

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

NATÁLIA SANTOS GARAJAU

**AVALIAÇÃO DO ESTÉRIL ORIUNDO DA EXPLORAÇÃO
DE MINÉRIO DE FERRO**

**BELO HORIZONTE
2019**

NATÁLIA SANTOS GARAJAU

**AVALIAÇÃO DO ESTÉRIL ORIUNDO DA EXPLORAÇÃO
DE MINÉRIO DE FERRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Dr. Marcello Dumont

BELO HORIZONTE

2019

NATÁLIA SANTOS GARAJAU

**AVALIAÇÃO DO ESTÉRIL ORIUNDO DA EXPLORAÇÃO
DE MINÉRIO DE FERRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em 04/07/2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Dumont – Orientador

Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão Paiva

Prof. Dr. André Guimarães Ferreira

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, primeiramente, pois Ele sabe de todas as coisas e que tudo tem o seu tempo e propósito. Aos meus pais, meu marido e familiares que sempre me incentivaram diante tantas dificuldades. Aos companheiros do CEFET -MG, principalmente Cassia Gomes, que contribuíram com esta Graduação. Aos colegas da Vale, Natércia Drumond e Alei Domingues, com apoio para a caracterização deste material e generosidade por compartilhar seus conhecimentos relacionados ao tema deste trabalho. A todos os professores que nos fazem crescer, nos ensinam uma nova profissão e compartilham conosco os seus conhecimentos, e principalmente ao meu orientador, professor e exemplo profissional Dr. Marcello Dumont pelo apoio frente a tantas dificuldades encontradas nessa jornada.

RESUMO

A mineração é uma atividade de grande importância e os seus produtos estão associados ao desenvolvimento sócio e econômico da sociedade. Porém, além das vantagens atribuídas a atividade há a geração de subproduto, o estéril, que é um inconveniente e limitante do processo. A caracterização mineral permite propor rotas de reaproveitamento do recurso mineral que não é prioritário do processo. Na região de Nova Lima, no Quadrilátero Ferrífero, há formações ferríferas cuja característica do minério são as concentrações de itabirito dolomítico. Os depósitos de minério de ferro caracterizados como composições dolomíticas são identificáveis como estéreis e são destinadas em pilhas pré-estabelecidas pela condição de restrição do processamento e comercialização deste litotipo de elevados teores de CaO e MgO, além de P e Al₂O₃ e pelo seu baixo percentual de ferro. Este trabalho avaliou o estéril dessa região para sugerir possíveis alternativas que retornem vantagens econômicas, ganhos ambientais e soluções seguras para um passível acumulativo da exploração mineral. Para caracterização foram coletadas amostras em diferentes pontos para garantir uma boa representatividade do material estocado e foram realizadas análises granulométricas, químicas, mineralógicas e morfológicas. Os principais minerais que se pressupõe a presença neste de estudo foram: hematita lobular, quartzo e carbonatos. Os testes de caracterização tecnológicos sugerem a viabilidade de uso na construção civil, processos siderúrgicos e de pelotização e na agricultura com a correção de características do solo.

Palavras chave: mineração, estéril, reaproveitamento.

ABSTRACT

Mining is an activity of great importance; its products are associated with the socio-economic development of society. However, besides the advantages attributed to the activity, there is the generation of by-product, the sterile, which is an inconvenient and limiting process. The mineral characterization allows to propose routes of reutilization of the mineral resource that is not a priority of the process. In the region of Nova Lima, in the state of Minas Gerais, there are iron formations whose ore characteristics are the concentrations of dolomitic itabirite (IDO). The iron ore deposits characterized as dolomitic compositions are identifiable as sterile and are destined in stacks pre-established by the condition of restriction of the processing and commercialization of this litotipo of high levels of CaO and MgO, besides P and Al₂O₃ and by its low percentage of iron. This work evaluated the barren of this region to suggest possible alternatives that return economic advantages, environmental gains and safe solutions for a cumulative potential of the mineral exploration. For characterization samples were collected at different points to ensure a good representation of the stock material and particle size, chemical, mineral and morphological analyzes were performed. The main minerals presumed to be present in this study were: lobular hematite, quartz and carbonates. The technological characterization tests suggest the feasibility of use in civil construction, steel and pelletizing processes and in agriculture with the correction of soil characteristics.

Key words: mining, sterile, reuse.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Produção de minério de ferro – estados dominantes..... | 17 |
| Figura 2 - Produção de minério de ferro – principais fluxos de escoamento | 17 |
| Figura 3 - Distribuição das exportações por produto (1º/2018)..... | 18 |
| Figura 4 - Evolução da participação do PIB - setor mineral no PIB brasileiro..... | 20 |
| Figura 5 – Índice de preço de minério de ferro..... | 20 |
| Figura 6 – Fluxograma – Local para deposição da pilha de estéril..... | 26 |
| Figura 7– Método ascendente de disposição do estéril. | 28 |
| Figura 8 – Método descendente de disposição do estéril | 28 |
| Figura 9 – Itabirito dolomítico..... | 29 |
| Figura 10 – Cristais de hematita martítica..... | 30 |
| Figura 11 – Cristais de carbonatos..... | 31 |
| Figura 12 – Cristais de magnesita..... | 32 |
| Figura 13 – Cristais de calcita | 33 |
| Figura 14 – Cristais de quartzo..... | 34 |
| Figura 15 – Cristais de gibbsita | 34 |
| Figura 16 – Cristais de talco..... | 35 |
| Figura 17 – Evolução da produção de agregados para construção civil..... | 38 |
| Figura 18 – Brita..... | 39 |
| Figura 19 - Rochagem..... | 41 |
| Figura 20 – Pelotas - minério de ferro aglomerado | 42 |
| Figura 21- Fluxograma dos métodos utilizados no trabalho | 44 |
| Figura 22-Fluxograma – processo de amostragem | 45 |
| Figura 23– Estéril Oriundo da Exploração de Minério de Ferro. | 49 |
| Figura 24– Pilha de Estéril Oriundo da Exploração de Minério de Ferro..... | 49 |
| Figura 25- Gráfico de análise granulométrica | 51 |
| Figura 26– Amostra natural de estéril de minério de ferro | 56 |
| Figura 27- Seções polidas embutidas em resina epóxi..... | 58 |
| Figura 28 - Imagens do microscópio ótico de estéril de minério de ferro – 12,5 mm | 58 |
| Figura 29- Imagens do microscópio ótico de estéril de minério de ferro – 4,75 mm | 59 |
| Figura 30- Imagens do microscópio ótico de estéril de minério de ferro – 2,0 mm | 59 |
| Figura 31- Imagens do microscópio ótico de estéril de minério de ferro – 2,0 mm | 60 |
| Figura 32– MEV/ EDS - estéril de minério de Ferro – 0,600mm..... | 62 |
| Figura 33– MEV/ EDS - estéril de minério de Ferro – 0,600mm..... | 62 |
| Figura 34 – MEV/ EDS - estéril de minério de Ferro – 0,300mm..... | 63 |
| Figura 35– MEV/ EDS - estéril de minério de Ferro – 0,300mm..... | 64 |
| Figura 36– MEV/ EDS - estéril de minério de Ferro – 0,150 mm..... | 64 |
| Figura 37– MEV/ EDS - estéril de minério de Ferro – 0,150 mm..... | 65 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Resumo do comércio exterior por produto (1º/2018)..... | 19 |
| Tabela 2 - Produção nacional de minério de ferro..... | 21 |
| Tabela 3 - Órgãos responsáveis pelas diretrizes e regulamentações..... | 22 |
| Tabela 4 - Técnicas para caracterização de minérios..... | 36 |
| Tabela 5 - Propriedades do concreto influenciadas pelas características do agregado..... | 37 |
| Tabela 6 - Preparação para o peneiramento – NBR6457..... | 46 |
| Tabela 7 - Conjunto de peneiras com as devidas aberturas nominais em mm –NBR7211..... | 47 |
| Tabela 8 - Composição granulométrica obtida pelo método de peneiramento a seco..... | 50 |
| Tabela 9 - Frações avaliadas do material estéril..... | 51 |
| Tabela 10 - Identificação das amostras – análise FRX..... | 54 |
| Tabela 11 - Resultados (%) análise FRX..... | 54 |

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al - Alumínio

Al₂O₃ – Óxido de alumínio

Al(OH₃) – Hidróxido de alumínio

C – Carbono

Ca - Calcio

CaO – Óxido de cálcio

CaCO₃ – Carbonato de magnésio

CaMg(CO₃)₂ – Carbonato de cálcio e magnésio - dolomita

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil.

CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos

DO - Dolomitas ferruginosas

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral

Fe - Ferro

FeO – Óxido de Ferro

Fe₂O₃ - Hematita

Fe₃O₄ - Magnetita

FRX - Fluorescência de raios-X

IBAMA - Instituto Brasileiro de Meio Ambiente Recursos Naturais Renováveis

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

IDO - Itabirito dolomítico

MEV - Microscopia eletrônica de Varredura

Mg - Magnésio

MgO – Óxido de magnésio

MgCO₃– Carbonato de magnésio

MMA - Ministério do Meio Ambiente

MME - Ministério de Minas e Energia

MnO₂ – Monóxido de manganês

O - Oxigênio

P - Fósforo

PPC – Perda por calcinação

P₂O₅ – Pentóxido de fósforo

PIB – Produto interno bruto

SiO₂ – Óxido de sílica

SMM/MME - Secretaria de Minas e Metalurgia

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 12 |
| 2 OBJETIVO | 15 |
| 2.1 Objetivo Geral | 15 |
| 2.2 Objetivos Específicos | 15 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 3.1 Mineração – Exploração de Minério de Ferro | 16 |
| 3.2 Estéril oriundo da Exploração de Minério de Ferro | 22 |
| 3.3 Pilha de estéril – Disposição e Planejamento | 24 |
| 3.4. Litologias do Itabirito Dolomítico | 29 |
| 3.4.1 Itabirito Dolomítico..... | 29 |
| 3.4.2 Hematita Martítica..... | 30 |
| 3.4.3 Carbonatos | 31 |
| 3.4.4 Magnesita | 32 |
| 3.4.5 Calcita..... | 33 |
| 3.4.6 Quartzo | 33 |
| 3.4.7 Gibbsita | 34 |
| 3.4.8 Talco | 35 |
| 3.4 Caracterização Mineralógica: | 36 |
| 3.5 Reaproveitamento de Estéril | 37 |
| 3.5.1 – Construção Civil – Brita | 37 |
| 3.5.2 – Rochagem – Correção da acidez do solo..... | 40 |
| 3.5.3–Aditivo em Pelotizações e fundente em pequenos altos-fornos..... | 42 |
| 4 MATERIAIS E MÉTODOS | 44 |
| 4.1 Materiais | 44 |
| 4.2 Métodos..... | 44 |
| 4.2.1 Amostragem | 45 |
| 4.2.2 Análises Granulométricas | 46 |

| | |
|---|-----------|
| 4.2.3 Análises Química - Fluorescência de raios X (FRX) | 47 |
| 4.2.4 Análises Morfológicas | 48 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 49 |
| 5.1 Análises da composição granulométrica do rejeito | 50 |
| 5.2 Análises Químicas..... | 53 |
| 5.2.1 Fluorescência de raios X (FRX)..... | 53 |
| 5.3 Análises Morfológicas..... | 56 |
| 5.3.1 Análise Visual..... | 56 |
| 5.3.2 Microscópio Ótico | 57 |
| 5.3.3 Microscópio eletrônico de varredura (MEV)..... | 61 |
| 6 CONCLUSÃO..... | 67 |
| 7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS..... | 69 |
| 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 70 |

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade de grande importância e os seus produtos estão associados ao desenvolvimento socioeconômico da sociedade. A relevância de estudos relacionados a mineração estão ligados aos fatores ambientais, econômicos e de segurança operacional. Pontos positivos estão ligados aos fatores econômicos que são justificados pelos lucros exponenciais, geração de empregos diretos e indiretos, tributações que retornam ao poder público entre outros que permitem a evolução da economia. Já os pontos negativos são ligados os fatores ambientais devido as grandes áreas desmatadas para liberar espaço para as pilhas de estéréis e os fatores de segurança operacional estão ligados a monitoramento.

A produção em mina de minério de ferro é resumida em dois tipos de materiais: estéril e minério. O minério de ferro é um recurso natural disposto na natureza na forma de rochas, misturado a outros elementos que originam outras formulações minerais (VALE, 2018). É um produto de interesse econômico que para aperfeiçoar suas características químicas exigidas pelo mercado consumidor pode ser destinado a uma instalação de tratamento (ROCHA, 2015).

A retirada do minério é reconhecida como uma estratégia de negócio. Já a remoção do estéril da mina, região lavrada e sua disposição trazem impactos negativos e desfavoráveis para desenvolvimento de uma mineradora, de ordem econômica, segurança ou ambiental (ARAGÃO, 2008).

Para a disponibilização desse material rico em óxido de ferro é necessário retirar o estéril que, posteriormente, será destinado a uma pilha de armazenamento o qual deverá ter sido previamente planejada e passará por constante acompanhamento. Há um cálculo que representa a proporção do material extraído rico no mineral de interesse e a quantidade de material estéril necessária para atingir cada tonelada do material economicamente viável. Essa relação é denominada como relação estéril-minério, ou REM.

