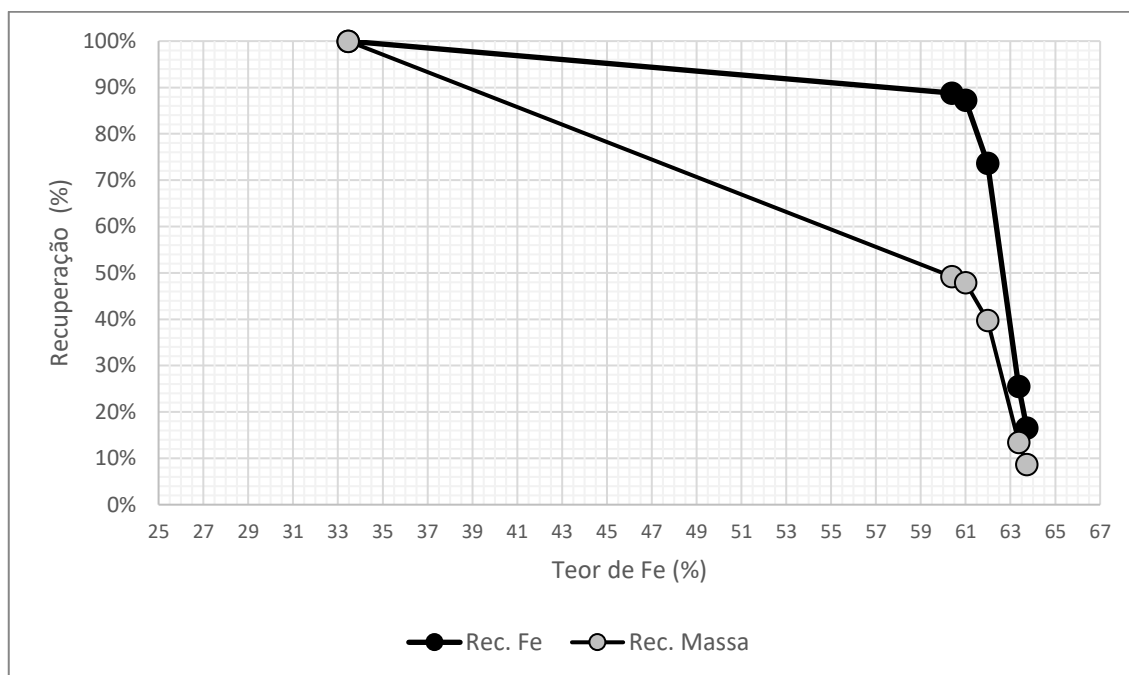


Figura 67 - Curva de teor do ferro e recuperação - teste 00

Fonte: Próprio Autor

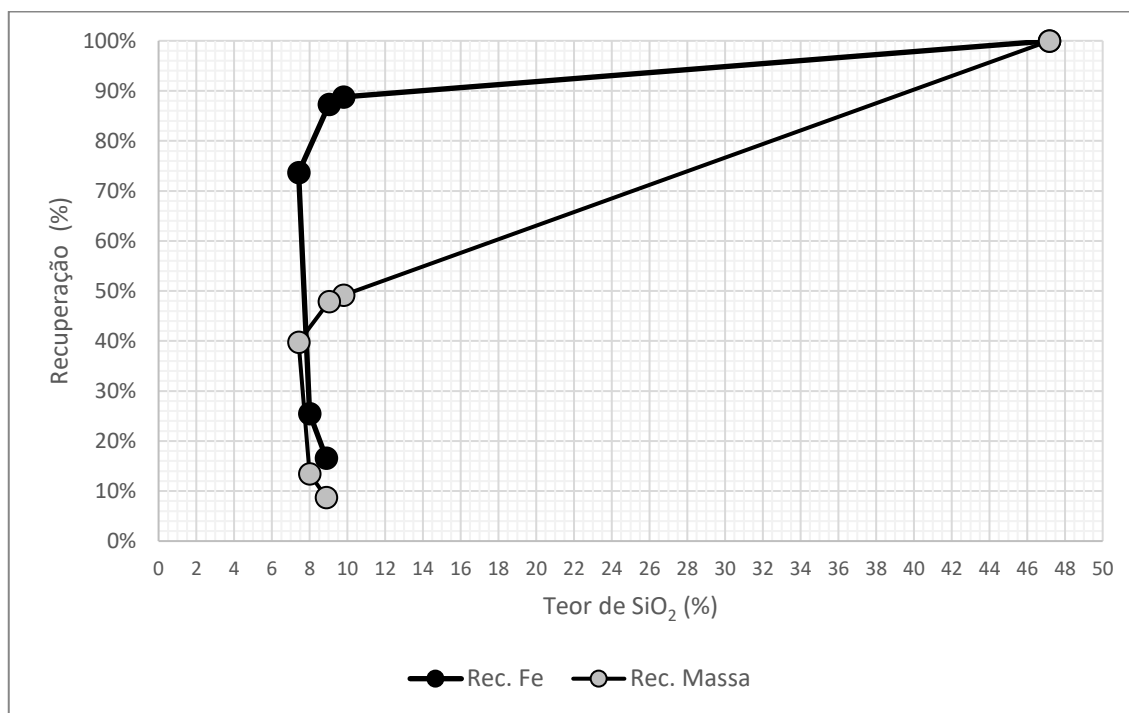


Figura 68 - Curva de teor da sílica e recuperação - teste 00

Fonte: Próprio Autor

6.3.2. Resultado teste 01 – Teste<1mm – Scavenger 1 (2500 Gauss)

O segundo teste, conforme apresentado, foi proposto uma rota com concentradores magnéticos de baixa, média e alta intensidade, uma vez que com essa variação na intensidade haverá previsivelmente captura de mais materiais com diferentes suscetibilidades magnéticas. Também foi proposta uma etapa re-roll para aumentar a recuperação mássica do concentrado final. Segue na figura 69 os resultados encontrados e devidamente ajustados.

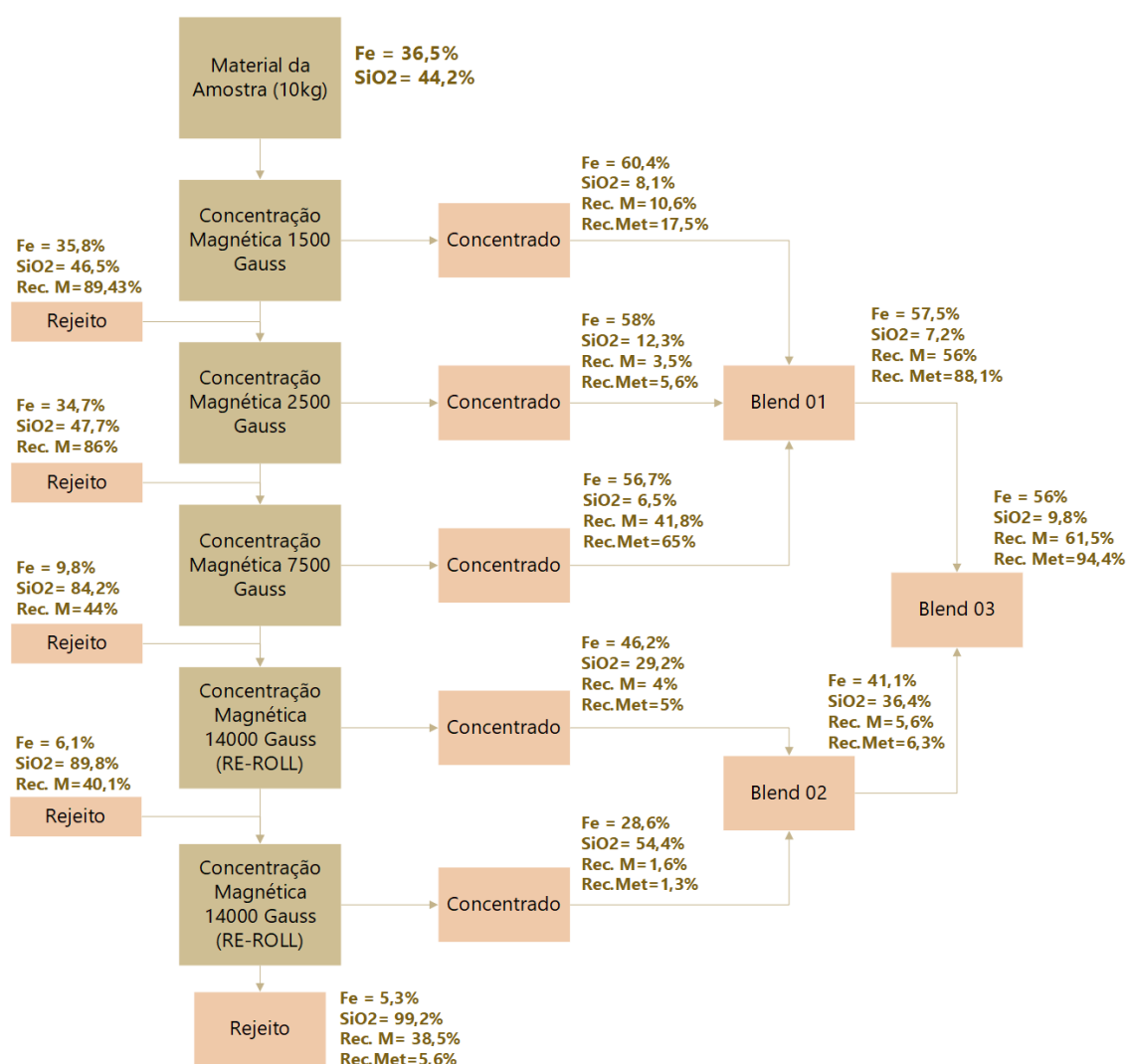


Figura 69 - Resultado teste 01

Fonte: Próprio Autor

Segue na figura 70 e figura 71 as curvas de teor e recuperação obtidas por meio do fechamento do balanço de massa para o teste 01.

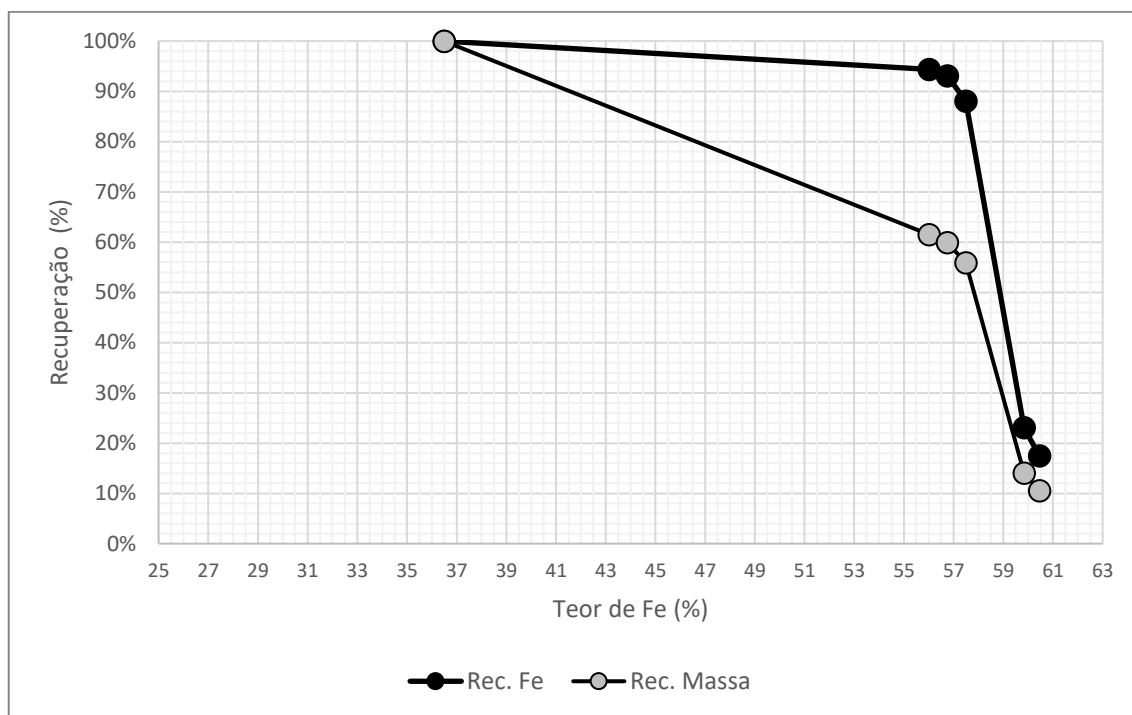


Figura 70 - Curva de teor do ferro e recuperação - teste 01

Fonte: Próprio Autor

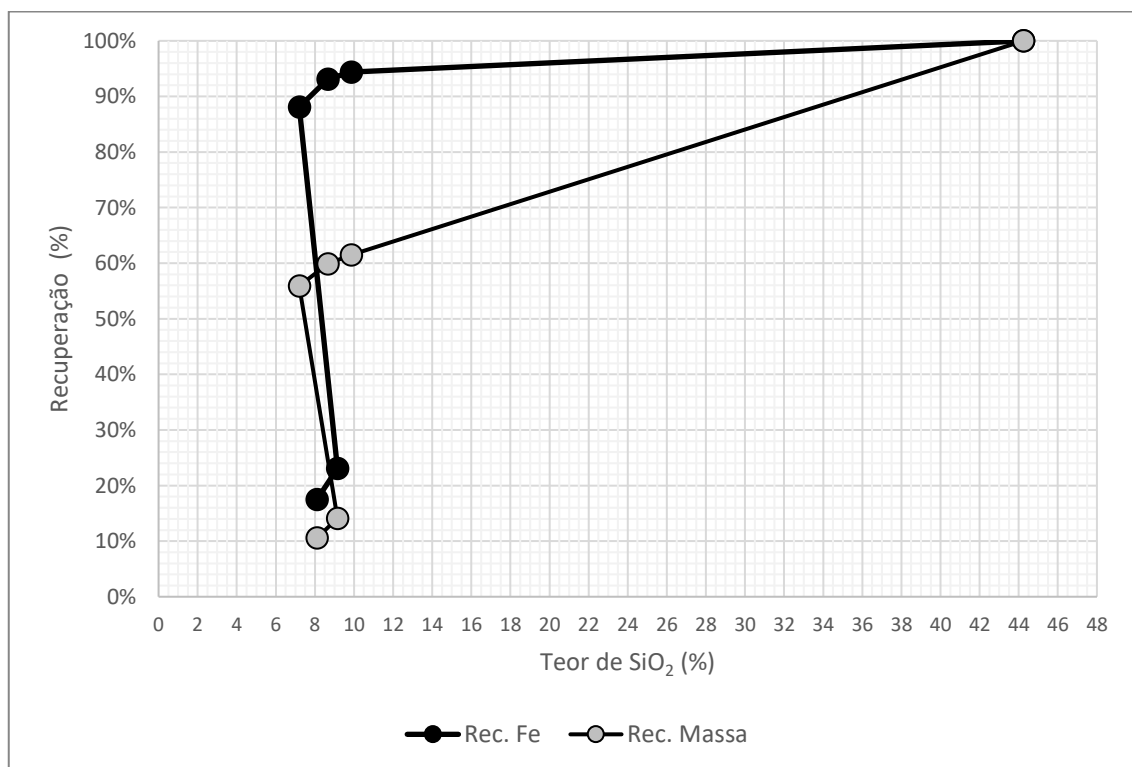


Figura 71 - Curva de teor da sílica e recuperação - teste 01

Fonte: Próprio Autor

6.3.3. Resultado teste 02 – Teste<2mm – Scavenger 1 (2500 Gauss)

De forma análoga ao apresentado para o teste 01, segue na figura 72 os dados obtidos no teste 02 devidamente ajustados.

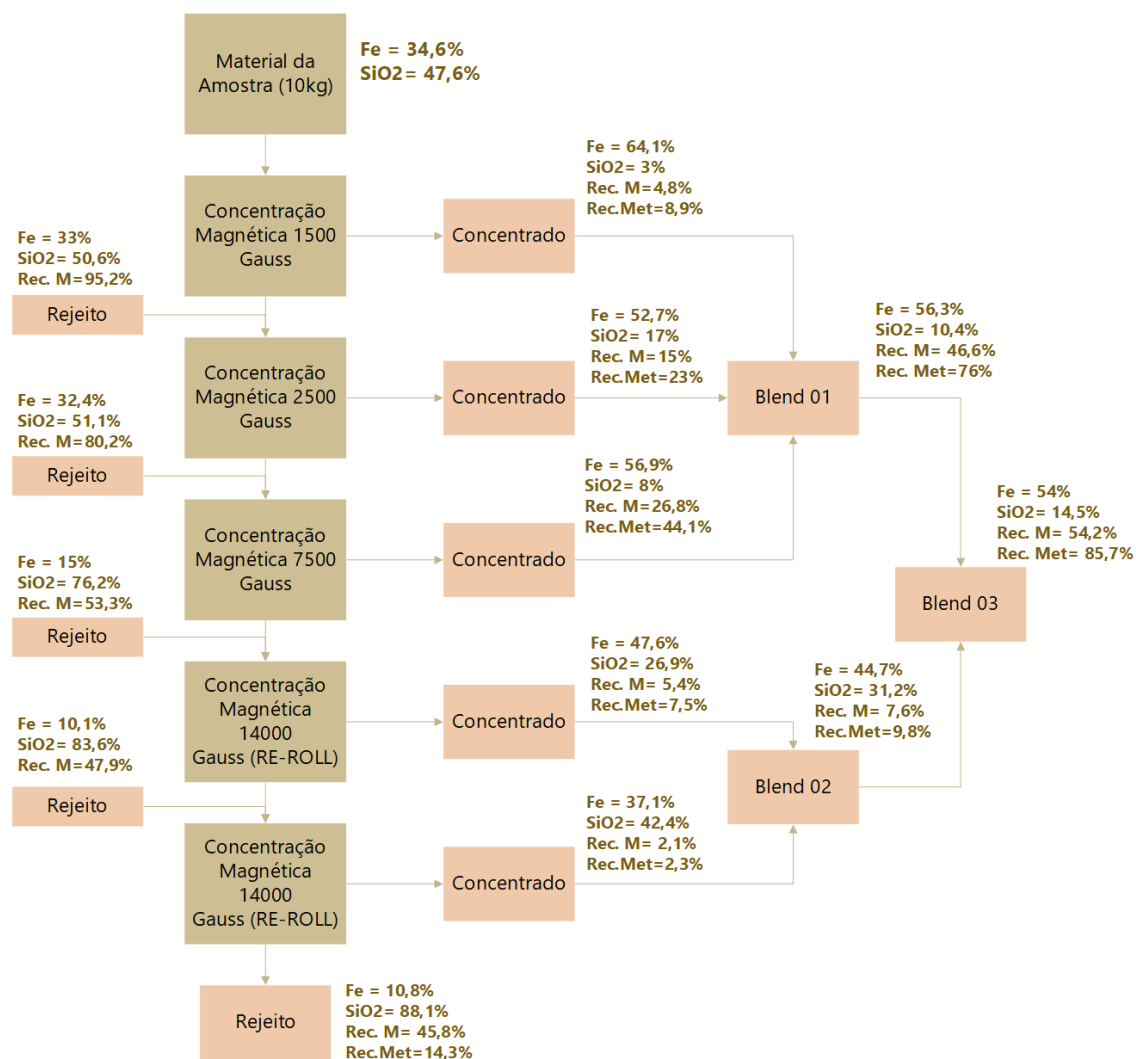


Figura 72 - Resultado teste 02

Fonte: Próprio Autor

Segue na figura 73 e figura 74 as curvas de teor e recuperação obtidas por meio do fechamento do balanço de massa para o teste 02.

