



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG
Campus Avançado de Poços de Caldas
Rodovia José Aurélio Vilela, nº 11.999 - Cidade Universitária
CEP: 37715-400 - Poços de Caldas/MG



Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), Campus de Poços de Caldas
Curso de Especialização em Engenharia de Minas (CEEM)

Guilherme José Rampazzo



**CARACTERIZAÇÃO E APROVEITAMENTO DE PILHA DE
REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO**

Poços de Caldas

2022



Guilherme José Rampazzo

CARACTERIZAÇÃO E APROVEITAMENTO DE PILHA DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à
Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG) como
parte dos requisitos para a integralização do curso de
Especialização em Engenharia de Minas (CEEM).
Orientador: Prof. Dr. Arthur Pinto Chaves



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG
Campus Avançado de Poços de Caldas

Rodovia José Aurélio Vilela, nº 11.999 - Cidade Universitária
CEP: 37715-400 - Poços de Caldas/MG



Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Rampazzo, Guilherme José.

Caracterização e aproveitamento de pilha de rejeitos de minério de ferro / Guilherme José Rampazzo. - Poços de Caldas, MG, 2022.

44 f. : il. -

Orientador(a): Chaves Arthur Pinto.

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2022.

Bibliografia.

1. Caracterização mineral. 2. Pilha de rejeitos. 3. Minério de ferro. I. Arthur Pinto, Chaves, orient. II. Título.

Ficha gerada automaticamente com dados fornecidos pelo autor.



Guilherme José Rampazzo

CARACTERIZAÇÃO E APROVEITAMENTO DE PILHA DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO

A Banca examinadora abaixo-assinada aprova o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG) como parte dos requisitos para a integralização do curso de Especialização em Engenharia de Minas (CEEM).

Aprovada em: 25 de fevereiro de 2021

Orientador: Prof. Dr. Arthur Pinto Chaves

Instituição: Escola Politécnica da USP

Assinatura:

Examinador 1: Prof(a). Dr(a). Carolina Del Roveri

Instituição: Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL

Assinatura:

Examinador 2: Prof. Dr. Maurício Guimarães Bergerman

Instituição: Escola Politécnica da USP

Assinatura:



AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à vida e à Deus por me proporcionar condições e oportunidades para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

À minha família por estarem sempre por perto e dispostos a ajudar e promover condições para que eu possa me dedicar e desenvolver minhas atividades profissionais da melhor forma possível.

À BEMISA pela cessão dos dados que deram solidez ao desenvolvimento do estudo de caso, financiando todo o desenvolvimento das atividades nos alvos dessa pesquisa durante os meses de julho a outubro de 2021 que fizeram parte de uma diligência comercial estabelecida com o a titular do Direito Minerário.

Ao Professor Doutor Arthur Pinto Chaves por ter aceitado me orientar durante o desenvolvimento desse TCC compartilhando uma pequena parcela de seu tempo e inestimável conhecimento.

Por fim, à UNIFAL e todo seu quadro de professores, os quais se esforçaram ao máximo para que a 1ª Turma do Curso de Especialização em Engenharia de Minas concluísse o curso alcançando com sucesso todos seus objetivos.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG
Campus Avançado de Poços de Caldas
Rodovia José Aurélio Vilela, nº 11.999 - Cidade Universitária
CEP: 37715-400 - Poços de Caldas/MG



“Nós somos o que fazemos repetidamente, a excelência não é um feito, e sim, e um hábito.”

Aristóteles



LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gráfico da demanda por minério de ferro nas últimas décadas	4
Figura 2 – Posicionamento da área de estudo em relação ao Domínio Estrutural do Quadrilátero Ferrífero (quadrado vermelho).	7
Figura 3 – Localização regional dos Direitos Minerários da Tora Mineração Ltda.	7
Figura 4 – Mapa destacando os DMs da Tora Mineração Ltda. e seus principais confrontantes e vizinhos.	9
Figura 5 – Mapa Geológico com as poligonais ativas da Tora Mineração Ltda.	10
Figura 6 – Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.	11
Figura 7 – Indução magnética para diferentes espécies mineralógicas: (a) ferromagnéticas, (b) paramagnéticas e (c) diamagnéticas.	21
Figura 8 – Características e aplicações de alguns separadores magnéticos.	23
Figura 9 – Modelo de Separador Magnético de Alta Intensidade de laboratório.	24
Figura 10 – Localização dos pontos amostrais para composição da amostra ROT-PIL.	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quadro de teores médios globais das amostras tal qual. Média realizada por triplicatas.	31
Tabela 2 – Quadro de resultados granuloquímicos da Amostra ROT-PIL.	32
Tabela 3 – Quadro de resultados granuloquímicos da Amostra ROT-PIL-SOND.	32
Tabela 4 – Análise quantitativa de fases em alíquotas da amostra ROT-PIL-SOND.	34
Tabela 5 – Resultados da concentração magnética em Circuito <i>Rougher-Scavenger</i>	35
Tabela 6 – Resultados granuloquímicos do retido no concentrador magnético 1500 Gauss.	35
Tabela 7 – Resultados granuloquímicos do retido no concentrador magnético 7500 Gauss.	36
Tabela 8 – Resultados granuloquímicos do material não atraído no concentrador magnético 7500 Gauss.	37
Tabela 9 – Resultados globais por faixa de concentrador magnético de alto campo magnético de laboratório.	38
Tabela 10 – Quadro de concentrados de minério de ferro por faixa de intensidade magnética.	39
Tabela 11 – Quadro de resultados do teste de concentração magnética a seco.	40



LISTA DE FOTOS

Foto 1 – Características macroscópicas do Rejeito Ferruginoso depositado na Pilha de Rejeitos.....	14
Foto 2 – Características macroscópicas do material caracterizado como Rejeito Arenoso...	15
Foto 3 – Afloramento de Itabirito Friável de alto teor, fina laminação e pouca sílica presente na rocha.....	16
Foto 4 – Afloramento de itabirito compacto com bandamentos dobrados.	17
Foto 5 – Ponto de coleta de amostra de superfície da Pilha de Rejeitos através de pequenas trincheiras na saia do talude.	27

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1 – Fluxograma de procedimentos analíticos na amostra ROT-PIL.....	28
Fluxograma 2 – Fluxograma de procedimentos analíticos na amostra ROT-PIL-SOND.	28



LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Mt	Milhões de toneladas
Bt	Bilhões de toneladas
SW	Sudoeste
NE	Nordeste
ENE	Leste-nordeste
WSW	Oeste-noroeste
DM	Direito Minerário
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
QF	Quadrilátero Ferrífero
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ISO	International Organization for Standardization



Sumário

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	3
2. OBJETIVO	5
2.1. <i>Objetivo geral</i>	<i>6</i>
2.2. <i>Objetivos específicos.....</i>	<i>6</i>
3. CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO	6
3.1. <i>Histórico dos Direitos Minerários.....</i>	<i>8</i>
<i>Fonte: Autor</i>	<i>9</i>
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
4.1. <i>Geologia Regional.....</i>	<i>10</i>
4.2. <i>Geologia Local</i>	<i>13</i>
4.2.1. <i>Pilha de Rejeitos.....</i>	<i>13</i>
4.2.2. <i>Recursos In Situ</i>	<i>15</i>
4.3. <i>Caracterização Mineral.....</i>	<i>18</i>
4.3.1. <i>Granulometria-granuloquímica</i>	<i>19</i>
4.3.2. <i>Difração de Raios-X</i>	<i>19</i>
4.4. <i>Tratamento de Minérios.....</i>	<i>20</i>
4.4.1. <i>Concentradores Magnéticos.....</i>	<i>21</i>
4.5. <i>Especificações granulométricas comerciais do minério de ferro.....</i>	<i>24</i>
4.6. <i>Passivos Ambientais da Mineração.....</i>	<i>24</i>
5. MATERIAIS E MÉTODOS	26
5.1. <i>Granuloquímica</i>	<i>29</i>
5.2. <i>Difração de Raios-X para determinação de fases minerais.....</i>	<i>29</i>
5.3. <i>Separação Magnética – Imã de Mão.....</i>	<i>29</i>
5.4. <i>Varredura Magnética WHIMS ou Lavabilidade Magnética</i>	<i>30</i>
5.5. <i>Separação Magnética – Dry Mag</i>	<i>30</i>
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30



6.1.	<i>Granuloquímica</i>	31
6.2.	<i>Determinação de Fases Minerais – Difratomia de Raios-X</i>	33
6.3.	<i>Separação Magnética – Imã de Mão</i>	34
6.4.	<i>Varredura Magnética – WHIMS</i>	37
6.5.	<i>Separação Magnética – DRY MAG</i>	39
7.	CONCLUSÕES	40
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
	ANEXO I – Difrações de Raios-X	



RESUMO

Base de desenvolvimento industrial mundial, o minério de ferro é o principal bem mineral explorado e comercializado no mundo. O Brasil, detentor de importantes jazimentos dessa substância possui posição estratégica tanto em termos de recursos minerais disponíveis como de produção. Grandes depósitos localizados no Quadrilátero Ferrífero, compartimento geológico situado no Estado de Minas Gerais, são explorados desde o início do século XX, iniciado pela extração de minério de ouro e posteriormente pelo minério de ferro, em depósitos de hematita muito ricos em ferro. A grande disponibilidade de minério de ferro de alto teor fez que por um bom tempo o aproveitamento desses recursos fosse realizado de forma bastante seletiva, sem a necessidade de rotas de concentração para formação de produtos comerciais. Vendido geralmente em granulometrias mais grossas, as frações mais finas desse material, consideradas rejeitos, foram empilhadas ao longo dos anos pelas diversas minerações no passado. Neste estudo de caso amostras de uma pilha de rejeitos localizada no município de Itaúna e Itatiaiuçu foram analisadas à fim de entender seu comportamento mineralógico, através de difratometria de raios-x, assim como as melhores formas e rotas para o aproveitamento desse, até então, passivo ambiental, como um depósito de minério de ferro utilizando rotas úmidas e secas de concentração magnética. Com teores médios do depósito próximos a 54% Fe, o desenvolvimento do ativo buscou compreender o comportamento do ferro nas faixas granulométricas comerciais, visando a obtenção de um produto tal qual está depositado e a aplicação de rotas de concentração magnética de baixo a alto campo magnético em vias úmidas. Com excelentes resultados às rotas úmidas foi possível obter produtos de minério de ferro com teores superiores a 63,5% Fe e uma recuperação mássica superior a 75%, demonstrando a eficiência da metodologia adotada para o estudo.

Palavras-chave: pilha de rejeitos; minério de ferro; caracterização mineral; concentração magnética.



ABSTRACT

Base of world industrial development, iron ore is the main mineral asset explored and traded in the world. Brazil, holder of important deposits of this substance, has a strategic position both in terms of available mineral resources and production. Large deposits located in the Quadrilátero Ferrífero, a geological compartment located in the State of Minas Gerais, have been explored since the beginning of the 20th century, starting with the extraction of gold ore and later by iron ore, in hematite deposits very rich in iron. The great availability of high grade iron ore meant that for a long time these resources were used in a very selective way, without the need for concentration routes for the formation of commercial products. Generally sold in coarser grain sizes, the finer fractions of this material, considered tailings, have been dumped up over the years by different mining companies in the past. In this case study, samples from a tailings dump located in the municipalities of Itaúna and Itatiaiuçu were analyzed in order to understand its mineralogical behavior, through x-ray diffractometry, as well as the best ways and routes for the use of this, until then, environmental liability, such as an iron ore deposit using wet and dry magnetic concentration routes. With average deposit contents close to 54% Fe, the development of the active sought to understand the behavior of iron in commercial granulometric ranges, aiming to obtain a product as it is deposited and the application of magnetic concentration routes from low to high magnetic field on wet routes. With excellent results for the wet routes, it was possible to obtain iron ore products with contents greater than 63.5% Fe and a mass recovery greater than 75%, demonstrating the efficiency of the methodology adopted for the study.

Keywords: tailings dump; Iron ore; mineral characterization; magnetic concentration



1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A produção de aço está diretamente ligada ao desenvolvimento industrial de um país, sendo caracterizada com a espinha dorsal do desenvolvimento, essencial para a civilização moderna.

Matéria prima para a fabricação do aço, o minério de ferro é o bem mineral mais importante da cadeia mineral, em 2011 o Brasil ocupava posição estratégica entre os maiores detentores de reservas (5ª posição mundial) como também de produção, ficando com a terceira posição (Chemale Jr. & Takehara, 2013, p. 20).

O minério de ferro é o mais importante metal explorado no Brasil, tanto por suas reservas quanto por sua importância econômica na balança comercial brasileira. No Anuário Mineral Brasileiro referente ao ano de 2019 (ANM – Agência Nacional de Mineração, 2020, p. 03) o minério de ferro correspondeu a 72,8% do valor total da produção entre as onze principais substâncias metálicas produzidas no país.

Os maiores volumes de minério extraídos foram no Estado de Minas Gerais, representando cerca de 311,0 Mt dos 510,4 Mt totais produzidos em 2019, correspondendo a 60,9% da produção nacional. Do total de minério de ferro produzido, cerca de 69,1% da produção foi destinada à exportação, gerando receitas superiores a 33 bilhões de dólares, sendo as demais principais substâncias metálicas responsáveis por mais 15 bilhões de dólares na geração de valor das exportações.

Como visto, o Estado de Minas Gerais ainda é o maior produtor de minério de ferro do país, embora as reservas e a qualidade do minério de ferro do Estado do Pará sejam maiores e melhores. No entanto, a facilidade logística e a tradição mineira de décadas fazem com que o estado mineiro ainda seja o principal produtor deste bem mineral, sendo grande parte da produção vinculadas às operações de grandes mineradoras no Quadrilátero Ferrífero.

A exploração de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero é uma atividade presente desde o início do século 20, ocorrendo de forma manual e bastante rudimentar assim que começaram a se esgotar os recursos auríferos de fácil extração de algumas regiões, muitas vezes inseridos nas formações ferríferas.

Região detentora de enormes jazimentos ferríferos teve as atividades iniciadas na região de Itabira nas primeiras décadas do século XX onde se exploravam camadas de hematita compacta com altos teores de Fe contido, aproximadamente 68%, que serviam para a

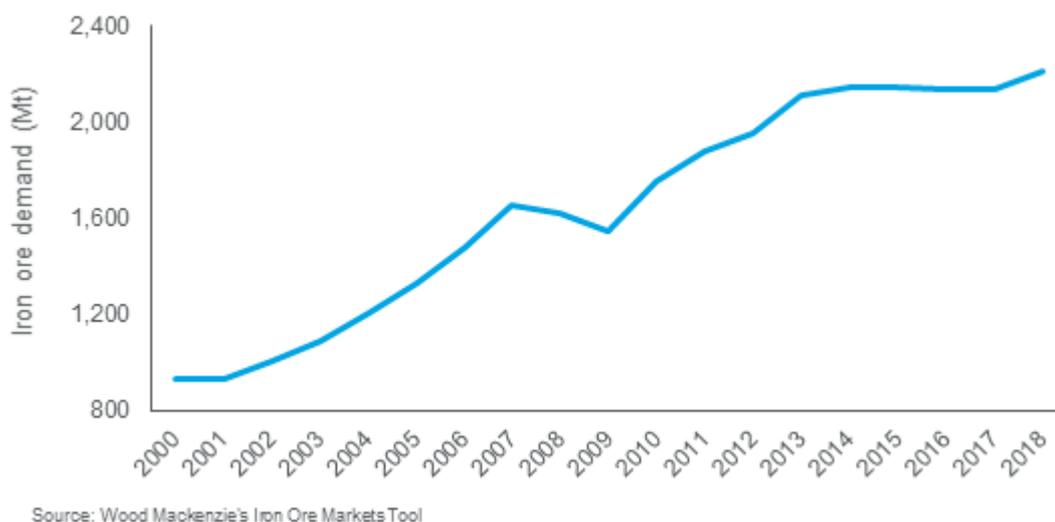


produção de aço no mundo inteiro. Essas unidades mais ricas foram se esgotando ao longo do tempo, assim como os finos ricos usados para geração de sinter feed.