Os estéréis oriundos do minério de ferro podem ser identificados como materiais que o aproveitamento econômico não é uma possibilidade viável, a rota de beneficiamento não é conhecida e que não atendem as especificações de qualidade de um processo industrial já existente (ROCHA, 2015).

Aglomerados de minérios de ferro que apresentam altas concentrações de ferro estão relacionados com uma íntima associação com carbonatos, característica pertinente ao material

estudado neste trabalho. A primeira fase de mineralização em magnetita está associada ao processo de carbonatação, a partir dessa associação é possível obter itabirito dolomítico e dolomitas ferruginosas além de outros corpos mineralizados, conforme os trabalhos citados por Junia (2017) e Vale.Drumond (2014).

Os depósitos de minério de ferro caracterizados como composições dolomíticas são identificáveis como estéreis. Após a sua remoção são enviadas para pilhas permanentes preparadas para receber esse estoque devido à restrição de processamento e comercialização deste litotipo. Os elevados teores de CaO e MgO, além de P e Al₂O₃ inviabilizam o processo das rotas industriais existentes no processamento de minério de ferro (COSTA,2013).

Segundo Spier (2016) e Junia (2017) itabirito dolomítico é caracterizado pela alternância de bandas ricas em hematita, quartzo, com bandas ricas em dolomita/carbonatos. Como parâmetro de caracterização é reconhecido os teores de itabirito dolomítico com percentual de até 12 % de FeO e a dolomita ferruginosa apresentando percentuais de 12 % a 19 % de FeO.

O material que é classificado como estéril não inviabiliza o seu uso em atividades futuras. Em outros cenários o produto que hoje não é o principal da cadeia, ou seja, fora da especificação de qualidade, sem rotas de processo definidas e que não tem um mercado determinado, pode ser redefinido a partir de novas possibilidades de aplicação que trarão fontes de riquezas e nesse caso em especial soluções ambientais.

Dessa forma, devido à grande demanda de material considerado estéril e diversas condições para implantação e manutenção das áreas para disposição desse material, faz-se necessário o estudo de alternativas para reaproveitamento e geração de valor agregado, mudando a disposição atual e viabilizando ganhos sustentáveis e financeiros. Conforme o trabalho iniciado por Vale e Drumond (2014), a partir de suas características físicas e químicas, é possível propor a utilização do estéril em diversos segmentos, entre eles:

- Substituir do calcário em pequenos altos-fornos e sinterizações utilizando o estéril como fundente.
- Agregar o material ao processo de Pelotização com adição de CaO e MgO, elementos que são adicionados como aditivos para alterar a qualidade do produto final,

- Inserir o material como agregado na construção civil, devido suas características químicas e granulométricas.
- Usar como corretivo do solo, frente à deficiência de minerais e acidez.

Dentro desse contexto, o presente trabalho a caracterizou e avaliou as características das rochas dolomíticas considerado como material estéril com o intuito de avaliar o seu reaproveitamento com benefícios econômicos e ambientais por meio da caracterização de suas propriedades físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é identificar e caracterizar o estéril oriundo da exploração de minério de ferro classificado como itabirito dolomítico, e avaliar as características e propriedades para propor um possível aproveitamento econômico e redução de resíduos sólidos no meio ambiente, avaliando assim benefícios econômicos e ambientais.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Coletar material caracterizado como estéril em uma mina no Quadrilátero Ferrífero.
- Identificar e caracterizar o material estéril da exploração de minério de ferro através das técnicas: análise granulométrica, análise química (fluorescência de raio X), análise morfológica (visual, microscópio ótico e microscopia eletrônica de varredura).
- Avaliar os benefícios econômicos para a destinação do estéril.
- Avaliar os benefícios ambientais e relacionados com a segurança.
- Avaliar as possibilidades para o seu reaproveitamento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Mineração – Exploração de Minério de Ferro

A atividade mineradora é considerada um dos setores básicos para economia do país e tem papel direto no modo de vida da população, pois traz benefícios para o bem-estar e melhora da qualidade de vida da atual geração assim como das futuras (FARIAS, 2002). É considerada por várias nações atividade fundamental para economia quando se avalia a importância dos minerais para vida moderna.

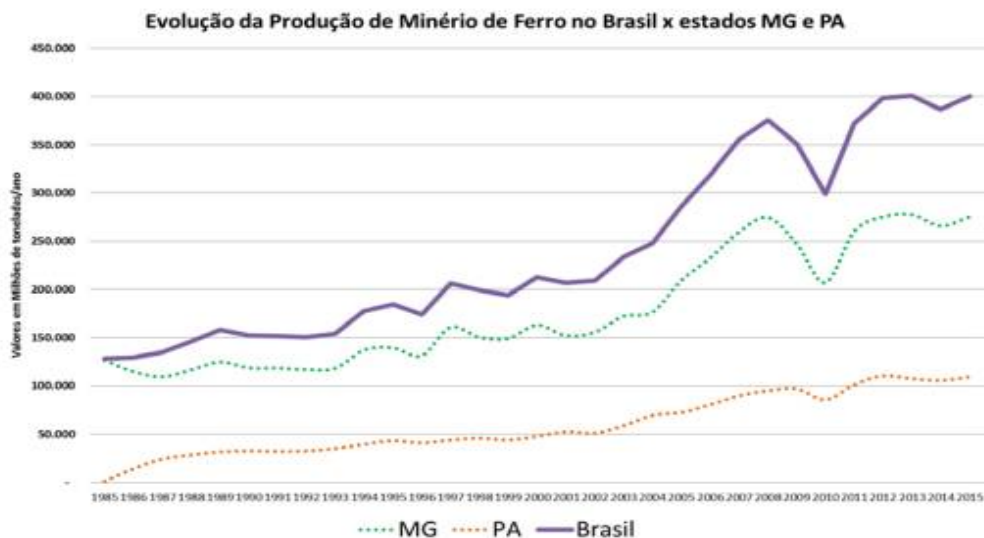
O aumento do consumo de materiais que tem como base inicial o minério de ferro exige dos pesquisadores novas alternativas para liberação de mais depósitos que possam ser explorados (ROCHA, 2015). Porém, com o aumento da retirada do minério há também o aumento do volume de material estéril a ser estocado.

O minério de ferro é um recurso natural disposto na forma de rochas, que misturado a outros elementos originam compostos minerais (VALE, 2018). Aproximadamente a metade desse material que é retirado do solo é estéril. As reservas minerais estão espalhadas pelo mundo, mas estão concentradas em pontos distintos, por exemplo, o Brasil e a Austrália os detêm mais da metade das jazidas. No Brasil, atualmente, o percentual mais elevado dos depósitos se encontra nas reservas situadas na região norte no estado do Pará e no quadrilátero ferrífero, em Minas Gerais, na região sudeste.

A mineração de ferro tem lugar de destaque e relevante em todo mundo e, em decorrência da exploração, contribui diretamente no cenário econômico e ambiental. Essa relevância é atribuída aos lucros exponenciais alcançados e também a geração de grande volume de estéril, que é caracterizado por não ter uma viabilidade econômica conhecida, fica disposto em grandes áreas exigindo recursos físicos e financeiros de manutenção do mesmo.

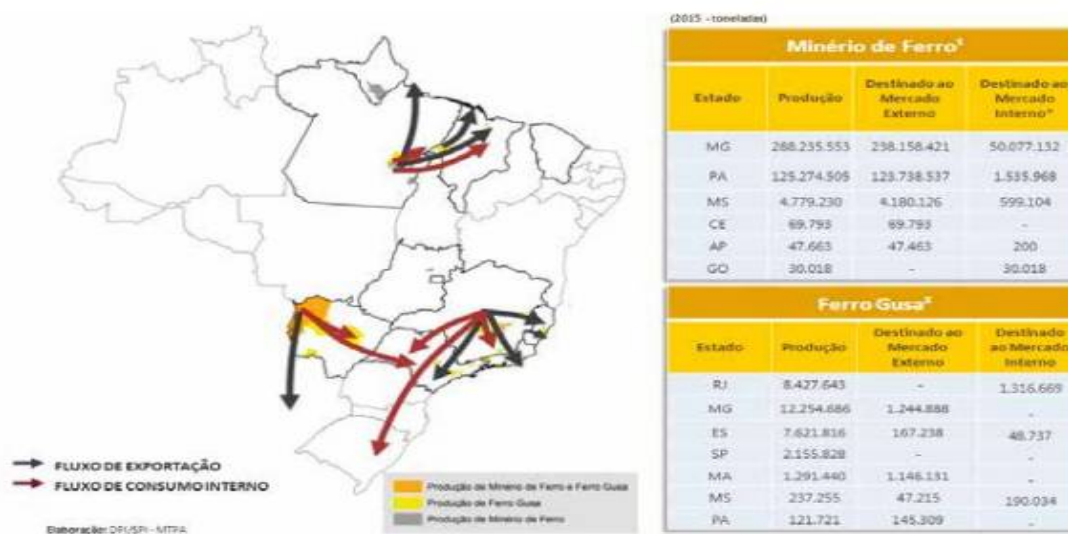
Para atender o mercado e manter a característica de teor elevado, as empresas misturam os minérios com qualidades diferentes e, dessa forma, atingem a faixa comercial requerida que, em geral, nas exportações ficam em torno de 67 % do material oriundo de Minas Gerais e 29 % do material do Pará (IBRM, 2019). Na Figura 1 está demonstrada a produção do minério de ferro no Brasil. Na Figura 2 está demonstrado o fluxo interno da produção.

Figura 1 - Produção de minério de ferro – estados dominantes



Fonte: IBRAM, 2019.

Figura 2 - Produção de minério de ferro – principais fluxos de escoamento



Fonte: IBRAM 2019.

A demanda pelo minério de ferro aumentou no século XXI. Segundo Guedes e Fernandes (2016) este período este associado a fatos relevantes como o crescimento da economia de países asiáticos e da América do Sul com a elevação do consumo de bens primários que reconfiguraram a visão geoeconômica. Este fato proporcionou um crescimento expressivo

da demanda mundial de minério de ferro e, com isso, a exploração teve um grande crescimento e passou a ser destaque no cenário nacional.

Desde então, o minério de ferro se enquadrou entre principais produtos da pauta exportadora brasileira, classificado no grupo dos minérios metalúrgicos que respondem por 7,6 % das exportações totais do país (DEPEC, 2017). Porém, o preço médio por tonelada das exportações de minério de ferro entre os dois semestres (1º/2017 e 1º/2018), cálculo feito pela divisão entre o valor total e a quantidade total das exportações, caiu 8,6 % (de U\$S 54,7 para U\$S 50,0) (ANM, 2018).

Apesar da demanda estar diminuindo ao longo anos, na visão do período posterior a 2015, o minério de ferro ainda se mantém líder na gama de minerais exportados no Brasil, seguido do ouro e do cobre. A economia está diretamente ligada ao desempenho comercial do minério de ferro na sua cadeia produtiva, além de inúmeros empregos gerados, diretos e indiretos. Estão envolvidas também as questões tributárias e arrecadações destinadas ao poder público e que movimentam a economia de muitas cidades. Na Figura 3 está demonstrada a variedade de produtos minerais exportados no primeiro semestre de 2018.

Figura 3 - Distribuição das exportações por produto (1º/2018)



Fonte: ANM, 2018.

Segundo Lins e Luz (2010), as atividades de execução na lavra e de tratamento de minérios, processos físicos e beneficiamento, constituem uma atividade econômica definida e

contabilizada nas contas nacionais pelo IBGE, identificadas como atividade extrativa mineral ou mineração. Na Tabela 1 há um resumo dos produtos exportados no Brasil no primeiro semestre de 2018.

Tabela 1 - Resumo do comércio exterior por produto (1º/2018)

| Exportações | | Importações | |
|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| Produto | Valor US\$ | Produto | Valor US\$ |
| Ferro | 8.991.558.110 | Carvão | 1.797.650.086 |
| Ouro | 1.393.913.022 | Potássio | 1.051.487.162 |
| Cobre | 1.236.442.488 | Cobre | 270.923.068 |
| Ferronióbio | 980.278.591 | Enxofre | 185.165.088 |
| Alumínio | 113.097.179 | Zinco | 154.837.182 |
| Manganês | 169.904.246 | Ouro | 2.717.601 |
| Pedras Naturais | 347.776.932 | Pedras Naturais | 11.336.562 |
| Outros | 1.074.529.985 | Outros | 610.298.873 |

Fonte: Adaptado de ANM, 2018.

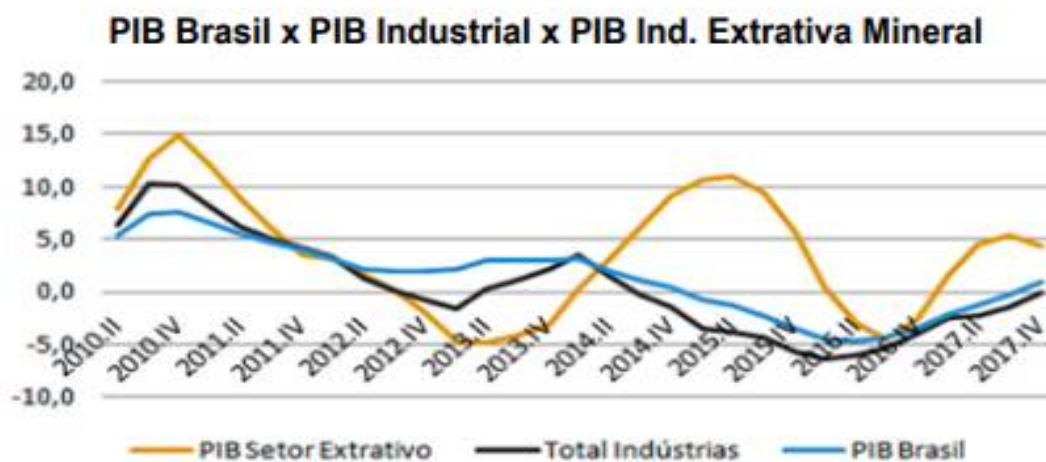
A extração de minério de ferro contribui significativamente com a variação do Produto Interno Bruto-PIB, é uma importante fonte de renda e a sua participação nesse índice ultrapassa a 4 %. O minério de ferro é uma das principais commodities que o Brasil exporta, a elevação da receita é favorecida pela comercialização de minério e consecutivos recordes de produção de empresas brasileiras (VALE, 2018). Além do benefício próprio, a exploração de minério de ferro contribui com o crescimento de diversos setores que são secundários a essa exploração do mineral tais como: siderurgia, metalurgia, petroquímicas, assim como outras: indústria automobilística e alimentícia.