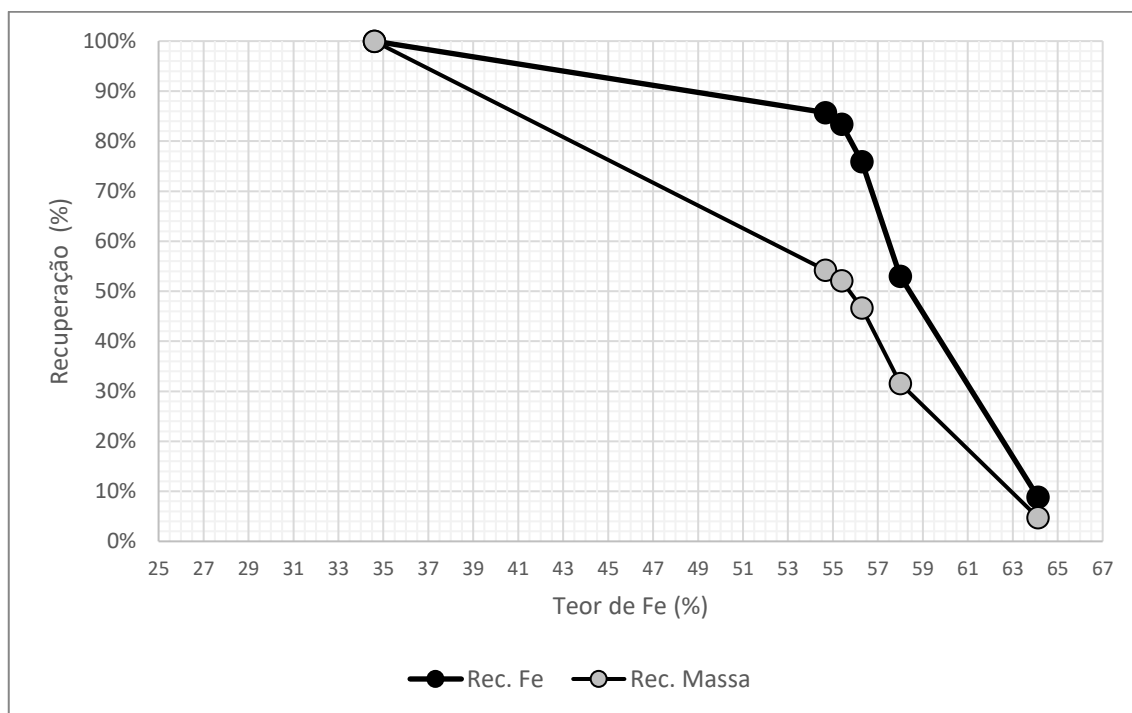


Figura 73 - Curva de teor do ferro e recuperação - teste 02

Fonte: Próprio Autor

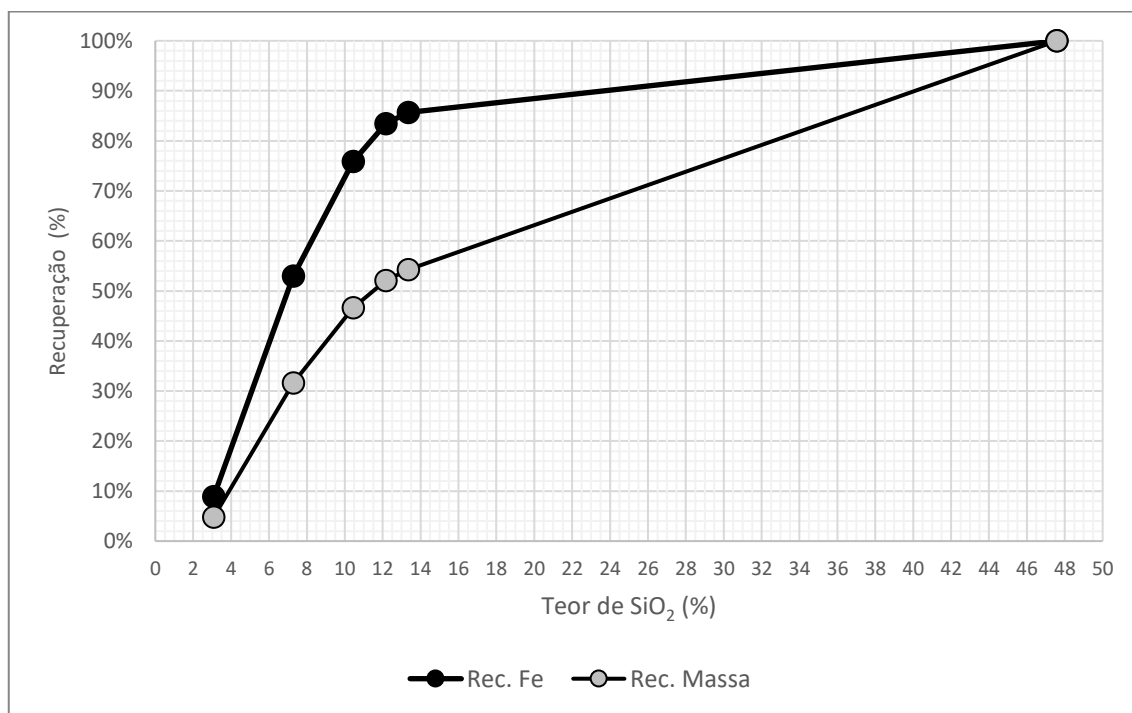


Figura 74 - Curva de teor da sílica e recuperação - teste 02

Fonte: Próprio Autor

6.3.4. Resultado teste 03 – Teste <3mm – Scavenger 1 (2500 Gauss)

O teste a seguir seguiu o mesmo fluxo apresentado no teste 01 e 02, só que nessa etapa foi alimentado com minério -3mm. Segue na figura 75 os resultados encontrados.

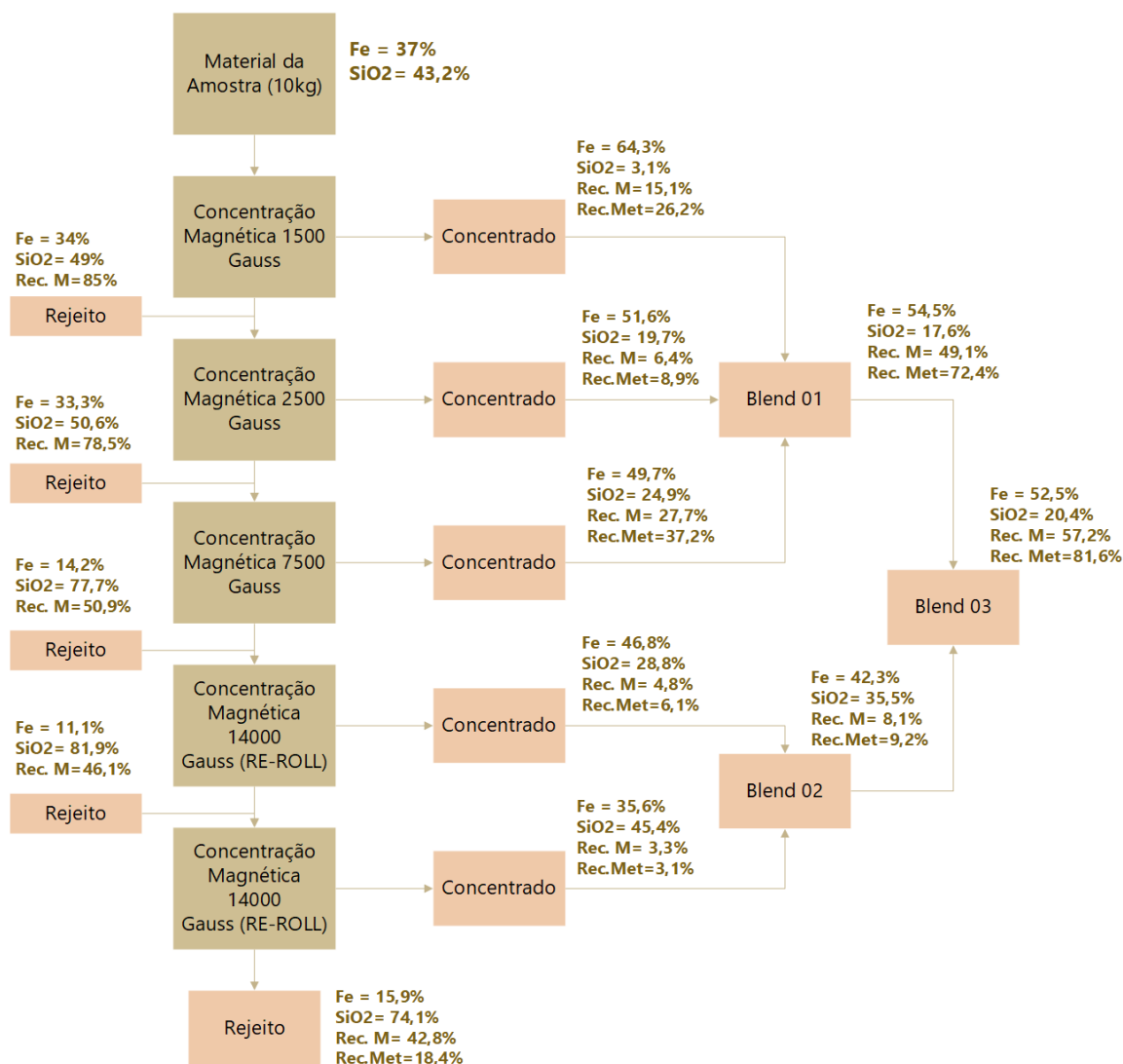


Figura 75 - Resultado teste 03

Fonte: Próprio Autor

Segue na figura 76 e figura 77 as curvas de teor e recuperação obtidas por meio do fechamento do balanço de massa para o teste 03.

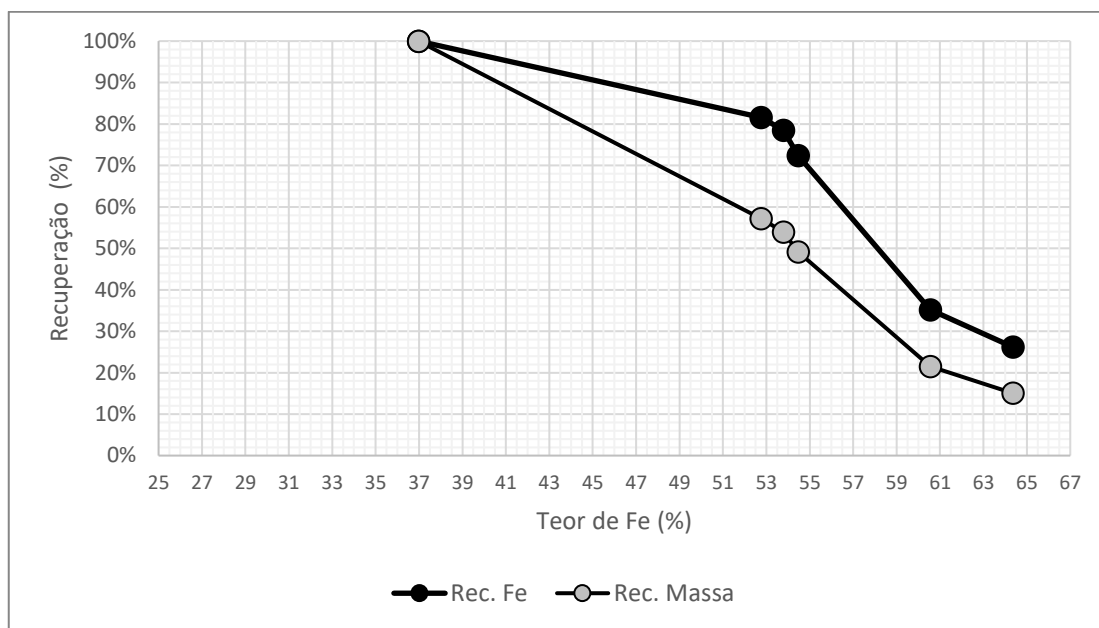


Figura 76 - Curva de teor do ferro e recuperação - teste 03

Fonte: Próprio Autor

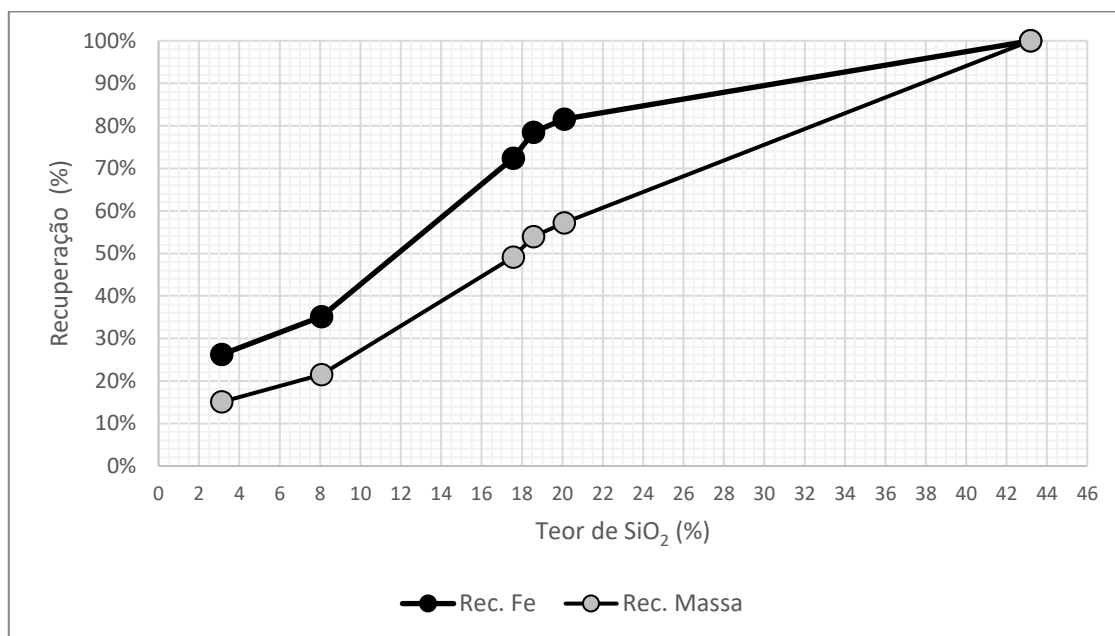


Figura 77 - Curva de teor da sílica e recuperação - teste 03

Fonte: Próprio Autor

6.3.5. Comparação entre os testes 00, 01, 02 e 03 - Semi-compacto – Via seca com secagem

Através dos dados apresentados nas curvas de teor e recuperação é possível realizar uma comparação dos resultados obtidos nos quatro testes realizados, bem como avaliar a influência da granulometria nos dados coletados.

A figura 78 demonstra a análise comparativa entre os dados do teste 02 e do teste 03, enquanto a figura 79 a análise entre o teste 01 e o teste 02.

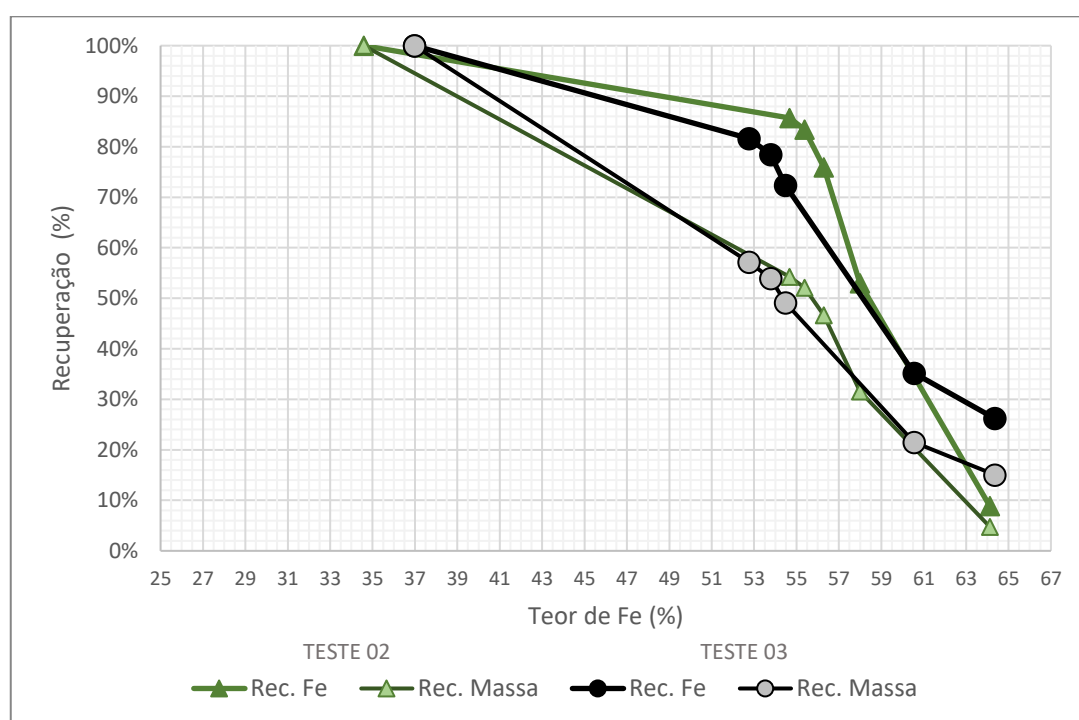


Figura 78 - Comparação das curvas de teor e recuperação - teste 02 e 03

Fonte: Próprio Autor

Pode ser notar, por meio da figura 78, que o teste 02 apresentou resultado superior ao teste 03.

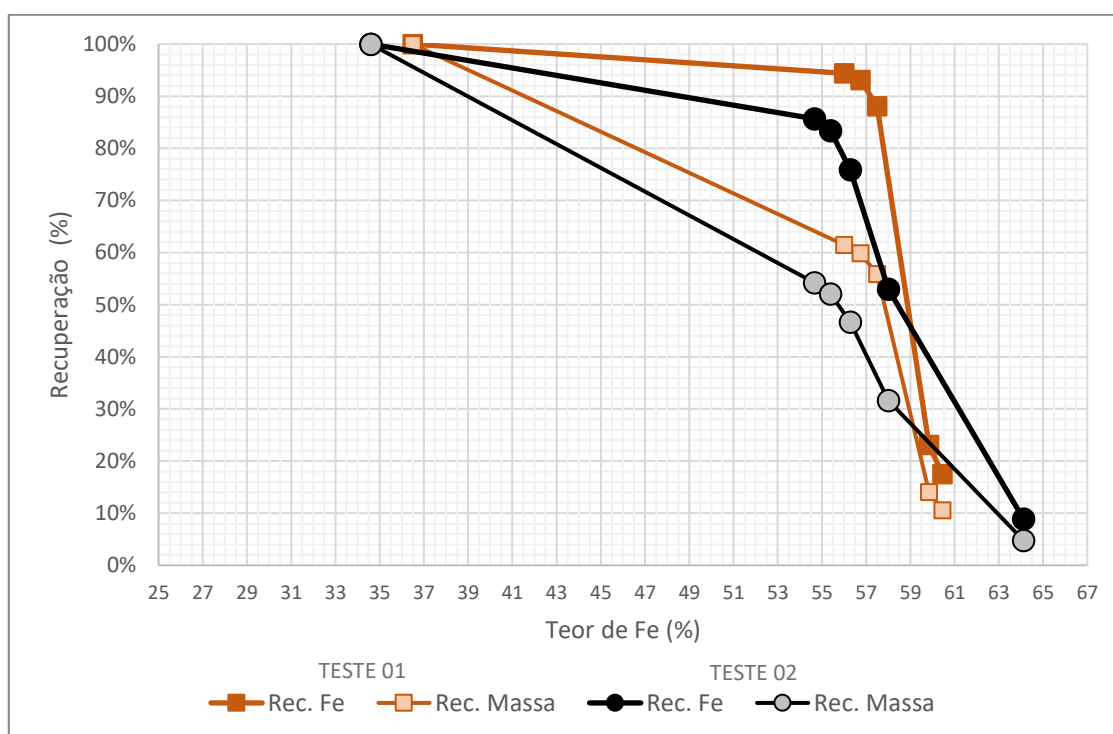


Figura 79 -Comparação das curvas de teor e recuperação - teste 01 e 02

Fonte: Próprio Autor

De forma semelhante ao apresentado entre o teste 02 e 03, é possível constatar, com base na figura 79, que o teste 01, com granulometria -1mm, apresentou resultados melhores do que os outros testes com diferentes granulometrias.

A análise dos testes 01, 02 e 03 evidenciam a influência significativa da granulometria nos resultados obtidos, o que está diretamente relacionado ao grau de liberação das partículas de minério, apresentando tanto aumento da recuperação mássica e recuperação metalúrgica, como também aumento do teor de ferro nos concentrados a medida que a faixa granulométrica vai se reduzindo, ou seja, o teste com granulometria -1,00mm apresentou um concentrado com teor melhor que o -2,00 e -3,00mm.

Apesar de o teste 01 apresentar resultados superiores em comparação aos testes 02 e 03, confirmando os dados indicados na caracterização mineralógica, é importante destacar que o blend total alcançou um teor de 56% de Fe e 9,8% de SiO₂, com uma recuperação mássica de 61,5% e uma recuperação metalúrgica de 94,4%. Por outro lado, para o blend 01, que não inclui a etapa de re-roll, os resultados para o teor de ferro e sílica foram de 57,5% e 7,2%, respectivamente, com uma recuperação mássica de 56% e uma

recuperação metalúrgica de 88,1%. Embora esses resultados não representem o produto final almejado, eles demonstram melhorias significativas em termos de recuperação mássica e metalúrgica quando comparados aos resultados da operação atual, que conforme exposta anteriormente possui uma média de ferro e sílica em torno de 58% e 11% e recuperação mássica e metalúrgica 35% e 53% respectivamente.

A etapa de re-roll tem como objetivo principal aumentar tanto a recuperação mássica quanto a recuperação metalúrgica em um processo industrial. O equipamento utilizado nesta etapa, devido ao seu alto gradiente, contribui significativamente para o arraste de material. O equipamento re-roll é empregado principalmente para maximizar a recuperação do material, em vez de simplesmente aumentar seu teor. Isso significa que sua função primária é melhorar a quantidade de material recuperado, independentemente de seu teor específico.

Definida a influência da granulometria, torna-se necessário avaliar a influência dos campos magnéticos nos resultados. Nos testes 01, 02 e 03, observou-se que entre os testes realizados, o com granulometria menor que 1 mm apresentou resultados superiores aos demais. Conforme mencionado anteriormente, tanto o teste 00 quanto o teste 01 foram conduzidos a granulometria -1 mm. Todavia, o teste 01 utilizou uma etapa de baixa intensidade, seguida por uma de média intensidade e outra de alta intensidade, diferentemente do teste 00, que empregou uma etapa de baixa intensidade seguida por duas etapas de alta intensidade. Ambos os testes incluíram etapas de re-roll idênticas. A comparação entre os dois testes é apresentada na figura 80.