De maneira geral os jazimentos de ferro de alto teor no Quadrilátero Ferrífero estão esgotados, relíquias de níveis de altos teores ainda podem ser encontrados em pequena quantidade, e hoje aproveita-se, através da utilização de unidades de tratamento e concentração mineral, jazimentos de teores médios de 38% de Fe contido.

A crescente demanda por minério de ferro no mundo, hoje acima de 2,0 Bt por ano (Figura 1), muito vinculado ao crescimento do mercado chinês das últimas décadas expressa bons resultados comerciais ao país, mas também faz refletir sobre a sustentabilidade desse crescimento, uma vez que os recursos minerais são finitos perante o volume de recursos que a cadeia produtiva consome, mesmo havendo reservas mundiais suficientes para muitos anos ainda.

Figura 1 – Gráfico da demanda por minério de ferro nas últimas décadas



Fonte: Wood Mackenzie (2022)

Diretamente ligado ao aumento da produção está o aumento dos passivos ambientais gerados pela mineração de ferro, assunto de extrema importância e debate nas últimas décadas, a qual foi potencializado pelos acidentes envolvendo barragens de rejeitos desde 2015.

O aproveitamento do minério de ferro de baixo teor, o qual há necessidade de que o minério seja submetido às rotas de concentração, geralmente úmidas, indiscutivelmente gerará



rejeitos que podem ser depositados em barragens ou diques de contenção, pilhas, preenchimento de cavas exauridas ou até mesmo de forma filtrado e estocado em pilhas.

Muitas dessas formas de deposição de rejeitos, principalmente aquelas concebidas nas décadas passadas quando ainda havia recursos de alto teor exploráveis, caracterizam depósitos antropogênicos com excelentes teores médios, gerando depósitos de oportunidade que começaram a ser aproveitados nos últimos anos, sejam por questões de qualidade do material depositado ou por políticas de recuperação e descomissionamento de passivos ambientais.

Neste sentido, justifica-se o estudo de caso deste Trabalho de Conclusão de Curso buscando compreender a qualidade e a melhor forma de aproveitamento de um depósito antropogênico de minério de ferro em uma área localizada na Serra da Samambaia, limite dos municípios de Itaúna e Itatiaiuçu, no extremo oeste da Serra do Curral, de titularidade da Tora Mineração Ltda., onde na década de 80 e 90 exploraram-se os recursos de alto de teor da Formação Cauê na vertente sul da Serra, e após etapas de classificação depositou-se o rejeito na vertente norte em um formato de pilha, gerando um depósito de cerca de 2,4 Mt com teor médio de 54% de Fe distribuídos de forma não sistemática, porém com pequena variância.

O aproveitamento desses recursos, mesmo que não muito volumosos, pode gerar produtos comercializáveis e eliminar ou diminuir bastante o impacto ambiental gerado pela deposição dos rejeitos, trazendo de volta a conformação primitiva do relevo ou situações ambientalmente menos impactantes.

2. OBJETIVO

Em linha com a aplicabilidade do conhecimento adquirido durante o Curso de Especialização em Engenharia de Minas o estudo de caso foi selecionado com o objetivo de desenvolvimento da compreensão mineral do ativo usando ferramentas acessíveis capazes de exprimir os resultados necessários para a transformação de um passivo ambiental em um ativo mineral capaz de gerar recursos aproveitáveis de minério de ferro



2.1. Objetivo geral

De forma bastante clara os objetivos do desenvolvimento do estudo de caso para o aproveitamento dos recursos de minério de ferro, depositados em forma de pilha de rejeitos na divisa dos municípios de Itaúna e Itatiaiuçu, são a caracterização mineral do depósito e o desenvolvimento de rotas para que o aproveitamento econômico do jazimento tenha o melhor grau de atratividade econômica. Os aspectos econômicos não serão abordados neste trabalho.

2.2. Objetivos específicos

Especificamente o trabalho tem como objetivo a aplicação das ferramentas capazes de exprimir resultados de caracterização e concentração mineral a fim de se compreender a melhor forma para o aproveitamento dos recursos de ferro do ativo mineral.

3. CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

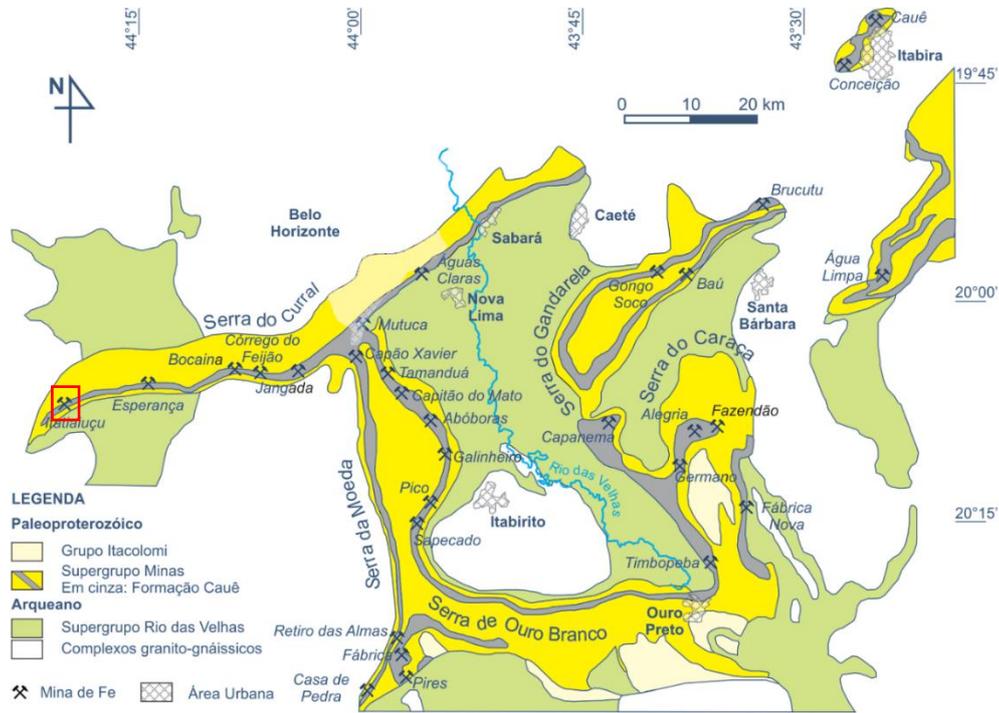
A área da Pilha de Rejeitos da Tora Mineração Ltda. está localizada nos municípios de Itaúna e Itatiaiuçu, na Serra da Samambaia no extremo oeste da Serra do Curral, a qual se estende por cerca de 100 km no sentido SW-NE, desde Itatiaiuçu até Caeté marcando o limite norte do distrito minerário do Quadrilátero Ferrífero (Figura 2).

Na região de avaliações, a crista da serra contempla os limites municipais, onde para a vertente norte da serra tem-se integralmente o Direito Minerário 832.288/2004, no município de Itaúna, e na vertente sul o Direito Minerário 833.491/2007 pertencente parcialmente ao município de Itatiaiuçu (Figura 3).

Tratam-se de Direitos Minerários com recursos de minério de ferro remanescentes da Formação Cauê e são confrontantes às operações avançadas da Mina Oeste da MUSA – Mineração Usiminas S.A e não distante das operações da ArcelorMittal e Minerita na Serra Azul, pertencendo ao mesmo contexto geológico.

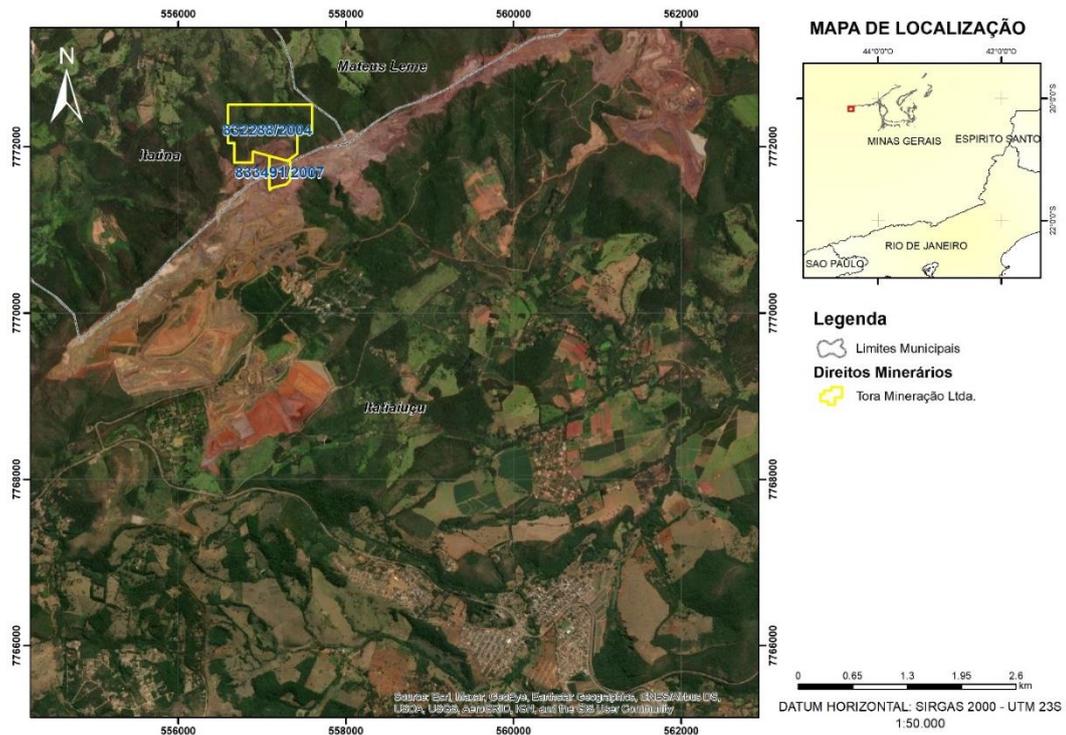


Figura 2 – Posicionamento da área de estudo em relação ao Domínio Estrutural do Quadrilátero Ferrífero (quadrado vermelho).



Fonte: Caxito & Dias (2018, p.17).

Figura 3 – Localização regional dos Direitos Minerários da Tora Mineração Ltda.



Fonte: Autor



3.1. Histórico dos Direitos Minerários

A região do extremo oeste da Serra do Curral, também chamada de Serra da Samambaia, é alvo de atividades de mineração de ferro desde a década de 50. Iniciada por empresas familiares da região de Itaúna e, posteriormente, continuada pela aquisição de reservas por grandes empresas, a região continua sendo explorada e produzindo concentrados de minério de ferro até os dias de hoje.

A área onde inserem-se os rejeitos de minério de ferro em avaliação, atualmente pertencentes à Tora Mineração Ltda., é resultado de desmembramento de antigos processos minerários vinculados às empresas da família proprietária da Minerita – Minérios Itaúna Ltda., as quais por diferentes composições societárias assumiam outros nomes.

Ao longo das décadas as poligonais primárias que englobavam os recursos de minério de ferro estudados neste trabalho passaram por cessões parciais e totais, até chegar à conformação atual.

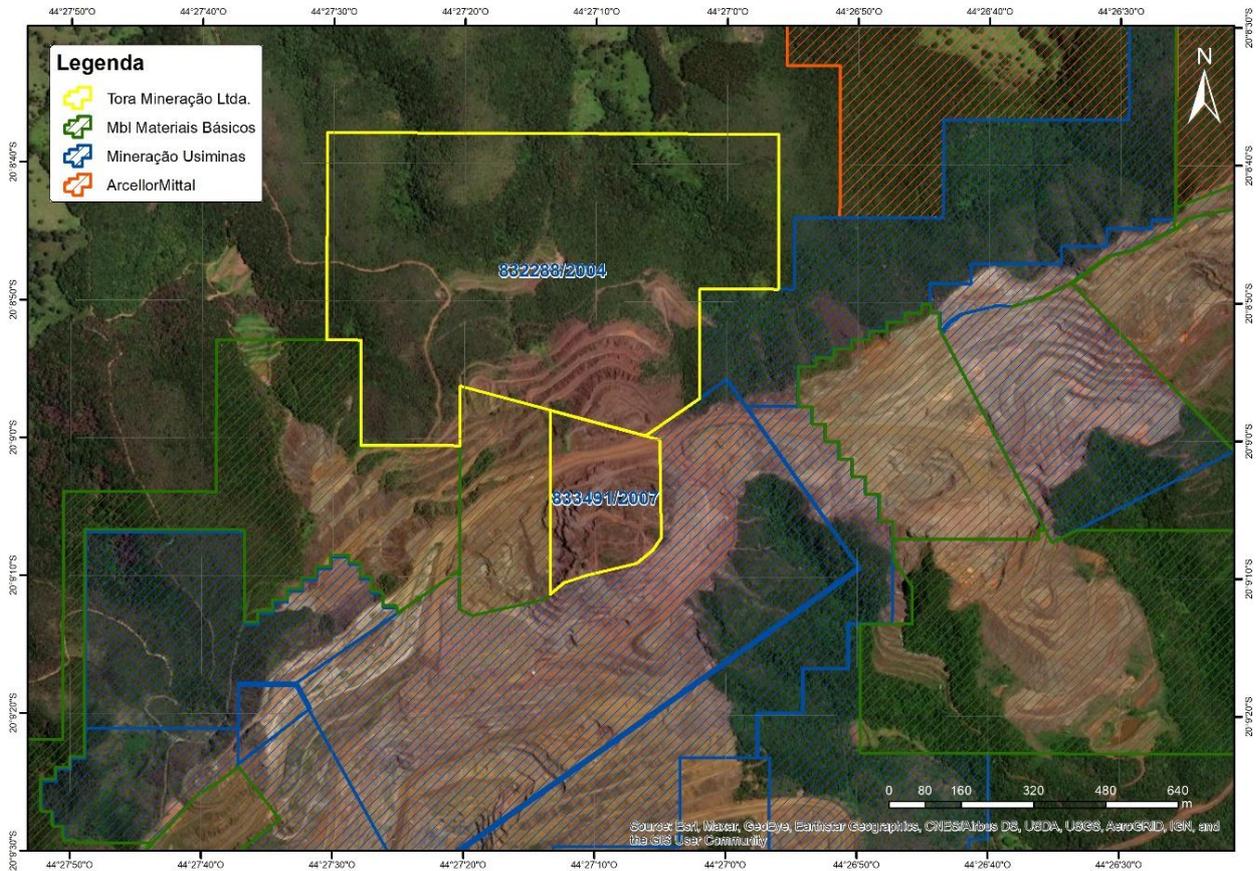
Estima-se que a região de recursos in situ do DM 833.491/2007 tenha sido explorada durante as décadas de 80 e 90, quando também houve a formação da Pilha de Rejeitos inserida no DM 832.288/2004. Desde então não houve mais atividades de extração de minério de ferro nessa região.

Esses DMs, hoje de titularidade da Tora Mineração Ltda, a qual tem como proprietários os filhos do falecido dono da Minerita, Dílson Fonseca da Silva, é fruto do desmembramento de ativos minerários da família. Vizinhos aos DMs da Tora Mineração Ltda. há processos da MBL - Materiais Básicos Ltda., que também possui laços familiares com a família controladora da Minerita e hoje encontram-se arrendados para a MUSA – Mineração Usiminas S.A. (Figura 4)

Ambos os Direitos Minerários tiveram suas cessões aprovadas à Tora Mineração Ltda. em 20 de setembro de 2019. O DM 833.491/2007 primeiramente pertenceu à Ferrominas Mineração Ltda, de 20/09/2007 até a data da cessão e o DM 832.288/2004 pertenceu à Minerita de 02/07/2004 até 11/08/2011, quando foi cedida à Ferrominas Mineração Ltda e, posteriormente, integralmente cedida à Tora Mineração Ltda.