O preço do minério de ferro (62 %Fe – teor de ferro) em dezembro de 2018 foi de US\$ 63,20/t como indicado no site da Vale S/A (VALE, 2018). As oscilações podem ser justificadas por variáveis que são inerentes ao mercado: crescimento de países emergentes, como a China, baixa demanda, custo de produção, transporte, entre outros pontos que determinam a lucratividade e viabilidade do processo. Outro fato importante é a produção de

minério de ferro por empresas australianas, concorrentes diretos das empresas brasileiras, que apresentava vantagem pela curta distância a ser percorrida em relação ao mercado asiático, situação refletida no preço do frete dos navios (COSTA, 2013).

As figuras 04 e 05 é ilustrado a evolução do PIB comparando o índice nacional, da indústria geral e específico da indústria mineral e a variação do valor de venda do minério de ferro, respectivamente.

Figura 4 - Evolução da participação do PIB - setor mineral no PIB brasileiro



Fonte: IBGE, 2018, elaboração IBRAM, 2019.

Figura 5 – Índice de preço de minério de ferro



Fonte: VALE, 2018.

No Brasil tem muitas empresas mineradoras com elevado valor agregado pela exploração do minério de ferro. Como a demanda positiva do mercado a produção aumenta

consideravelmente como pode ser observado na tabela comparativa em diferente intervalos, 2012 e 2016 (GOMES, 2016). Em muitos casos o cálculo para atender o mercado nesse aumento de produção não é programado a disposição do aumento do estéril também gerado. Na tabela 2 é apresentada a produção nacional de minério de ferro das principais empresas brasileiras.

Tabela 2 - Produção nacional de minério de ferro

| Empresa | Produção por Ano | |
|-----------------------|------------------|---------|
| | 2012 | 2016 |
| Vale | 360.000 | 425.000 |
| CSN | 30.000 | 89.000 |
| MMX | 13.000 | 42.500 |
| Usiminas | 12.000 | 29.000 |
| Anglo American | 5.500 | 35.000 |
| Mineração Corumbaense | 5.000 | 10.000 |
| AcelorMital | 4.300 | 15.000 |
| V&M | 5.000 | 5.000 |
| Mhag | 1.000 | 12.000 |
| Bahia Mineração | - | 20.000 |
| Outros | - | 17.000 |

Fonte: IBRAM, 2019.

A exploração mineral deve ser feita de forma controlada a fim de respeitar as condições ambientais, é preciso haver um equilíbrio entre as questões econômicas e a sustentabilidade. Existem alguns órgãos que são responsáveis por ditar diretrizes e regulamentações, além de atuar na concessão, fiscalização e cumprimento da legislação mineral e ambiental para o melhor aproveitamento dos recursos minerais. Na tabela 3 seguem alguns das principais orientações do órgão regulamentador dos processos da mineração para acompanhar as boas práticas e ações normativas segundo FARIAS (2002).

Tabela 3 - Órgãos responsáveis pelas diretrizes e regulamentações

| Órgão | Descrição | Função |
|--------------|--|--|
| MMA | Ministério do Meio Ambiente | Providencia e coordena as políticas ambientais, e o acompanha sua execução |
| MME | Ministério de Minas e Energia | Providencia e coordena as políticas dos setores mineral, elétrico e de petróleo/gás. |
| DNPM | Departamento Nacional de Produção Mineral | Planeja a melhor forma de aproveitamento dos recursos minerais, preservação paleontológica. |
| CPRM | Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais | Divulga o conhecimento geológico e hidrológico básico, também de disponibiliza informações e conhecimento sobre o meio físico para a gestão territorial |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente | Criação das políticas ambientais, a qual as resoluções têm poder normativo, com força de lei, desde que, o Poder Legislativo não tenha aprovada legislação específica; |
| IBAMA | Instituto Brasileiro de Meio Ambiente Recursos Naturais Renováveis | Para o em nível federal, responsável pelo licenciamento e fiscalização ambiental |

Fonte: FARIA, 2002.

3.2 Estéril oriundo da Exploração de Minério de Ferro

Estéreis da mina podem ser identificados como materiais: solo, subsolo, rocha, originados da natureza junto com a fonte de interesse, que não tem aproveitamento econômico e que podem se apresentar em camadas (inclinadas ou horizontais), com partes irregulares ou ligação íntima ao minério (SILVA *et al*, 2006). Este material é disposto em pilhas específicas e necessitam de planejamento, acompanhamento e plano de segurança para sua manutenção.

Os estéreis oriundos do minério de ferro podem ser identificados como materiais que o aproveitamento econômico não é uma possibilidade viável, a rota de beneficiamento não é

conhecida e não atendem as especificações de qualidade de um processo industrial já existente (ROCHA, 2015).

Ainda pode-se considerar como definição do estéril: fração mineral de uma jazida que contém elementos cujo teor de minerais aproveitáveis estejam fora do limite do teor de corte, o seu valor não pode estar associado ao valor do produto bruto explorado ou na planta de beneficiamento ou de concentração mineral (CPRM, 2019).

A movimentação do material estéril pode ter um caráter negativo no desenvolvimento da mina sendo preciso agregar os valores econômicos a este processo, além dos aspectos relacionados à segurança e meio ambiente. Essa atividade envolve a movimentações de grandes volumes, extensa disponibilidade de áreas para a disposição de estéril e o cumprimento das imposições dos órgãos reguladores do processo (ARAGÃO, 2008).

Para iniciar a exploração mineral é concedida uma autorização a partir de uma série de fatores que são avaliados. A retirada do estéril tem-se uma elevada relevância, pois definido o proprietário (denominado titular do direito minerário, ou seja, responsável pela produção) é possível identificar onde deve ser feita a destinação correta. A responsabilidade pelo material estéril no âmbito administrativo, civil e penal é do titular da concessão de lavra válida e da área que está fixada dentro do polígono desse direito minerário (FREIRE, 2014).

O estéril oriundo das explorações de minério de ferro pode ser classificado de acordo com a sua composição mineralógica, característica da jazida explorada, da separação do mineral de interesse econômico e de condições de mercado favoráveis. A qualidade desse estéril, principalmente o explorado no Quadrilátero Ferrífero, possui como características a presença dos seguintes óxidos: Al_2O_3 , SiO_2 , P_2O_5 , MnO_2 , MgO , CaO além de matéria orgânica (JUNIA, 2017). A quantificação desses elementos caracteriza o tipo de estéril e possibilita uma avaliação de reaproveitamento, pois a presença destes óxidos que para algumas situações são consideradas indesejáveis em outro momento podem ser benéficos.

A deposição dos estéreis após a retirada da cava é precedida de ações regulamentadoras para garantir a segurança do local desses depósitos. Entre as análises realizadas, podem ser citados como os mais relevantes: estudos hidro geológicos, hidrológicos e geotécnicos (ARAGÃO, 2008). Essa preparação e manutenção envolvem custos que não são repassados no custo de produção do produto principal explorado, dessa forma o reaproveitamento passa ser

uma necessidade sustentável de qualquer empresa se manter ativa de forma rentável e sustentável.

De acordo com o DNPM (2019) a disposição de estéril deve observar os seguintes critérios:

- Para de rios, lagos ou outros cursos de água prever a implantação de medidas para não permitir o arraste de material sólidos para o interior de seu curso de acordo com as normas vigentes.
- Nas limitações da pilha de estéril é proibido o estabelecimento de quaisquer edificações, exceto edificações operacionais, mas é exigida a comprovação de estabilidade.
- Para áreas que há cursos d'água e nascentes é preciso ser realizado previamente um estudo técnico que avalie o impacto sobre os recursos hídricos, informações sobre a quantidade e a qualidade da água deve ser avaliada antes da liberação do local.
- A segurança é item primordial, as medidas técnicas de segurança devem prever situações de risco.

3.3 Pilha de estéril – Disposição e Planejamento

As pilhas de estéreis são uma realidade para a atividade de minério de ferro e para expandir as operações de uma mina é preciso avaliar a quantidade de estéril excedente que será gerado para atingir a exploração do material. A partir desse cenário é preciso avaliar o planejamento a disposição do estéril, tanto das pilhas já existentes quanto de novas pilhas para atender as demandas (COSTA, 2013).

Segundo o IBRAM (2019), que promoveu a Comissão de Estudo Especial de Elaboração de Projetos para Disposição de Rejeitos e Estéreis em Mineração (ABNT/ CEE-220), com o intuito de disponibilizar a revisão da norma NBR/ABNT13029/2006 (que apresenta apresentação e a elaboração e de projeto de disposição de estéril em pilha), é preciso obter uma padrão para disposição, estocagem, segurança, com o objetivo de prever as condições mínimas ao atendimento dos padrões de segurança, operacionalidade e sustentabilidade.

Após a retirada do material sem interesse econômico da mina é possível classificá-lo neste montante têm-se desde estéril grosseiro de mina até areia fina. No geral deve-se levar em consideração as características físicas, químicas e mineralógicas desses materiais para disposição e possível reaproveitamento (CARVALHO, 2009).

Segundo Faria (2016) a disposição do estéril envolve custos como preparar o local, transporte, geotecnia, planejamento, manutenção, licenciamento, monitoramento entre outros fatores que estão associados aos itens citados. O planejamento de uma pilha envolve vários desafios técnicos, além da avaliação das condições das propriedades dos materiais que provocam degradação mecânica, logo, é preciso considerar possíveis reações químicas que podem interferir na estabilidade da estrutura calculada. Outros itens relevantes são: a fundação da pilha, o local escolhido, a pluviometria da área, a estabilidade do material para antecipar ao risco de deslizamentos dos taludes da pilha (CARVALHO, 2009).

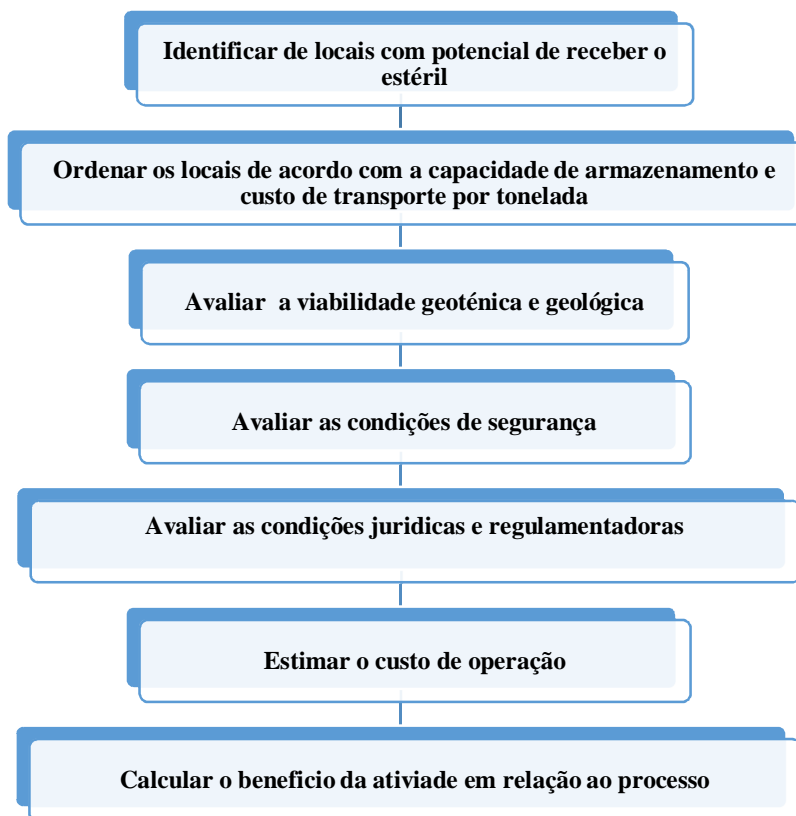
A preparação de uma pilha de estéril deve ter em seu projeto o arranjo geométrico, o planejamento do sistema de drenagem (interna e superficial), as avaliações de estabilidade, e os planos da Mina, que irão monitorar e prever a sua construção (PULINO, 2010).

Para elaborar o planejamento de uma pilha, o primeiro passo é realizar a estimativa dos volumes e tipos de estéril que serão depositados. A massa do estéril produzida pode ser estimada no processo de planejamento de longo prazo, tendo com avaliação inicial a cava operacional e deve ser relevante as informações das mudanças nos cenários econômicos (FARIA, 2016).