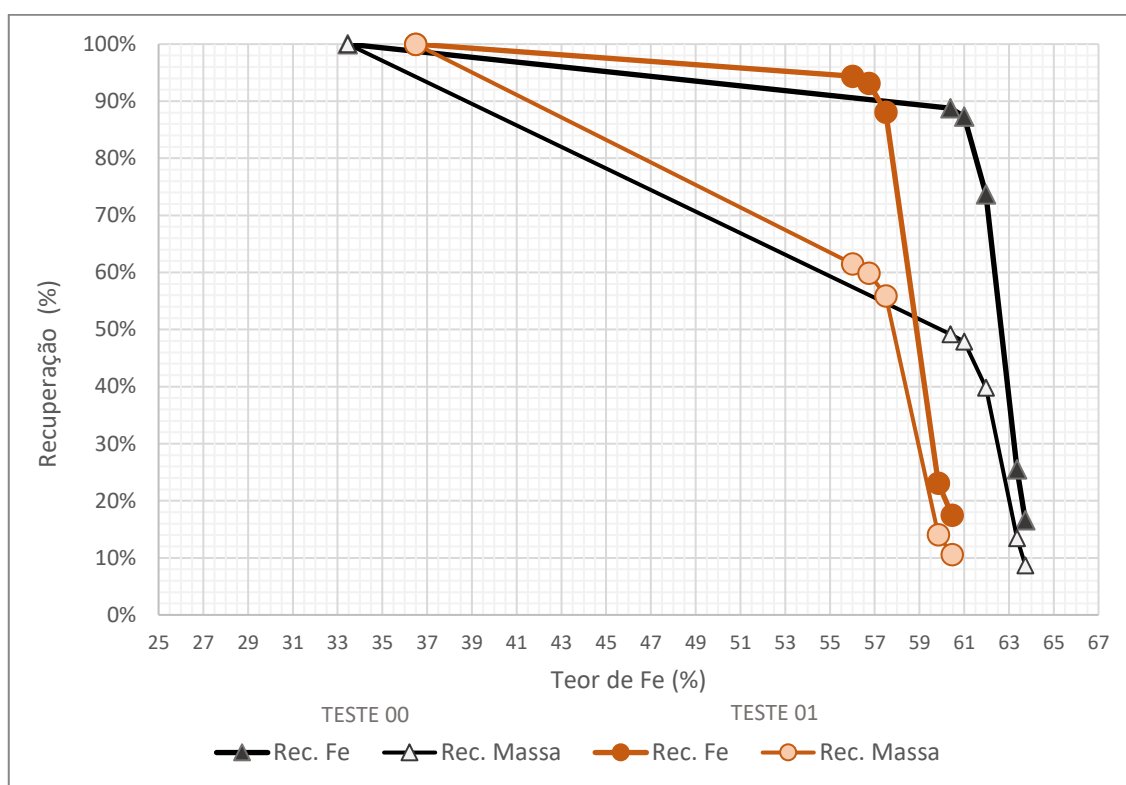


Figura 80 - Comparação das curvas de teor e recuperação - teste 00 e teste 01

Fonte: Próprio Autor

Com base nos resultados apresentados na figura 80, torna-se evidente que o teste 00 demonstrou a configuração mais eficaz para a obtenção de um concentrado de maior qualidade. Esta eficácia pode ser atribuída a configuração específica dos concentradores magnéticos adotada, que incluiu duas etapas de alta intensidade. Essa abordagem permitiu uma captura mais eficiente de minerais menos susceptíveis ao campo magnético. Para o blend 01 do teste 00, obteve-se um teor de ferro e sílica de 62% e 7,4%, respectivamente, com uma recuperação mássica de 39,8% e uma recuperação metalúrgica de 73,7%. Já o blend total, que soma a etapa re-roll, resultou em um produto com teor de ferro e sílica de 60,4% e 9,8%, respectivamente, alcançando uma recuperação mássica de 49,2% e uma recuperação metalúrgica de 88,8%. Os teores encontrados em ambos os blends são consistentes com os requisitos do produto final desejado e demonstraram melhorias nas recuperações quando comparados aos parâmetros atuais da planta.

6.4. Resultados concentração magnética – Formação Ferrífera Bandada – Semi-compacto – Via seca a umidade natural

Conforme destacado nas seções anteriores, a secagem é prevista para atuar como um facilitador no processo de concentração magnética. Assim, foram delineados testes idênticos aos apresentados nos experimentos 01, 02 e 03, porém utilizando a umidade natural do material. O trabalho proposto visa avaliar a influência desse parâmetro na operação, uma vez que a mesma amostra que irá alimentar cada um dos testes são provenientes das mesmas amostras utilizadas na alimentação dos testes 01, 02 e 03.

6.4.1. Resultado teste 04 – Teste <1mm – Scavenger 1 (2500 Gauss)

Para o teste 04 foi proposto a cominuição de toda a amostra para menor que 1mm, de forma similar ao teste 01. Segue o resultado do teste, devidamente ajustado utilizando o programa Sort®, expresso na figura 81.

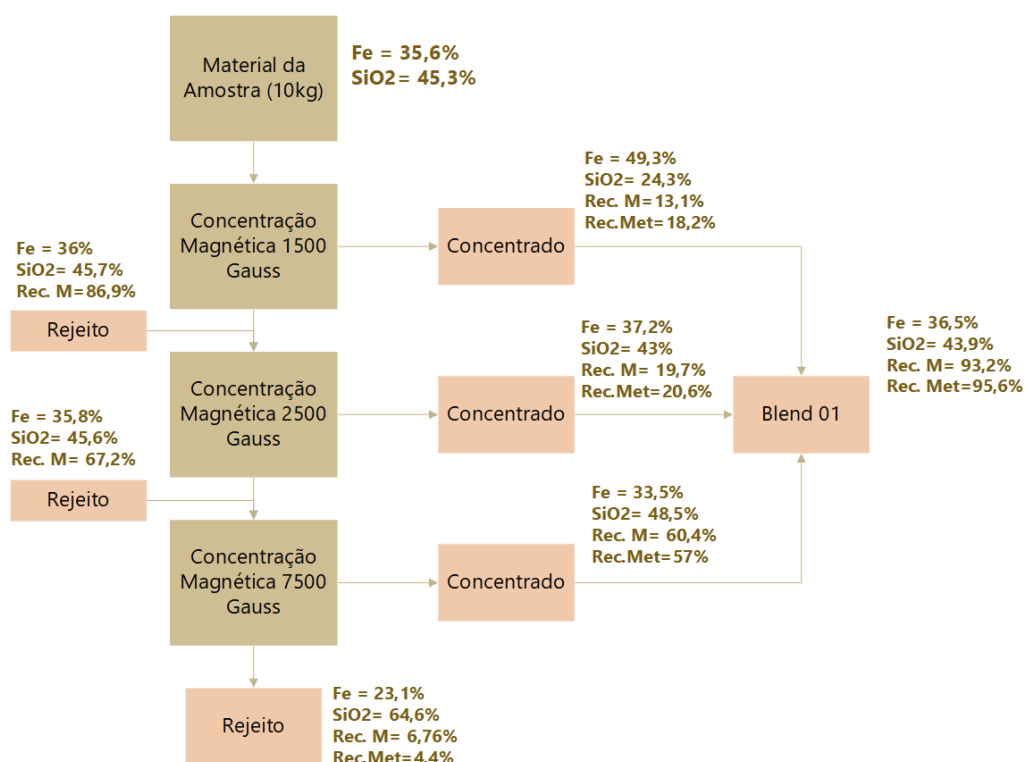


Figura 81 - Resultado teste 04

Fonte: Próprio Autor

Segue na figura 82 e figura 83 a curva de teor e recuperação obtidas por meio do fechamento do balanço de massa.

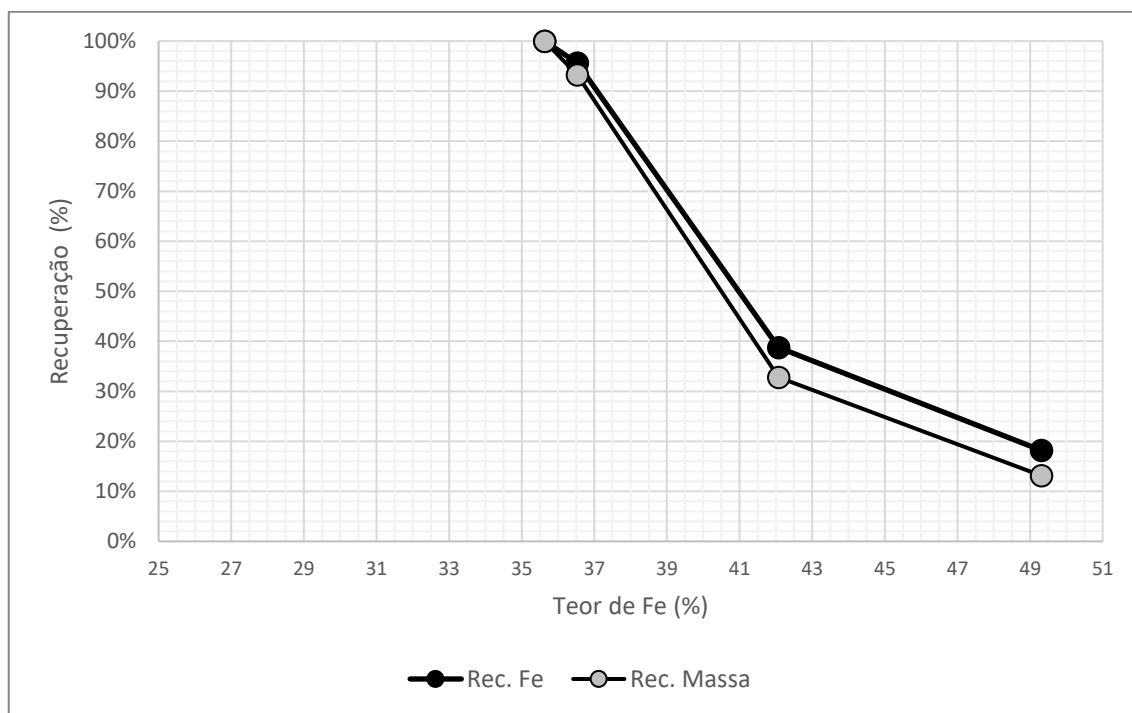


Figura 82 - Curva de teor do ferro e recuperação - teste 04

Fonte: Próprio Autor

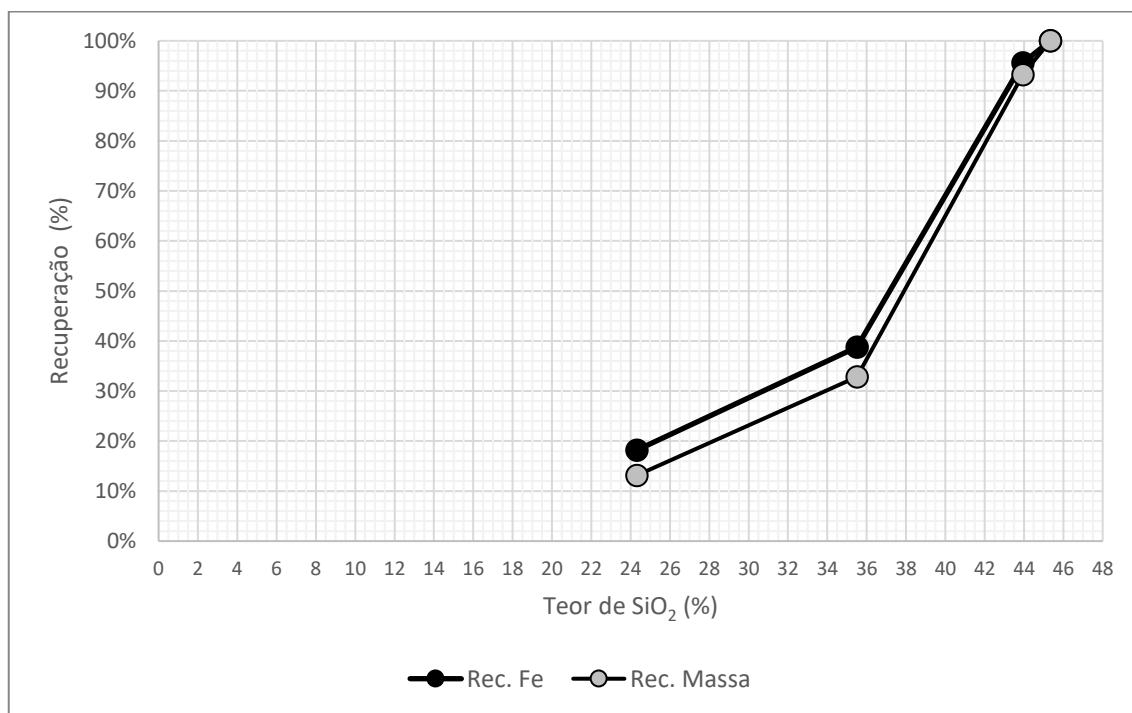


Figura 83 - Curva de teor da sílica e recuperação - teste 04

Fonte: Próprio Autor

6.4.2. Resultado teste 05 – Teste<2mm – Scavenger 1 (2500 Gauss)

De forma semelhante ao teste 04, foi realizado o teste 05, no qual a alimentação do teste foi minério -2 mm. Segue na figura 84 o resultado obtido para o teste em questão.

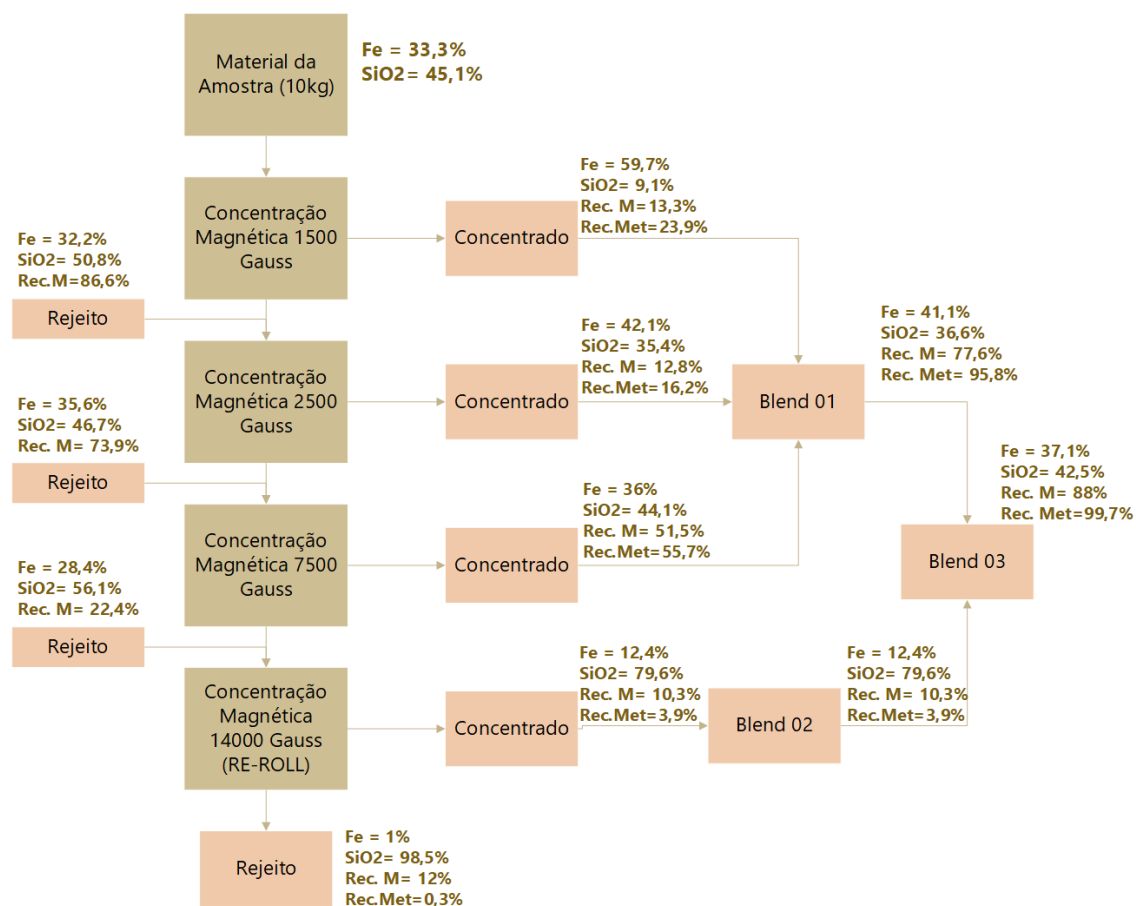


Figura 84 - Resultado teste 05

Fonte: Próprio Autor

Nas figuras 85 e 86, são apresentadas as curvas de teor e recuperação, obtidas através do fechamento do balanço de massa.

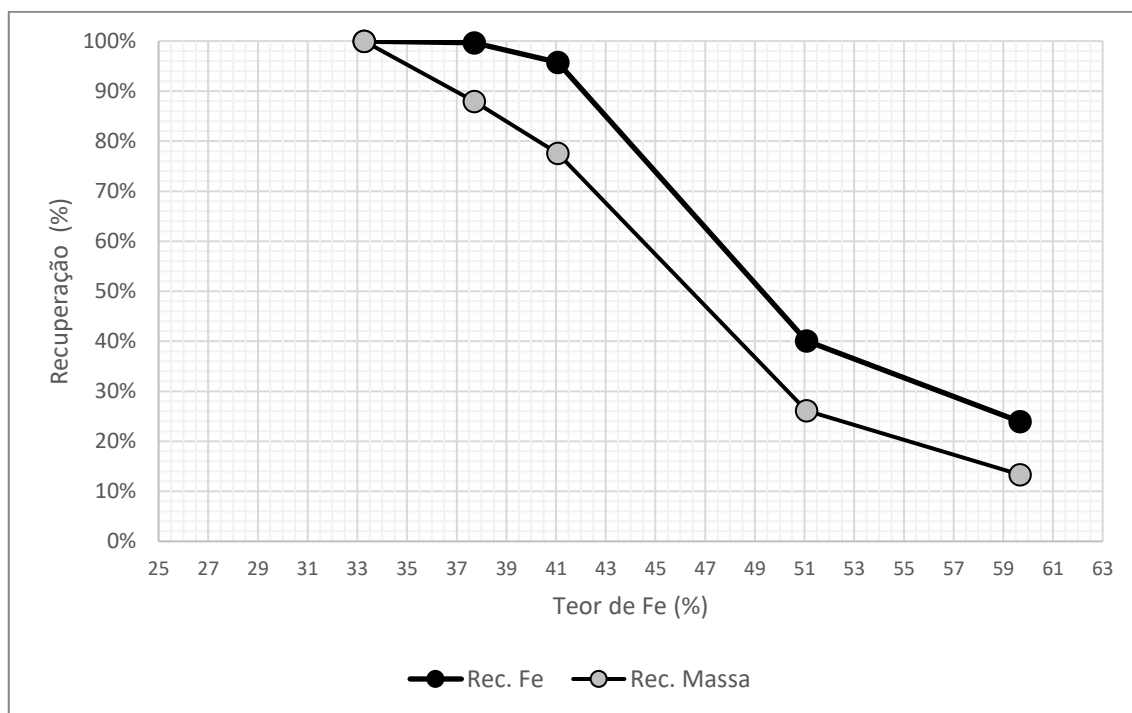


Figura 85 - Curva de teor do ferro e recuperação - teste 05

Fonte: Próprio Autor

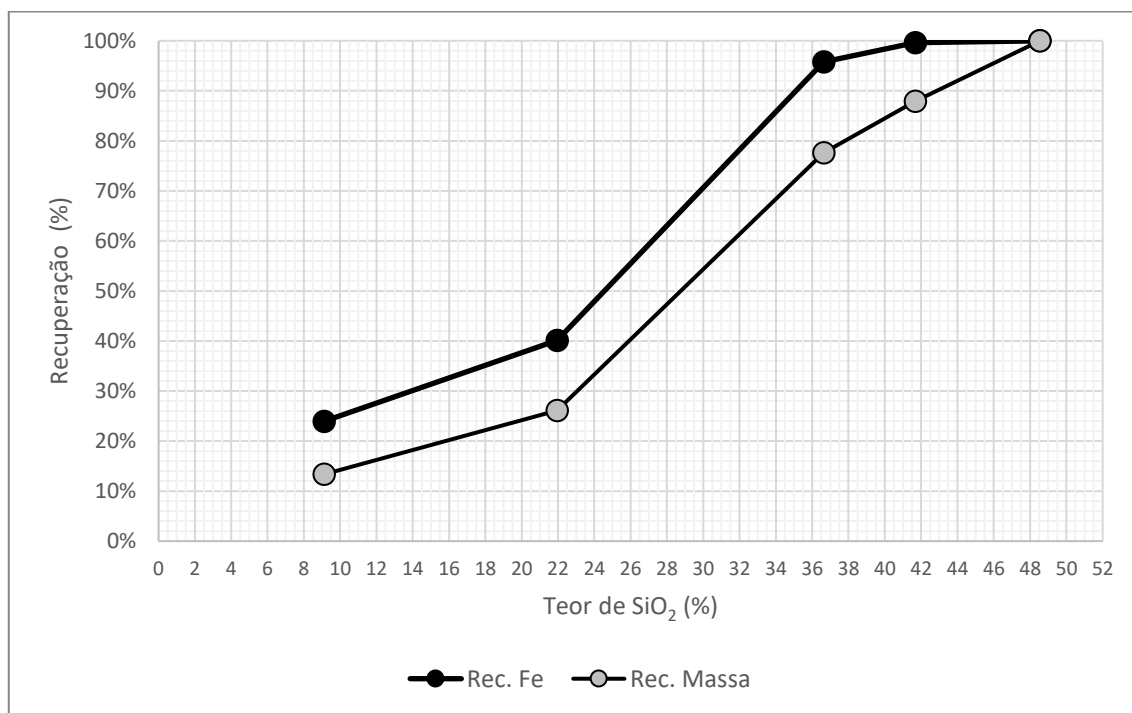


Figura 86 - Curva de teor da sílica e recuperação - teste 05

Fonte: Próprio Autor

6.4.3. Resultado teste 06 – Teste <3mm – Scavenger 1 (2500 Gauss)

De modo similar ao teste 03, foi realizado o teste 06 para o material cominuído a -3mm. Segue na figura 87 o resultado encontrado.