Figura 4 – Mapa destacando os DMs da Tora Mineração Ltda. e seus principais confrontantes e vizinhos.



Fonte: Autor

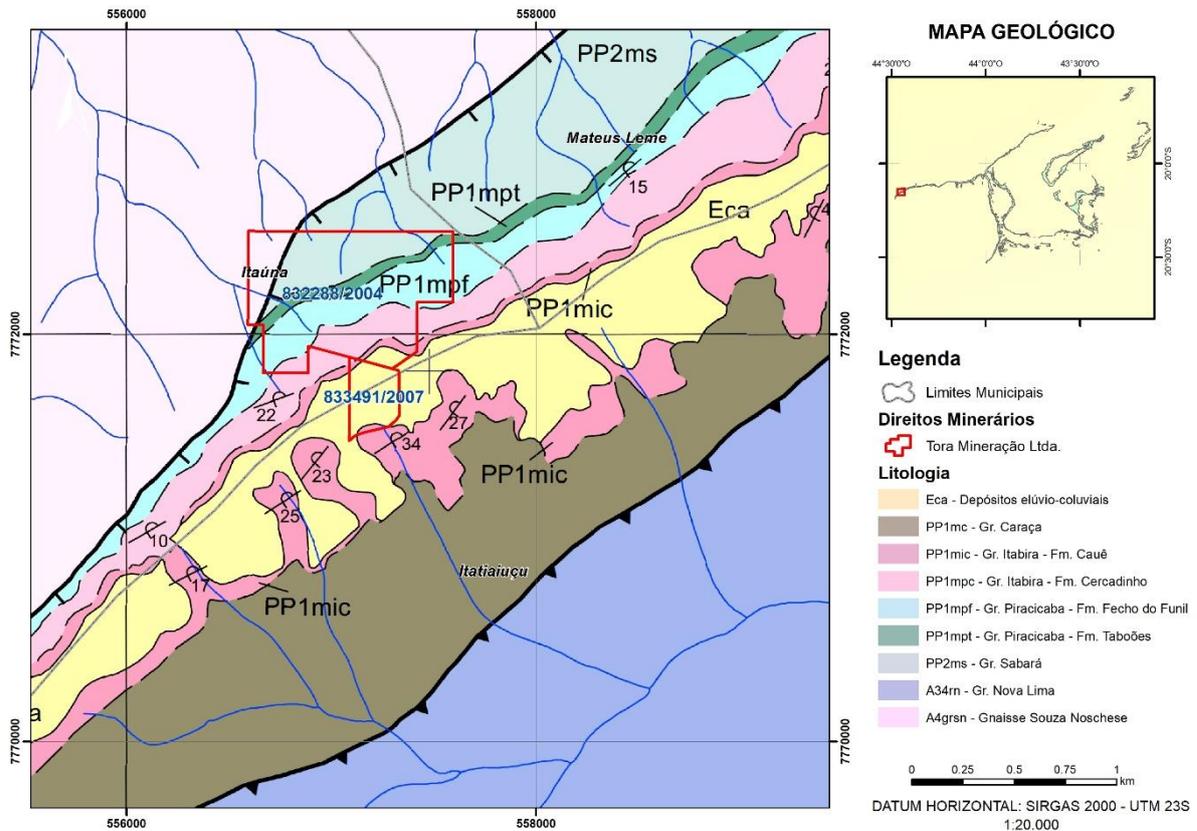
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O embasamento teórico para o desenvolvimento deste TCC parte dos conhecimentos básicos geológicos, tanto regionais quanto locais, o conhecimento das ferramentas certas a serem utilizadas para a obtenção dos resultados desejados e a compreensão dos passivos ambientais gerados pelas atividades de mineração.

A unidade mineralizada em ferro nas quais há operações extrativas de diversas mineradoras e onde os recursos in situ do DM 833.491/2007 correspondem à Formação Cauê, pertencente ao Grupo Itabira, que por sua vez, faz parte do Supergrupo Minas (Figura 5).



Figura 5 – Mapa Geológico com as poligonais ativas da Tora Mineração Ltda.



Fonte: Autor

4.1. Geologia Regional

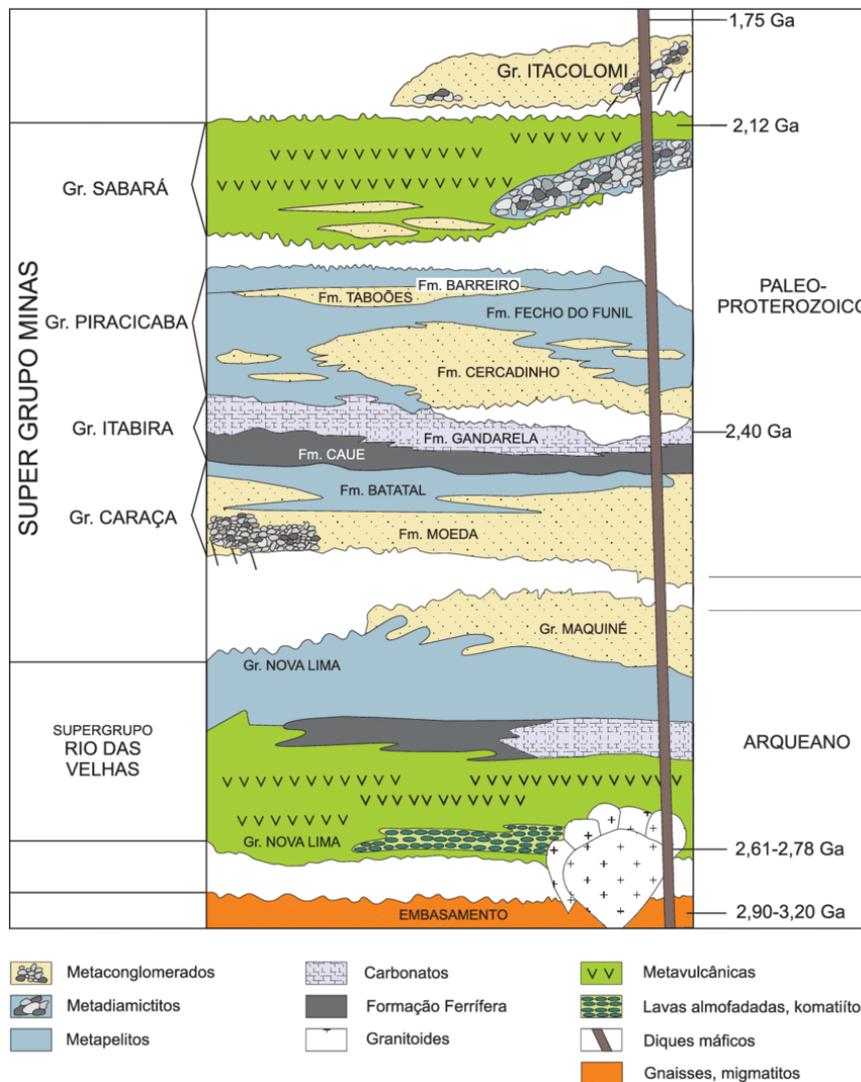
Estratigraficamente, o Quadrilátero Ferrífero se constitui pelo Supergrupo Rio das Velhas, atribuído ao Arqueano; pelo Supergrupo Minas, atribuído ao Paleoproterozóico; pelo Grupo Itacolomi, provavelmente do Mesoproterozóico, além de gnaisses graníticos e rochas intrusivas máficas e ultramáficas de idades diversas (Figura 6). Ocorrem ainda sedimentos continentais terciários, encontrados em pequenas áreas; e coberturas ferruginosas (canga) do Terciário/Quaternário.

O Supergrupo Rio das Velhas é formado por rochas de composição máfica, ultramáfica e ácidas, com intercalações de rochas metassedimentares. Destacam-se neste contexto as formações ferríferas, às quais se associam mineralizações auríferas. Este supergrupo subdivide-se nos Grupos Nova Lima e Maquiné. O Grupo Nova Lima consiste principalmente por xistos verdes, metassedimentar e metavulcânico, e filito, com intercalações de quartzito, grauvaca, dolomito, talco xisto e formações ferríferas. O Grupo Maquiné é representado por

seqüências de quartzitos, metapelitos, e xistos, depositados em discordância angular sobre os litotipos do Grupo Nova Lima.

O Supergrupo Minas ocorre de forma discordante sobre as unidades mais antigas. É representado por uma seqüência metassedimentar que abrange rochas de origem clástica e química, depositadas em ambiente continental e marinho. As rochas desta unidade são de fácil distinção no relevo por ocorrerem essencialmente nas porções de maiores elevações no QF. Sua divisão compreende, da base para o topo, os grupos Tamanduá, Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará.

Figura 6 – Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.



Fonte: modificado de Alkmin e Marshak (1998, p. 34).



A base do Supergrupo Minas é representada pelo Grupo Tamanduá que apresenta associações de xistos, quartzitos, filitos e formações ferríferas. Em sequência ocorre o Grupo Caraça representado pelas formações Moeda e Batatal. A Formação Moeda é representada por sequências de quartzitos, conglomerados e filitos. A Formação Batatal compreende sequências de filitos. Estes grupos compreendem depósitos aluviais associados a depósitos marinhos de água rasa.

O Grupo Itabira corresponde a uma unidade de origem química, dividida nas Formações Cauê e Gandarela. A Formação Cauê é composta por formações ferríferas bandadas, em leitos alternados de quartzo e de minerais de ferro como hematita e magnetita, classificadas como do tipo Lago Superior. Em direção ao topo da unidade ocorrem níveis gradados com dolomitos até sequências carbonáticas dolomíticas no topo, correspondendo à Formação Gandarela.

O Grupo Piracicaba está representado por quartzitos e filitos intercalados em camadas espessas. Sua unidade de maior expressão é a Formação Cercadinho composta por filitos, quartzitos e quartzitos ferruginosos. As demais unidades deste grupo são as Formações Fecho do Funil (dolomitos e filitos intercalados), Taboões (quartzitos) e Barreiro (filitos). O Grupo Sabará compreende uma sequência metavulcanossedimentar representada por xistos, grauvacas, quartzitos, formações ferríferas e conglomerados.

Nas porções leste e sul do QF, em zonas dominadas por falhamentos de empurrão, ocorrem sedimentos clásticos grosseiros, incluindo arenitos e conglomerados, que representam o Grupo Itacolomi. Sedimentos cenozóicos são comuns em todo o QF, sendo representados por depósitos de argila, chapadas com canga, depósitos pelíticos lacustrinos, coberturas detrito-lateríticas e depósitos coluviais e aluviais diversos.

A área avaliada, situada na porção extrema oeste da Serra do Curral, recebe a designação de Serra da Samambaia e é toda sustentada por rochas do Supergrupo Minas, de idade paleoproterozóica.

O Supergrupo Minas está representado na serra e suas encostas pelos seus Grupos Caraça, Itabira e Piracicaba, que se encontram estratigraficamente invertidos, orientando a sequência metassedimentar em direção aproximada de ENE-WSW, com mergulhos variáveis de 20 a 45° para sudeste.

O topo da serra é sustentado pelo pacote de formações ferríferas itabiríticas pertencentes à Formação Cauê, do Grupo Itabira, as quais se integram por uma rocha caracterizada pela alternância de bandas hematíticas e de sílica, que apresentam graus



variáveis de intemperismo e, conseqüentemente, compacidade. Os itabiritos se encontram frequentemente enriquecidos por processos supergênicos, que promoveram a lixiviação parcial da sílica e a formação de minérios com teores mais interessantes.

Na encosta norte da serra, os itabiritos encontram-se sotopostos pelas rochas da Formação Cercadinho, predominantemente filitos, quartzitos e quartzitos ferruginosos. Na encosta sul, as formações ferríferas estão sobrepostas por quartzitos e filitos integrantes do Grupo Caraça Indiviso. Nas encostas mais baixas ao sul, os terrenos são constituídos por rochas xistosas, geralmente bastante intemperizadas, do Grupo Nova Lima, do Supergrupo Rio das Velhas.

4.2. Geologia Local

Localmente os litotipos aflorantes são bastante restritos. Na Pilha de Rejeitos, superficialmente, há o completo predomínio do material ferruginoso depositado em ponta de aterro e conformado com bermas e taludes. As unidades litológicas basais ao material depositado somente são vistas a oeste do depósito em cortes no relevo para o encaixe de acessos onde afloram quartzito alterados da Formação Cercadinho.

Já na região onde ocorrem os recursos *in situ* de minério de ferro, ocorre o franco predomínio de rochas itabiríticas da Formação Cauê que apresentam variações composicionais e de compacidade ao longo de área aflorante do depósito, sendo subdividida como itabiritos friáveis e itabiritos compactos.

4.2.1. Pilha de Rejeitos

A Pilha de Rejeitos é composta por um material inconsolidado de coloração marrom escura a avermelhada de granulometria que varia de grãos muito finos até seixos e pequenos blocos de formação ferrífera (Foto 1). Composto essencialmente de óxidos de ferro – hematita e magnetita – e quartzo, apresenta um magnetismo moderado ao imã de baixo campo.

Entende-se que o material ferruginoso depositado seja proveniente de camadas de hematitas e/ou itabiritos ricos, com elevados teores e explorados de forma seletiva, pois os teores das amostras realizadas em superfície demonstram teores médios de 53% de Fe, portanto, para serem considerados como rejeitos, o produto aproveitado certamente possuía elevados teores de ferro contido.



Foto 1 – Características macroscópicas do Rejeito Ferruginoso depositado na Pilha de Rejeitos.



Fonte: Autor

Durante a sondagem realizada na Pilha de Rejeitos, pode-se confirmar esse material ferruginoso depositado por dezenas metros de espessura em alguns furos.

Atravessada a camada de Rejeito Ferruginoso a unidade estéril sotoposta ao depósito de rejeitos é caracterizada por um material de coloração branco-amarelada e de granulometria fina à média de composição essencialmente silicosa, friável, por vezes com alguma contribuição de minerais de ferro (Foto 2). Tal unidade foi caracterizada como Rejeito Arenoso, considerando a possibilidade de se tratar de um material descartado posteriormente a uma concentração de minério de ferro, o fato deste material estar todo inconsolidado contribuiu para essa interpretação.

Por fim, a sondagem na Pilha de Rejeitos interceptou também passagens de Filito de cor predominantemente cinza prateado, composto de finos argilominerais em rocha com estrutura foliada e textura bastante sedosa. Rocha com maior coesão, quase sempre foi recuperada em intervalos contínuos.



Foto 2 – Características macroscópicas do material caracterizado como Rejeito Arenoso.



Fonte: Autor

4.2.2. Recursos In Situ

Fonte dos Rejeitos Ferruginosos, é de suma importância destacar a presença dos itabiritos ao sul da Pilha de Rejeitos. Superficialmente afloram somente os itabiritos clássicos da Formação Cauê os quais são compostos essencialmente por óxidos de ferro na forma de hematita e, em menor quantidade, magnetita, além do quartzo. Minerais acessórios como anfibólio e carbonatos podem ocorrer a depender da fácies da unidade geológica.

Nesta região de avaliação foram observados somente itabiritos silicosos que possuem algumas variações composicionais, sendo ora mais ricos, ora mais pobres em teores de ferro contido.