Segundo Carvalho (2009) os materiais estéreis podem ser estocados nas seguintes condições:

- Sob o solo;
- No recobrimento da mina de céu aberto;
- Em locais que se transformem lagos profundos;
- Como forma de reprocessamento em um segundo plano, com separação do estoque;

A determinação do local que irá ser depositado o estéril, onde iniciará a deposição da pilha, deve obedecer a seguinte sequência conforme a figura 6, segundo Farias, 2016.

Figura 6 – Fluxograma – Local para deposição da pilha de estéril

Fonte: Adaptado de Farias (2006).

A identificação da área para a receber o material retirado da mina deverá ser feita, com a ordenação por capacidade e cálculo dos custos. Deverá ter validação das condições de segurança para avaliar se estão de acordo com as condições jurídicas e regulamentadora. Por fim, é estimado o custo benefício de toda operação em relação ao processo.

Segundo Paria (2015), o estéril que será empilhado deve ser analisado a partir da granulometria analisada e da caracterização geoquímica. Conhecer as características físicas contribui para prever a estabilidade da pilha e as características químicas possibilitam avaliar possíveis interações entre os óxidos presente no estéril com água que também trazem impactos para estabilidade estrutural deste estoque.

A presença de líquido aumenta o fator de risco de uma pilha. Dessa forma, se faz necessário um sistema de drenagem interna de pilhas de estéril para que a água não se acumule no interior da pilha, retirando essa água que infiltra e não permitindo que haja aumento da pressão e tornando a estabilidade geotécnica melhor (PULINO, 2010). Tremores de terra

também podem influenciar na estabilidade da pilha, podendo haver um deslizamento. Existem fatores que contribuem para que o material estéril possa fluir com mais facilidade, entre eles pode ser mencionado: a ausência de drenagem, alta tensão de confinamento, ciclos de tensões frequentes (CARVALHO, 2009).

Segundo Faria (2016), é fundamental garantir que a construção da pilha de estéril esteja em conformidade com as especificações de projetos aprovados pelos órgãos responsáveis pelos controles pois, frequentemente, as causas de insucesso dessas pilhas estão ligadas a alterações das estruturas programadas durante a construção da mesma. Controles como a garantia da qualidade e estabilidade envolvem custos que podem extrapolar a estimativa inicial, favorecendo o uso de condutas erradas (PARIA, 2015).

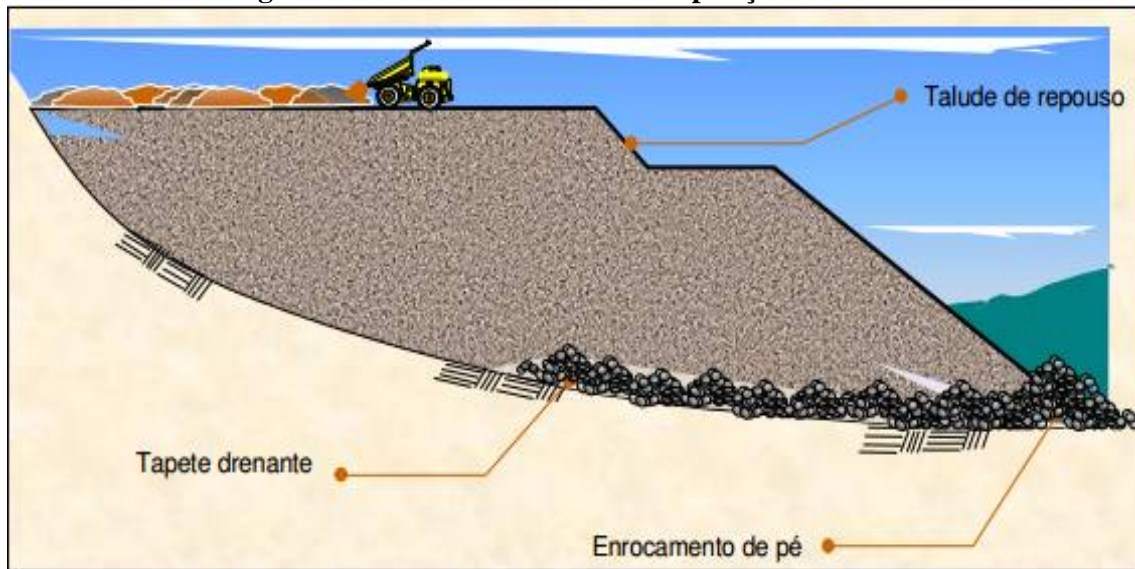
Para construir uma pilha de material estéril é feita inicialmente limpeza da área e remoção do solo superficial. Para solos ricos em matéria orgânica, deverá ser estocado e em outro momento reaproveitado com o recobrimento de áreas que necessitam de revegetação. Pode ser feita pelo método ascendente ou descendente, cada opção tem suas vantagens e desvantagens (FARIA, 2016).

Segundo Aragão (2008) o método ascendente é mais comumente usado e recomendado. Cada carregamento sucessível é suportado pelo anterior, caso aconteça uma ruptura terá o encontro do banco anterior, pela ótica da segurança e da estabilidade e assim traria menores impactos. A metodologia ascendente é a mais recomendável para a elaboração de um projeto de uma pilha de estéril, porque o comportamento geotécnico da estrutura tem controle apurado ao longo dos alteamentos sucessivos (PARIA, 2015). O material é transportado por caminhões, carregadeiras ou equipamentos semelhantes. É considerado um método mais seguro e que atende a norma NBR 13029 (2017). A construção de pilha pelo método ascendente pode acontecer por duas formas segundo Aragão (2008):

- Via Camadas – O desenvolvimento da pilha é realizado com espessura de até 1,5m;
- Bancada – Para essa forma, o desenvolvimento se dá de acordo com a altura do banco;

Na figura 7 é apresentado o modo de construção de uma pilha estéril pelo método ascendente.

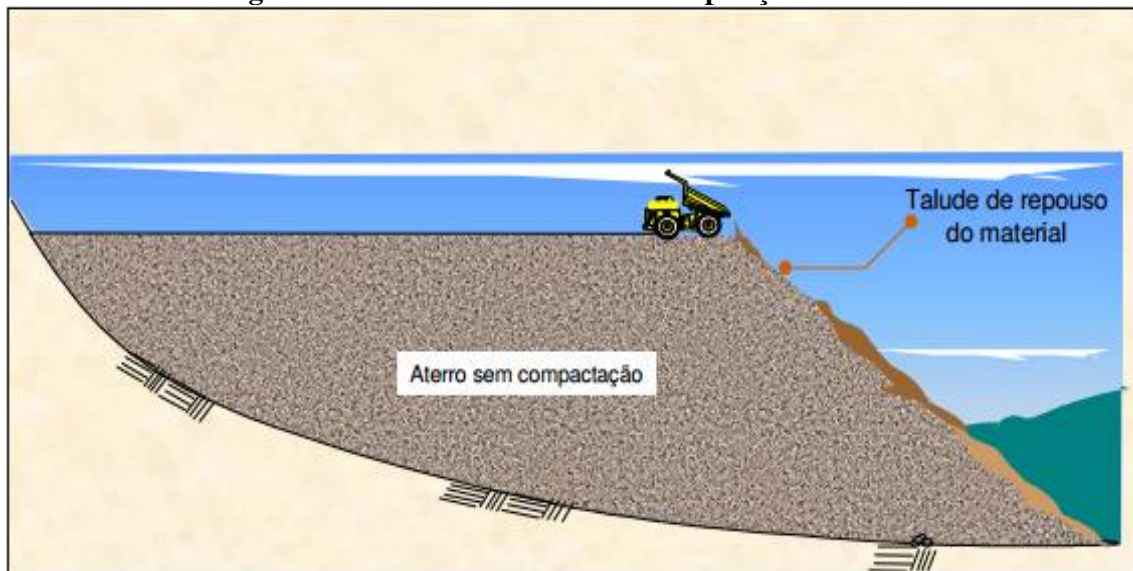
Figura 7– Método ascendente de disposição do estéril.



Fonte: CARVALHO, 2009, elaboração VALE, 2000.

Na figura 8 é representado o modo de construção de uma pilha estéril pelo método descendente.

Figura 8 – Método descendente de disposição do estéril



Fonte: CARVALHO, 2009, elaboração VALE, 2000.

O método de disposição do estéril descendente é feito sem planejamento e deve ser evitado pois a camada posterior é suportada pelo talude. O material é lançado na ponta do aterro, não há compactação e a drenagem é comprometida. Segundo Carvalho (2009) este método é

mais econômico, pois reduz a distância do transporte. Mas, não atende a legislação referente a segurança e a sustentabilidade. Segundo Parias (2015), formam estruturas com elevada instabilidade, susceptíveis aos eventos erosivos e a deslizamentos generalizados com grandes limitações no uso prático. A indicação desse método fica restrita a materiais com potencial drenante e/ou em áreas confinadas. Conforme a NBR 13029 (2017), este método citado não pode ser adotado pela indústria de mineração.

Dessa forma o reaproveitamento do estéril pode ser justificado apenas pelo ganho em segurança, que já seria fato suficiente para ser executado. Mas, somado a essa vantagem têm-se também o ganho ambiental, não menos importante o lucro financeiro.

3.4. Litologias do Itabirito Dolomítico

3.4.1 Itabirito dolomítico

Segundo Spier (2016) itabirito dolomítico é caracterizado pela alternância de bandas ricas em hematita, quartzo, com bandas ricas em dolomita e carbonatos. Como parâmetro de caracterização, é reconhecido os teores de itabirito dolomítico com percentual de até 12 % de FeO e a dolomita ferruginosa apresentando percentuais de 12 % a 19 % de FeO (JUNIA, 2017).

A figura 9 pode ser observado o mineral de itabirito dolomítico o qual é possível observar as bandas de carbonatos, hematitas e quartzo, característico desse mineral.

Figura 9 – Itabirito dolomítico



Fonte: GONÇALVES, 2015.

Segundo Gonçalves (2015) na composição dos itabiritos dolomíticos além dos minerais citados é possível também identificar em sua composição os seguintes minerais: clorita, calcita, talco, anfibólios, entre outros.

A cor predominante são tons rosados e avermelhados contrastando com a cor cinza do minério de ferro. Em média os teores de ferro encontrados estão em torno de 41,07 % de Fe e percentual médio que prevalece é o de material granulado maior que 8 mm, em torno de 98,99 % (COSTA, 2013).

3.4.2 Hematita Martítica

Segundo Gonçalves (2015) a hematita martítica é gerada pela oxidação da magnetita a partir dos planos cristalográficos da mesma. A micro porosidade é uma das suas características, há presença de cristais com aspecto granular. Na figura 10 estão apresentadas as características específicas deste mineral: figuras geométricas e coloração branca, caraterístico de hematita.

Figura 10 – Cristais de hematita martítica



Fonte: GONÇALVES, 2015.



Fonte: GONÇALVES, 2015.

3.4.3 Carbonatos

O carbonato de cálcio e magnésio, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, possui composição e morfologia semelhante com a calcita que apresenta diversas aplicações industriais. Na figura 11 estão apresentadas as características visíveis no microscópio ótico de luz refletida, supõe a identificação de carbonatos devido o alto relevo da imagem. O microscópio indicado para análise de carbonatos é de luz transmitida.

Figura 11 – Cristais de carbonatos



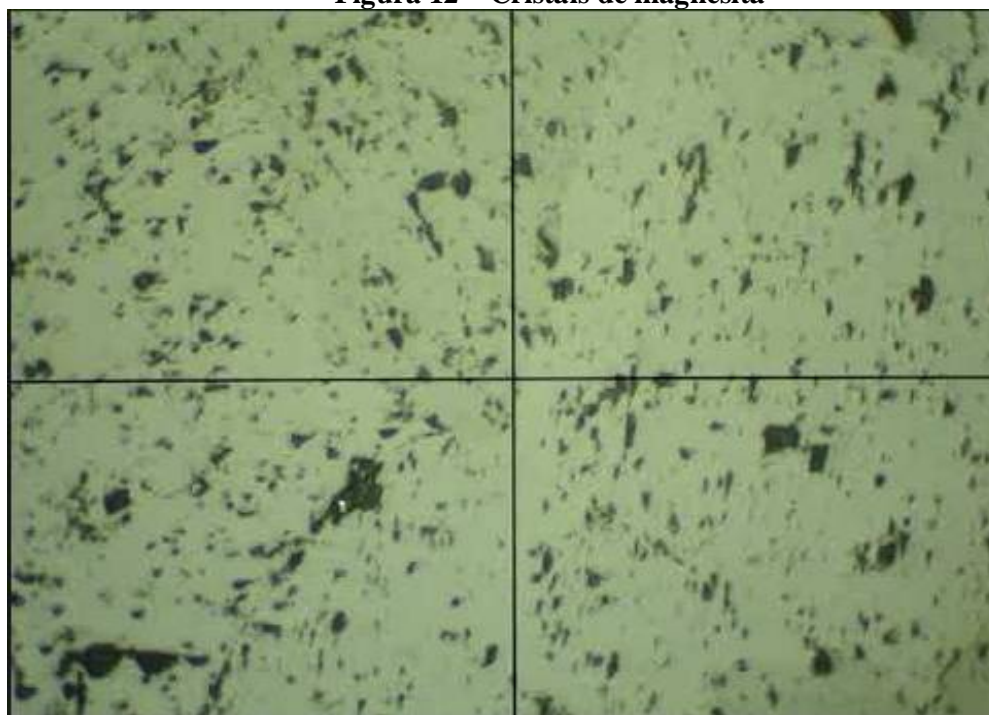
Fonte: GONÇALVES, 2015.