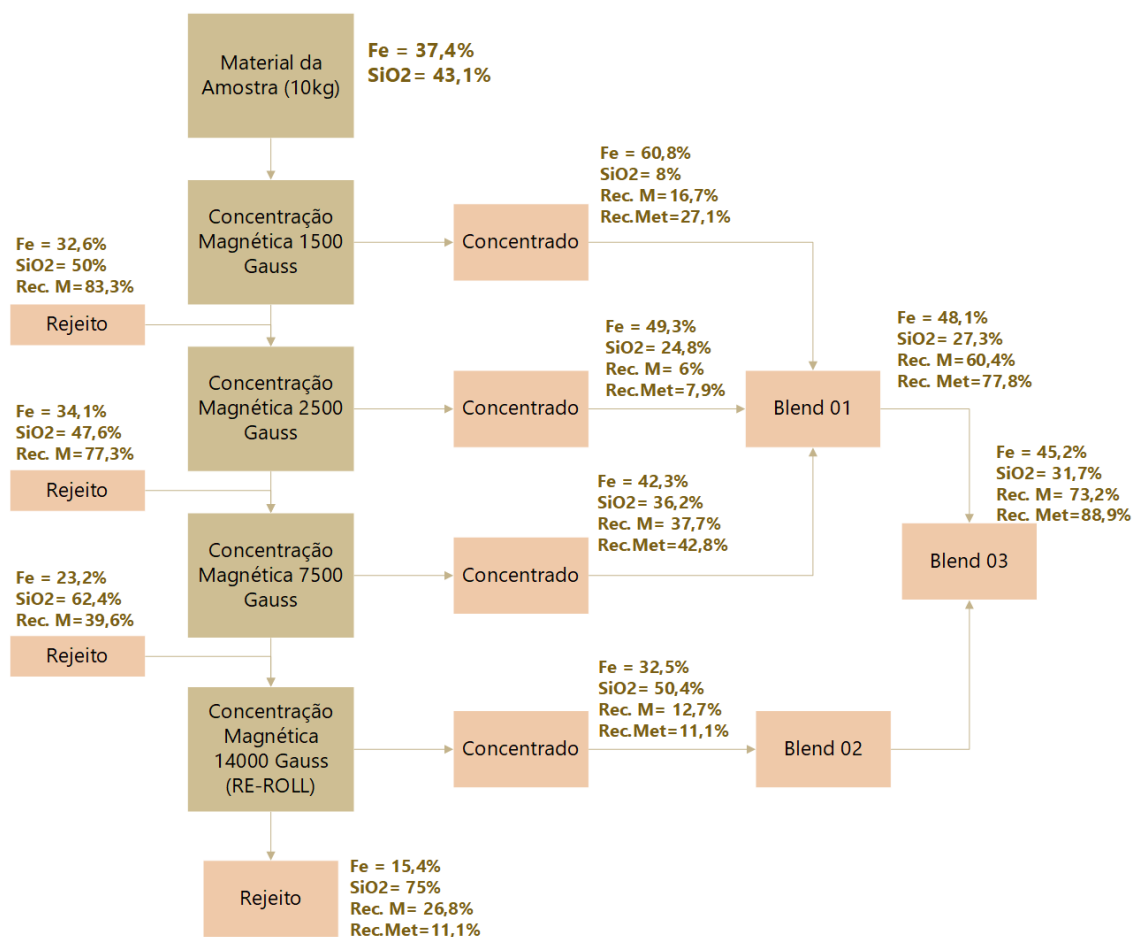


Figura 87 - Resultado teste 06

Fonte: Próprio Autor

Nas figuras 88 e 89, são apresentadas as curvas de teor e recuperação, obtidas através do fechamento do balanço de massa.

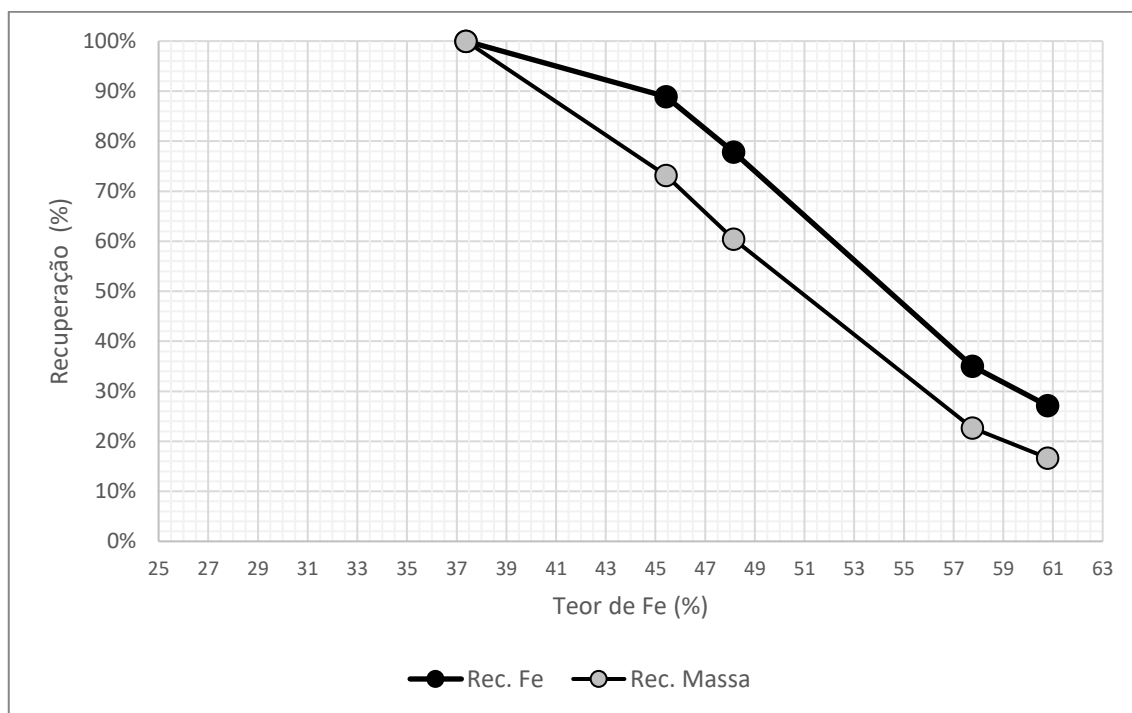


Figura 88-Curva de teor do ferro e recuperação - teste 06

Fonte: Próprio Autor

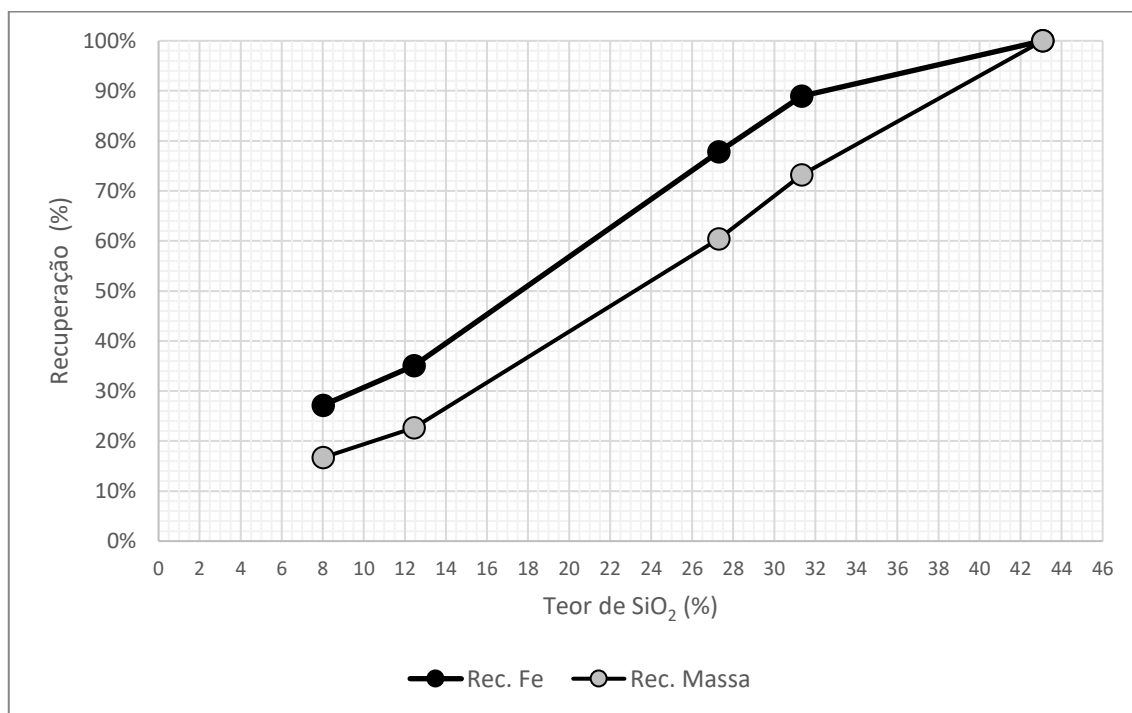


Figura 89 - Curva de teor da sílica e recuperação - teste 06

Fonte: Próprio Autor

6.4.4. Comparação entre os testes 04, 05 e 06 – Semi-compacto – Via seca a umidade natural

Os testes apresentados indicaram uma diferença no fluxograma em comparação com o teste 01, 02 e 03. Essa variação deve-se a etapa de re-roll, no qual para teste 04 não conteve massa suficiente para o desenvolvimento dessa etapa e para o teste 05 e 06 foi possível realizar apenas uma etapa re-roll. Segue na figura 90 e 91 fotos da alimentação do tambor com o material a umidade natural.



Figura 90 - Alimentação do tambor com umidade

Fonte: Próprio autor



Figura 91 – Foto da alimentação do tambor com umidade

Fonte: Próprio autor

Ao comparar os testes, observa-se que, embora a recuperação mássica e metalúrgica tenha sido elevada, a concentração magnética não apresentou resultados favoráveis em nenhum dos três testes. Isso se dá principalmente devido a agregação do material durante o teste de concentração, conforme ilustrado na figura 90 e 91 é possível notar algumas dificuldades operacionais observadas durante o teste piloto, como agregação e arraste de material, aumentando assim a recuperação mássica e ao mesmo tempo elevando o teor da sílica. Além dos resultados apresentados, a alimentação do material a umidade natural apresentou complicações como alimentação uniforme no tambor e entupimento do silo de alimentação e na calha vibratória.

Como o intuito do teste era comparar a influência da umidade nos resultados da concentração, segue na figura 92, figura 93 e figura 94, a comparação entre as curvas de teor e recuperação para os testes realizados para granulometria menor que 1mm, menor que 2mm e menor que 3mm. Para cada granulometria será apresentado a comparação entre o teste realizado a umidade natural e com secagem.

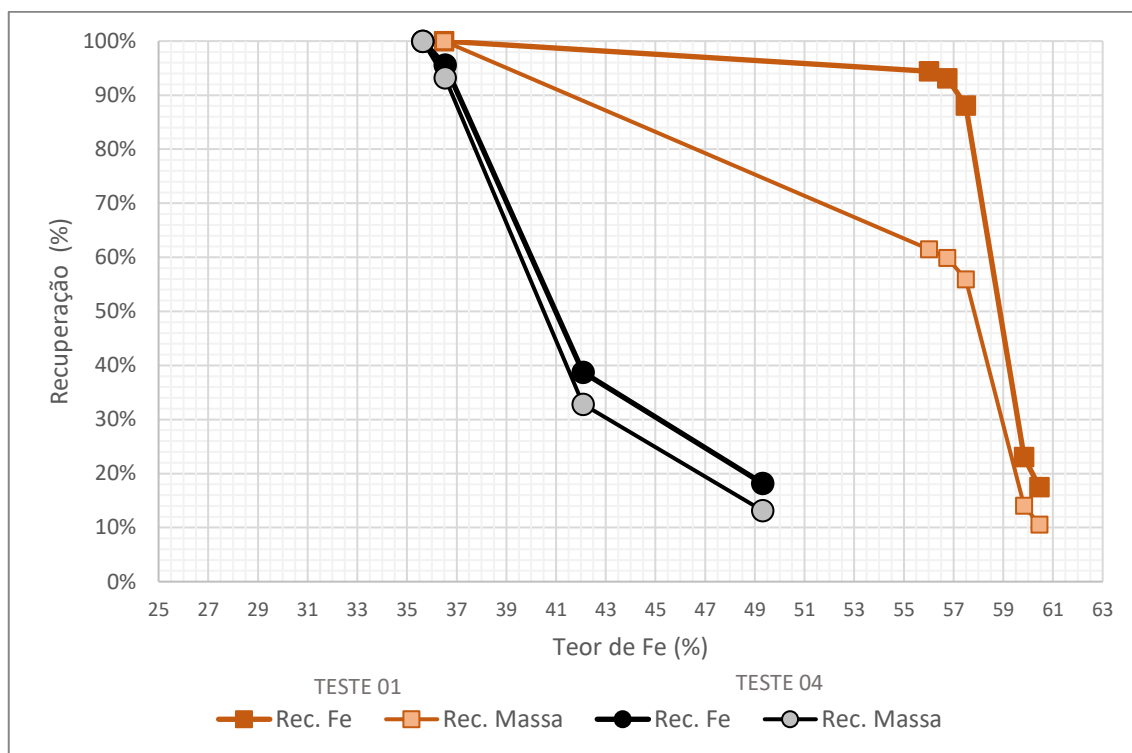


Figura 92 - Comparação das curvas de teor e recuperação - teste 01 e teste 04

Fonte: Próprio Autor

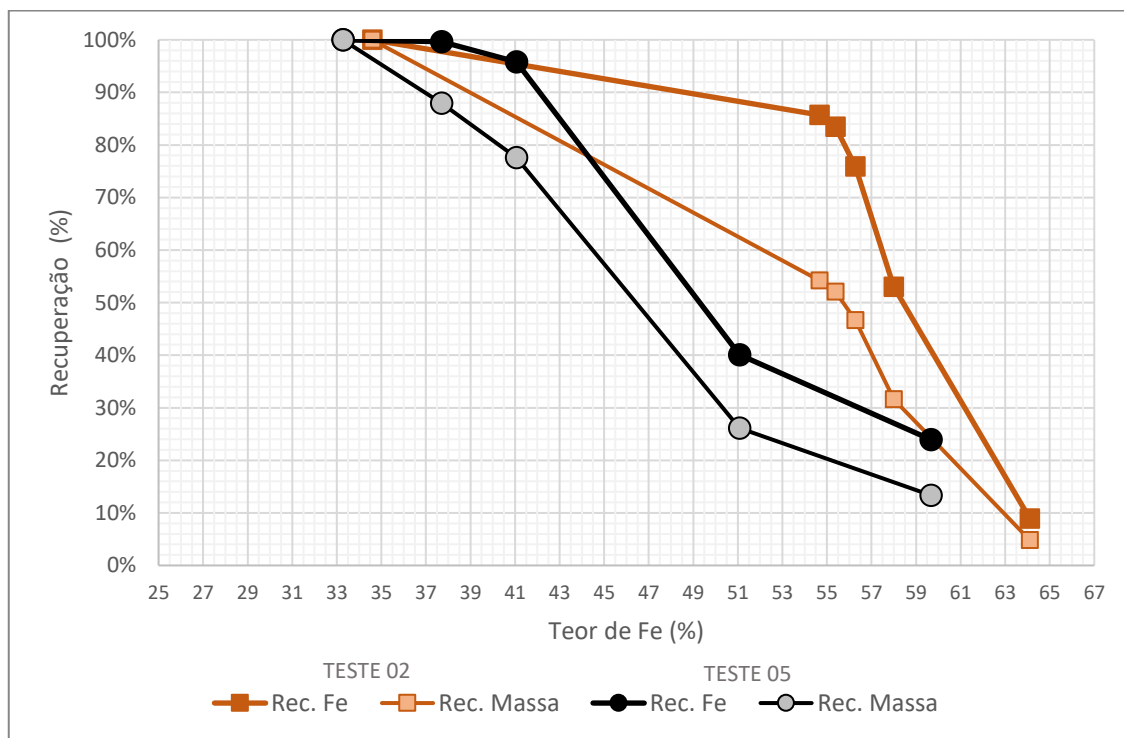


Figura 93 - Comparação das curvas de teor e recuperação - teste 02 e teste 05

Fonte: Próprio Autor

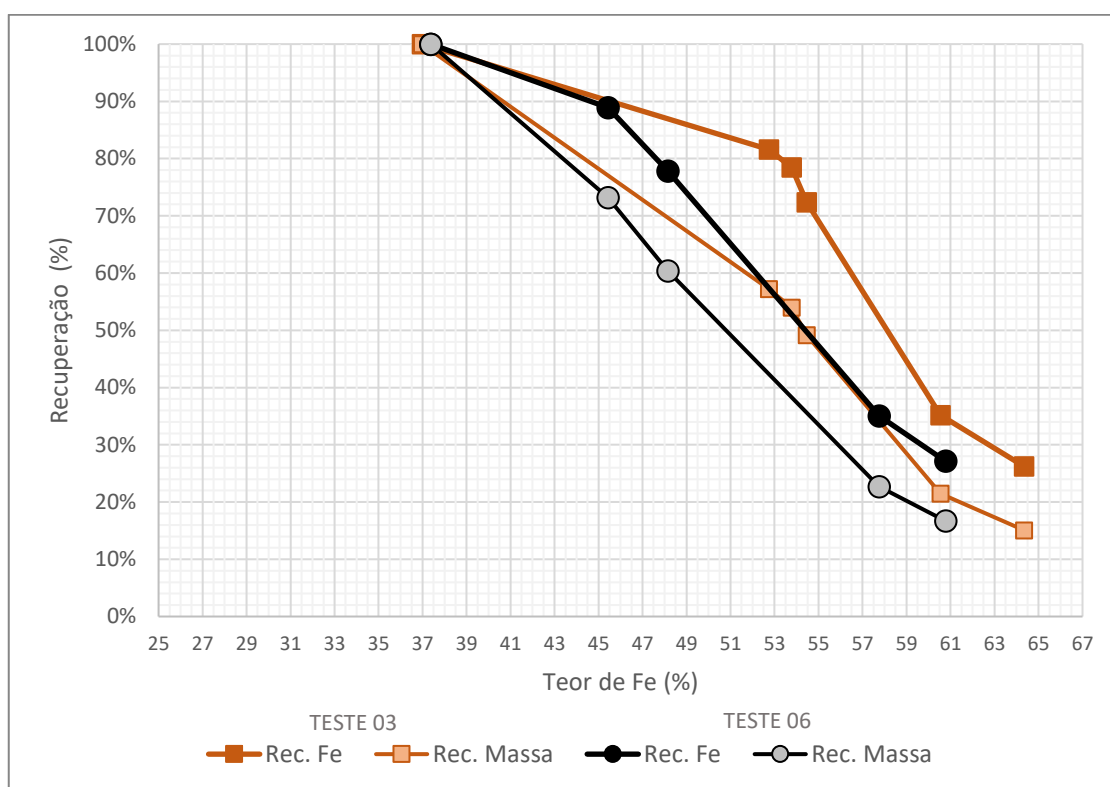


Figura 94 - Comparação das curvas de teor e recuperação - teste 03 e teste 06

Fonte: Próprio Autor

No laboratório, como indicado anteriormente, as amostras são pesadas, secadas e depois pesadas novamente, fluxo que se assemelha ao encontrado na planta industrial, sendo assim os valores de umidade encontrado para o teste 01, 02 e 03 eram de aproximadamente 0,15 % de umidade, enquanto para o teste a umidade natural estavam em torno de 4,5%. Ao analisar a comparação entre os testes indicados, verifica-se que a influência da umidade é mais significativa em materiais mais finos, conforme apresentado na figura 92. Nesse cenário, observa-se uma melhora substancial nos resultados com a secagem prévia. De forma mais sutil, essa melhora também é perceptível nos testes com granulometria -2,0 e -3,0 mm.

6.5. Resultado teste 7 – Formação Ferrífera Bandada – Semi-compacto – Via úmido

Apesar de a característica inicial da planta instalada em Sabinópolis é ser uma unidade de beneficiamento a seco, conforme proposto no trabalho, foi adicionado essa etapa com intuito de verificar o comportamento do material no beneficiamento a úmido. Sendo assim, para esse estudo foi coletado também amostra do semi-compacto.