Macroscopicamente essas variações são observadas pelas tonalidades na coloração e compacidade do material. Os itabiritos de alto teor, por vezes formados por camadas essencialmente hematíticas, possuem uma coloração cinza escura predominante, pouca sílica livre e, geralmente, apresentam-se de forma friável. São rochas que apresentam finas laminações e a granulometria dos cristais é bastante fina (Foto 3).

Já os itabiritos compactos aflorantes são nitidamente mais pobres devido à quantidade de laminações silicosas observadas na rocha. Compacta, a rocha apresenta laminações alternadas de cores cinzas compostas pelos óxidos de ferro e cores brancas, essencialmente quartzosas. Nestas rochas as estruturas são facilmente observadas, não só a estrutura Sn,



mas como dobramentos muitas vezes apertados à isoclinais, evidenciando uma região de intensa atividade deformacional dúctil (Foto 4).

Foto 3 – Afloramento de Itabirito Friável de alto teor, fina laminação e pouca sílica presente na rocha.



Fonte: Autor

Assim como nos itabiritos friáveis, a granulometria nessa rocha é fina, no entanto, o baixo teor médio de Fe e o fato de serem compactas e coesas sugerem a necessidade de estágios de cominuição, incluindo moagem, para que se possa obter liberação do mineral de interesse.

Os metassedimentos da Formação Cercadinho foram comprovados pela sondagem nesta região, sotopostos à Formação Cauê e foram divididos em três litotipos: quartzitos, quartzitos ferruginosos e filitos.

Os quartzitos apresentam-se como rochas compactas de granulometria fina a média e bandamentos finos. Composta quase que exclusivamente por quartzo, apresenta coloração branca leitosa. Biotita ocorre como mineral acessório marcando a estruturação da rocha.

Já os quartzitos ferruginosos são rochas bastante semelhantes aos quartzitos tanto no aspecto mineralógico como estrutural, no entanto possuem contribuições de hematita em sua composição, gerando tonalidades levemente acinzentadas à rocha. Embora possua óxidos de ferro na constituição mineralógica, os teores de Fe contido na rocha não ultrapassam 20%.



Esses intervalos ocorrem geralmente após os itabiritos, mas podem ocorrer também em leitos intercalados aos quartzitos não ferruginosos.

Foto 4 – Afloramento de itabirito compacto com bandamentos dobrados.



Fonte: Autor

Já os quartzitos ferruginosos são rochas bastante semelhantes aos quartzitos tanto no aspecto mineralógico como estrutural, no entanto possuem contribuições de hematita em sua composição, gerando tonalidades levemente acinzentadas à rocha. Embora possua óxidos de ferro na constituição mineralógica, os teores de Fe contido na rocha não ultrapassam 20%. Esses intervalos ocorrem geralmente após os itabiritos, mas podem ocorrer também em leitos intercalados aos quartzitos não ferruginosos.

Por fim, a unidade filítica interceptada nos furos realizados na Pilha de Rejeitos também foi observada por esta sondagem com as mesmas características. Rocha de coloração cinza prateada a amarelada, foliada fina e textura bastante sedosa. Destacam-se algumas passagens desse filito associado de hematita, gerando intervalos mais compactos e densos.



4.3. Caracterização Mineral

O profundo conhecimento das fases minerais e suas propriedades físicas e químicas são de extrema importância para as disciplinas de Tratamento e Beneficiamento Mineral.

Realizada a partir de fragmentos do ROM (*run of mine*) ou testemunhos de sondagem os estudos relacionados à caracterização mineralógica servem de embasamento para que os engenheiros de processo possam desenvolver rotas otimizadas para a concentração do mineral portador do elemento químico de interesse.

Os estudos mineralógicos aplicados ao beneficiamento mineral não devem se limitar somente à identificação dos minerais constituintes, mas sim apresentarem avaliações qualitativas e semiquantitativas desses constituintes (Porphírio et al., 2010, p. 57).

Cada minério possui suas características e peculiaridades próprias, como composição mineralógica, granulometria do mineral de interesse, relação com minerais de ganga etc. fazendo com que cada um tenha seu processo tecnológico mais adequado.

Sabendo que cada minério possui propriedades distintas, muitos usam as ferramentas de microscopia óptica para a caracterização mineralógicas dos minérios, onde destacam-se as seguintes análises, as quais devem ser usadas de forma conjunta para um melhor entendimento das propriedades minerais do minério:

- a análise mineralógica qualitativa que identifica todos os minerais;
- a análise mineralógica semiquantitativa por meio de avaliações e cálculos semiquantitativos das proporções percentuais de todos os minerais do minério;
- a determinação do grau de liberação por meio da avaliação e cálculo das percentagens de liberação do mineral de interesse com relação a sua ganga, bem como estudos do comportamento dos grãos mistos;
- as medidas de reflectividade dos minerais opacos;
- as fotomicrografias de situações mineralógicas marcantes que podem ser conclusivas de determinados fenômenos relativos à formação dos minerais do minério;
- as identificações mineralógicas por difratometria de raios-X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- complementação e compatibilização dos estudos mediante os resultados de análises químicas dos elementos principais e os chamados traços.



4.3.1. *Granulometria-granuloquímica*

A análise granulométrica é a análise da distribuição do diâmetro das partículas de uma determinada amostra, que pode ser bruta, geralmente coletada em materiais inconsolidados, ou proveniente de uma britagem, quando se trata de exemplares de rochas coesas.

Diversos são os intervalos de abertura nas peneiras que fazer as análises granulométricas, podendo ser realizada à seco ou através do empolpamento da amostra. Há alguns jogos de peneiras usados para determinação da distribuição granulométrica, podendo seguir os seguintes padrões de escala: ABNT, Tyler, Richards e ISO (Correia, 2010, p. 277).

No minério de ferro, por possuir faixas granulométricas comerciais bem definidas, geralmente orientam-se os estudos granulométricos de forma a se compreender quais as proporções de massa de produtos nessas faixas são geradas a partir de um volume de rocha, geralmente britado.

A massa de material retido em cada intervalo de abertura de peneira define a vocação do minério. Se em granulometrias mais grossas os teores são baixos, indica que o grau de liberação do mineral de interesse deve ser melhorado através de mais etapas de cominuição da amostra original.

A dosagem química dos elementos de interesse em amostras coletadas nas faixas granulométricas obtidas após a análise de distribuição granulométrica é denominada de granuloquímica.

4.3.2. *Difração de Raios-X*

Segundo Porphírio et al. (2010, p. 73), os raios-x são radiações eletromagnéticas que possuem comprimentos de onda que variam de 10^3 a 10^5 Å e que podem ser polarizados, refletidos e refratados. O feixe difratado sem mudança do comprimento de onda, resultante da dispersão dos raios X pelos elétrons dos átomos do cristal, só é reproduzido se for satisfeita a equação de Bragg ($n\lambda = 2d\sin\theta$). Onde λ é o comprimento de onda dos raios atômicos no retículo difratados, d é a distância dos átomos ou da rede de planos cristalino (distância interplanar), n é um número inteiro correspondente à ordem de difração e θ é o ângulo oblíquo ou ângulo de Bragg que é o complemento do ângulo de incidência (i) da óptica geométrica. Considerando essas propriedades haverá um padrão de difração único para cada substância.



O material analisado pode estar na forma de um simples cristal ou através de alguma substância mono ou policristalina sob a forma de pó. A forma de pó é geralmente mais utilizada. A técnica requer pequena quantidade de amostra (<1 g) e é um procedimento de baixo custo operacional e bastante rápida quando totalmente automatizada.

A difração de raios-x é empregada para a identificação de cerca de 95% das substâncias inorgânicas, além de ser usada para estudos de estruturas cristalinas. Valores quantitativos das fases presentes em certos materiais podem ser obtidos utilizando-se de métodos apropriados, como:

- Difração-absorção;
- Padrão Interno;
- Relações de Intensidade de Referência (RIR);
- Rietveld.

4.4. Tratamento de Minérios

A atividade mineira pode ser dividida em três fases resumidamente: a descoberta, a lavra e a concentração de minérios. A concentração de minérios, terceira atividade da cadeia mineral, trata do Tratamento de Minérios.

Chaves (1996, p. 02) define o universo do tratamento de minérios como o conjunto de operações unitárias de redução de tamanhos, separação de tamanhos, separação de espécies minerais e separação de sólidos e líquidos, bem como a arte de combiná-las em fluxogramas de modo a obter concentrados e produtos aceitáveis pelo mercado.

Pelo fato de a natureza raramente entregar bens minerais, principalmente metálicos, de forma a ser aproveitada diretamente, sem a necessidade de operações de classificação ou concentração, é recomendado que estudos preliminares para determinação das características do minério sejam realizados e que auxiliem na escolha dos melhores métodos de concentração e classificação para cada tipo de minério.

Em se tratando de minério de ferro, predominantemente hematítico, o uso de concentradores magnéticos de alta intensidade, flotação e jigagem (dependendo da granulometria) são os processos mais usados e consagrados. Para o desenvolvimento de rotas de concentração do depósito de ferro depositado na Pilha de Rejeitos deste estudo de caso optou-se pelo uso somente de rotas por concentradores magnéticos.

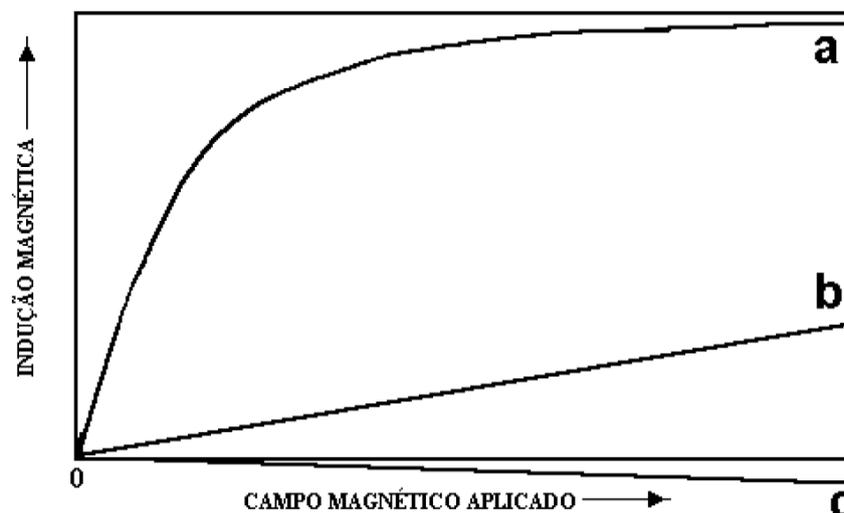
4.4.1. Concentradores Magnéticos

O uso de separadores magnéticos é largamente utilizado na área de processamento de minérios para concentração e/ou purificação de muitas substâncias minerais, podendo ser empregada no beneficiamento de minério, obviamente sua eficiência está vinculada à resposta ao campo magnético das espécies mineralógicas e materiais individualmente.

A propriedade de um mineral que determina sua resposta quando submetida à um campo magnético é a susceptibilidade magnética. Os minerais que são fortemente e fracamente atraídos pelo campo magnético são denominados de ferromagnéticos e paramagnéticos, respectivamente, já os minerais que são repelidos são denominados de diamagnéticos.

Pela Figura 7 observa-se que os minerais ferromagnéticos apresentam resposta rápida à indução magnética, sendo fortemente atraídos pelo campo magnético, como é o caso da magnetita. As partículas minerais paramagnéticas, como a hematita, apresentam uma resposta menos acentuada, sendo fracamente atraídos pelo campo magnético. Já nos minerais diamagnéticos, como o quartzo, que são repelidos por um campo magnético, a relação entre indução e campo induzido decresce linearmente.

Figura 7 – Indução magnética para diferentes espécies mineralógicas: (a) ferromagnéticas, (b) paramagnéticas e (c) diamagnéticas.



Fonte: Sampaio et al. 2010, p. 372.

Ambientalmente bem aceita, a separação magnética é uma técnica que pode ser usada tanto em rotas secas como úmidas. O método a seco é usado, geralmente, para



granulometrias mais grossas e a úmida para granulometrias médias e finas (Sampaio et al., 2010, p. 367). No entanto há a necessidade de se ter um bom grau de liberação no particulado grosso para uma boa eficiência das rotas secas.

Nos dias atuais há equipamentos bastante evoluídos que permitem separar desde materiais fortemente magnéticos à fracamente magnéticos, mesmo sob a forma de partículas muito finas. Isso resultou no desenvolvimento da separação magnética de alta intensidade (HIMS) e da separação magnética de alto gradiente (HGMS) que usa eletromagnetos resistentes ou supercondutores ou magnetos permanentes. O desenvolvimento das terras-raras contribuiu bastante para confecção de ímãs de campo magnético.

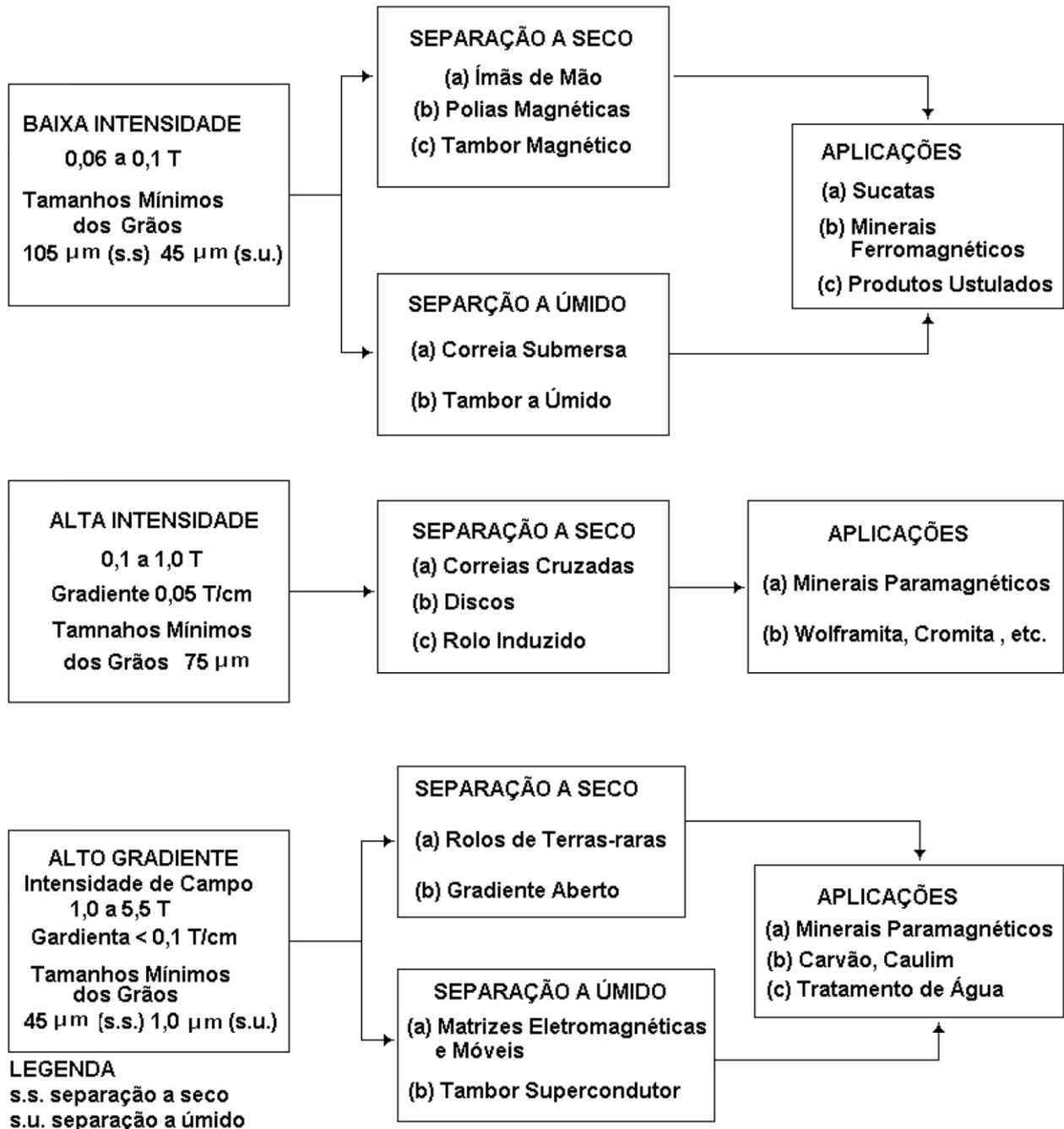
Os separadores magnéticos são divididos em dois grupos: separadores a seco e a úmido. Estes podem ser subdivididos de acordo com as características do campo de indução. Desta forma são comercializados separadores de baixa a alta intensidade, operando em vias secas ou úmidas.