Apresenta as seguintes características: dureza (escala de Mohs): 3,5 a 4, massa específica: 2,89 g/cm³ a 2,90 g/cm³, brilho: vítreo e cor: branca, cinza, rosada (COSTA, 2013).

3.4.4 Magnesita

Composto constituído de carbonato de magnésio, cuja formula estrutural é MgCO₃. Participa da formação de uma serie isomorfa com a siderita (FeCO₃) quando substitui o ferro. Em sua composição pode conter traços de níquel, cobalto, cálcio e manganês (COSTA, 2013). Há uma predominância deste mineral em veios a partir de produtos de reações das alterações de rochas ricas em magnésio em zonas de metamorfismo regional. A coloração predominante varia desde o branco ao amarelo, mas podem surgir outras cores na presença de impurezas (ALMEIDA, SAMPAIO, 2005). Na figura 12 estão apresentadas as características visíveis no microscópio ótico de luz refletida dos cristais de magnesita, sua característica tem mais visibilidade no microscópio ótico de luz transmitidas devido a transparência do carbonato.

Figura 12 – Cristais de magnesita

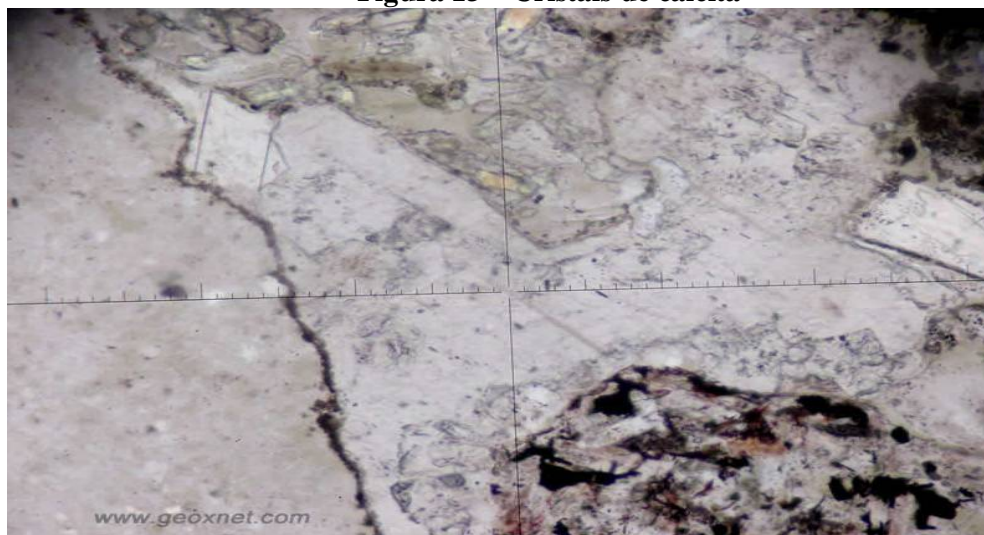


Fonte: MAGNESITA, 2019.

3.4.5 Calcita

Calcita é o mineral predominante das rochas carbonáticas como por exemplo, na composição do mármore de pureza elevada. Pode ser encontrado na coloração branca, que a cor mais comum, incolor, azul, amarela, esverdeada, vermelha, cinza. A fórmula da composição estrutural é CaCO_3 (COSTA, 2013). Pode ser citado dentre as suas características físicas como relevante a dureza 3 (escala Mohs) e a massa específica $2,72 \text{ g/cm}^3$ (ALMEIDA, SAMPAIO, 2005). Na figura 13 estão apresentadas as características visíveis no microscópio ótico microscópio ótico de luz refletida dos cristais de calcita, suas características tem mais visibilidade no microscópio ótico de luz transmitidas devido a transparência do carbonato.

Figura 13 – Cristais de calcita



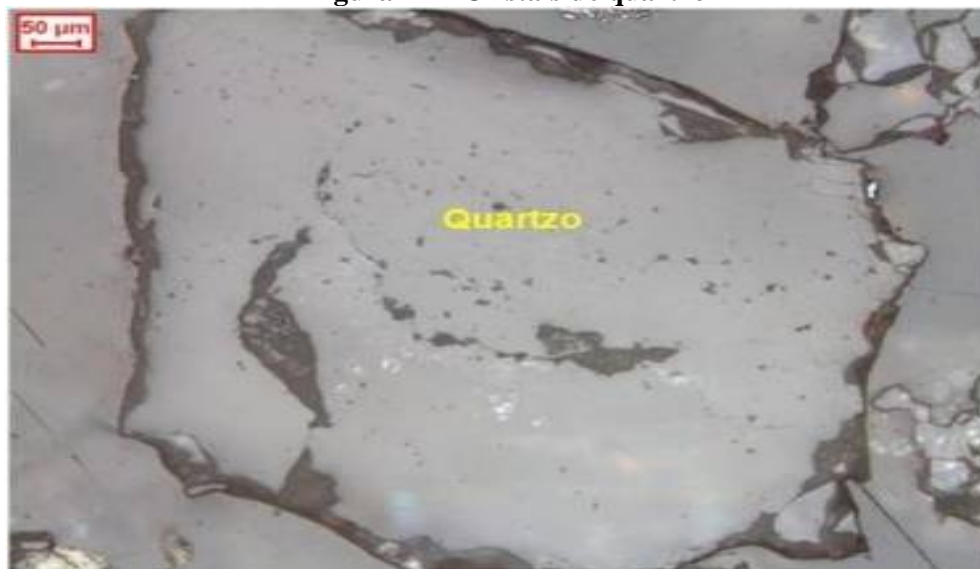
Fonte: GEOXNET, 2019.

3.4.6 Quartzo

É um mineral muito abundante na crosta terrestre. Tem na sua composição óxido de silício, fórmula estrutural SiO_2 . Tem como característica a resistência ao intemperismo e ao desgaste físico (COSTA, 2013). Apresenta granulometria fina (0,01 mm a 0,03 mm) a muito grossa (0,22 mm), as dimensões têm aspecto granular com cristais equidimensionais ou fibroso (anfíbolito). Têm contornos irregulares, bordas variando de pouco rugosa a lisa, e muito rugosas e com cavidades (JUNIA, 2017). Tem como característica elevada dureza e bordas que podem ser vistas com facilidade ao microscópio ótico. A cor apresentada ocorre pela à presença de impurezas, essa coloração varia entre cinza clara a branco e baixo relevo (GONÇALVES,

2015). Na figura 14 estão apresentadas as características visíveis no microscópio ótico dos cristais de quartzo. Óxido que pode ser observado pelo tipo de luz refletida por ser opaco.

Figura 14 – Cristais de quartzo

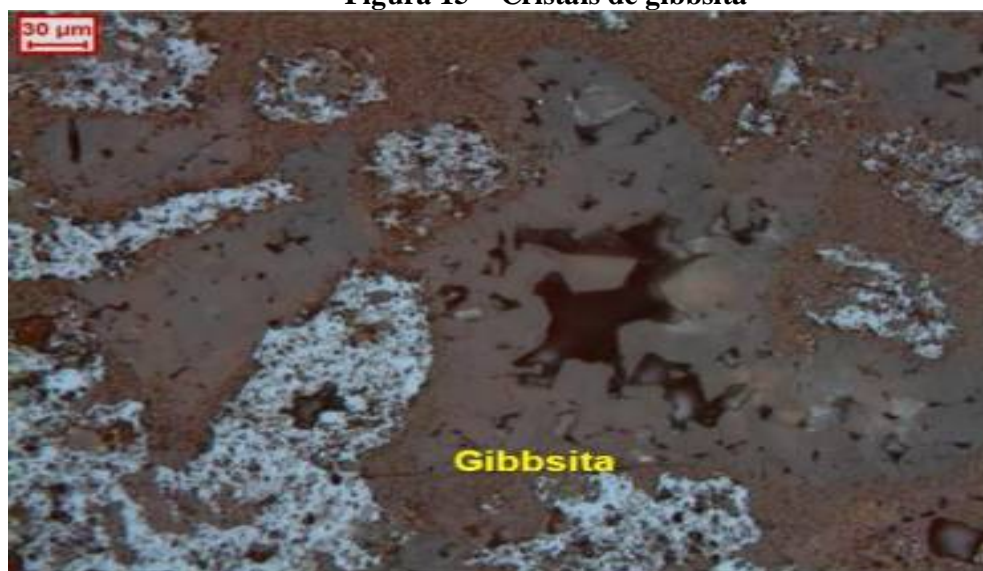


Fonte: GONÇALVES, 2015.

3.4.7 Gibbsita

Na figura 15 estão apresentadas as características visíveis no microscópio, imagens coloridas, característico desse mineral

Figura 15 – Cristais de gibbsita



Fonte: GONÇALVES, 2015.

Segundo Gonçalves (2015) a gibbsita tem como caracterizado como um mineral monoclinico de coloração branca (acinzentado), do grupo dos óxidos (hidróxido de alumínio - $\text{Al}(\text{OH}_3)$), a massa específica entre $2,30 \text{ g/cm}^3$ e $2,40 \text{ g/cm}^3$ e nas análises de microscópica óptica a imagem é frequentemente apresentada como é transparente, incolor a marrom claro, de aspecto sacaroide (grãos semelhantes a açúcar). É comum estar associada à goethita terrosa e caulinita.

3.4.8 Talco

O talco é um mineral que apresenta em sua composição química um silicato hidratado de magnésio. Na figura 12 estão apresentadas as características visíveis no microscópio ótico, talco também baixa visibilidade nesta técnica. É preciso associar as outras caracterizações para conseguir identificar o mineral.

Figura 16 – Cristais de talco



Fonte: GONÇALVES, 2015.

Tem ampla aplicação industrial, como exemplo o uso em tintas, fabricação do papel e preparo de alimentos. Apresenta as seguintes características: dureza (escala de Mohs): 1,0, massa específica: $2,70 \text{ g/cm}^3$ a $2,80 \text{ g/cm}^3$, brilho: perláceo a untuoso, cor: cinza, verde claro, prateado, fratura: irregular e transparência: translúcido.

3.4 Caracterização Mineralógica:

A caracterização mineralógica é uma ferramenta muito importante para identificar na composição dos minerais os constituintes e determinar de suas propriedades, os objetivos das análises é determinar as fases presentes e a quantificar os principais elementos. A possibilidade de identificar os minerais viabiliza o estudo sobre as propriedades do material explorado (NEUMANN *et al.*,2010).

As análises laboratoriais que permitem a observação e a identificação das espécies minerais são essenciais para determinar as características inerentes a cada material e avaliar as suas possibilidades de aproveitamento, sejam elas mineralógicos ou não (COSTA, 2013). As técnicas mais usuais aplicadas à caracterização são mostradas na Tabela 4:

Tabela 4 - Técnicas para caracterização de minérios

| | Técnicas | Propriedades |
|--|--|---|
| Difração de Raio X | Metodologia do pó | Permite avaliar as fases das estruturas para obter a identificação dos minerais |
| Microscopia Ótica | Microscópio estereoscópico e óptico de polarização | Permite avaliar a forma, cor, alterações e as propriedades ópticas |
| Fluorescência de raio X | Metodologia do pó Câmara de monocristal | Permite avaliar os elementos químicos para obter a identificação dos minerais |
| Microscopia Eletrônica de Varredura | MEV | Permite avaliar a forma e as associações. |

Fonte: Adaptado de Costa, 2013.

As análises no microscópio eletrônico de varredura são muito importantes nessa fase de caracterização, pois permite verificação de aspectos da textura e possibilita a investigação de fases minerais que não foram identificadas na microscopia óptica por se apresentarem baixas quantidades e para amostras que apresentam baixo grau de cristalinidade (JUNIA,2017).

3.5 Reaproveitamento de Estéril

No estudo da viabilidade econômica de uma atividade devem ser considerados os insumos gerados, a sua disposição, tratamento e finalidade. Assim, a possibilidade de reaproveitamento é uma alternativa econômica e sustentável. Essa condição seria o ideal para a grande maioria das atividades, porém, muitas vezes os custos impedem do tratamento ou a falta de qualidade, em especificação, que inviabiliza o processo e os insumos são estocados.

A disposição desses materiais, principalmente em mineração (minério de ferro) é feita em pilhas denominadas pilhas de estéril que geram custo tanto no seu planejamento quanto na execução e manutenção para atender as normas de segurança.

A expectativa do reaproveitamento do estéril oriundo da mineração de ferro em algumas atividades que podem ser rentáveis seja no retorno financeiro, ou apenas na utilização desse material liberando área útil e poupando recursos antes destinados para esse fim.

3.5.1 – Construção Civil – Brita

A construção civil é um campo da economia que mesmo frente às crises permanecem com suas atividades garantindo que assim o uso de agregados seja em pequena ou grande escala. Os insumos para a indústria da construção civil são os materiais que são consumidos em todo o mundo. A composição do agregado segue o seguinte percentual 57 % de rocha britada e 43 % de areia e cascalho. Na tabela 5 é apresentada as propriedades influenciadas pela característica do agregado.