6.5.1. Resultado teste 07 – Teste <1mm – Scavenger 1 (13000 Gauss)

Para o teste 07 foi indicado uma rota a úmido com o intuito de averiguar os resultados encontrados e por meio dele entender as características do minério analisado. A amostra destinada a alimentação desse teste foi cominuída para menor que 1 mm. Segue na figura 95 os resultados encontrados e ajustados:

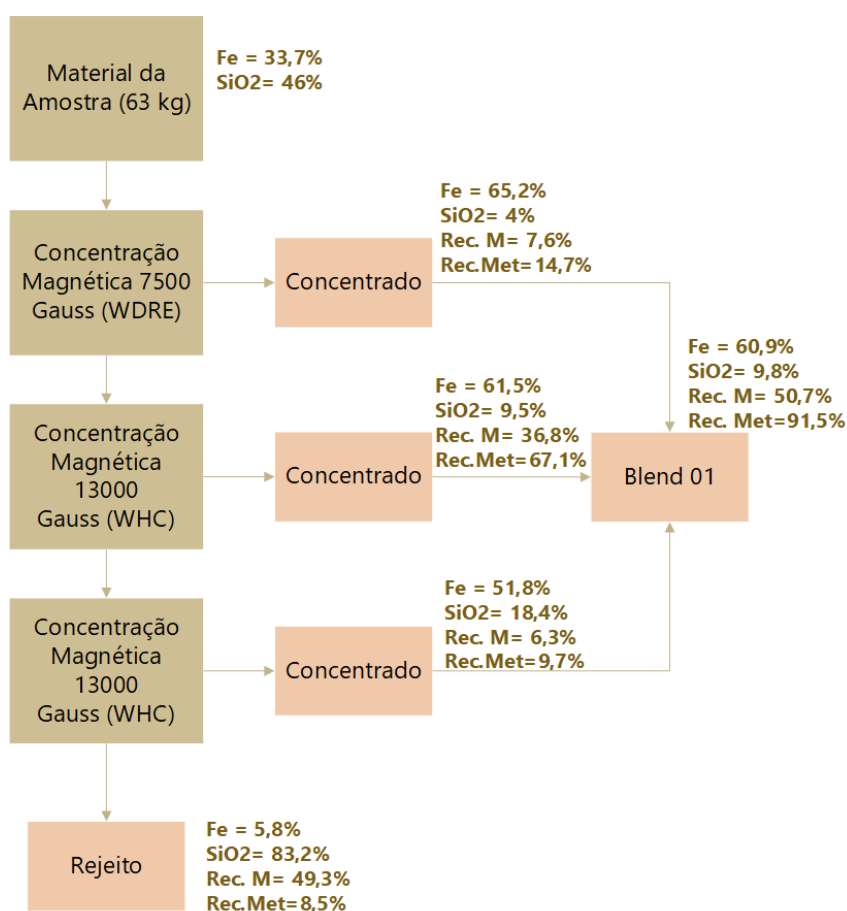


Figura 95 - Resultado teste 07

Fonte: Próprio autor

Segue na figura 96 e figura 97 a curva de teor e recuperação obtidas por meio do fechamento do balanço de massa.

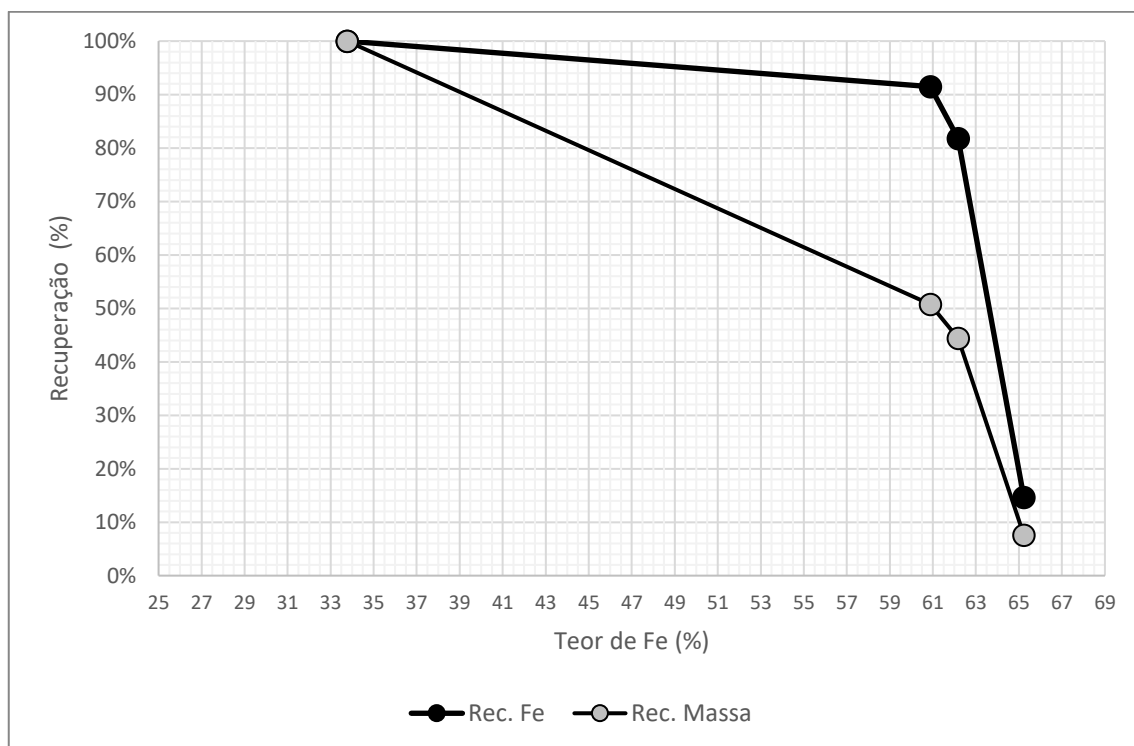


Figura 96 - Curva de teor do ferro e recuperação - teste 07

Fonte: Próprio Autor

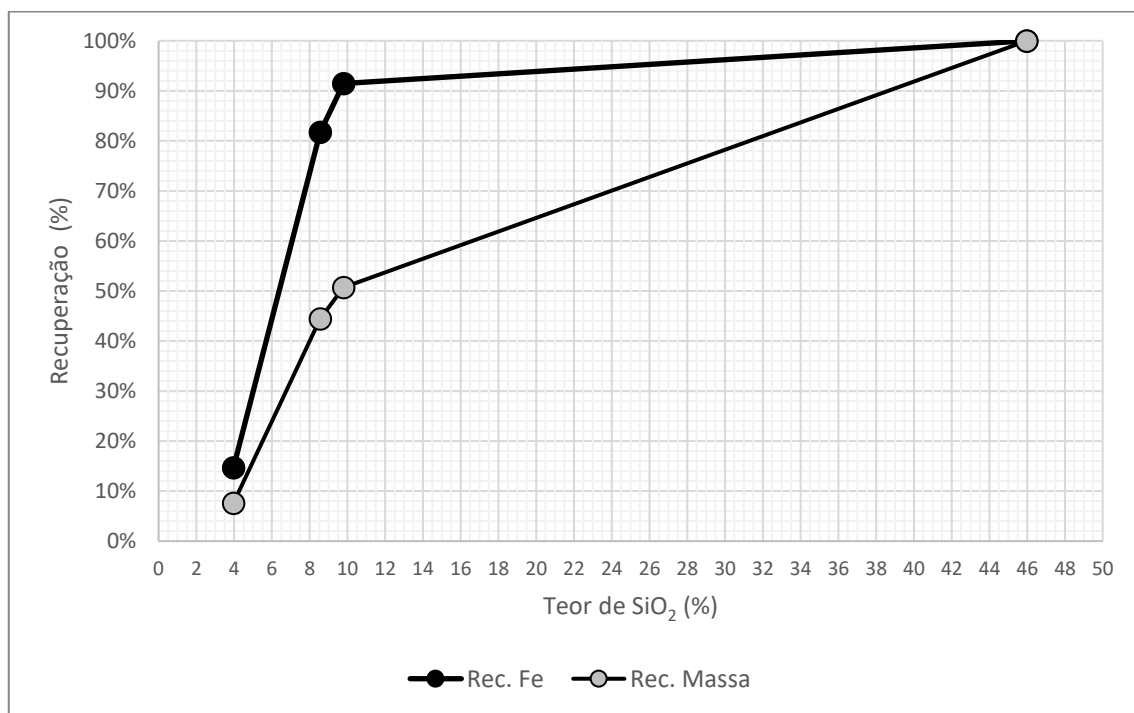


Figura 97 - Curva de teor da sílica e recuperação - teste 07

Fonte: Próprio Autor

Conforme previsto, o teste realizado a úmido demonstrou resultados significativos, especialmente nos estágios iniciais. O blend total alcançou um teor aceitável no mercado tanto para o ferro quanto para a sílica, além de uma recuperação mássica e metalúrgica adequada. Com o intuito de comparar o desempenho do material semi-compacto na rota a seco com secagem e na rota a úmido, segue na figura 98 a comparação entre o teste 00 e o teste 07.

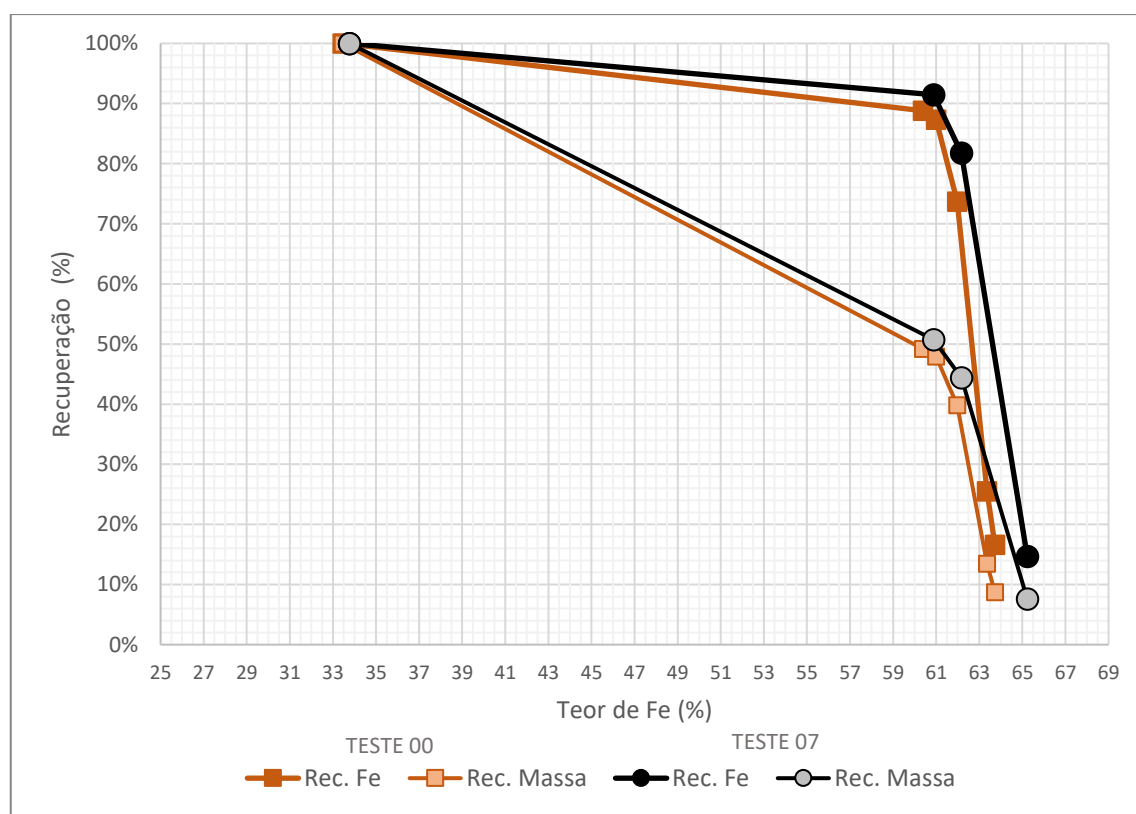


Figura 98 - Comparação das curvas de teor e recuperação - teste 00 e teste 07

Fonte: Próprio Autor

Os dois testes apresentaram resultados semelhantes para a granulometria -1mm, porém, conforme apresentado na curva teor e recuperação, o teste 07 apresentou uma melhora sutil em comparação com o teste 00, sendo o blend total do teste 00 um concentrado com teor de ferro igual a 60,4% e 9,8% de sílica com recuperação mássica próxima a 49,2% enquanto para o teste úmido apresentou um teor de 60,9% de ferro para 9,8% de sílica com uma recuperação de 50,7%, sendo assim para esse cenário específico não foi identificado uma melhora tão significativa nos resultados que justifique a alteração do método de concentração a seco com secagem para o beneficiamento a úmido.

6.6. Resultado dos testes de concentração magnética – Formação Ferrífera Bandada – Compacto – Via seca com secagem

A amostragem realizada na frente de lavra, conforme indicada anteriormente, engloba dois tipos distintos de materiais, sendo o primeiro tipo caracterizado como minério semi-compacto e já o segundo tipo, utilizado neste teste, apresenta características de um minério compacto com uma dureza relativamente superior ao semi-compacto.

6.6.1 Resultado teste 08 – Teste P80=1mm – Scavenger 1 (2500 Gauss)

O teste 08 foi concebido com o propósito de analisar o comportamento do minério compacto e compará-lo com o teste 01, que seguiu a mesma rota proposta, porém para o minério semi-compacto. O objetivo principal é identificar as diferenças na resposta ao campo magnético entre esses materiais, dado que ambas as rotas propostas utilizaram material com granulometria -1 mm. Os resultados devidamente ajustados utilizando o programa Sort® estão apresentados na figura 99.

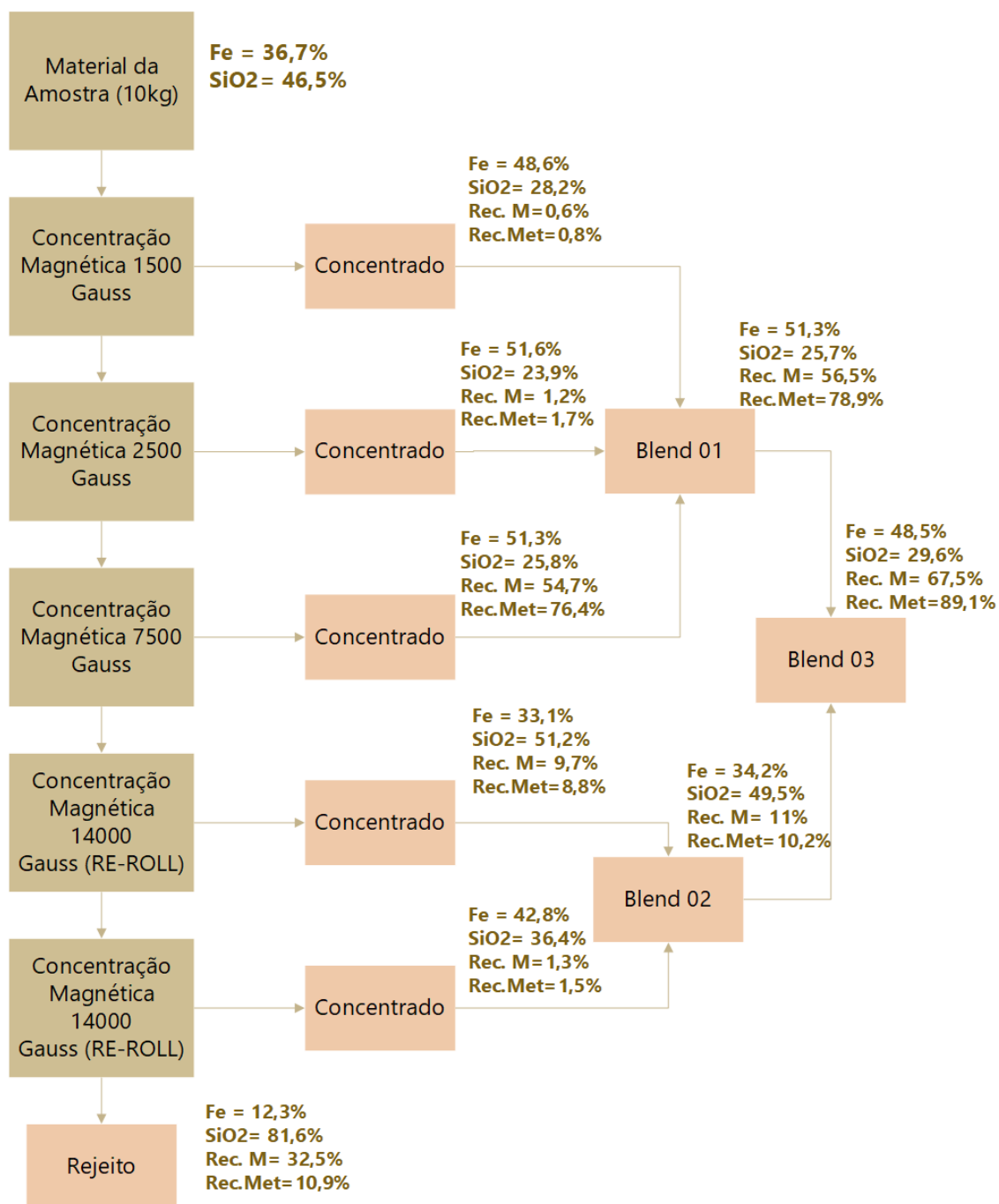


Figura 99 - Resultado teste 08

Fonte: Próprio autor

Segue na figura 100 e figura 101 a curva de teor e recuperação obtidas por meio do fechamento do balanço de massa.

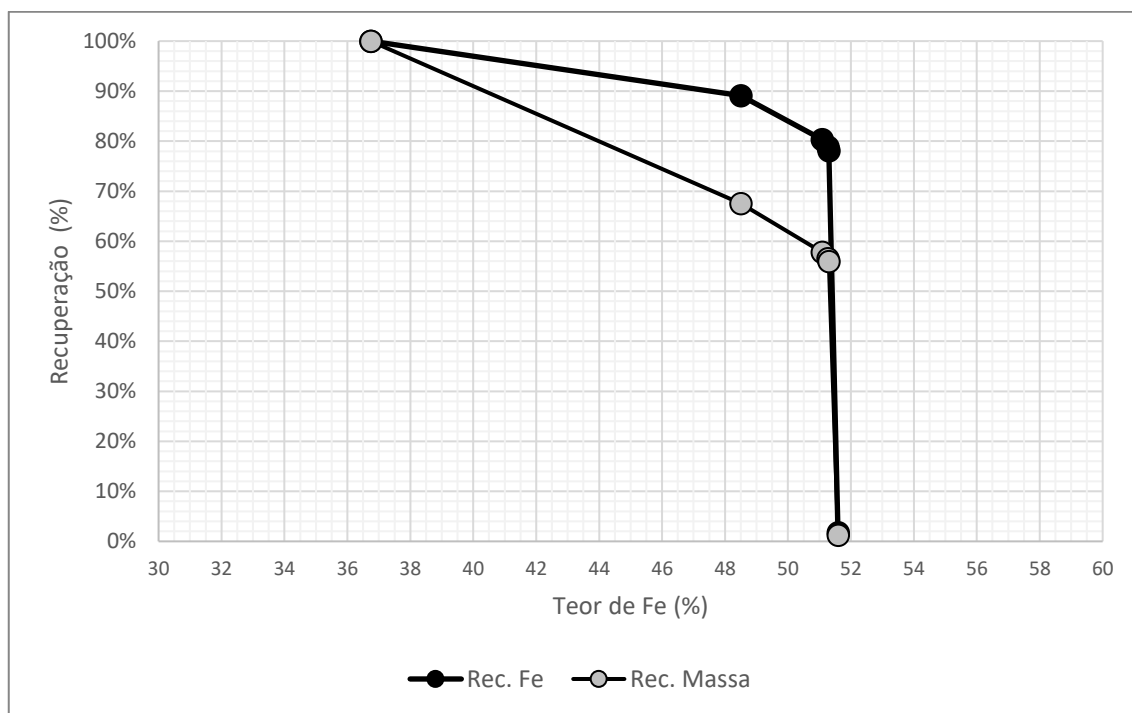


Figura 100 - Curva de teor do ferro e recuperação - teste 08

Fonte: Próprio Autor

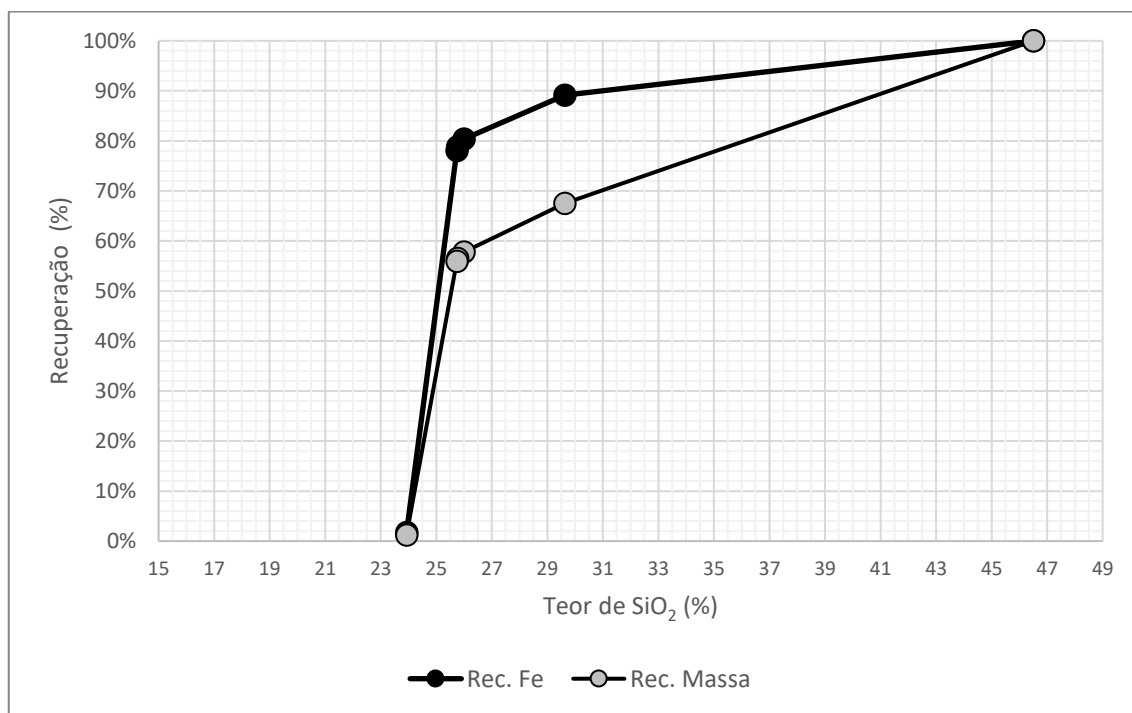


Figura 101 - Curva de teor da sílica e recuperação - teste 08

Fonte: Próprio Autor

A rota apresentada para o material compacto não apresentou resultado satisfatório, pois os produtos apresentaram teores bem abaixo do considerado viável. Isso indica que o material compacto não se comporta da mesma forma que o material semi-compacto para a mesma rota de processo.