Diversas também são as formas dos elementos que fazer o trabalho de separação nos equipamentos, como: separadores de tambor, de rolos induzidos, de correias cruzadas, de carrossel, entre outros. A Figura 8 ilustra as características e aplicações de alguns separadores magnéticos englobando critérios de classificação.

Utilizados neste trabalho os separadores magnéticos de alta intensidade para laboratório tem seu uso, em geral, restrito à concentração de minerais paramagnéticos, pois seu uso em minerais ferromagnéticos de alta susceptibilidade magnético pode acarretar problemas operacionais por não conseguir retirar o mineral da matriz mesmo utilizando alta pressão de água. A Figura 9 a seguir demonstra um típico separador magnético de alta intensidade para laboratório, similar ao usado para os testes realizadas durante este estudo de caso.



Figura 8 – Características e aplicações de alguns separadores magnéticos.



Fonte: Sampaio et al., 2010, p. 374.



Figura 9 – Modelo de Separador Magnético de Alta Intensidade de laboratório.



Fonte: Inbrás, 2022 (www.inbras.com.br acessado em 24/01/2022)

4.5. Especificações granulométricas comerciais do minério de ferro

As especificações podem variar para cada consumidor, principalmente em relação aos teores do elemento de interesse e seus contaminantes, as características do minério de ferro são geralmente particionadas em três frações granulométricas, (Wolff, 2009, p. 15 e 16):

- Granulados (*Lump ore*): > 6,35 mm, com alimentação direta nos altos fornos;
- *Sinter feed* grosso: < 6,35 e > 0,15 mm, necessita ser sinterizado;
- *Pellet feed*: < 0,15 mm, necessidade de confecção de pelotas para uso nos altos fornos.

Quanto maior a proporção de material granulado e teores mais elevados de ferro, maior valor agregado o minério possui, além de geralmente proporcionar redução dos custos de operação, alcançando melhores margens de lucratividade. No entanto, os granulados de hematita de alto teor no Quadrilátero Ferrífero estão praticamente esgotados.

4.6. Passivos Ambientais da Mineração

Dentre os diversos impactos ambientais que a mineração causa por sua atividade, uma das mais preocupantes é a forma de deposição e estocagem de resíduos sólidos e sólidos-líquidos denominados de estéreis e rejeitos. Estes resíduos quando secos geralmente são



estocados em formas de pilhas, já quando se encontram junto de solução aquosa é necessário a instalação de diques de contenção, barragens, ou operações de espessamento para a deposições de soluções sólido-líquidas mais concentradas e recirculação no sistema de beneficiamento ou devolução da água ao meio ambiental de forma tratada.

Durante muitos anos, nas décadas iniciais da mineração de ferro na região da Serra Azul, quando a atividade mineira era realizada de forma rudimentar aproveitando somente os minérios de altíssima qualidade, sem concentração, o resíduo sólido, considerado como rejeito foi depositado em ponta de aterro, formando pilhas de metros de altura, muitas vezes sem obras essenciais de drenagem e controle, gerando impactos consideráveis às bacias hidrográficas da região (Vieira, 2010, p. 02). Muito similar a essa situação caracteriza-se a Pilha de Rejeitos da Tora Mineração Ltda. objeto do estudo, com a diferença de haver *sumps*, diques de contenção de sólidos, bermas com contínua manutenção, e ações mitigadores de riscos e danos ambientais.

Essas estruturas em forma de pilhas acabam por serem consideradas como passivos ambientais, pois geram modificações visuais ao terreno, impactam no habitat de diversas espécies animais, acabam com as espécies vegetais onde estão instaladas, além da possibilidade de contaminação do solo por metais pesados, assoreamento de drenagens pelo carreamento de particulados, geração de poeira, entre outros.

O aproveitamento dessas pilhas de rejeitos como recurso de minério de ferro abre uma grande possibilidade de recuperação ambiental para a região, uma vez que a morfologia primitiva do terreno pode novamente ser reconformada e ambientalmente recuperada por programas de recuperação vegetal e animal.

Alguns conceitos são importantes ser tratados referentes à recuperação ambiental de passivos de mineração. Bittar (1997, p. 24-30) distingue os seguintes termos:

Restauração é a reprodução das condições existentes na área antes da perturbação. Fato considerado bastante improvável, senão, impossível;

Recuperação é a utilizada no sentido de estabilizar a área degradada;

Reabilitação é a recuperação em que a área degradada é adequada a um novo uso determinado, segundo um projeto prévio.

Embora a mineração ocorra desde o início do século XX no Brasil, políticas ambientais diretamente ligadas à mineração só foram desenvolvidas e implantadas após muitos anos. Somente a partir de 1989 as empresas de mineração passaram a ser obrigadas a formular e entregar o PRAD – Plano de Recuperação de Áreas Degradadas e somente a partir de 2018



foi instaurada a obrigatoriedade da apresentação e execução do Plano de Fechamento de Mina, o qual visa devolver de forma recuperada e reabilitada para novos usos todas as áreas impactadas diretamente pelas atividades de mineração em determinada região.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Tendo em vista a necessidade de entender o comportamento do ferro nas diversas faixas granulométricas que caracterizam os produtos comerciais de minério de ferro, os estudos de caracterização e concentração mineral da Pilha de Rejeitos foram concebidos de forma a gerar o entendimento de um eventual aproveitamento desse material diretamente, como produto tal qual, e de forma a desenvolver rotas de concentração através de concentradores magnéticos para geração de *sinter feed* utilizando-se rotas úmidas. Também foram realizados testes em concentradores magnéticos via seca.

Para os ensaios foram realizadas duas amostragens, uma inicial composta por material coletado superficialmente na pilha de rejeitos através da composição de alíquotas de aproximadamente 25 kg em 10 pequenas trincheiras abertas nas saias dos taludes ao longo das bancadas visando tentar compor uma amostra representativa do depósito (Amostra ROT-PIL), totalizando aproximadamente 250 kg, e, posteriormente, uma amostra composta por intervalos amostrais nos furos de sonda realizados na pilha de rejeitos, de modo a gerar uma amostra, também de 250 kg, com o teor médio das amostras de rejeito ferruginoso analisadas durante a sondagem (Amostra ROT-PIL-SOND) e maior representatividade tridimensional do depósito. O teor médio foi de 54% de Fe.

A Figura 10 apresenta os pontos amostrais realizados na pilha de rejeitos, onde foram abertas as trincheiras, e o material resultante da escavação foi homogeneizado com a pá de uma retroescavadeira (Foto 5), onde coletaram-se os 25 kg para composição da amostra.

Com exceção da determinação das fases minerais por difração de raios-X em quatro alíquotas proveniente da amostra composta por material de sondagem (ROT-PIL-SOND), todas as demais análises e testes de concentração magnética que foram realizadas na amostra ROT-PIL, conforme Fluxograma 1, foram executadas pelo laboratório SGS Geosol, incluindo a granulométrica na amostra ROT-PIL-SOND.

A difração de raios-X em alíquotas da amostra ROT-PIL-SOND foi realizada em laboratório particular da empresa Elfusa, do Grupo Curimbaba.



Figura 10 – Localização dos pontos amostrais para composição da amostra ROT-PIL.



Fonte: Autor

Foto 5 – Ponto de coleta de amostra de superfície da Pilha de Rejeitos através de pequenas trincheiras na saia do talude.

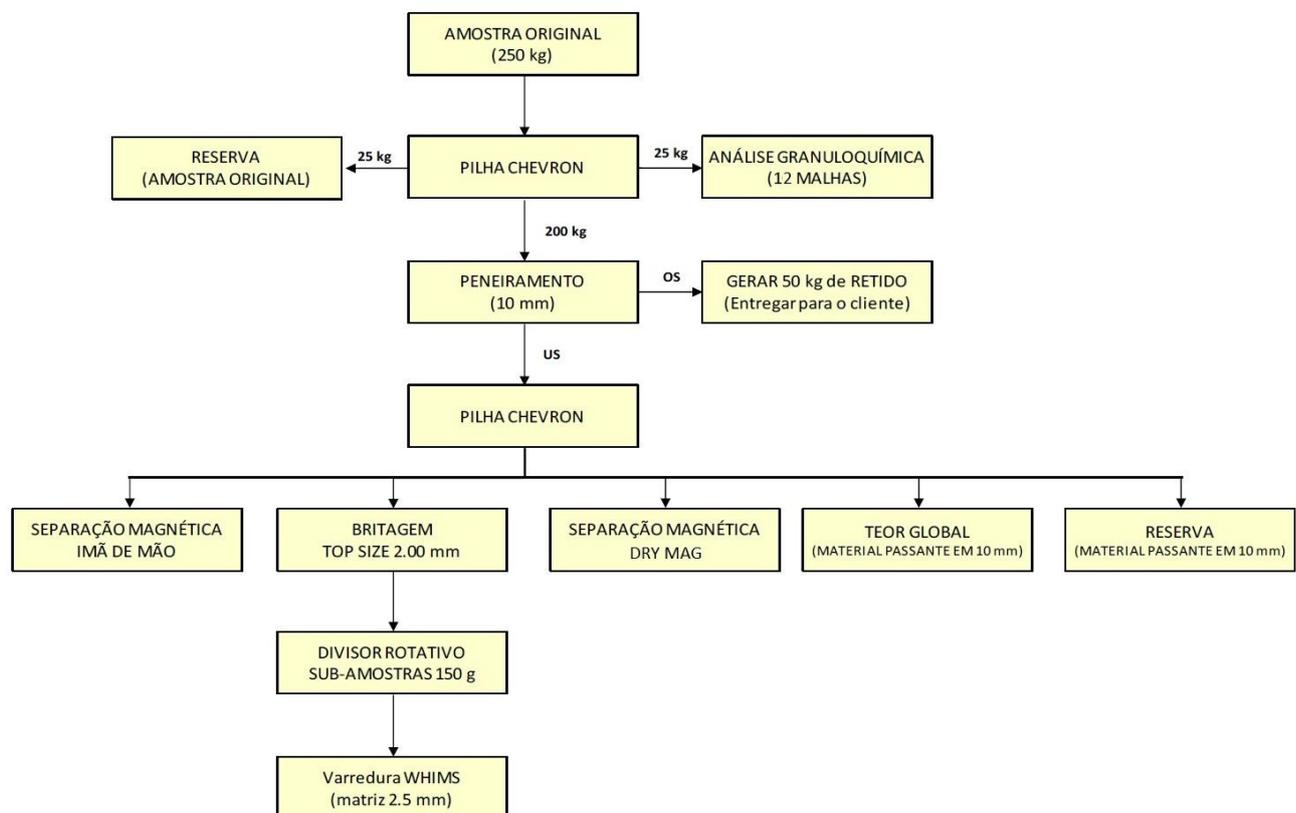


Fonte: Autor



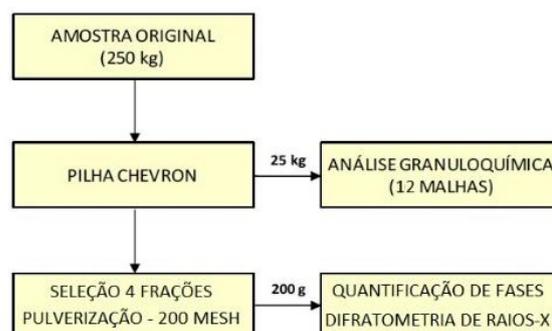
Como os teores de alimentação e a granulométrica das duas amostras foram bastante similares, decidiu-se por não repetir todos os ensaios de concentração na amostra ROT-PIL-SOND, restringindo esta somente aos ensaios de caracterização: granulométrica e determinação de fases minerais por difração de raios-X em quatro frações comerciais: granulado, > 6,30 mm; *sinter feed* grosso, <6,30 e >1,00 mm; *sinter feed* fino, <1,00 e >0,15 mm; e *pellet feed*, <0,15 mm (Fluxograma 2).

Fluxograma 1 – Fluxograma de procedimentos analíticos na amostra ROT-PIL.



Fonte: Autor

Fluxograma 2 – Fluxograma de procedimentos analíticos na amostra ROT-PIL-SOND.



Fonte: Autor



De forma resumida os principais testes e análises que envolveram a caracterização mineral e concentração magnética foram realizados da seguinte forma:

5.1. Granuloquímica

Após o recebimento da amostra tal qual, esta foi homogeneizada pelo método de pilha *chevron*, onde separou-se uma alíquota de 25 kg para realização dos testes granuloquímicos a úmido em 12 faixas granulométricas, todas em mm: 30,00; 19,00; 12,50; 8,00; 4,75; 2,00; 1,00; 0,50; 0,30; 0,15; 0,045; e <0,045. Do retido de cada malha de peneira foi medida a massa retida e uma alíquota preparada para determinação de Fe e elementos maiores através de fluorescência de raios-X e FeO por titulação com dicromato de potássio.

5.2. Difração de Raios-X para determinação de fases minerais

Únicos ensaios realizados fora dos laboratórios da SGS Geosol, as análises quantitativas das fases minerais presentes em 4 faixas granulométricas foram realizadas no laboratório particular da empresa de abrasivos, Elfusa. Como método de quantificação utilizou-se o de Rietveld.

Determinadas as faixas correspondentes a produtos de minério de ferro como: granulado, *sinter feed* grosso, *sinter feed* fino e *pellet feed*, alíquotas de 200 g dessas amostras foram preparadas após classificação da amostra tal qual, e pulverizadas em 200 mesh. Essa massa foi então encaminhada ao laboratório para confecção de pastilhas e análise por difratometria de raios-X.

5.3. Separação Magnética – Imã de Mão

A alíquota destinada a este teste é proveniente do material passante no peneiramento em 10 mm e após a homogeneização desse material passante retirou-se uma alíquota de 300 gramas, a qual foi feita uma solução com 30% de sólidos, colocada em recipiente adequado e misturada com agitador. A inserção de imãs de mãos na polpa, primeiramente de baixo campo magnético (1.500 G) e depois de médio campo (7.500 G) fizeram a retirada do material magnético dessa polpa, caracterizando uma rota úmida de concentração magnética Rougher-



Scavenger. Como produtos têm-se o concentrado magnético 1.500, concentrado magnético 7.500 e o não magnético 7.500.

5.4. Varredura Magnética WHIMS ou Lavabilidade Magnética

Para este teste de concentração parte do material homogeneizado do passante na peneira de 10 mm foi retirado e britado, reduzindo a um *top size* de 2,00 mm. Deste material, duas alíquotas de 150 g foram coletadas, totalizando 300 g para o teste.

Os concentradores magnéticos de alto campo têm sua intensidade regulada por corrente elétrica. Para esta análise foram utilizados os campos de 800, 2.000, 5.000, 9.000, 11.000 e 13.000 G em um *gap* da matriz de 2,5 mm. Cada campo gerou um concentrado com mensuração de massa e teores dos elementos químicos específicos. A porcentagem de sólidos inicial da polpa concebida para o teste foi de 30%.