Tabela 5 - Propriedades do concreto influenciadas pelas características do agregado

| Propriedades do Concreto | Características Relevantes do Agregado | |
|--------------------------|--|---|
| | Areia | Brita |
| Resistência mecânica | Forma dos grãos Dimensão máxima | Forma dos grãos Dimensão máxima |
| Retração | Textura superficial | Dimensão máxima Módulo de elasticidade |
| Massa unitária | Massa específica Granulometria | Granulometria |

Fonte: Adaptado de VALVERDE, 2001.

No Brasil setores minerais que produzem matéria prima bruta para a indústria da construção civil, como exemplo a brita, são conhecidos como produtores de agregados (VALVERDE, 2001). Na figura 17 é apresentada a evolução da produção de agregados desde 1988.

Figura 17 – Evolução da produção de agregados para construção civil



Fonte: FERREIRA e FONSECA, 2013.

A brita tem tamanho graúdo e por definição é um material classificado como agregado de origem artificial. Pode ser encontrado em pedreiras de materiais oriundos de rochas cristalinas com solos de escassa cobertura, sem muitas transformações físicas e com a composição química preferencial de rochas quartzo – feldspáticas como os granitos, gnaisses (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2017).

O setor da construção civil é bem dependente do uso da brita, pois está associado à as aplicações na confecção de concreto, reestruturação pavimentada o de estradas de terra, de ferrovias, barramentos, etc. Nas funções da brita no concreto são, segundo Ministério de Minas e Energia, (2017):

- Resistir aos esforços solicitados de acordo com os estruturados grãos de sua composição;
- Agir na resistência ao desgaste à ação de intempéries;
- Não permitir as variações de volume independente da natureza;
- Permitir redução do custo do concreto;

Minerações como as de exploração de minério de ferro podem ser produtoras de brita, caso o seu material estéril tenha alta concentração de MgO (magnésio) e SiO₂ (quartzo) e que não exigem uma especificação mais rígida. Na figura 18 é lustrado o material agregado: brita.

Figura 18 – Brita



Fonte: VALE.DRUMOND, 2014.

Os tamanhos de britas são classificados segundo a ABNT NBR 7525 (1993), como:

- Nº 1 – 4,8 mm a 12,5 mm;
- Nº 2 – 12,5 mm a 25 mm;
- Nº 3 – 25 mm a 50 mm ;
- Nº 4 – 50 mm a 76 mm ;
- Nº 5 – 76 mm a 100 mm;

Os tamanhos mais utilizados na construção civil são das britas 1 e 2, são usadas principalmente na produção de concretos e colunas. O material estéril que for separado da porção rica do minério de ferro poderá sofrer cominuição e se apresentar granulometria específica, poderá ser reutilizada, desde que estejam dentro da especificação: 1% a 14% de MgO e granulometria de 8 a 18mm (VALE.DRUMOND, 2014).

3.5.2 – Rochagem – Correção da acidez do solo

A utilização das rochas como regenerador e recuperador de solos é de grande relevância, uma vez que a reutilização tem um fim sustentável para o um problema que anteriormente era considerado um impacto ambiental. Materiais citados como agrominerais remetem as matérias-primas de origem mineral (garimpo rochas, metalurgia e resíduos de mineração) disponíveis para o uso na agropecuária com o intuito de trazer ganhos para fertilização, modificação da acidez e ou estabilização do solo (PADUA, 2012).

Determinados estéreis oriundos da exploração de minério de ferro podem ter como características as altas concentrações de CaO, MgO e em menores teores de P fatores que viabilizam o uso para a aplicação de correção do solo. Segundo Theodoro e Leonardos (2011) geralmente as fontes naturais que são utilizadas como substitutas de fertilizantes industriais são as rochas que contém os minerais citados anteriormente.

O termo rochagem é aplicado à tecnologia que a princípio caracteriza que determinados tipos de rochas apresentam qualidade de nutrientes que podem fornecer de alguma forma a nutrição requerida aos solos, e conseqüentemente também para as plantas. A inserção de rochas por meio de pó aos solos permite a remineralização, pois a adição de minerais supri os nutrientes que foram levados do solo pelo processo natural de intemperismo (THEODORO, LEONARDOS, 2011).

Os solos brasileiros possuem deficiências que necessitam serem corrigidas e adequadas para o sucesso do plantio de determinadas culturas. Dentre a grande variedade destes solos, no que se refere às características químicas, grande parte não são indicados para o cultivo, pois a acidez que está acima dos limites aceitáveis é um dos exemplos de ponto negativo. Uma das causas dessa característica são as deficiências dos elementos cálcio, magnésio, potássio e sódio (EMPBRAPA, 2019).

As explorações agrícolas também contribuem para aumentar a acidez do solo. As práticas aplicadas potencializam o prejuízo químico sofrido seja pela lavagem do solo pela água das chuvas que levam nutrientes do solo, ou pela maximização do ciclo da matéria orgânica do solo ou ainda pela preparação do solo para obter um efeito acidificante com a adição de fertilizantes (EMBRAPA, 2017). A avaliação da acidez do solo é feita pela medição do valor de pH, esta análise indica a concentração de íons hidrogênio no solo em solução.

Outra abordagem sobre a definição rochagem refere-se a essa técnica como uma possibilidade de fertilização que consiste na adição de pó oriundos de rocha ou minerais que possuem a característica de alterar significativamente a produtividade dos solos sem interferência do equilíbrio ambiental, além de viabilizar a sustentabilidade (PADUA, 2012). O prévio conhecimento das características química e geológicas das rochas e dos ganhos positivos da fertilização são fatores relevantes para propor a utilização de materiais geológicos, e garantir o seu uso específico para determinado pó de rocha (THEODORO, LEONARDOS, 2011).

A disponibilidade de materiais que tenham em sua composição teores consideráveis de óxidos capazes de trazer benefícios ao solo é uma alternativa inteligente para reaproveitamento de pó de rochas, que poderiam ser considerados como estéreis do processo.

Segundo Vale.Drumond (2014) os íons de cálcio e magnésio presente no material favorecem a reação com o hidrogênio, como produto da reação tem-se o consumo e retirada do excesso dos íons de hidrogênio, elevando o pH e permitindo a neutralização do solo. O calcário também contribuí para a neutralização de acidez promovida pelos fertilizantes nitrogenados, entre eles nitrato, amônio, e sulfatos, favorecendo o cultivo de materiais orgânico do solo (VALE. DRUMOND, 2014).

Na figura 19 são apresentadas rochas que podem ser utilizadas como pó de rocha para a prática de rochagem.

Figura 19 - Rochagem



Fonte: NORDESTERURAL, 2019.

O material estéril a ser utilizados deve ser submetido a análises químicas, com o objetivo de se determinar as quantidades dos elementos presentes. A partir dos resultados e através dos cálculos, é possível obter a quantidade dos materiais necessária para correção solo (SILVEROL, MACHADO, 2005). O material existente será utilizado in natura, sem nenhum beneficiamento, sendo necessário somente os processos físicos: moagem e o peneiramento.

3.5.3–Aditivo em Pelotizações e fundente em pequenos altos-fornos.

Na mineração, a Pelotização pode ser considerada um processo de reaproveitamento do material superfino (*pellet feed*, granulometria inferior a 0,150 mm) que anteriormente era enviado para barragem de rejeitos. Para a formação da pelota, posterior a redução de tamanho das partículas, são adicionados aditivos que contém os elementos químicos CaO e MgO, para neutralizar a SiO₂ (óxido presente na com posição química do minério de ferro) e conferir características especiais ao metal, respectivamente.

Na Pelotização, o pellet feed passa primeiramente pelo processo de moagem, posteriormente é filtrado, prensado para redução da partícula, passa pelo misturador, segue para o disco de pelotamento que dá ao material a forma arredondada e se transformarem em pelotas (pellets). A última etapa é o envio para forno para secagem e queima, processos que garantem as características metalúrgicas do material.

Na figura 20 pode ser observada as pelotas produzidas com o minério de ferro mais as misturas associadas ao processo de produção.

Figura 20 – Pelotas - minério de ferro aglomerado



Fonte: VALE, 2019.

De acordo com as características do estéril com a concentração adequada é uma possibilidade o seu uso no processo da pelota como aditivo. Esta é uma vantagem significativa, pois trará uma economia para o processo e uma solução para disposição do estéril.

Outra aplicação para reutilização do estéril oriundo da exploração de minério de ferro é a sua utilização como fundente. Os itabiritos dolomíticos, material estéril de estudo, tem em sua composição principalmente bandas de dolomita ferrosa, quartzo, óxidos de ferro, calcita, clorita e anfibólios e consideráveis percentuais de carbonatos (D'AVILA, 2015). Os materiais considerados óxidos, identificados como fundentes, são muito importantes para os processos pirometalúrgicos. Os fundentes são elementos que ajudam no processo de fusão dos metais e são muito úteis na separação do minério de ferro da ganga, permitindo que junto a formação da escória seja eliminada as impurezas, materiais com ponto de fusão acima da temperatura de operação do forno (COSTA, 2013)

O fundente tem como principal função permitir que as impurezas sejam mais facilmente fusíveis, através de uma interação química para formação de um novo composto com ponto de fusão mais baixos que os constituintes da composição da escória (OLIVEIRA, 2013). O tipo de fundente usado irá definir a alcalinidade da escória, dessa forma é possível prever as reações nas paredes refratárias do forno.

Segundo Machado (2006), os fundentes são classificados em dois tipos: básicos (tem uma sua composição química os elementos CaO e/ou MgO) e ácidos (tem uma sua composição química os elementos SiO₂ e/ou Al₂O₃).

Segundo Costa (2013) os fundentes principais são:

- Calcário (Composição química contém o elemento CaO);
- Dunito (Composição química contém os elementos MgO e SiO₂);
- Serpentinó (Composição química contém os elementos MgO e SiO₂);
- Dolomita (Composição química contém os elementos MgO e SiO₂);
- Quartzo (Composição química contém o elemento SiO₂).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Foi utilizado nesse estudo amostras de estéril proveniente da exploração de minério de ferro da região de Nova Lima, Quadrilátero Ferrífero, que estavam empilhados após a atividade de remoção da cava para liberação do material rico em óxido de ferro.

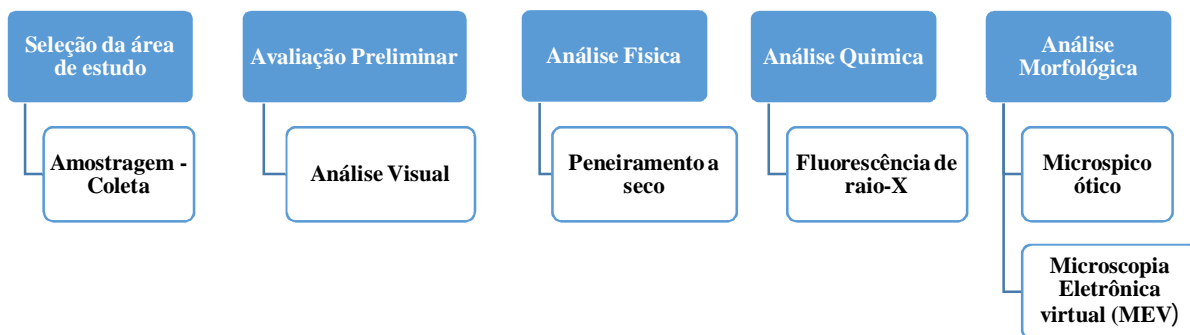
4.2 Métodos

Para caracterização da amostra de estéril foram realizados ensaios físicos, químicos e morfológicos a partir das seguintes técnicas:

- Amostragem;
- Ensaios granulométricos por peneiramento a seco;
- Fluorescência de Raios X;
- Microscopia Ótica;
- Microscopia eletrônica de Varredura (MEV);

Na figura 21 esta representado os métodos executados no trabalho:

Figura 21- Fluxograma dos métodos utilizados no trabalho



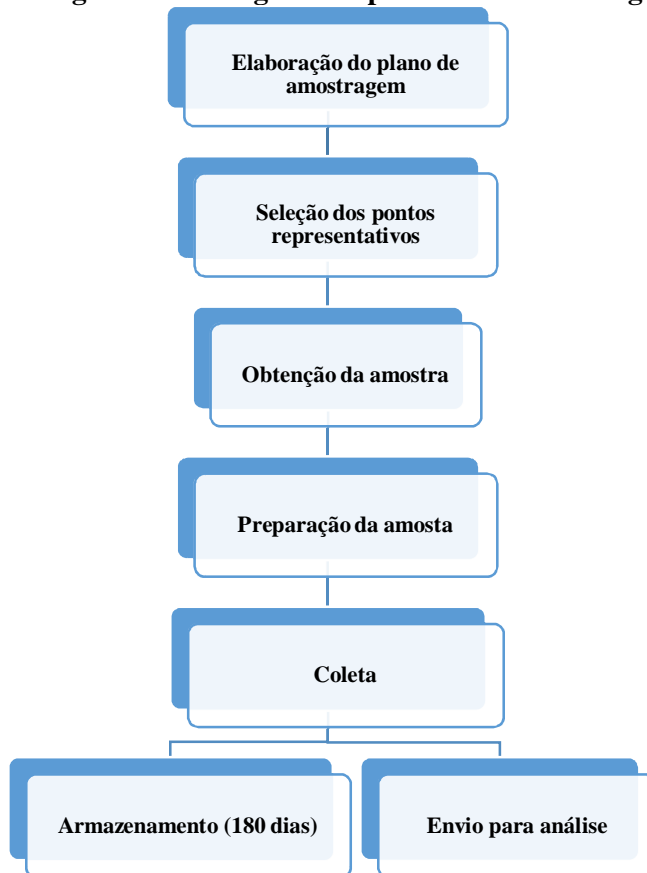
Fonte: Próprio autor.