Segue na figura 102 registro fotográfico da alimentação do teste 08 no tambor de concentração magnética.



Figura 102 - Alimentação menor que 1 mm – teste 08

Fonte: Próprio autor

As Figuras 103, 104 e 105 ilustram o concentrado resultante da etapa de concentração magnética a 7500 Gauss, além dos concentrados e rejeitos gerados na etapa subsequente de reprocessamento (re-roll), respectivamente. Essas representações visuais são fundamentais para a compreensão detalhada dos resultados obtidos em cada fase do processo.

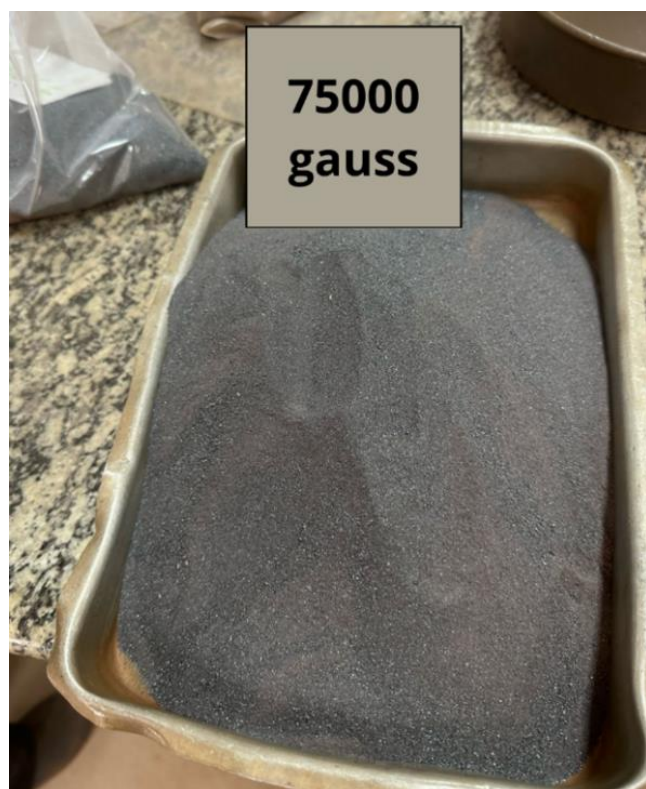


Figura 103- Concentrado da concentração magnética de 7500 Gauss

Fonte: Próprio autor



Figura 104 - Concentrado e rejeito da primeira etapa re-roll

Fonte: Próprio autor



Figura 105 - Concentrado e rejeito da segunda etapa re-roll

Fonte: Próprio autor

Devido a natureza semi-compacto do material utilizado no teste 01, era esperado que ele apresentasse uma maior liberação das partículas com granulometria menor que 1 mm em comparação com o material compacto utilizado no teste 08. Este último demonstrou uma fração de apenas 16% de partículas liberadas nessa granulometria. Sendo assim, fica evidente que a rota indicada apresentou um resultado favorável para o material semi-compacto, principalmente no teste com duas etapas de alta intensidade, entretanto para o material compacto a rota não está adequada.

Corroborando com os resultados observados no teste, foram realizadas análises granulométricas para o teste 01 e o teste 08 para as amostras de cabeça. Essas amostras foram cominuída para menor que 1mm para alimentar os testes mencionados, diferentemente dos ensaios granulométricos da caracterização, nos quais as amostras foram cominuída para -31,5mm. No caso do teste 08, devido a dureza do material, considerou-se apenas a fração P80, ou seja, aproximadamente 80% passante com tamanho inferior a 1 mm. A figura 106 apresenta a granulometria desses materiais. Além disso, na mesma figura, demonstra uma comparação entre as frações passantes nas

peneiras de tamanho menor que 1 mm e menor que 0,150 mm para os testes 01 e 08, juntamente com os respectivos teores nessas granulometrias.

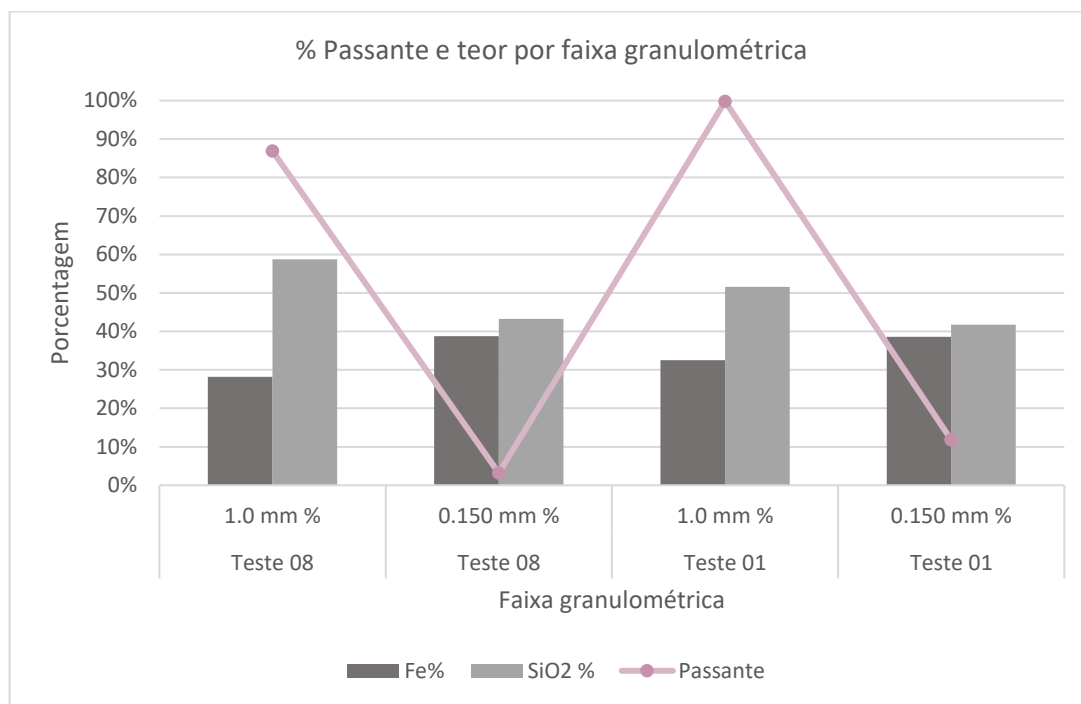


Figura 106 - Teores nas peneiras 1mm e 0,15 mm (teste 01 e teste 08)

Fonte: Próprio autor

Considerando apenas as peneiras com abertura de 1,0mm e 0,150 mm é possível perceber que a amostra do compacto, utilizado no teste 08, foi muito mais resistente ao processo de cominuição.

No teste 08 verifica-se que mais de 70% do material encontra-se retido em peneiras anteriores a de 0,300mm. Indicado na figura 107 a comparação entre o passante para cada peneira (faixa granulométrica) e o grau de liberação esperado.

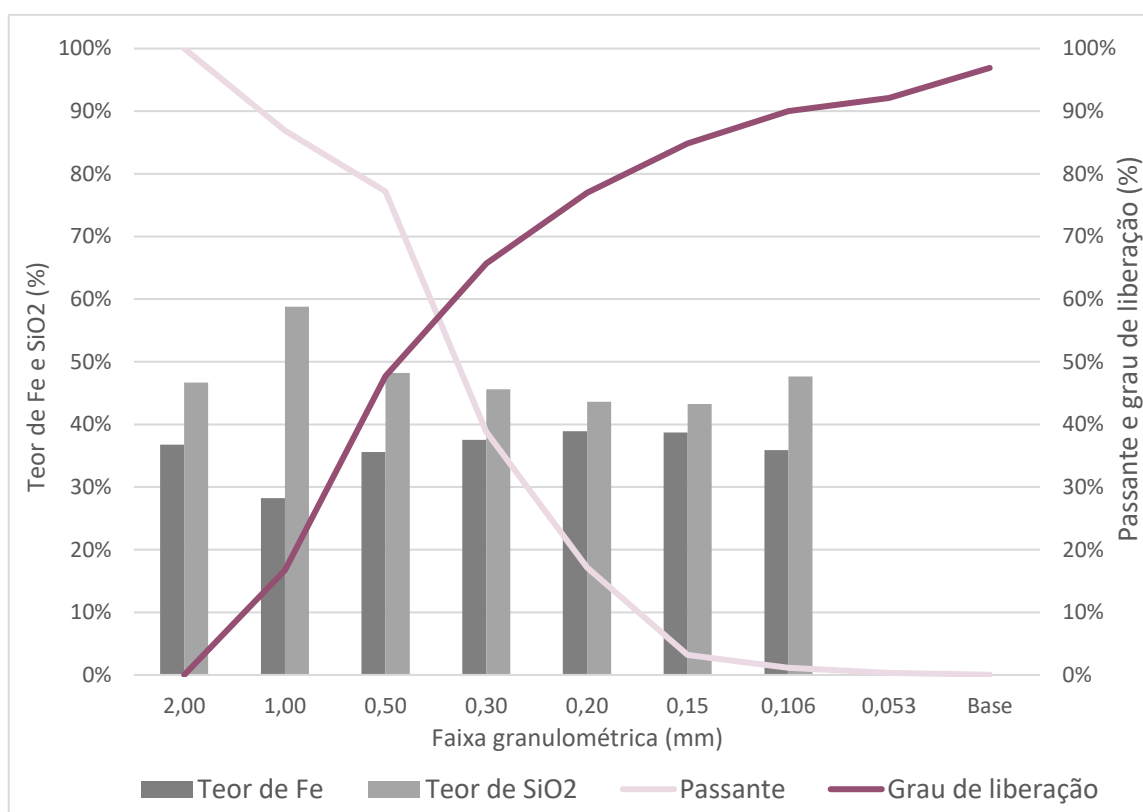


Figura 107 - Granuloquímica e grau de liberação por faixa granulométrica do teste 08- amostra cabeça

Fonte: Próprio autor

Para as amostras retidas nas peneiras 0,053 e base não houve massa suficiente para análise química, conforme apresentado na tabela 18.

Tabela 18 - Granuloquímica amostra teste 08

Fonte: Próprio autor

Etapa	Malha peneira	Retido (%)	Fe%	SiO ₂ %
Amostra cabeça (<1,00mm)	1.0 mm %	13,13%	28,23%	58,77%
Amostra cabeça (<1,00mm)	0.500 mm %	9,67%	35,57%	48,23%
Amostra cabeça (<1,00mm)	0.300 mm %	38,39%	37,53%	45,59%
Amostra cabeça (<1,00mm)	0.200 mm %	21,69%	38,90%	43,61%
Amostra cabeça (<1,00mm)	0.150 mm %	13,95%	38,72%	43,24%
Amostra cabeça (<1,00mm)	0,106 mm %	2,03%	35,90%	47,62%
Amostra cabeça (<1,00mm)	0,053 mm %	0,81%	Massa insuficiente	Massa insuficiente
Amostra cabeça (<1,00mm)	Base %	0,30%	Massa insuficiente	Massa insuficiente

As curvas na figura 107 se interceptam em torno de 0,4 mm, o que corresponde a 55% de passante do material e a 55% do grau de liberação esperado.

Na figura 90 está apresentado a granuloquímica para o blend total encontrado do teste 08.

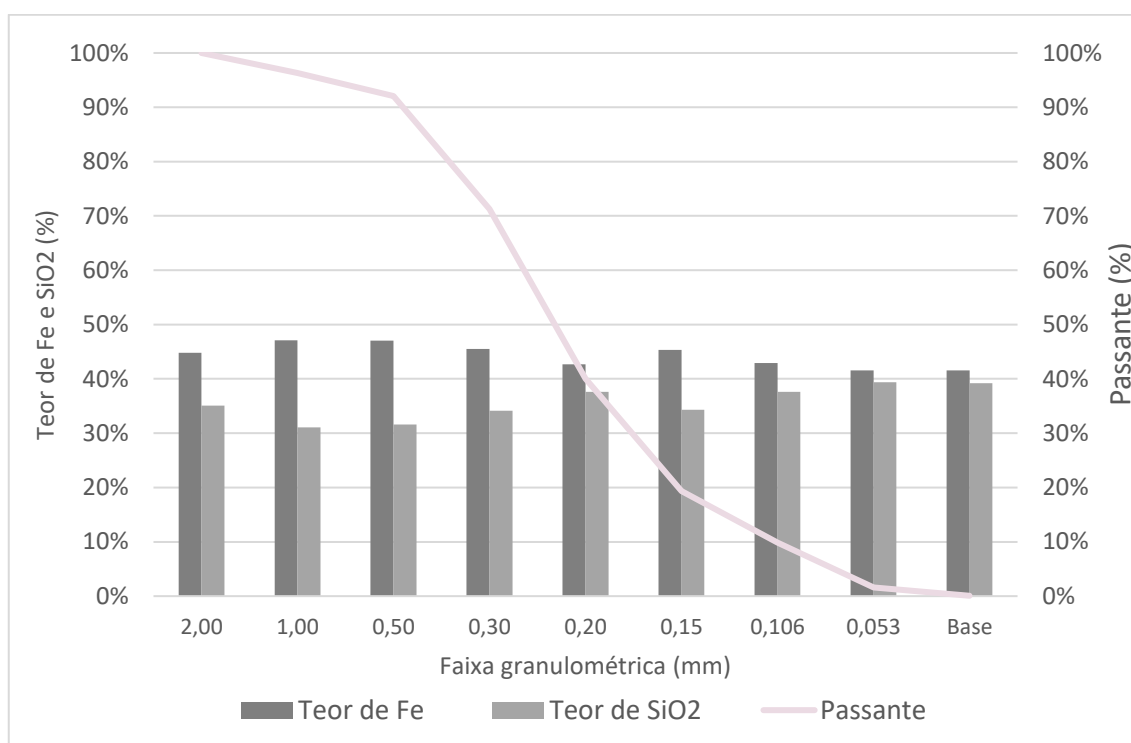


Figura 108 - Granuloquímica teste 09 - Blend Total

Fonte: Próprio autor

Inicialmente, esperava-se que os testes realizados com o scavenger 1, operando a uma intensidade de 2500 Gauss, produzissem resultados superiores aos obtidos com o scavenger de 7500 Gauss. Em decorrência dessa expectativa, optou-se por adotar o modelo de 2500 Gauss como padrão para os testes. No entanto, após a análise dos resultados, verificou-se que essa configuração não proporcionou o desempenho esperado e, portanto, não representou o fluxo ideal para a operação.

6.7 Resultados concentração magnética – Formação Ferrífera Bandada – Compacto – Híbrida (concentração a seco com secagem + concentração a úmido)

Com base nas observações dos testes anteriores, constatou-se que o teste 00 apresentou um resultado satisfatório quando relacionado ao minério semi-compacto. No entanto, ao tratar o compacto, os testes resultaram em teores abaixo dos padrões de mercado, que seria teor de Fe acima de 60% e SiO₂ abaixo de 10%. Para otimizar os resultados, foi proposta uma abordagem híbrida na rota do teste 09.

6.7.1 Resultado teste 09 – Teste P80=1mm - Concentração híbrida

Para esta rota, foi utilizada uma fração de aproximadamente 80% passante em malha menor que 1 mm, resultando de um processo de cominuição específico para alcançar essa granulometria. Em seguida, essa fração foi separada em duas amostras com base na retenção nas peneiras. O minério retido na peneira de 1mm voltava para o britador de rolos para ser cominuído. O passante na peneira de 1mm e retido na peneira de 0,3 mm foi direcionado para o teste a seco com secagem e por último, o passante na peneira de 0,3mm foi encaminhado para o beneficiamento a úmido. Os resultados obtidos estão representados na figura 109.

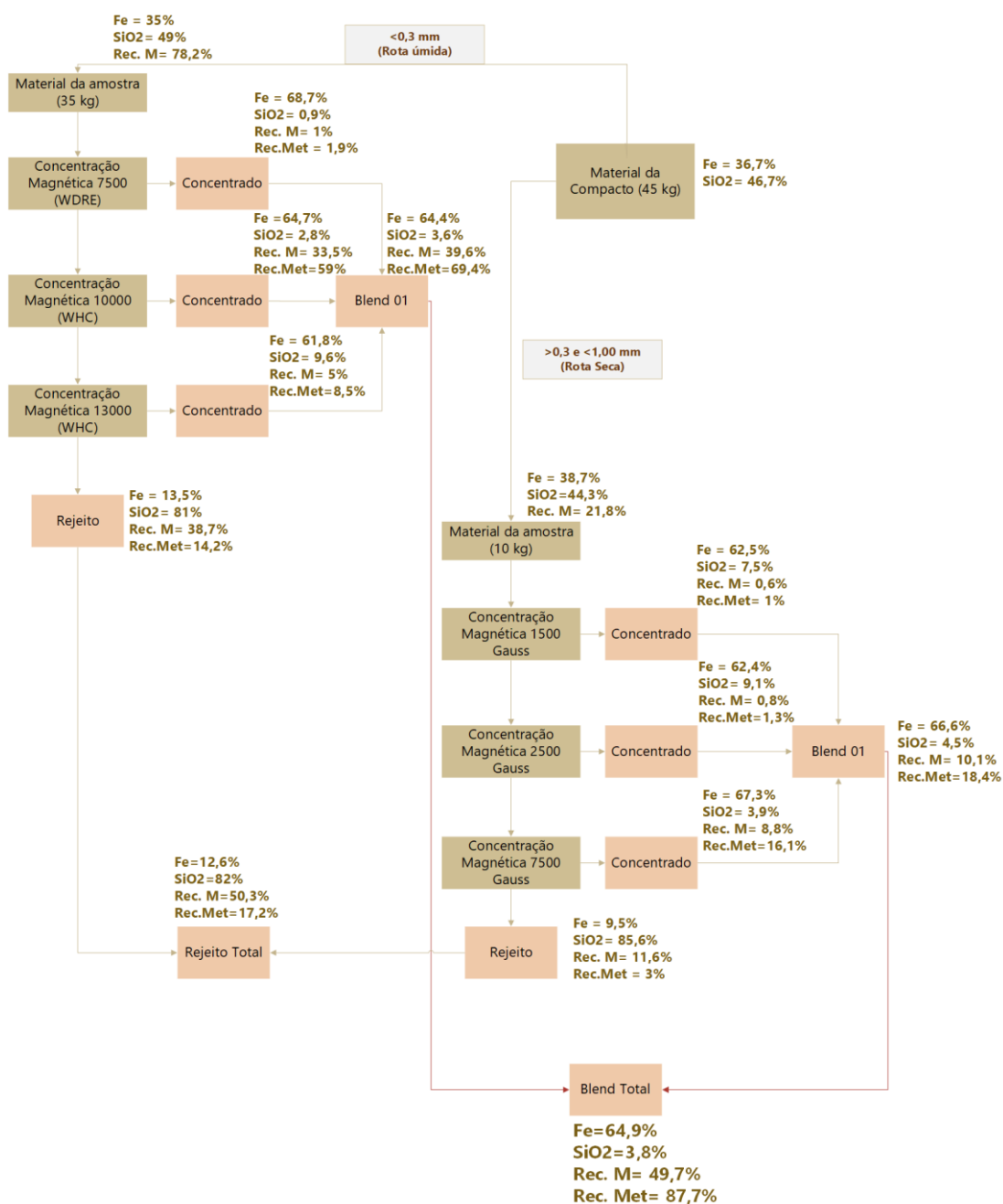


Figura 109 - Resultado teste 09

Fonte: Próprio autor

Na etapa úmida, a fração com granulometria inferior a 0,3 mm foi processada, alcançando os resultados demonstrados na figura 110. A figura 111 apresenta um registro fotográfico do concentrado filtrado obtido nesta etapa.