5.5. Separação Magnética – *Dry Mag*

Diferentemente das outras etapas de concentração magnética, um teste em rolos magnéticos de 4.500 G foi também feito com uma alíquota de 976 gramas proveniente do passante em 10 mm em rota seca, sem a geração de polpa.

Neste teste foram experimentados 3 intervalos de *gaps* da matriz magnética: 10, 12 e 14 cm, gerando simplesmente como produtos o concentrado magnético e o não magnético.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo destina-se a apresentar todos os resultados e suas interpretações referentes às análises e testes que as amostras ROT-PIL e ROT-PIL-SOND foram submetidas durante o desenvolvimento dessa pesquisa, as quais embasaram as conclusões apresentadas no capítulo seguinte.

Antes de iniciar qualquer análise com as amostras enviadas ao laboratório, ambas foram homogeneizadas e uma alíquota separada para análise dos teores globais da amostra, também chamado nos testes de **Teor de Alimentação**.



Para a definição deste teor foram feitas análises em três alíquotas do mesmo material (triplicatas) para definir os teores globais das amostras. A Tabela 1 a seguir exprime esses resultados e o teor médio de alimentação esperado de cada uma das amostras.

Tabela 1 – Quadro de teores médios globais das amostras tal qual. Média realizada por triplicatas.

AMOSTRA		TEOR (%)													
ROT-PIL	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	FeO	MnO	CaO	TiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	BaO	V ₂ O ₅	LOI
Alíq. A	51.8	20.6	1.54	0.04	1	0.01	0	0.1	0.06	0.06	0.1	0.01	0.01	0.01	1.9
Alíq. B	52.4	21	1.63	0.04	1	0.01	0	0.1	0.06	0.06	0.1	0.01	0.01	0.01	1.9
Alíq. C	52	21	1.58	0.04	0.9	0.01	0	0.1	0.06	0.06	0.1	0.01	0.01	0.01	1.8
MÉDIA	52.07	20.9	1.58	0.04	1	0.01	0	0.1	0.06	0.06	0.1	0.01	0.01	0.01	1.9
ROT-PIL-SOND	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	FeO	MnO	CaO	TiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	BaO	V ₂ O ₅	LOI
Alíq. A	54.2	17.5	2.17	0.1	0.7	0.03	0	0.2	0.05	0.05	0.1	0.02	0.01	0.01	2.7
Alíq. B	54.9	17.7	2.14	0.1	0.8	0.03	0	0.2	0.05	0.05	0.1	0.02	0.01	0.02	2.7
Alíq. C	54.8	17.8	2.16	0.1	0.8	0.03	0	0.2	0.05	0.05	0.1	0.02	0.01	0.01	2.7
MÉDIA	54.63	17.7	2.16	0.1	0.8	0.03	0	0.2	0.05	0.05	0.1	0.02	0.01	0.01	2.7

Fonte: Autor

Através da Tabela 1 é possível notar que os resultados médios globais, de uma forma geral, não são tão distintos, se aproximando em cerca de 5% de diferença para os teores de Fe entre a amostra coletada em superfície – ROT-PIL – a qual está potencialmente mais submetida às ações das intempéries, da amostra coletada em testemunhos de sondagem – ROT-PIL-SOND – a qual gerou uma amostra mais representativa do depósito tridimensionalmente.

6.1. Granuloquímica

Os testes granuloquímicos realizados em 12 frações buscaram identificar as faixas onde há melhores concentrações de Fe nas amostras a fim de estabelecer estratégias de melhor aproveitamento e comercialização do produto passível de ser obtido na pilha de rejeitos.

As tabelas 2 e 3 trazem os resultados destas análises feitas nas duas amostras.



Tabela 2 – Quadro de resultados granulométricos da Amostra ROT-PIL.

DISTRIBUIÇÃO GRANULOQUÍMICA DA AMOSTRA SUPERFICIAL DA PILHA – ROT-PIL																		
PRODUTO (mm)	Massa retida simples (%)	Massa retida acum. (%)	Passante (%)	Dosagem (%)														
				Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	MnO	CaO	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	BaO	V ₂ O ₅	LOI	FeO
ALM CALC	100.00			52.14	21.46	1.57	0.08	0.02	0.01	0.06	0.12	0.06	0.05	0.01	0.01	0.01	1.88	0.90
+ 12,50	0.20	0.20	99.80	58.90	4.48	7.06	0.08	0.02	0.01	0.08	0.10	0.07	0.07	0.01	0.01	0.01	4.42	0.70
+ 8,00	0.50	0.80	99.20	62.30	5.35	1.14	0.10	0.02	0.01	0.04	0.13	0.07	0.02	0.01	0.01	0.01	2.03	1.09
+ 4,75	5.30	6.10	93.90	61.60	6.02	1.32	0.11	0.02	0.01	0.05	0.15	0.20	0.04	0.01	0.01	0.01	1.96	1.31
+ 2,00	14.20	20.20	79.80	61.50	7.33	1.38	0.11	0.02	0.01	0.05	0.14	0.09	0.03	0.01	0.01	0.01	2.25	1.39
+ 1,00	7.00	27.20	72.80	59.20	12.10	1.45	0.11	0.03	0.01	0.06	0.13	0.07	0.03	0.01	0.01	0.01	2.28	1.20
+ 0,500	8.50	35.60	64.40	56.30	15.40	1.15	0.08	0.02	0.01	0.03	0.09	0.08	0.02	0.01	0.01	0.01	1.66	1.30
+ 0,300	5.90	41.60	58.40	56.40	15.10	0.70	0.06	0.02	0.01	0.02	0.06	0.07	0.01	0.01	0.01	0.01	1.26	1.42
+0,150	16.10	57.70	42.30	56.30	17.30	0.56	0.05	0.02	0.01	0.05	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.77	0.76
+ 0,045	23.80	81.50	18.50	41.50	39.60	0.53	0.04	0.02	0.01	0.10	0.04	0.06	0.01	0.00	0.01	0.01	0.86	0.74
- 0,045 Fundo	18.5	100.00	0.00	46.00	26.00	4.48	0.11	0.02	0.03	0.07	0.28	0.02	0.19	0.02	0.01	0.01	3.95	0.26

Fonte: Autor

Tabela 3 – Quadro de resultados granulométricos da Amostra ROT-PIL-SOND.

DISTRIBUIÇÃO GRANULOQUÍMICA DA AMOSTRA DOS TESTEMUNHOS DE SONDAGEM DA PILHA – ROT-PIL-SOND																		
PRODUTO (mm)	Massa retida simples (%)	Massa retida acum. (%)	Passante (%)	Dosagem (%)														
				Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	MnO	CaO	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	BaO	V ₂ O ₅	LOI	FeO
ALM CALC	100.00			54.50	17.90	1.92	0.21	0.04	0.02	0.10	0.16	0.10	0.06	0.02	0.01	0.02	2.38	1.00
+ 30,00	1.06	1.06	98.94	43.70	35.50	0.18	0.43	0.04	0.01	0.10	0.01	0.10	0.01	0.01	0.01	0.01	1.78	1.21
+ 19,00	0.91	1.97	98.03	56.40	16.80	0.67	0.18	0.04	0.01	0.10	0.23	0.10	0.01	0.01	0.01	0.01	1.40	1.15
+ 12,50	1.11	3.08	96.92	63.30	7.40	1.14	0.23	0.05	0.01	0.10	0.15	0.10	0.02	0.01	0.01	0.02	1.63	1.81
+ 8,00	0.97	4.05	95.95	62.80	5.48	1.72	0.25	0.04	0.01	0.10	0.20	0.10	0.16	0.02	0.01	0.01	2.15	1.58
+ 4,75	5.07	9.12	90.88	62.80	5.73	1.36	0.27	0.04	0.01	0.10	0.19	0.10	0.05	0.01	0.01	0.02	2.32	1.45
+ 2,00	12.60	21.70	78.30	61.70	6.53	1.51	0.29	0.04	0.01	0.10	0.20	0.10	0.03	0.02	0.01	0.02	2.58	1.45
+ 1,00	7.76	29.46	70.54	60.00	9.93	1.42	0.27	0.04	0.02	0.10	0.16	0.10	0.03	0.01	0.01	0.02	2.83	0.90
+ 0,500	6.71	36.17	63.83	57.50	14.30	1.94	0.22	0.03	0.02	0.10	0.11	0.10	0.03	0.02	0.01	0.02	2.21	1.00
+ 0,300	5.21	41.38	58.62	57.40	16.20	0.86	0.17	0.04	0.02	0.10	0.09	0.10	0.02	0.01	0.01	0.01	1.52	1.50
+0,150	15.40	56.77	43.23	57.00	16.90	0.68	0.12	0.04	0.02	0.10	0.06	0.10	0.02	0.02	0.01	0.01	1.25	1.20
+ 0,045	23.10	79.82	20.18	46.80	31.90	0.79	0.11	0.03	0.02	0.10	0.07	0.10	0.01	0.02	0.01	0.01	1.22	0.99
- 0,045 Fundo	20.2	100.00	0.00	50.60	17.70	5.22	0.32	0.04	0.05	0.10	0.34	0.10	0.20	0.02	0.02	0.02	4.69	0.27

Fonte: Autor



Cada amostra foi estabelecida de aproximadamente 25 kg e pelas distribuições granulométricas é possível identificar grandes similaridades no comportamento químico das amostras perante as faixas granulométricas.

Inicialmente observa-se que não há material retido acima de 19,00 mm na amostra de superfície, enquanto na amostra da sondagem, as faixas de +30,00 e +19,00 perfazem somente 1,97% da massa da amostra, volume irrisório.

Em ambas as amostras as maiores proporções de massas retidas se acumulam entre as faixas +4,75 a 0,015 mm, demonstrando claramente que a vocação do recurso de ferro depositado na pilha de rejeitos é para constituição de *sinter feed* grosso e fino.

Outro ponto relevante se refere às duas faixas granulométricas mais finas, passantes em 0,15 mm. São essas as faixas responsáveis pela diluição dos teores médios da amostra tal qual. Abaixo da faixa de 0,15 mm os teores de Fe sofrem abruptos decréscimos, passando de teores em torno de 56% de Fe para teores entre 40 e 50% de Fe. Não somente responsáveis pela piora na qualidade do minério, ambas faixas granulométricas representam cerca de 42 a 43% da massa das amostras iniciais, um volume bastante considerável de finos nas amostras.

Em termos de qualidade do *sinter feed* passível de ser gerado na pilha de rejeitos, supondo a utilização somente de peneiras classificatórias no beneficiamento do recurso, pode ser esperar um produto com teor médio próximo de 60% de Fe, com recuperação mássica entre 55 e 60% da massa do depósito.

6.2. Determinação de Fases Mineraias – Difractometria de Raios-X

Para melhor compreender os teores de Fe e FeO presente nas faixas granulométricas, foram selecionadas 4 frações comerciais para realização de análises para a determinação quantitativa das fases mineraias através de difratometria de raios-X.

As frações selecionadas para análises foram, todas em mm: > 6,30; < 6,30 e > 1,00; < 1,00 e > 0,15; e < 0,15.

A Tabela 4 resume os resultados obtidos pelas análises. Resultados mais detalhados da difratometria estão inseridos no Anexo I.

Basicamente o material depositado na pilha de rejeitos é composto de óxido de ferro na forma de hematita e suas variações, quartzo e óxidos de ferro hidratado na forma de goethita e derivações.



Tabela 4 – Análise quantitativa de fases em alíquotas da amostra ROT-PIL-SOND.

Amostra	Fases Minerais (%)		
	Hematita (α -Fe ₂ O ₃)	Quartzo (SiO ₂)	Goethita (α -FeO(OH))
ROT-PIL-SOND +6,30	87,2	9,3	3,5
ROT-PIL-SOND +1,00	83,9	12,5	3,6
ROT-PIL-SOND +0,15	82,9	17,1	Traços
ROT-PIL-SOND -0,15	69,0	26,9	4,1

Fonte: Autor

Nota-se uma grande proporção de hematita na fração de granulados, > 6,30 mm, porém é uma faixa granulométrica onde não há mais que 10% de massa retida, não sendo então tão significativa esse resultado.

As frações de *sinter feed*, entre 0,15 e 6,30 mm, apresentaram boas quantidades de hematita, cerca de 83%, mas já é possível notar um acréscimo de sílica na fração entre 0,15 e 1,00 mm. Por fim, a fração < 0,15 mm apresenta uma boa queda nas proporções de óxido de ferro, aumento de quartzo e um leve acréscimo nas proporções dos óxidos hidratados de ferro.

6.3. Separação Magnética – Imã de Mão

Conforme explicado no capítulo 5, um circuito *rougher-scavenger* de concentração magnética foi simulado através de imãs de mão de baixo e médio campo (1.500 e 7.500 G) em polpa contendo 30% de sólidos da amostra ROT-PIL, passante em 10 mm.

Os testes de concentração magnética foram realizados em três alíquotas de 150 g cada. A primeira foi enviada para análise química global, demonstrado pela Tabela 5, e as outras duas alíquotas formaram uma amostra para realização de testes granuloquímicos, somando pouco mais de 290 g.

Como pode ser observado nos resultados da Tabela 5, é possível estabelecer um bom produto comercial na fração *sinter feed*, com teores médios globais de 63,69% de Fe e uma recuperação mássica de 74,60%. Contaminantes como alumina e fósforo apresentaram teores muito baixos.



Tabela 5 – Resultados da concentração magnética em Circuito *Rougher-Scavenger*.

Circuito RGH-SCV Ímã de mão a úmido		Amostra: ROT-PIL						Granulometria: < 10.0 mm						% Sólidos: 30		
Massa inicial: 150 g		TEOR (%)														
ETAPA	Massa (%)	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	FeO	MnO	CaO	TiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	BaO	V ₂ O ₅	LOI
ALM EXPERIMENTAL		52.07	20.87	1.58	0.08	0.97	0.01	0.01	0.13	0.06	0.06	0.05	0.01	0.01	0.01	1.85
ALM CALCULADA	100.00	53.93	18.32	1.39	0.08	0.83	0.02	0.01	0.11	0.05	0.02	0.05	0.01	0.01	0.01	1.87
MAG 1500	10.20	65.50	5.00	0.61	0.05	3.36	0.03	0.01	0.07	0.05	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.59
NÃO MAG 1500	89.80	52.62	19.82	1.48	0.08	0.55	0.02	0.01	0.11	0.05	0.02	0.05	0.01	0.01	0.01	2.02
MAG 7500	64.40	63.40	4.99	0.88	0.07	0.56	0.02	0.01	0.10	0.04	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	1.50
NÃO MAG 7500	25.40	25.30	57.40	3.01	0.12	0.52	0.01	0.01	0.15	0.09	0.02	0.11	0.01	0.01	0.01	3.33
Concentrado Total	74.60	63.69	4.99	0.84	0.07	0.94	0.02	0.01	0.10	0.04	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	1.38

Fonte: Autor

Em relação aos 25,40% em massa de rejeitos da concentração magnética, observa-se ainda uma boa quantidade de Fe neste material, com teor médio de 25,30%, sugerindo a necessidade de concentradores de campo magnético de alta intensidade para boa recuperação do mineral de minério.

Os testes granuloquímicos foram realizados nas massas retidas pelo Ímã de 1.500 G, 7.500 G e na massa não magnética a 7.500 G em 4 faixas granulométricas conforme as tabelas 6, 7 e 8.

Tabela 6 – Resultados granuloquímicos do retido no concentrador magnético 1500 Gauss.