4.2.1 Amostragem

A amostra de estéril foi coletada conforme a orientação da NBR10007 (2004b) de forma pontual em seis pontos distintos, para garantir a representatividade do local amostrado, o resíduo estava seco sobre o solo e disposto em pilhas, o amostrador utilizado foi uma pá e foi feita a identificação logo após a coleta.

O material coletado foi separado de forma representativa quanto ao tamanho das partículas, para isso foi feito quarteamento e separado em sacos hermeticamente fechados quantidade necessária para os testes. Na figura 22 estão descritos os passos do processo de amostragem:

Figura 22-Fluxograma – processo de amostragem



Fonte: Próprio autor.

A amostra, no local da coleta, estava aglomerada da mesma forma que em seu depósito da qual foi retirada da cava após detonação. Foi feita uma separação inicial formando uma pilha horizontal e retirando uma alíquota de cada ponto, garantindo uma representatividade.

A quantidade separada para análise granulométrica do material foi feita conforme previsto na NBR6457 (1986), a massa reservada foi de 4000,0 g de estéril de minério de ferro. Posteriormente a pesagem, foi feito o quarteamento a fim de obter uma massa mais acessível para o peneiramento.

Na tabela 6 estão descritas as condições para realizar a análise conforme descrito na norma NBR 6457 (1986).

Tabela 6– Preparação para o peneiramento – NBR6457

| Quantidade de Amostra para Análise Granulométrica | |
|--|---------------------------------------|
| Dimensão dos grãos maiores contidos na amostra, determinação por observação visual (mm) | Quantidade mínima a tomar (kg) |
| < 5 | 1 |
| 5 a 25 | 4 |
| >25 | 8 |

Fonte: Adaptado da NBR6457, 1986.

4.2.2 Análises Granulométricas

Foram separadas alíquotas de 1000,0 g e peneiradas manualmente a seco, utilizando uma série de peneiras com abertura de 25 mm, 12,5 mm, 4,75 mm, 2,0 mm, 1,8 mm, 0,600 mm, 0,300 mm, 0,150mm e 0,075mm. As peneiras usadas nesse ensaio são da fabricante BERTEL, foram previamente lavadas em água e secas em ar comprimido. As peneiras apresentavam bom estado de conservação e em boas condições para a operação.

Na tabela 7 estão apresentadas as condições que foram aplicadas para análise granulométrica conforme descrito na norma NBR 7211 (1983).

**Tabela 7– Conjunto de peneiras com as devidas aberturas nominais em mm –
NBR7211**

| Serie normal | Serie intermediária |
|---------------------|----------------------------|
| 75 mm | - |
| - | 63 mm |
| - | 50 mm |
| 37,5 mm | - |
| - | 31,5 mm |
| - | 25 mm |
| 19 mm | - |
| - | 12,5 mm |
| 9,5 mm | - |
| - | 6,3 mm |
| 4,75 mm | - |
| 2,36 mm | - |
| 1,18 mm | - |
| 0,600 mm | - |
| 0,300 mm | - |
| 150 mm | - |

Fonte: Adaptado da NBR7211, 1983.

Foram utilizadas peneiras da série normal e intermediária conforme a disponibilidade do laboratório que foi realizada a análise. Segue as peneiras: 25mm, 12,5mm, 4,75mm, 2,0mm, 1,8mm, 0,600, 0,300mm e 0150mm.

4.2.3 Análises Química - Fluorescência de raios X (FRX)

Após o ensaio granulométrico por peneiramento a seco, foi separada uma fração de aproximadamente 1,0 g do material retido em cada peneira. As amostras foram pulverizadas no moinho de bolas até faixa abaixo de 0,045 mm. Em seguida realizada a preparação das pastilhas fundidas para posterior análise no Espectrômetro de Fluorescência de Raios X equipamento Rigaku modelo Simultix 14, para quantificar os teores de Fe₂O₃, SiO₂, Al₂O₃, Mn, P, CaO, MgO e TiO₂.

4.2.4 Análises Morfológicas

4.2.4.1 Análise Visual

Avaliação do visual das características primárias do material após o peneiramento a seco. As frações avaliadas são referentes as primeiras peneiras o qual já possível observar pontos relevantes e característicos do material de estudo.

4.2.4.2 Microscópio Ótico

As amostras recebidas da análise granulométrica foram preparadas para a realização da análise conforme o procedimento padrão: embutimento em resina epóxi, lixamento (lixas 150, 220, 400, 600 e 1200) e polimento (com pasta de diamante) em politriz manual gerando a seção polida de grãos.

Para avaliação inicial da morfologia das amostras foi utilizado microscópio óptico do Microscópio Zeiss - modelo Imager-Z2m foram utilizadas ampliações de 10x e 20x.

4.2.4.3 Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

A morfologia das análises das amostras de estéril, após o ensaio granulométrico foi realizada no utilizando o equipamento Shimadzu SUPERSCAN SSX-550, para realização do ensaio foram feitos o ajuste necessário de tensão 15kV e corrente de 69 μ A.

Antes da realização da análise, foi preciso preparar as amostras. Essa preparação consiste em aderir o pó das amostras em fitas de carbono e metalizá-las com películas de ouro no equipamento SANYU ELECTRON, modelo SC-701, em uma corrente de 5 mA durante 3 minutos.

Para análise elementar utilizou o EDS acoplado ao MEV selecionando pontos específicos para avaliar a concentração dos óxidos presentes nas amostras. O espectro de EDS foi obtido com tempo de análise de 60s.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Amostragem

Amostra no local da coleta. Nas figuras 23 e 24 estão apresentados os materiais no local da coleta, disperso e em estoque.

Figura 23– Estéril Oriundo da Exploração de Minério de Ferro.



Fonte – Próprio autor.

O material se apresentou em várias formas irregulares, de diferentes tamanhos e visivelmente com a presença de heterogeneidade de minerais de colorações diferentes.

Figura 24– Pilha de Estéril Oriundo da Exploração de Minério de Ferro



Fonte – Próprio autor.

A pilha de estéril formada pela deposição do material, pode ser classificada pelo método ascendente. No local amostrado se apresenta de forma compacta, atendendo as condições de segurança.

5.1 Análises da composição granulométrica do rejeito

Os resultados obtidos pelo método de peneiramento a seco manual estão representados na Tabela 8.

Tabela 8– Composição granulométrica obtida pelo método de peneiramento a seco

| Quantidade de Amostra para Análise Granulométrica | | | |
|---|----------|--------------------|----------------------|
| Peneira (mm) | % Retido | % Retido Acumulado | % Passante Acumulado |
| 25 | 6,33 | 6,33 | 93,67 |
| 12,5 | 26,70 | 33,03 | 66,97 |
| 4,75 | 34,81 | 67,84 | 32,16 |
| 2,0 | 11,94 | 79,78 | 20,22 |
| 1,8 | 2,26 | 82,04 | 17,96 |
| 0,600 | 4,50 | 86,54 | 13,46 |
| 0,300 | 2,45 | 88,99 | 11,01 |
| 0,150 | 1,78 | 90,77 | 9,23 |
| >0,150 (0,075) | 8,49 | 100 | 0 |

Fonte: Próprio autor.

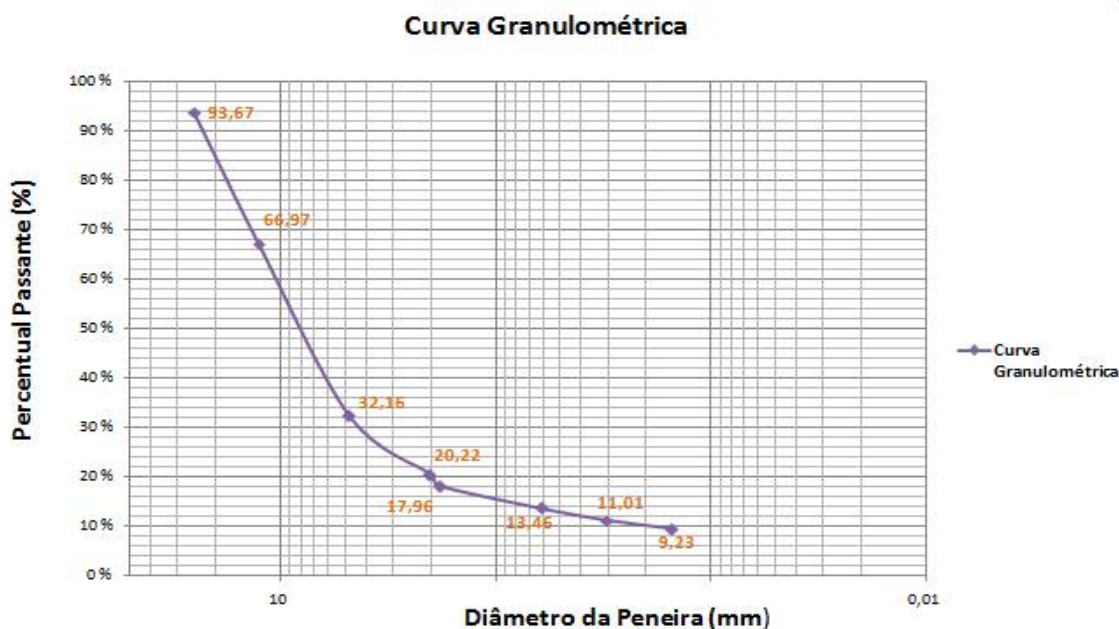
De acordo com a norma NBR7225 (1983) Materiais de pedra e agregados naturais – Classificação e terminologia, é possível classificar determinar as frações do solo em agregado (pedra britada e pedregulho), areia (grossa, média e fina) e filer (argila). Para as faixas analisadas neste trabalho, de acordo com a norma D 3282(1993/2004) – *Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purpose*, é possível determinar as frações do solo de pedregulho, areia grossa, areia fina e silte/argila, conforme mostrado na Tabela 9. A partir dessa classificação podemos associar e identificar o material analisado.

Tabela 9– Frações avaliadas do material estéril (NBR 7225)

| Frações do Rejeito (mm) | % Massa retida |
|--|----------------|
| Pedregulho (2,0 a 75,0) | 79,78 |
| Areia Grossa (0,425 a 2,00) | 6,76 |
| Areia Fina (0,075 a 0,425) | 4,23 |
| Silte-Argila (< 0,075) | 8,49 |

Fonte: Próprio autor.

A distribuição granulométrica obtida pelo método de peneiramento a seco manual está representada e figura 25:

Figura 25- Gráfico de análise granulométrica

Fonte: Próprio Autor

O maior percentual do estéril analisado foi classificado como pedregulho 79,78 %, pois se encontra na faixa de 75,0 mm a 2,0 mm. Considerando que foi analisada a amostra somente como o processo físico de separação do minério e de acordo com a NBR 7225 (1983) é possível classificar esse material de acordo com as dimensões nominais como pedra britada nº 1 e nº 2.

A análise da curva granulométrica ficou coerente com o que era esperado pelo ensaio: uma curva bem distribuída, pois o material estéril estocado provém da detonação e não passou previamente passar per nenhum tipo de redução física e nem de peneiramento, logo as frações que apresentariam maior percentual seriam a de maior granulometria.

Com esse resultado é possível supor que as características são de um material compacto, pela maior quantidade de material retido estar nas primeiras peneiras da análise. Mas, se faz necessário a realização do ensaio de dureza para confirmação. Dessa forma, em um possível reaproveitamento é preciso avaliar os custos da cominuição para que além dos ganhos ambientais e com segurança, também seja exista viabilidade econômica ao processo.

Os resultados encontrados nas frações predominantes deste trabalho de 12,5 mm a 2,00 mm sugerem o uso deste material como agregado na construção civil, assim como o estudo feito por Zagôto (2016) que analisou os rejeitos de lavra de rochas ornamentais do Espírito Santo com objetivo de avaliar o reaproveitamento do material na construção civil. Os seus resultados também confirmaram que o material predominante do ensaio de peneiramento que estão compreendidos entre a faixa granulométrica 19 mm a 4,75 mm podem ser classificados comercialmente como brita 1. O uso como brita 1 é relevante na construção civil, pois está presente na composição da maioria das confecções de concretos realizados no Brasil. Anteriormente era comum a mistura de britas 1 e 2, porém no mercado atual predomina a primeira (BASTOS, 2006).

Ainda comparando as faixas de maior representatividade do ensaio granulométrico de 12,5 mm a 2,00 mm, os resultados de Latterza (1998) também apresentou potencial de aproveitamento de materiais para uso da construção civil. Segundo os seus estudos, agregados graúdos gerados pelo reaproveitamento de entulhos da construção estão em conformidade na preparação dos concretos classe C-15 (uso em fundações e em obra provisória, resistência a compressão 15 MPa, segundo NBR 8953(1992)) com o uso da brita tipo 1. A brita dois que também aparece com um percentual relevante e é indicado para concretos que exigem mais resistência para a construção de fundações e pisos mais espessos.