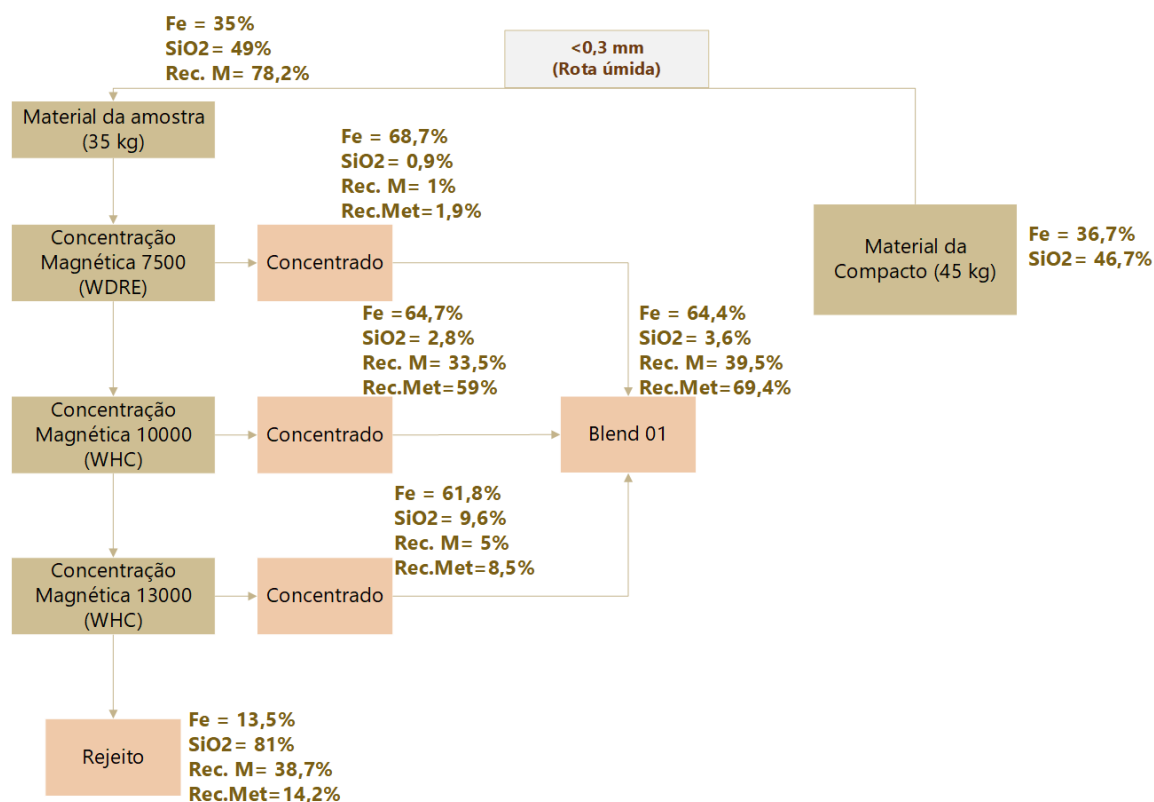


Figura 110 - Resultado teste 09 (parte úmida)

Fonte: Próprio Autor



Figura 111 - Concentrado filtrado proveniente do teste 09 (etapa úmida)

Fonte: Próprio Autor

Segue na figura 112 e figura 113 a curva de teor e recuperação obtidas por meio do fechamento do balanço de massa para essa etapa do teste.

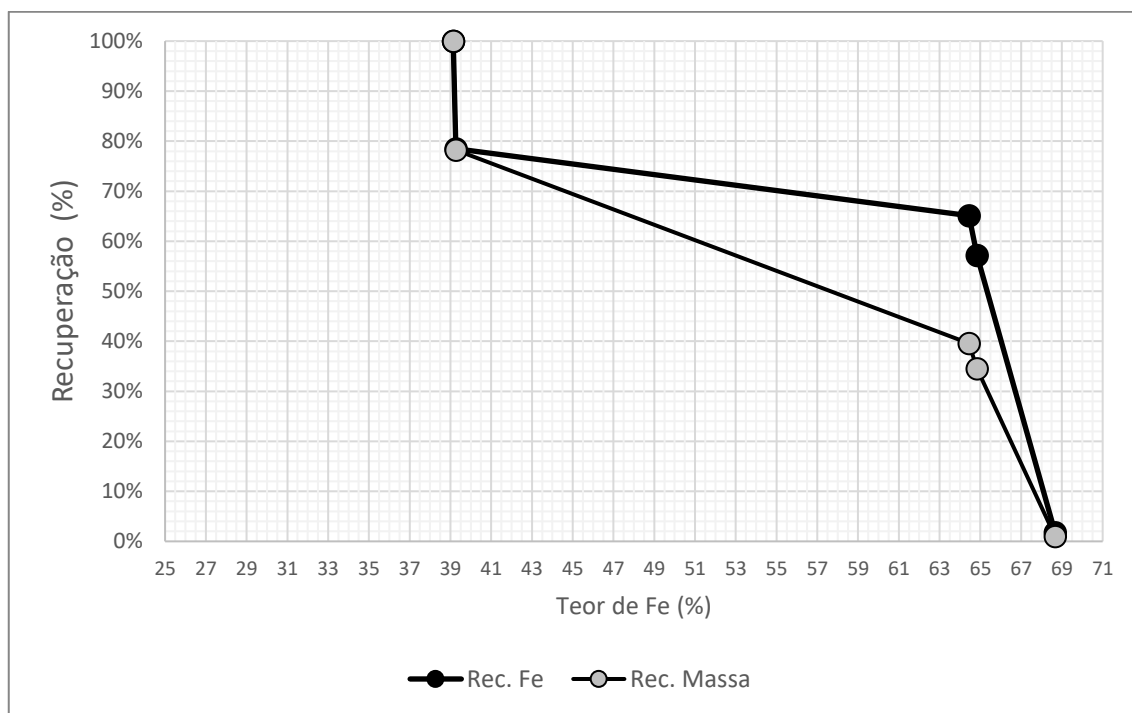


Figura 112 - Curva de teor do ferro e recuperação - teste 09 (parte úmida)

Fonte: Próprio Autor

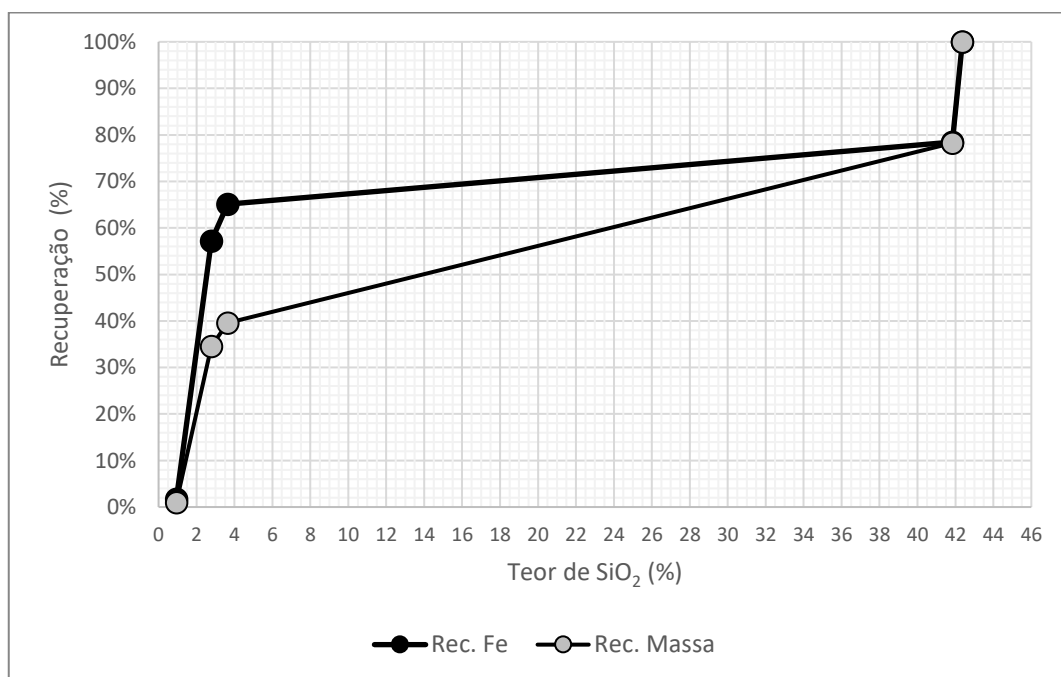


Figura 113 - Curva de teor da sílica e recuperação - teste 09 (parte úmida)

Fonte: Próprio Autor

Devido a granulometria mais fina e ao maior grau de liberação em comparação com o teste 07, esse material demonstrou uma concentração com resultados significativamente melhores, conforme indicado na figura 114.

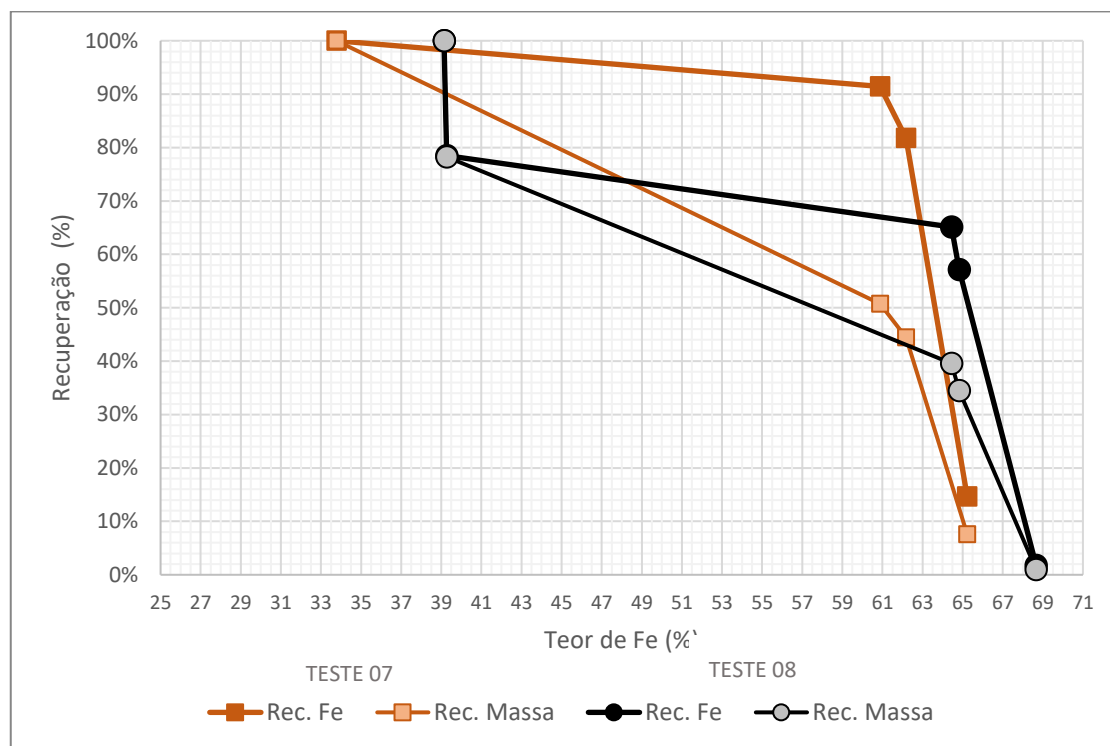


Figura 114 - Comparação das curvas de teor e recuperação - teste 07 e teste 08 (parte úmida)

Fonte: Próprio Autor

Ademais, o processo de concentração úmida permitiu a remoção de partículas finas que prejudicavam a eficiência da concentração a seco. De maneira análoga, a concentração a seco com etapa de secagem, após a remoção das partículas finas, apresentou um teor de ferro superior aos demais testes, conforme indicado na figura 115 e nas curvas de teor e recuperação apresentadas nas figuras 116 e 117.

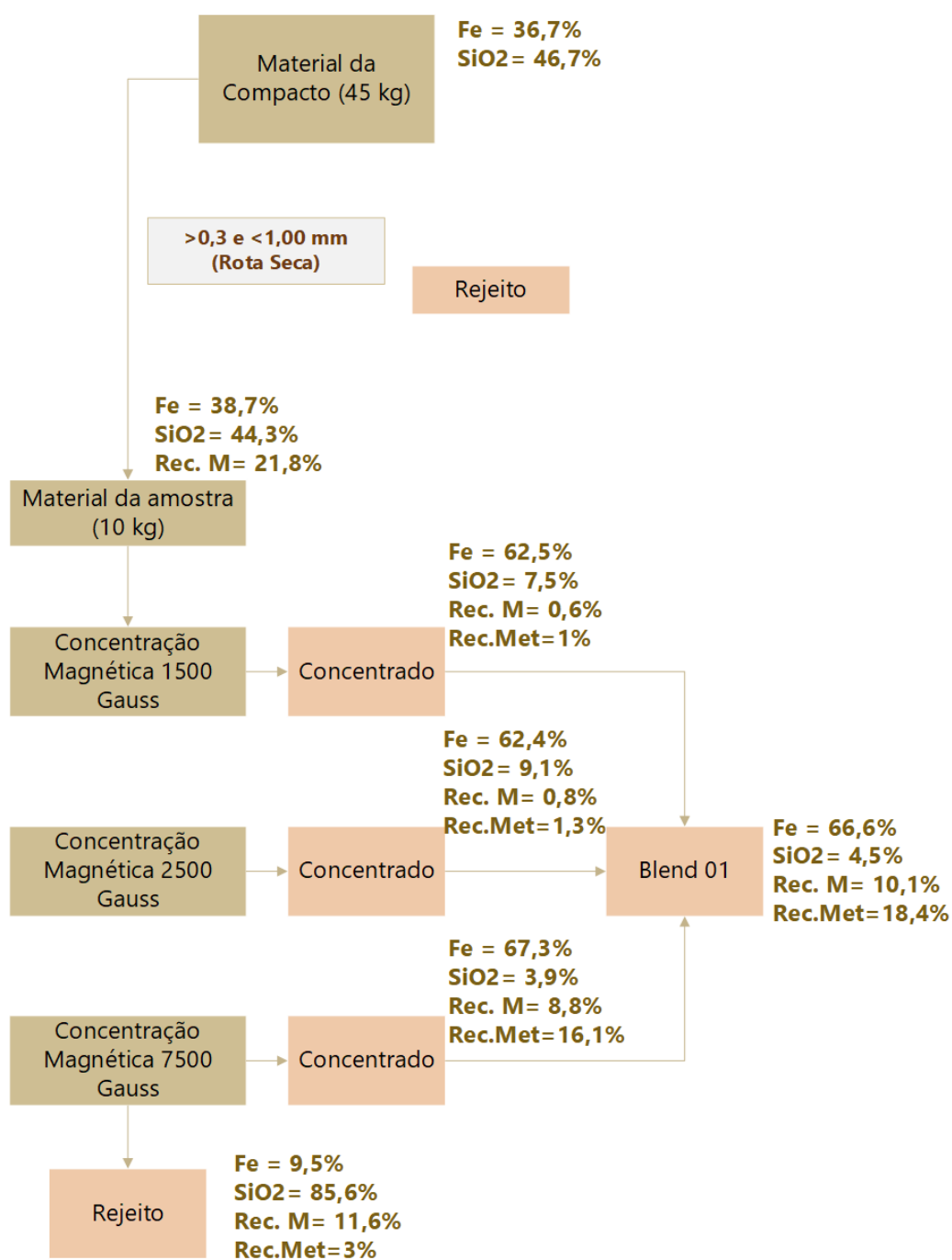


Figura 115 - Resultado teste 09 (Parte seca)

Fonte: Próprio autor

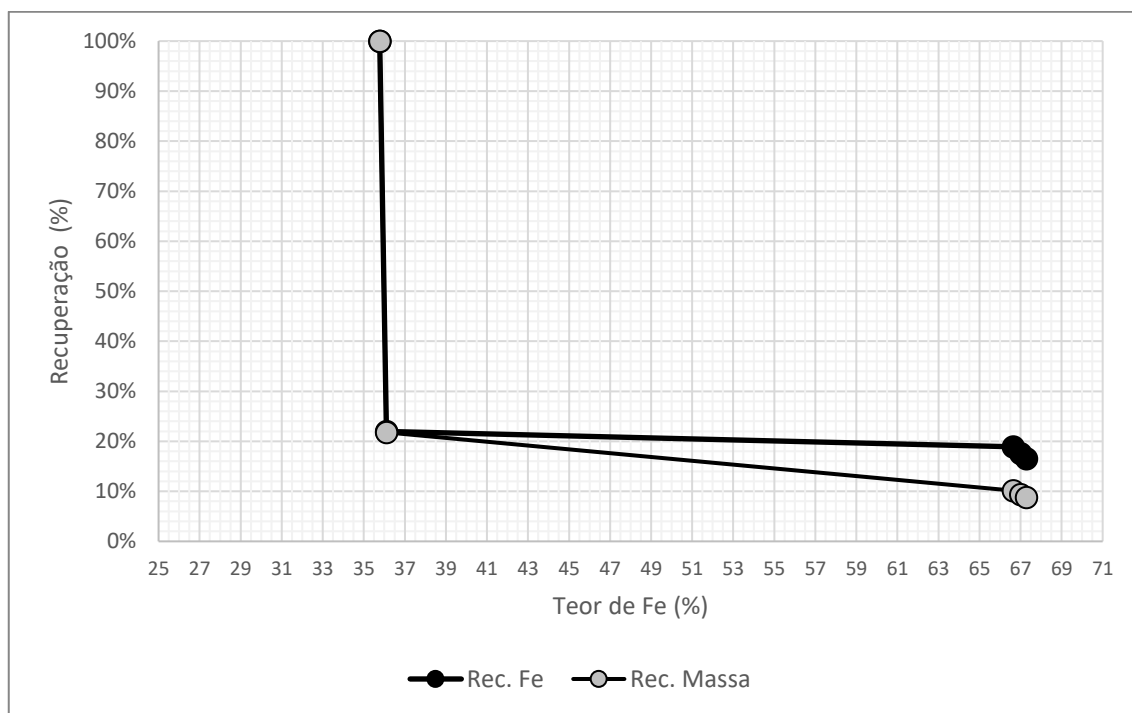


Figura 116 - Curva de teor do ferro e recuperação - teste 09 (parte seca)

Fonte: Próprio Autor

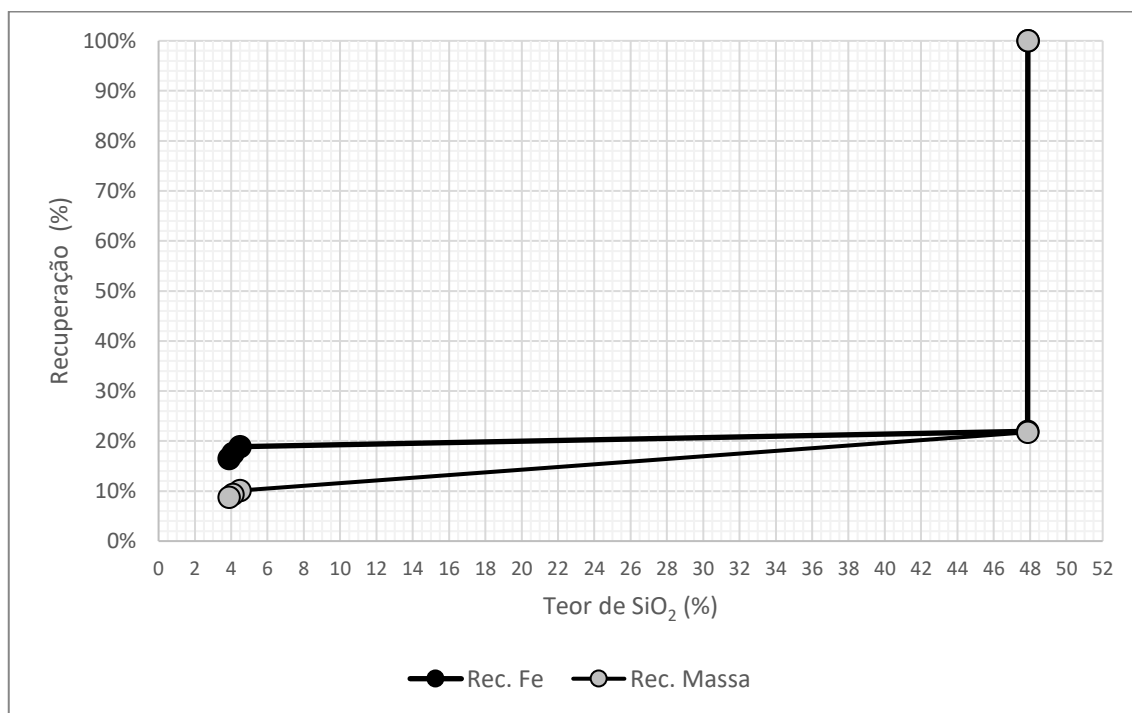


Figura 117 - Curva de teor da sílica e recuperação - teste 09 (parte seca)

Fonte: Próprio Autor

Segue na figura 118 registro fotográfico da alimentação do minério menor que 1 mm e maior que 0,3 mm no tambor de concentração magnética.



Figura 118 - Alimentação do minério menor que 1mm e maior que 0,3mm

Fonte: Próprio autor

É ilustrado das figuras 119, 120 e 121, o concentrado proveniente de cada etapa da concentração magnética.