Circuito RGH-SCV Ímã de mão a úmido		Amostra: ROT-PIL - CONC MAG 1500						Granulometria: < 10.0 mm								
Massa inicial: 150 g		TEOR (%)														
PRODUTO (mm)	Massa (g)	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	FeO	MnO	CaO	TiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	BaO	V ₂ O ₅	LOI
ALM EXP	27.00	65.50	5.00	0.61	0.05	3.36	0.03	0.01	0.07	0.05	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.59
ALM CALC	25.50	65.63	4.97	0.63	0.05	3.32	0.03	0.02	0.08	0.06	0.06	0.03	0.01	0.01	0.01	0.77
+ 2,00	6.00	66.20	4.46	0.66	0.06	4.21	0.04	0.02	0.10	0.08	0.07	0.02	0.01	0.02	0.01	0.51
+ 0,500	7.50	65.50	5.13	0.62	0.06	3.44	0.03	0.01	0.09	0.06	0.06	0.02	0.01	0.01	0.01	0.85
+ 0,150	7.00	67.80	2.99	0.57	0.04	3.05	0.03	0.02	0.05	0.06	0.06	0.04	0.01	0.01	0.01	0.64
- 0,150 Fundo	5.0	62.10	8.13	0.67	0.04	2.44	0.02	0.04	0.07	0.04	0.06	0.02	0.01	0.01	0.01	1.12

Fonte: Autor



Somente 25,5 gramas da massa de sólidos da polpa foi atraída pelo ímã de 1.500 G, demonstrando a pequena quantidade de minerais ferromagnéticos na rocha, como a magnetita, por exemplo. Tal fato pode ser confirmado pelos teores de FeO nas faixas granulométricas deste concentrado. O teor médio de FeO na amostra global é de somente 0,97%.

As faixas acima de 0,15 mm apresentaram excelentes resultados para teores de Fe, no entanto a massa é relativamente pequena em relação a amostra tal qual. Ocorre ainda aproximadamente 20% de finos nesse concentrado.

Aproximadamente 64% da massa inicial de sólidos da polpa foi atraído pelo campo de 7.500 G, demonstrando o predomínio de minerais que necessitam de um campo magnético maior para serem atraídos, como é o caso da hematita. Todas as faixas apresentaram teores químicos bastante favoráveis à geração de produtos de minério de ferro, sempre superior a 62% de Fe contido.

Tabela 7 – Resultados granuloquímicos do retido no concentrador magnético 7500 Gauss.

Circuito RGH-SCV Ímã de mão a úmido		Amostra: ROT-PIL - CONC MAG 7500										Granulometria: < 10.0 mm				
Massa inicial: 150 g		TEOR (%)														
PRODUTO (mm)	Massa (g)	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	FeO	MnO	CaO	TiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	BaO	V ₂ O ₅	LOI
ALM EXP	188.00	63.40	4.99	0.88	0.07	0.56	0.02	0.01	0.10	0.04	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	1.50
ALM CALC	186.00	63.93	5.37	0.91	0.08	0.66	0.02	0.01	0.11	0.05	0.07	0.02	0.01	0.01	0.01	1.63
+ 2,00	41.00	64.00	4.55	0.91	0.10	0.86	0.02	0.01	0.13	0.05	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	1.80
+ 0,500	34.00	65.00	4.54	1.10	0.09	0.69	0.03	0.01	0.12	0.08	0.07	0.02	0.01	0.01	0.01	1.86
+ 0,150	50.00	65.50	3.95	0.71	0.06	0.62	0.03	0.01	0.07	0.05	0.08	0.01	0.01	0.01	0.01	1.32
- 0,150 Fundo	61.00	62.00	7.55	0.96	0.07	0.53	0.02	0.02	0.11	0.03	0.06	0.02	0.01	0.01	0.01	1.63

Fonte: Autor

Nota-se também que cerca de 30% da amostra é composta por finos, <0,15 mm, faixa a qual dilui a qualidade global do concentrado, com teores de sílica que chegam a 7,55%. A proporção em massa de finos, <0,15 mm no produto concentrado final é de 31,20%.

Por fim, tem-se a análise granuloquímica da massa não magnética expressa na Tabela 8, que pode ser considerada o rejeito dessa simulação de circuito de concentração magnética.



Tabela 8 – Resultados granulométricos do material não atraído no concentrador magnético 7500 Gauss.

Circuito RGH-SCV Ímã de mão a úmido		Amostra: ROT-PIL - NÃO MAGNÉTICO										Granulometria: < 10.0 mm				
Massa inicial: 150 g		TEOR (%)														
PRODUTO (mm)	Massa (g)	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	FeO	MnO	CaO	TiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	BaO	V ₂ O ₅	LOI
ALM EXP	81.00	25.30	57.40	3.01	0.27	0.52	0.01	0.01	0.15	0.09	0.02	0.11	0.01	0.01	0.01	3.33
ALM CALC	79.50	20.37	63.76	2.63	0.21	0.41	0.01	0.02	0.13	0.07	0.02	0.08	0.01	0.01	0.01	2.93
+ 2,00	13.00	54.20	12.70	2.99	0.46	0.84	0.02	0.01	0.21	0.02	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	5.11
+ 0,500	8.50	24.60	55.50	2.83	0.39	1.08	0.01	0.01	0.13	0.07	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	4.37
+ 0,150	12.00	13.20	78.80	1.43	0.14	0.74	0.01	0.03	0.05	0.04	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	1.91
- 0,150 Fundo	46.00	11.90	75.80	2.80	0.13	0.07	0.01	0.02	0.12	0.09	0.01	0.12	0.01	0.01	0.01	2.31

Fonte: Autor

Equivalente a 27,2% da amostra tal qual, a massa de material não magnético (rejeitos) tem boa correspondência com a recuperação mássica da amostra que foi submetida às análises químicas globais que foi de 74,60% de material magnético concentrado. Praticamente todas as faixas apresentam teores de Fe abaixo de 25%, com exceção do retido em 2,00 mm, equivalente à 16% desse material não magnético, e que possui teores médios de 54,20% de Fe contido. Tal fato abre a possibilidade para o desenvolvimento de processos mais eficazes para que não se perca essa quantidade de ferro no rejeito.

6.4. Varredura Magnética – WHIMS

Testes em concentradores magnéticos de alto campo também foram realizados na amostra ROT-PIL para comparação de eficiência com a simulação de circuito *rougher-scavenger* realizada pelos ímãs de mão.

Britada em 2 mm, a amostra ROT-PIL foi submetida a 6 níveis de campo magnético e os resultados são apresentados na Tabela 9. A Tabela 10 demonstra os resultados de um produto acumulado das concentrações por faixas.

Para esse teste utilizou-se uma amostra de massa inicial de 300 g, em polpa com 30% de sólidos iniciais, no entanto ocorre adição de água durante a realização do teste.



Através do quadro de resultados abaixo é possível notar que os melhores resultados químicos para ferro estão na faixa de concentrados até 9.000 G onde há uma boa quantidade de material atraído pelo campo magnético, com teores elevados, acima de 58% de Fe.

A contribuição em recuperação mássica para os campos magnéticos de 11.000 e 13.000 G é relativamente pequena em relação à massa inicial, 1,75 e 0,7%, respectivamente (Tabela 10).

Nota-se também que nesses campos de alta intensidade os teores de Fe sofrem um grande decréscimo em relação às faixas de menor intensidade. Pelo alto campo o qual os minerais são submetidos, muitos minerais diamagnéticos possivelmente estão sendo carregados com os minerais paramagnéticos, ou estão em formato de partículas mistas, uma vez que essa amostra não passou por processo de moagem, somente britagem em 2 mm.

Tabela 9 – Resultados globais por faixa de concentrador magnético de campo magnético de alta intensidade de laboratório.

Varredura WHIMS		Amostra: ROT-PIL														
ETAPA	Massa (g)	TEOR (%)														
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	MnO	CaO	TiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	BaO	V ₂ O ₅	LOI	FeO
ALM EXPERIMENTAL	300.00	52.07	20.87	1.58	0.08	0.01	0.01	0.13	0.06	0.06	0.05	0.01	0.01	0.01	1.85	0.97
ALM CALCULADA	285.50	51.80	21.81	1.44	0.08	0.03	0.03	0.11	0.06	0.04	0.05	0.01	0.01	0.01	-	0.92
MAG 800	26.00	65.90	3.47	0.59	0.05	0.03	0.03	0.07	0.04	0.06	0.02	0.01	0.01	0.01	0.59	3.11
NÃO MAG 800	259.50	50.39	23.64	1.52	0.08	0.03	0.03	0.12	0.06	0.04	0.05	0.01	0.01	0.01	-	0.70
MAG 2000	59.50	66.20	3.81	0.66	0.06	0.03	0.02	0.08	0.06	0.06	0.02	0.01	0.01	0.01	0.96	1.23
NÃO MAG 2000	200.00	45.69	29.55	1.78	0.09	0.02	0.03	0.13	0.06	0.04	0.06	0.01	0.01	0.01	-	0.55
MAG 5000	86.00	64.20	4.27	0.98	0.08	0.03	0.02	0.11	0.04	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	1.41	0.57
NÃO MAG 5000	114.00	31.72	48.61	2.39	0.10	0.02	0.04	0.15	0.08	0.03	0.08	0.01	0.01	0.01	-	0.53
MAG 9000	46.00	58.50	11.40	1.86	0.14	0.03	0.03	0.18	0.04	0.04	0.04	0.01	0.01	0.01	3.11	0.48
NÃO MAG 9000	68.00	13.60	73.79	2.74	0.07	0.01	0.05	0.12	0.11	0.03	0.11	0.01	0.01	0.01	-	0.56
MAG 11000	5.00	51.50	17.90	2.65	0.17	0.02	0.05	0.22	0.05	0.03	0.06	0.01	0.01	0.01	4.29	0.25
NÃO MAG 11000	63.00	10.60	78.22	2.75	0.07	0.01	0.05	0.11	0.11	0.03	0.12	0.01	0.01	0.01	-	0.59
MAG 13000	2.00	43.10	30.10	3.35	0.19	0.03	0.06	0.22	0.14	0.03	0.06	0.02	0.02	0.01	I.S.	0.24
NÃO MAG 13000	61.00	9.53	79.80	2.73	0.06	0.01	0.05	0.11	0.11	0.03	0.12	0.01	0.01	0.01	2.24	0.60

Fonte: Autor



Tabela 10 – Quadro de concentrados de minério de ferro por faixa de intensidade magnética.

Varredura WHIMS		Produto Acumulado					
Amostra ROT-PIL		Teor (%)					
Campo Magnético (Gauss)	Massa retida (g)	Massa Acumulada (%)	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	FeO
MAG 800	26.00	9.11%	65.90	3.47	0.59	0.05	3.11
MAG 2000	59.50	29.95%	66.11	3.71	0.64	0.06	1.80
MAG 5000	86.00	60.07%	65.15	3.99	0.81	0.07	1.18
MAG 9000	46.00	76.18%	63.74	5.56	1.03	0.08	1.04
MAG 11000	5.00	77.93%	63.47	5.83	1.07	0.08	1.02
MAG 13000	2.00	78.63%	63.29	6.05	1.09	0.09	1.01

Fonte: Autor

O produto gerado pelos concentradores de campo magnético elevado demonstra excelentes resultados até o campo magnético de 9.000 G, gerando um produto de recuperação mássica e teores médios de Fe levemente superior ao produto gerado pelos testes com imã de mão. Porém, esses separadores magnéticos possuem custos mais elevados, principalmente pelo uso contínuo de corrente elétrica em alguns modelos para a indução do campo magnético. Operacionalmente, as faixas de campo magnético mais elevadas pouco implementaram na recuperação mássica do concentrado final e, negativamente, proporcionou uma queda no teor médio de Fe e aumento no teor médio de sílica.

6.5. Separação Magnética – DRY MAG

Último teste de concentração magnética realizada na amostra ROT-PIL foi através de concentradores magnéticos de rolos em rotas secas, visando entender se era possível gerar produto em unidades de concentração que requerem licenciamentos ambientais mais simplificados pela ausência de captação de água e consequente necessidade de destinar a água do circuito para barragens, baias, ou outras formas de tratamento e acondicionamento de materiais fluídos.



Tabela 11 – Quadro de resultados do teste de concentração magnética a seco.

DRY MAG – 4500 GAUSS			Amostra: Pilha – ROT-PIL						Granulometria: Passante em 10.0 mm								
TESTE	ETAPA	Massa (g)	TEOR (%)														
			Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	MnO	CaO	TiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	BaO	V ₂ O ₅	LOI
-	Alim. Experimental	-	52.07	0.97	20.87	1.58	0.08	0.01	0.01	0.13	0.06	0.06	0.05	0.01	0.01	0.01	1.85
01 (GAP +14 cm)	Alim. Calc.	976.0	52.27	0.80	20.97	1.45	0.08	0.02	0.02	0.12	0.06	0.05	0.05	0.01	0.01	0.01	1.89
	Mag.	268.0	52.20	1.48	23.80	1.29	0.06	0.02	0.03	0.11	0.07	0.02	0.05	0.01	0.01	0.01	1.38
	Não Mag.	708.0	52.30	0.54	19.90	1.51	0.08	0.02	0.01	0.12	0.05	0.06	0.05	0.01	0.01	0.01	2.08
02 (GAP +12 cm)	Alim. Calc.	991.0	52.32	0.75	21.98	1.55	0.08	0.02	0.02	0.12	0.06	0.02	0.05	0.01	0.02	0.01	2.08
	Mag.	535.0	54.80	1.10	20.00	1.22	0.06	0.02	0.02	0.10	0.07	0.02	0.04	0.01	0.01	0.01	1.48
	Não Mag.	456.0	49.40	0.35	24.30	1.93	0.10	0.02	0.01	0.15	0.05	0.02	0.06	0.01	0.03	0.01	2.79
03 (GAP +10 cm)	Alim. Calc.	989.0	52.34	0.77	20.84	1.56	0.08	0.02	0.01	0.12	0.06	0.02	0.05	0.01	0.01	0.01	2.08
	Mag.	708.0	54.90	0.94	17.60	1.23	0.06	0.02	0.01	0.10	0.05	0.02	0.04	0.01	0.01	0.01	1.54
	Não Mag.	281.0	45.90	0.35	29.00	2.40	0.12	0.01	0.01	0.17	0.07	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01	3.45

Fonte: Autor

Através dos resultados expressos na Tabela 11, pode-se notar que os testes foram realizados sob um campo magnético constante de 4.500 G, alternando somente o *gap* da matriz magnética. Em todos os testes os resultados foram bastante ruins, não havendo uma efetiva concentração mineral, somente uma partição de massa, as quais apresentaram teores químicos bastante semelhantes entre o material considerado magnético e não magnético.

Para o teste utilizou-se 976,00 g do material passante em 10,00 da amostra original.

O melhor resultado obtido pelo teste foi com o *gap* + 10 cm, onde ocorreu um ligeira concentração no produto magnético de quase 3% em relação ao teor de alimentação da amostra, no entanto a massa tida como não magnética resultou em 45,90% de Fe contido, indicando claramente a baixa eficiência do método para este tipo de minério.

7. CONCLUSÕES

Com o objetivo de caracterizar mineralogicamente e quimicamente o depósito de minério formado pela Pilha de Rejeitos da Tora Mineração Ltda. este trabalho focou em utilizar ferramentas consagradas da indústria mineral para comprovar a viabilidade de se obter produtos comercializáveis de minério de ferro a partir desse material depositado após lavra seletiva em recursos in situ de minério de ferro da Formação Cauê localizados logo a sul da área de deposição.



Através da difração de raios-x pode-se confirmar o amplo predomínio de hematita na composição mineralógica do material estudado, sendo que a maior quantidade desse mineral está presente nas frações sinter feed grosso e granulado, decrescendo conforme a granulometria diminui.