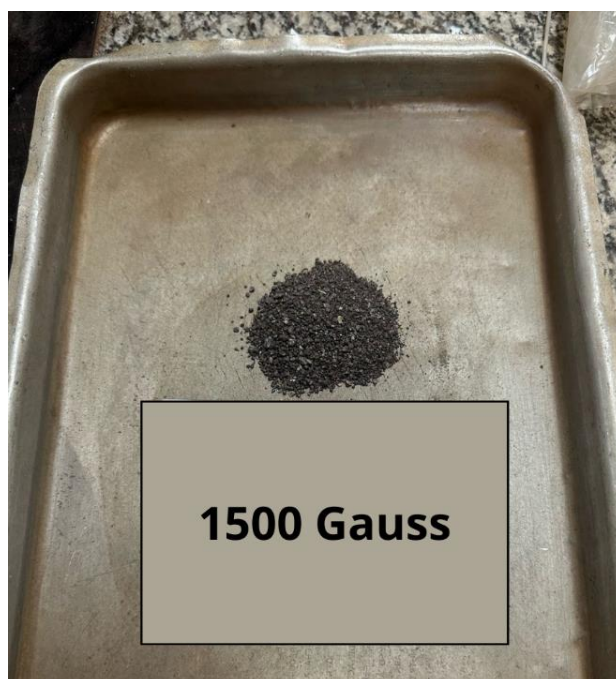


Figura 119- Concentrado do primeiro estágio teste 09

Fonte: Próprio autor

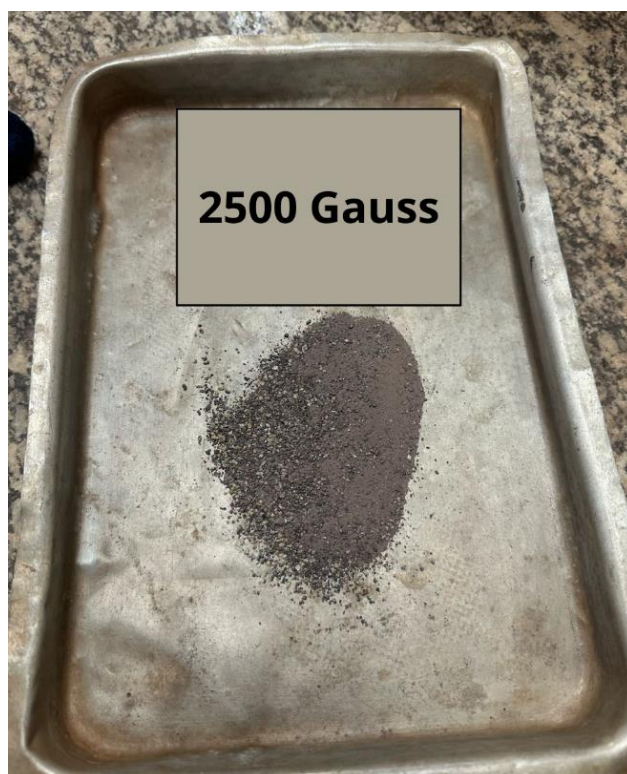


Figura 120 - Concentrado do segundo estágio teste 09

Fonte: Próprio autor



Figura 121 - Concentrado do terceiro estágio teste 09

Fonte: Próprio autor

A proposta da rota híbrida indicada, onde a fração mais fina é destinada a concentração a úmido e a parte mais grossa ao beneficiamento a seco gerou um resultado satisfatório no blend total (concentrado da rota a úmida + concentrado da rota seca) com teor de ferro de 64,9% e 3,8 % de sílica, sendo esse teor um teor considerado alto no mercado e para esse teor foi alcançado uma recuperação mássica de 49,7% e uma recuperação metalúrgica de 87,7%. Com o objetivo de aumentar ainda mais a recuperação mássica e metalúrgica, consequentemente diminuindo o teor de ferro no blend total, pode-se considerar a possibilidade de adicionar etapas de re-rolls na parte do teste a seco. Além disso, também pode ser considerado ajustes na intensidade do carrossel no beneficiamento a úmido para aumentar a captura de mais produto.

A eficiência dessa rota proposta não foi observada nem na rota totalmente a seco, nem na rota exclusivamente a úmido. Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato de que a concentração a seco é mais eficiente para partículas grossas, enquanto a concentração a úmido é mais adequada para partículas finas. Ao separar essas duas frações, o minério direcionado ao processo úmido está completamente liberado, resultando em um produto de alta qualidade para essa etapa. Diferentemente do que ocorreu no teste 08, onde as

partículas finas prejudicaram a concentração da fração mais grosseira, nesta etapa foi possível aumentar a eficiência do beneficiamento a seco com etapa de secagem. Ao direcionar o minério com granulometria inferior a 1 mm diretamente para o processo úmido, há o risco de arrastar partículas ainda não liberadas e perder partículas finas previamente liberadas, devido a saturação da matriz. Por outro lado, ao encaminhar o minério -1 mm diretamente para o processo a seco, diminui-se a capacidade de concentrar efetivamente as partículas finas de ferro, pois há uma alta probabilidade de essas partículas permanecerem em suspensão ou serem arrastadas para o não magnético. Uma alternativa, conforme proposto no teste 09, é apresentar dois fluxos distintos de acordo com a granulometria, cada um adaptado as especificidades de cada processo de beneficiamento.

7 CONCLUSÕES

Para esse estudo foram avaliadas diversas estratégias para aprimorar a concentração de minério de ferro em uma usina de processamento mineral, utilizando técnicas de secagem e concentração magnética, focando principalmente no aumento da recuperação mássica e metalúrgica. Nos testes realizados foi comprovado a importância da secagem para o aumento da eficiência na concentração a seco, situação que pode ser verificada para os testes que seguiram parâmetros e rotas iguais, com alimentação do mesmo minério, porém variando a umidade. Para o teste 01 e teste 04 utilizou-se a mesma amostra, a qual foi cominuída a -1mm, a diferença é que a amostra que alimentou o teste 01 foi previamente secada, enquanto a do teste 04 estava a umidade natural. O teste 01 apresentou um concentrado com teor de ferro de 57,5% e 7,2% de sílica para uma recuperação mássica de 55,81% e metalúrgica de 88,1%, enquanto o concentrado do teste 04 apresentou um teor de 49,30% de ferro e 13,14% de sílica para uma recuperação mássica de 24,31% e metalúrgica de 18,19%. O mesmo ocorreu para os demais testes que demonstraram relação entre eficiência na concentração magnética com a umidade do minério alimentado.

Uma das principais questões que têm contribuído para a ineficiência operacional da planta instalada é a heterogeneidade na frente de lavra. Inicialmente, a planta era alimentada apenas com minério friável. Posteriormente, iniciou-se a fase de processamento de minério semi-compacto e, em breve, será atingida a fase do minério compacto. Com o objetivo de prever e implementar as adequações necessárias para se adaptar as novas características dos recursos minerais processados, foram realizados diversos testes com minério semi-compacto e compacto. Dentre os testes realizados para o semi-compacto, identificou-se que os melhores resultados encontrados foram no teste 00 e teste 07, porém, por se tratar de um leve aprimoramento em comparação ao teste a úmido, para essa característica de minério foi considerado que o teste 00 apresentou o melhor resultado uma vez que não demandaria grandes alterações nos equipamentos de concentração existente na unidade atual. Para o teste 00 foi encontrado um blend total com teor de 60,4% de ferro e 9,8% de sílica com recuperação mássica de 49,2% e recuperação metalúrgica de 88,8%. Para melhorar ainda mais esse resultado será necessário mais testes com o re-roll, a fim de encontrar e definir a melhor relação entre o aumento da

recuperação mássica e metalúrgica sem comprometer significativamente o teor de ferro e sílica. Além disso, conforme observado no teste 03, a granulometria de alimentação atual da planta de concentração magnética, que é -3,0mm, não proporciona um grau de liberação adequado para obter uma concentração viável. Portanto, são necessárias a instalação de etapas adicionais de cominuição e redução das malhas das peneiras. O teste 00 demonstrou um cenário favorável para um teste em escala industrial, devido aos resultados positivos obtidos para a alimentação <1mm.

Para o compacto, que apresenta maior resistência a cominuição e um grau de liberação alcançado em faixas menores em comparação ao semi-compacto, a mesma configuração proposta para o semi-compacto não apresentou resultados satisfatórios, como indicado nos resultados do teste 08. Assim, foi sugerida uma rota híbrida, uma concentração a seco com secagem com uma etapa de concentração a úmido, considerando a premissa da mina de utilizar o menor volume de água possível e evitar altos custos com aquisição de equipamentos robustos. A rota híbrida apresentou resultados satisfatórios, com um blend total de 64,9% de ferro e teor de sílica de 3,8% e recuperação mássica foi de aproximadamente 50% e a recuperação metalúrgica próxima e 88%.

Conforme evidenciado, os resultados da operação da planta em Sabinópolis para o alvo em estudo apresentaram uma média de 58% de ferro e 11% de sílica para o concentrado produzido, com uma recuperação mássica média de 35% e recuperação metalúrgica de 53%. A rota proposta para o semi-compacto, conforme sugerido no teste 00, gerou um concentrado com teor médio de ferro de 62%, sílica de 7,4%, recuperação mássica de 39,8% e recuperação metalúrgica de 73,7% para o blend 01, ou seja, sem considerar a etapa do re-roll para aumentar a recuperação mássica. Para o compacto, conforme o Teste 09, obteve-se um teor de ferro de 64,9%, sílica de 3,8%, recuperação mássica de aproximadamente 50% e recuperação metalúrgica de 87,7%. Dessa forma, entende-se que o objetivo do trabalho foi atingido, visto que foram propostas estratégias eficazes para a otimização da planta atual. As estratégias adotadas visam a melhoria do processo de beneficiamento, contribuindo significativamente para a eficiência operacional da usina e para a maximização do aproveitamento dos recursos minerais de forma sustentável.

A análise financeira das propostas de melhoria para a planta semi-compacto e compacto revelou um aumento significativo no faturamento anual.

Para a situação atual, a planta possui uma capacidade de alimentação de aproximadamente 600 kt/ano, com uma recuperação mássica de 35%, resultando em um total de 210 kt/ano de concentrado, com teor de Fe de 58% e teor de SiO₂ de 11%. O valor do concentrado com base na fórmula *netback*, é de R\$ 113,52, gerando um valor médio anual de R\$ 23.839.200.

Na proposta de melhoria o itabirito semi-compacto, a recuperação mássica aumentou para 49,2%, elevando o total de concentrado para 295,2 kt/ano, com um teor de Fe de 60,4% e teor de SiO₂ de 49,2%. O valor do concentrado passou a ser de R\$ 179,43, resultando em um valor médio anual de R\$ 52.967.736. Isso representa um aumento de R\$ 29.128.536 no faturamento anual.

Para o itabirito compacto, a proposta de melhoria sugere uma recuperação mássica de 50%, aumentando o total de concentrado para 300 kt/ano, com um teor de Fe de 64,9% e teor de SiO₂ de 3,8%. O valor do material, com base na fórmula *netback*, passou a ser de R\$ 358,03, gerando um valor médio anual de R\$ 107.409.000. Isso corresponde a um aumento de R\$ 83.569.800 no faturamento anual.

8 REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 6023: Informação e documentação - Referências - Elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

ALKMIM, F. F., Kuchenbecker, M., Reis, H. L. S., & Pedrosa-Soares, A. C. (2017). **The Araçuaí Belt**. In Heilbron, M., Cordani, U. G., & Alkmim, F. F. (Eds.), São Francisco Craton, Eastern Brazil. Regional Geology Reviews.

ANM/SRDM; USGS-Mineral Commodity Summaries. Produção mundial de minério de ferro em 2018. Disponível em: <https://www.gov.br>. Acesso em: 07 abr. 2024

ARRUDA, E.B., Facanha, J.M.F., Pires, L.N., Assis, A.J., Barrozo, M.A.S. **Conventional and modified rotary dryer: Comparison of performance in fertilizer drying**. Federal University of Uberlândia, Chemical Engineering School, 38400-902 Uberlândia, MG, Brazil. Artigo publicado em: 30 de julho de 2009.

BARROTE, Vitor Rodrigues. **A sequência portadora de formações ferríferas de Guanhões**, Minas Gerais, Brasil. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. Orientação: Prof. Dr. Carlos Alberto Rosière.

BERK, Z. (2018). **Food Process Engineering and Technology** (Third Edition). Food Science and Technology, pp. 513-566. Chapter 22 - Dehydration. Professor (Emeritus), Department of Biotechnology and Food Engineering, TECHNION, Israel Institute of Technology, Israel. Disponível online em 23 de fevereiro de 2018.

BOMFIM, M. R. **Avaliação de impactos ambientais da atividade minerária**. Cruz das Almas, BA: UFRB, 2017. 46p.

BRANDÃO, P. R. G.; Cançado, R. Z. L.; Santos, L. D.; Vasconcelos, O. R. **Caracterização Mineralógica e Tecnológica**. In: VALADÃO, G. E. S.; ARAUJO, A. C. (Ed.). Introdução ao Tratamento de Minérios. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. p. 27-61.

CHAVES, A. P.; L. FILHO, L. de S.; BRAGA, P. F. A. Flotação. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. (Ed.). **Tratamento de Minérios**. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

CHAVES, Arthur P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. 3. ed. São Paulo: Signus Editora, 2007. Coleção Teoria e prática do tratamento de minérios, v. 1. 280p.

CORNELL, R. M. e SCHWERTMANN, U. (1996) **The Iron Oxides: Structure, properties, reactions, occurrence and uses**. VCH Publishers, New York.

CORNEJO, F. (2003). **Secagem como método de conservação de frutas**. [S.l.]: Embrapa Agroindústria de Alimentos.

CRISTIE, T.; BRATHWAITE, B. **Mineral commodity report 15 – iron**. New Zealand: Institute of Geological and Nuclear Science Ltd. 1997.

DUARTE, H. A. FERRO – **Um Elemento Químico Estratégico que Permeia História, Economia e Sociedade**. Química Nova, vol. 42, no. 10, p. 1146-1153, 2019. DOI: 10.21577/0100-4042.20170443.

GAES, Maria Alice Cabral; POSSA, Mario Valente; LUZ, Adão Benvindo da. **Amostragem de minérios**. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1991. 48 p.: il. - (Série Tecnologia Mineral, 49). ISSN 0103-7382. ISBN 85-7227-012-7

GOMES, C. B. **Técnicas analíticas instrumentais aplicadas a geologia**. Editora Edgard Blucher Ltda., São Paulo, 1984, 251p.

GONÇALVES, D. L. (2018). **Análise comparativa dos separadores magnéticos**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Minas. Orientador: Professora Andrea Bicalho.

GONZAGA, Ligia Mara. **Separação Magnética a úmido de minérios de ferro itabiríticos**. 2014. 163 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

GROSSI SAD, J. H., CHIODI FILHO, C., SANTOS, J. F., MAGALHÃES, J. M. M. & CARELOS, P. M. (1990 b). **Geoquímica e origem da formação ferrífera do Grupo Guanhães**, Distrito de Guanhães, MG, Brasil. Anais, 36o Congr. Bras. Geologia, Natal, Vol. 3, p. 1241-1253.

GROSSI-SAD, J. H., Magalhães, J. M. M., & Carelos, P. M. (1989). **Geologia do Distrito de Guanhães**, Minas Gerais. Relatório Interno, Belo Horizonte, DOCEGEO-GEOSOL, 252 p. In: Grossi-Sad, J. H., Mourão, M. A. A., Guimarães, M. L. V., & Knauer, L. G. (1997). Geologia da Folha Conceição do Mato Dentro.

HENLEY, K. J. **Ore-dressing mineralogy – A review of techniques, applications and recent developments**. Mineral Dressing, Vol. 7, 1983, p175-200.

INBRAS. Produto. Disponível em: <http://www.inbras.com.br/produto/>. Acesso em: 10/06/2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 02 jan. 2023.

KEEY, R. B. **Introduction to industrial drying operations**. Oxford: Pergamon Press, 1978.

KING, R.P. **Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems**. Great Britain: Butterworth-heinemann, 2001. ISBN 0-7506-4884-8.

KLEIN, C. **Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origin**. *American Mineralogist*, v. 90, p. 1473-1499, 2005.

KUCHENBECKER, M., & Sanglard, J. C. D. (2018). **The role of detachment and interlayer shear zones in the structural evolution of the southern Espinhaço range, eastern Brazil**. *Journal of South American Earth Sciences*, 84(1), 343–350.

LINS, F. F. **Concentração Gravimétrica Em Tratamento de Minérios**. 2ª edição. CETEM/MCT. Rio de Janeiro, 1998.

LOPES, Marcos. **Separação Magnética no beneficiamento mineral**. Técnico e Mineração: O portal do profissional, Criciúma, p.0-1, jul. 2014. Disponível em: <https://tecnicoemineracao.com.br/separacao-magnetica-beneficiamentomineral/>. Acesso em: 10 julho 2023.

LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. (Eds.). **Tratamento de Minérios – 6ª Edição**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018.

MAGALHÃES, Joana Reis. **Eventos magmáticos e metamórficos no Bloco Guanhães (MG): Caracterização petrogenética e significado geodinâmico dos registros estateriano, criogeniano e ediacarano na evolução do Paleocontinente São Francisco**. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Número 42, 26/02/2019.

MOPE. **"Concentração a Seco Sem Segredos"**. Modelo Operacional. <https://www.modelooperacional.com.br/2020/07/13/concentracao-a-seco-sem-segredos/>. Acessado em 04/10/2023.

NEUMANN, R.; SCHNEIDER, C.L.; ALCOVER NETO, A. **Caracterização Tecnológica de Minérios**. In: LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C. (Ed.). **Tratamento de Minérios – 5ª edição**. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. p. 85–139.

PARK, K. J.; Antonio, G. C.; Oliveira, R. A.; Park, K. J. B. **Conceitos de processos e equipamentos de secagem**. Campinas: UNICAMP, 2007.

PEDROSA-SOARE, A. C., Dardenne, M. A., Hasui, Y., Castro, F. D. C., & Carvalho, M. V. A. (1994). **Nota Explicativa dos Mapas Geológico, Metalogenético e de Ocorrências Minerais do Estado de Minas Gerais**, Escala 1:1.000.000. SEME/COMIG, Belo Horizonte, 231 pp.

PORPHÍRIO, N.M.; BARBOSA, M.I.; BERTOLINO, L.C. **Caracterização Mineralógica de Minérios**. In: LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C. Tratamento de Minérios – 5 edição. Rio de Janeiro: CETEM, 2010.

ROCHA, L. (2008). **Estudo de aproveitamento econômico das lamas de uma mineração de ferro, através de concentração por flotação catiônica reversa**. Dissertação (Mestrado). Área de concentração: Tecnologia Mineral. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais. 126p.

SILVA, André Carlos. **Concentração física de minerais**: Goiás: Cetm, 2012. 132 slides, color. Disponível em: <https://cetm_engminas.catalao.ufg.br/up/596/o/cfm_05.pdf>. Acesso em: 20 de janeiro de 2024.

SILVA, Maximiliano Batista da. (2012). **Separação Magnética de Ultrafinos Hematíticos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral. Orientador: Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz. Ouro Preto, MG. 144 páginas.

SILVA, E. C.; SOUZA, A. A. **Desafios do processamento em umidade natural/rotas de mínimo consumo de água**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 26, 2015. Anais... Poços de Caldas, 2016.

SILVA, J. d. S. e. (1995). **Pré-processamento de produtos agrícolas**. [S.l.]: Instituto Maria.

SILVA, M. G.; LIRA, T. S.; ARRUDA, E. B.; MURATA, V. V.; BARROZO, M. A. S. **Modelling of fertilizer drying in a rotary dryer: parametric sensitivity analysis**. Brazilian Journal of Chemical Engineering, SciELO Brasil, v. 29, n. 2, p. 359–369, 2012

STRUMILLO, C. **Drying: principles, applications, and design**. [S.l.]: CRC Press, 1986. v. 3.

SVOBODA, J. **Magnetic Methods for the Treatment of Minerals**. Amsterdam: Elsevier, 1987.

TARLING, D.H.; HROUDA, F. **The Magnetic Anisotropy of Rocks**. Londres: Chapman & Gall, 1993.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY; **Mineral commodity summaries** 2016. U.S. Geological Survey, 202 p.90-91, 2017.

VALADÃO, George Eduardo Sales; ARAUJO, Armando Corrêa de (Org.). **Introdução ao tratamento de minérios**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

VALE. Complexo S11D Eliezer Batista. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/initiatives/innovation/s11d/Paginas/default.aspx>. Acessado em: 05/05/2023.

WALDE, D. H. G. **Geologia do ferro**. In: SCHOBENHAUS, C., COELHO, C. E. S. Principais depósitos minerais do Brasil. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 1986. V. II, c.1, p3-6.

WEBER, E. A. **Armazenagem agrícola**. [S.l.]: Kepler Weber Industrial, 1995.

WILLS, B.A. and NAPIER-MUNN, T. **Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery**. Publicado 2015.

WU, Z. H.; HU, Y. J.; LEE, D. J.; MUJUMDAR, A. S.; LI, Z. Y. **Dewatering and Drying in Mineral Processing Industry: Potential for Innovation**. *Drying Technology*, v. 28, n. 7, p. 834–842, 07 July 2010. DOI: 10.1080/07373937.2010.490485. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2010.490485>.