Tal fato também pode ser visto nos ensaios granuloquímicos o qual revelou que cerca de 40% das amostras coletadas no depósito são caracterizadas por materiais finos, abaixo de 0,15 mm, onde ocorre um importante decréscimo nos teores de ferro e aumento de sílica.

A baixa porcentagem de material retido acima de 8,00 mm confirma a vocação da pilha de rejeitos para obtenção de *sinter feed*, sendo em maior quantidade o *sinter feed* fino, entre 0,15 e 1,00 m.

As frações acima de 0,15, por si só, seriam capazes de gerar um produto de excelente qualidade, com teores médios de Fe acima de 57%, passíveis de comercialização direta, no entanto não há sistema de classificação em via seca capaz de selecionar somente as frações acima de 0,15 mm, para tal é necessário a inserção de água no sistema de classificação.

Partindo desse princípio da necessidade de água para obter produtos de maior valor agregado, o qual indiscutivelmente passará por processos de licenciamento ambientais mais rigorosos e demorados, é de total sentido pensar em rotas de concentração via úmida para esse projeto de aproveitamento mineral.

Por se tratar de métodos eficientes e de baixo custo operacional, os concentradores magnéticos foram escolhidos como base para o desenvolvimento destas rotas para concentração dos minerais portadores de ferro, como a hematita e magnetita.

Ambos os testes em via úmida apresentaram excelentes resultados. O primeiro, com imãs de mão de baixo e médio campo – 1.500 e 4.500 G – simulando um circuito *rougher-scavenger* apresentou um concentrado de 63,69% de Fe com uma recuperação mássica de 74,60%.

Já os testes realizados em concentradores de alto campo magnético também reportou resultados similares no produto acumulado na faixa de 9.000 G, com uma leve melhora na recuperação mássica e na qualidade do minério, 76,18% de recuperação mássica e 63,74% de Fe. Por se tratar de uma rota com menor consumo energético, o circuito *rougher-scavenger* parece ser o mais adequado para o aproveitamento deste recurso.

Os testes realizados em concentradores magnéticos de rota seca, em campo de 4.500 G, não apresentaram resultados satisfatórios, pouco concentrando o material ferruginoso da amostra.



Em se tratando de um passivo ambiental, a oportunidade de se aproveitar a pilha de rejeitos como fonte de recursos de minério de ferro abre a possibilidade da eliminação ou redução do impacto ambiental a qual a pilha proporcionou na região em que está instalada. Seu total aproveitamento como produto direto, ao teor médio de 54% de Fe, embora bastante pobre, porém comercializável à baixos preços, pode proporcionar a recuperação da topografia primitiva da região, bem como seu reflorestamento.

No entanto, buscando um maior valor agregado ao recurso e utilizando vias úmidas de concentração o impacto ambiental gerado pela pilha será transferido de local, porém em menor proporção, uma vez que cerca de 75% do material é passível de ser aproveitado comercialmente, restando aproximadamente 25% de rejeitos a serem novamente depositados. Considerando que o recurso da pilha está estimado em 2,4 Mt, ter-se-ia um novo passivo de aproximadamente 600 Kt de material depositado.

De forma conclusiva, os testes realizados mostram a potencialidade para a transformação de um passivo ambiental em recurso mineral embasado nos excelentes resultados obtidos dos testes de concentração realizados em nível de bancada.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. **Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero.** Precambrian Research, vol. 90, p. 29-58. 1998.

ANM. **Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas.** Coordenação técnica de Marina Dalla Costa. Brasília: ANM, 2020.

BITTAR, O. Y. **Avaliação da Recuperação de Áreas Degradadas por Mineração na Região Metropolitana de São Paulo.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

CAXITO, F.; DIAS, T. G. Ferro. In: PEDROSA-SOARES, A. C.; VOLL, E.; CUNHA, E. C. (coord.) **Recursos Minerais de Minas Gerais On Line: síntese do conhecimento sobre as riquezas minerais, história geológica, meio ambiente e mineração de Minas Gerais.** Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (CODEMGE), 2018.

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minério.** 1 ed. São Paulo: Signus Editora. 1996.

CHEMALE JUNIOR, F.; TAKEHARA, L. **Minério de Ferro: Geologia e Geometalurgia.** São Paulo: Editora Blucher, 2013.

CORREIA, J. C. G. **Classificação e Peneiramento.** In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. (ed.). Tratamento de Minérios. 5 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 2010, p. 257-300.

INBRAS. **Concentrador Magnético de Alta Intensidade, Via Úmida, Escala de Bancada** (Concentrador WHC de laboratório). Diadema/ SP: Disponível em: <<https://inbras.com.br/concentrador-magnetico-de-alta-intensidade-via-umida-escala-de-bancada-concentrador-whc-de-laboratorio/>>. Acesso em 24 jan. 2022.



PORPHÍRIO, N. H.; BARBOSA, M. I. M.; BERTOLINO, L. C. **Caracterização Mineralógica de Minérios.** In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. (ed.). Tratamento de Minérios. 5 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 2010, p. 57-84.

SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A. **Separação Magnética e Eletrostática.** In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. (ed.). Tratamento de Minérios. 5 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 2010, p. 367-398.

VIEIRA, K. G. **Aspectos Geotécnicos e Econômicos da Recuperação Ambiental de Áreas Degradadas por Antigas Pilhas de Rejeitos:** Um Estudo de Caso. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

WOLFF, A. P. **Caracterização de Rejeitos de Minério de Ferro de Minas da Vale.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

WOOD MACKENZIE. **Global Iron Ore Demand** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por ggr@pocos-net.com.br. Acesso em: 19 jan. 2022.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG
Campus Avançado de Poços de Caldas

Rodovia José Aurélio Vilela, nº 11.999 - Cidade Universitária
CEP: 37715-400 - Poços de Caldas/MG



ANEXO I – Difrações de Raios-X

Numero do Certificado: 157245/2021 - 1.0

Produto: ROT - PIL - SONDA (+ 6,30 mm)

Requisitante: Guilherme José Rampazzo

Análise Química

	RESULTADO	UNIDADE
TiO2	0,22	%
SiO2	7,01	%
Fe2O3	90,06	%
CaO	0,03	%
MgO	0,06	%
Na2O	0,09	%
K2O	0,1	%
Cr2O3	0	%
ZrO2	0,01	%
Al2O3	2,17	%
MnO	0	%
P2O5	0,25	%

LOI 1050 °C

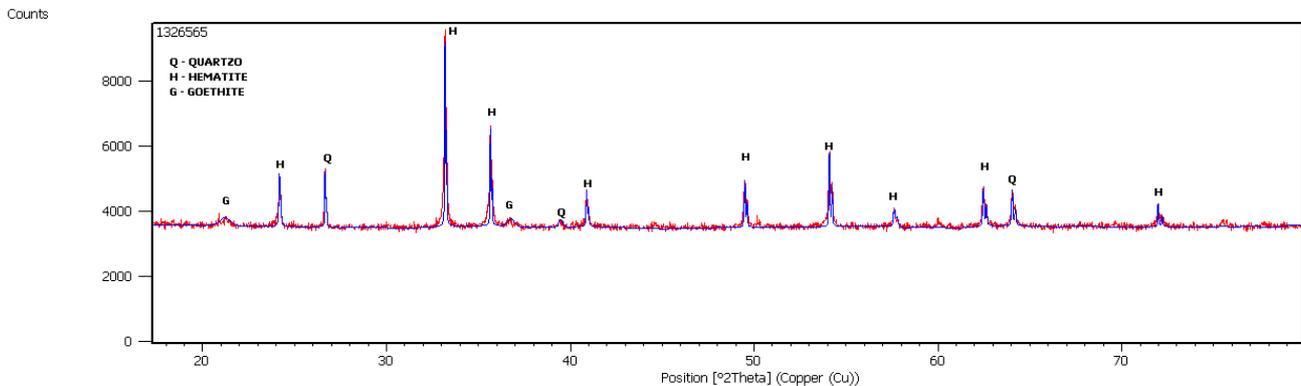
	RESULTADO	UNIDADE
U+PF	2,29	%

Distribuição de Partículas à Laser (MALVERN)

	RESULTADO	UNIDADE
Ds 10	1,2	um
Ds 50	14,6	um
Ds 90	68,7	um

Análises Mineralógicas DRX

FASES	%
Hematite (α -Fe2O3)	87,2
Quartz SiO2	9,3
Goethite α -FeO(OH)	3,5



Numero do Certificado: 157244/2021 - 1.0

Produto: ROT - PIL - SONDA (+ 1,00 mm)

Requisitante: Guilherme José Rampazzo

Análise Química

	RESULTADO	UNIDADE
TiO2	0,18	%
SiO2	7,93	%
Fe2O3	90,06	%
CaO	0,03	%
MgO	0,01	%
Na2O	0,12	%
K2O	0,03	%
Cr2O3	0,01	%
ZrO2	0,01	%
Al2O3	1,4	%
MnO	0	%
P2O5	0,26	%

LOI 1050 °C

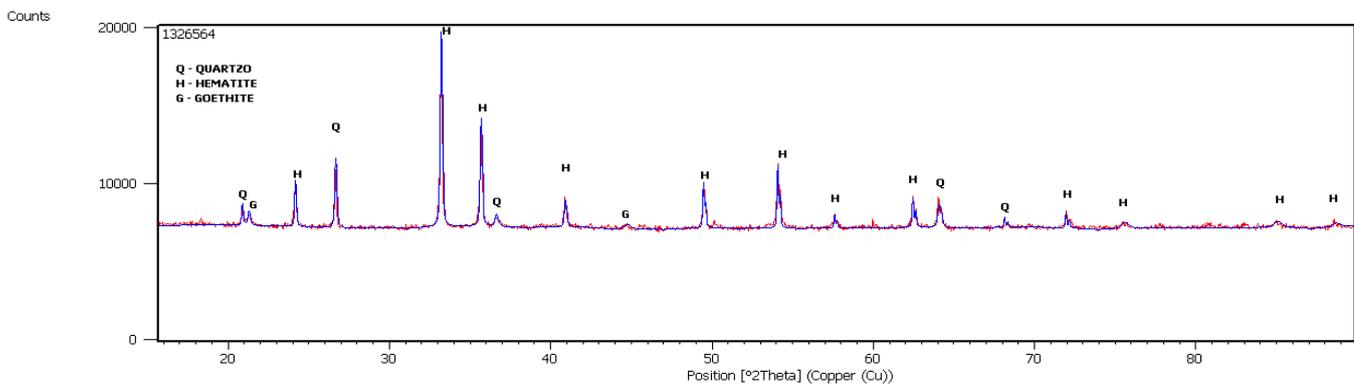
	RESULTADO	UNIDADE
U+PF	2,69	%

Distribuição de Partículas à Laser (MALVERN)

	RESULTADO	UNIDADE
Ds 10	1,4	um
Ds 50	20,6	um
Ds 90	78,4	um

Análises Mineralógicas DRX

FASES	%
Hematite (α -Fe2O3)	83,9
Quartz SiO2	12,5
Goethite α -FeO(OH)	3,6



Numero do Certificado: 157243/2021 - 1.0

Produto: ROT - PIL - SONDA (+ 0,15 mm)

Requisitante: Guilherme José Rampazzo

Análise Química

	RESULTADO	UNIDADE
TiO2	0,08	%
SiO2	15,94	%
Fe2O3	82,34	%
CaO	0,07	%
MgO	0,02	%
Na2O	0,15	%
K2O	0	%
Cr2O3	0	%
ZrO2	0	%
Al2O3	1,35	%
MnO	0	%
P2O5	0,11	%

LOI 1050 °C

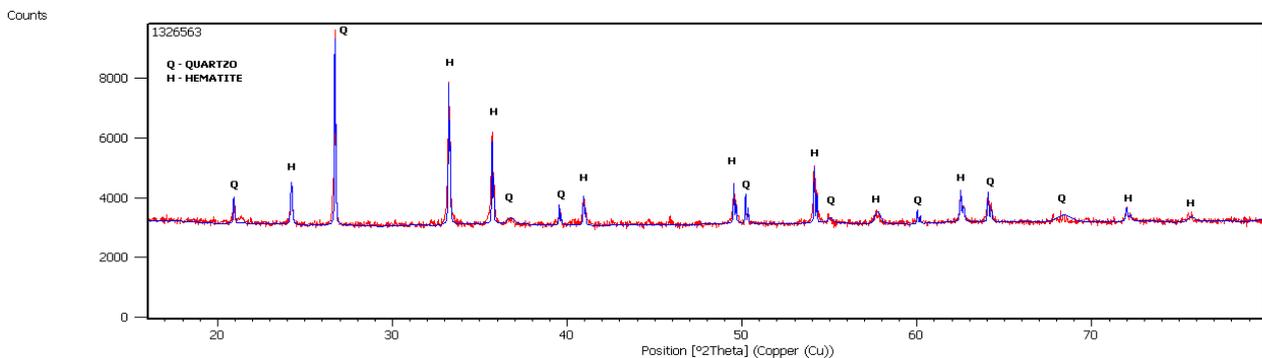
	RESULTADO	UNIDADE
U+PF	1,44	%

Distribuição de Partículas à Laser (MALVERN)

	RESULTADO	UNIDADE
Ds 10	1,8	um
Ds 50	24,6	um
Ds 90	83,0	um

Análises Mineralógicas DRX

FASES	%
Hematite (α -Fe2O3)	82,9
Quartz SiO2	17,1
Goethite α -FeO(OH)	traços



Sérgio Luis D'Amálio
Coordenador de Controle de Qualidade
CRQ 04420496 – IV

Numero do Certificado: 157241/2021 -1.0

Produto: ROT - PIL - SONDA (- 0,15 mm)

Requisitante: Guilherme José Rampazzo

Análise Química

	RESULTADO	UNIDADE
TiO2	0,21	%
SiO2	26,13	%
Fe2O3	70,18	%
CaO	0,08	%
MgO	0,01	%
Na2O	0,13	%
K2O	0,09	%
Cr2O3	0	%
ZrO2	0,01	%
Al2O3	3,00	%
MnO	0	%
P2O5	0,16	%

LOI 1050 °C

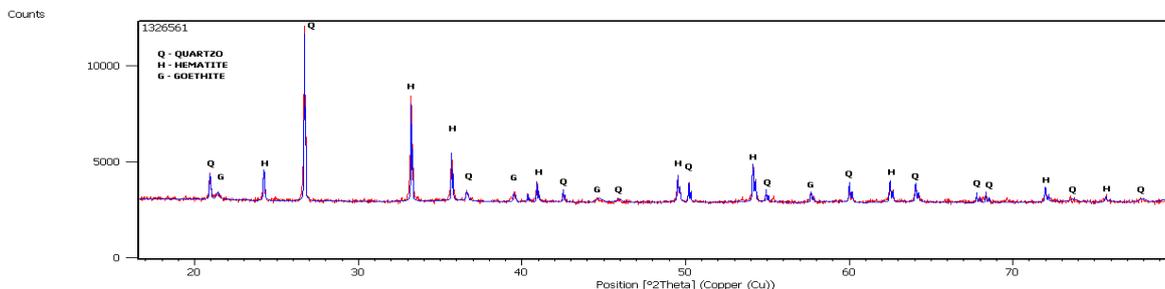
	RESULTADO	UNIDADE
U+PF	2,83	%

Distribuição de Partículas à Laser (MALVERN)

	RESULTADO	UNIDADE
Ds 10	2,8	um
Ds 50	37,6	um
Ds 90	89,3	um

Análises Mineralógicas DRX

FASES	%
Hematite (α -Fe2O3)	69
Quartz SiO2	26,9
Goethite α -FeO(OH)	4,1



Sérgio Luis D'Amálio
Coordenador de Controle de Qualidade
CRQ 04420496 – IV