Para as faixas seguintes o resultado do passante da peneira de 2,00 mm, em torno de 11%, sugere o uso para correção da acidez do solo, atrelado aos dados da análise química que aponte a presença de óxido básicos. De acordo com Coelho (2004) a exigência para reutilização do material a ser reaproveitado na agricultura como corretivo da acidez do solo de materiais com possível qualidade química é que o passante da peneira de 2,00 mm seja maior ou igual a 95 % do total amostrado. Um papel relevante para dissolução do material e possibilidade de

contato com solo é o tamanho da partícula, dessa forma a determinação granulométrica é fundamental. Para o processo que é avaliado neste estudo o material apresentou menor percentual para essa aplicação, mas caso seja de interesse as faixas superiores deverão ser moídas após britagem, para atender à exigência mencionada anteriormente.

E para o material passante da última peneira 0,150mm, em torno de 8,49 %, os resultados sugerem o uso para a prática de rochagem como uma possível rota para o reaproveitamento de minérios dolomíticos. Entretanto, a análise química irá confirmar a presença dos óxidos CaO e MgO na faixa de aplicação para essa técnica. Os estudos de Beneduzi (2011) avaliou pós de rochas na faixa de 0,075 mm como uma possibilidade de uso na agricultura com sustentabilidade aplicando a fertilização dos solos com a de adubação e práticas agrícolas que provocaram uma menor agressão ao solo, confirmando a faixa granulométrica.

O somatório das massas retidas foi diferente da massa total inserida no conjunto de peneiras, esse erro pode estar atribuído a quantidade de finos agregados ao material que pode favorecer dispersão no momento da análise e as partículas de tamanho irregular que são geradas no peneiramento manual, mas, este é considerado um comportamento normal devido a irregularidade de algumas partículas que ficam retidas pela malha (formato agulha) mesmo com granulometria maior que a abertura da malha da peneira (VIGLIONI, 2018).

5.2 Análises Químicas

5.2.1 Fluorescência de raios X (FRX)

Foram analisadas todas as frações separadas no peneiramento seco para que fosse possível avaliar as características química dos elementos e a perda por calcinação (PPC) de cada porção da amostra coletada. A análise foi quantitativa e o fechamento químico (FQ) ficou dentro do desvio aceitável +/- 2,0 % para os teores avaliados e validados por padrões certificados na validação das curvas de calibração.

Na tabela 10 é apresentada a identificação das amostras que foram analisadas pela técnica de fluorescência de raio-X.

Tabela 10 – Identificação das amostras – análise FRX

| AMOSTRAS | DESCRIÇÃO |
|------------------|---|
| CQ_000114 | Amostra de Estéril Fração 0,600 mm |
| CQ_000115 | Amostra de estéril Fração acima de _25,0 mm |
| CQ_000116 | Amostra de estéril Fração 4,75 mm |
| CQ_000117 | Amostra de estéril Fração 0,300 mm |
| CQ_000118 | Amostra de estéril Fração 0,150 mm |
| CQ_000119 | Amostra de estéril Fração 25 mm |
| CQ_000120 | Amostra de estéril Fração 0,75 mm |
| CQ_000121 | Amostra de estéril Fração 12,5 mm |
| CQ_000122 | Amostra de estéril Fração 1,18 mm |
| CQ_000123 | Amostra de estéril Fração 2,00 mm |

Fonte: Próprio autor.

Os resultados quantitativos dos elementos químicos analisados pela técnica de fluorescência de raios X da amostra de estéril oriundo da exploração de minério de ferro estão descritos na Tabela 11. Os resultados foram organizados de forma decrescente em relação a sequência das peneiras que foram submetidas no ensaio granulométrico.

Tabela 11 – Resultados (%) análise FRX

| AMOSTRA | Fe₂O₃ | SiO₂ | P | AL₂O₃ | Mn | TiO₂ | MgO | CaO | PPC | FQ |
|-----------------|------------------------------------|------------------------|----------|------------------------------------|-----------|------------------------|------------|------------|------------|-----------|
| CQ000115 | 30,99 | 5,06 | 0,019 | 1,26 | 0,271 | 0,089 | 12,246 | 14,245 | 22,8 | 100,40 |
| CQ000119 | 18,73 | 27,38 | 0,039 | 0,81 | 0,217 | 0,056 | 11,943 | 11,860 | 19,63 | 98,83 |
| CQ000121 | 25,10 | 17,03 | 0,050 | 1,09 | 0,24 | 0,138 | 11,910 | 12,115 | 20,43 | 99,02 |
| CQ000116 | 28,40 | 14,69 | 0,047 | 1,31 | 0,241 | 0,147 | 11,398 | 11,299 | 18,77 | 98,64 |
| CQ000123 | 30,99 | 15,09 | 0,046 | 1,36 | 0,277 | 0,134 | 10,044 | 10,164 | 17,63 | 99,19 |
| CQ000122 | 33,01 | 15,70 | 0,044 | 1,37 | 0,329 | 0,140 | 8,264 | 10,497 | 16,73 | 100,42 |
| CQ000114 | 36,23 | 14,86 | 0,044 | 1,61 | 0,454 | 0,126 | 7,484 | 9,255 | 15,05 | 100,87 |
| CQ000117 | 41,03 | 20,23 | 0,040 | 2,30 | 0,747 | 0,142 | 4,358 | 4,795 | 8,75 | 100,29 |
| CQ000118 | 45,60 | 15,69 | 0,036 | 2,01 | 0,655 | 0,134 | 4,007 | 4,193 | 7,69 | 99,85 |
| CQ000120 | 39,51 | 23,11 | 0,041 | 2,53 | 0,823 | 0,146 | 4,073 | 4,336 | 8,19 | 100,03 |

Fonte: Próprio autor.

De acordo com os resultados a média obtida dos teores foram: CaO 9,276% e de MgO 8,573%, com estes resultados pressupõe que o material de estudo é um itabirito dolomítico, uma vez que, estão na faixa avaliada para esse litotipo. No trabalho realizado por Gonçalves (2015) também foi caracterizado o itabirito dolomíticos com os seguintes percentuais da faixa global: CaO 16,468 %, de MgO 9,942 % e de PPC 26,44 %.

Para o grupo de amostras que enquadram na classificação de material granulado (tamanho variável de 8 mm a 40 mm) há predominância dos teores mais altos dos óxidos de cálcio magnésio, CaO e MgO, outro fator relevante é percentual maior de perda ao fogo, PPC. Este resultado já era esperado porque a dolomita, principal mineral desse material de estudo, tem em sua composição carbonato duplo de cálcio e magnésio e acordo com Junia (2017) materiais que são gerados a partir de processos de carbonatação apresentam facilidade de lixiviação e oxidação, dessa forma nas faixas mais superficiais são caracterizadas por teores mais altos de cálcio e magnésio.

Para a classificação de material *sinter feed* (tamanho variável de 6,35 mm a 0,15 mm) há redução dos óxidos de cálcio magnésio, CaO e MgO, e do teor de óxido de sílica, (SiO₂) e estabilização do percentual de fósforo. D'Avila (2015) citou que para essa faixa pode se proposto o uso como fundente, uma vez que, se o minério tiver característica ácida os materiais que são portadores dos óxidos de CaO e MgO (classificados como fundentes básicos) irão produzir sínter de basicidade binário. A dolomita é uma fonte bastante utilizada como fonte de MgO, pois tem como característica a baixa reatividade e alta demanda energia de decomposição.

E por fim a classificação de material *pellet feed* (tamanho < 0,15 mm), há o aumento do de teor de óxido sílica, para o seu uso na Pelotização é necessário encaminhar o material para fases de concentração, pois teor do óxido de ferro deve ser superior a 60%. Há aumento também dos percentuais dos elementos manganês e alumina e consequente redução dos óxidos de cálcio e magnésio e da perda ao fogo. Junia (2018) constatou em seu trabalho a possibilidade do uso de materiais dolomíticos com alto percentual de CaO e MgO, desde que não altere a qualidade química, pode ser inserido como insumo na produção de pelota, ressaltando a importância de teste físicos e metalúrgicos para avaliar rendimento e custos.

Para usar essa mistura na composição do minério aglomerado é necessário melhorar a qualidade de ferro do concentrado final realizando melhorias no processo de beneficiamento, porém no caso deste estudo o controle de sílica deverá ser avaliado para atender as

especificações do produto. O aumento de Mn nessa faixa de análise também favorece a produção de um tipo de pelota especial, como características metalúrgicas distintas.

A identificação de altos percentuais de CaO e MgO sugerem o uso deste material na prática de rochagem para corrigir a acidez do solo, porém é preciso avaliar a faixa ideal da concentração deste óxido. Assim como Beneduzzi (2011) que sugeriu que essa técnica é uma alternativa sustentável e que tem viabilidade para o uso de correção de deficiências do solo, ressaltando a vantagem econômica frente a outras alternativas importadas que apresentam maior custo.

5.3 Análises Morfológicas

5.3.1 Análise Visual

O material natural após a passagem no britador apresentou formas irregulares, característica de material compacto posterior a um processo físico. As avaliações visuais foram realizadas nas frações > 25 mm e 25 mm, respectivamente, estão representadas na figura 26.

Figura 26— Amostra natural de estéril de minério de ferro





Fonte: Próprio autor.

Na análise visual é possível identificar bandamentos de ferro-carbonatos e tons avermelhados característicos do itabirito dolomítico. Segundo Costa (2013) A coloração é marcada por tons rosados e avermelhados em contraste com a cor cinza do minério de ferro caracterizam esse litotipo.

5.3.2 Microscópio Ótico

Para as frações posteriores: 12,50 mm; 4,50 mm e 2,00 mm foram analisadas os minerais visíveis no microscópico óptico.

Após a preparação, seguem as amostras confeccionadas e as imagens obtidas estão representadas na figura 27:

Figura 27- Seções polidas embutidas em resina epóxi.



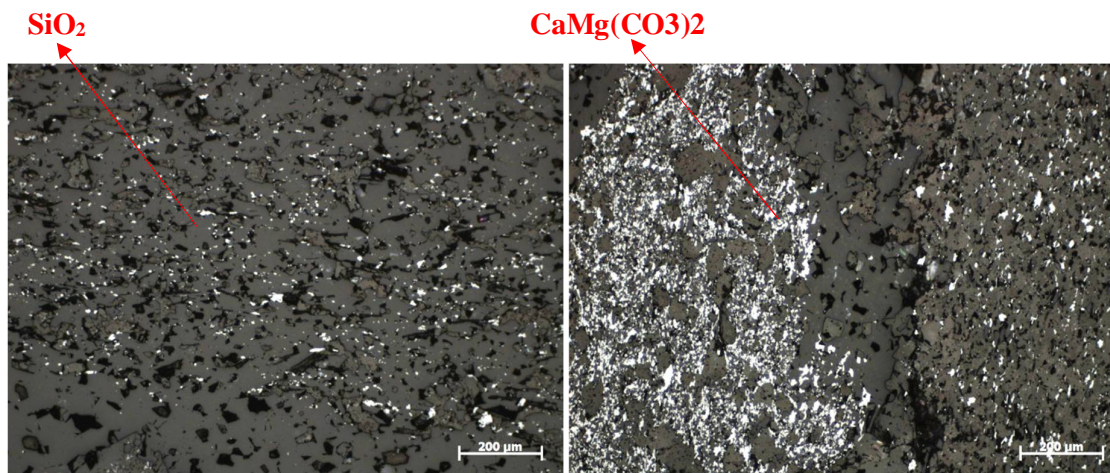
Fonte: Próprio autor.

- a) Fração de 12,5 mm;
- b) Fração de 4,75 mm;
- c) Fração de 2,00 mm;

As imagens das análises no microscópio ótico estão representadas pelas imagens 28, 29, 30 e 31.

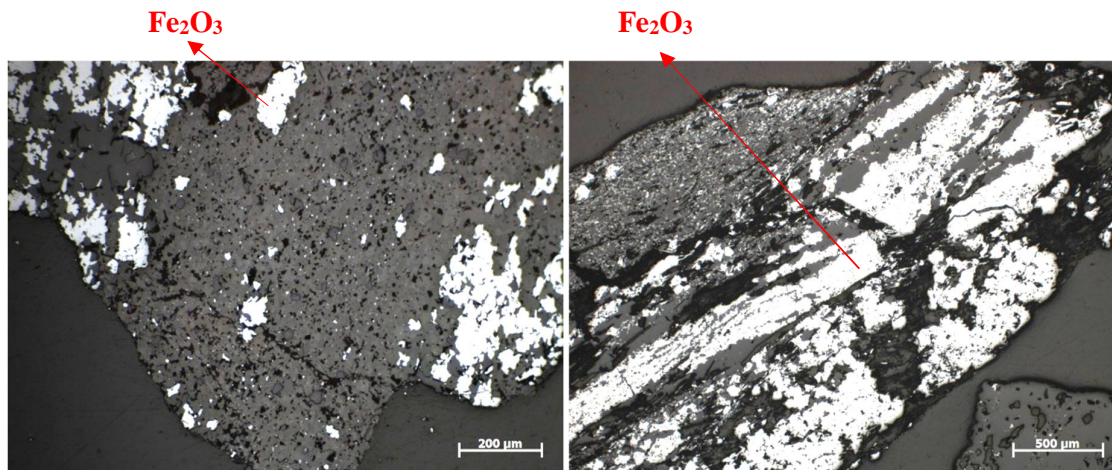
A análise realizada foi qualitativa a partir do microscópio de luz refletida onde há a predominância das imagens de minerais mais opacos, como os óxidos e hidróxidos de ferro. Este tipo de equipamento permite a identificação mais precisa de hematita e quartzo. Para carbonatos, minerais transparentes, o indicado seriam microscópios de luz transmitida juntamente com outras técnicas analíticas. Para essas imagens os minerais relacionados aos carbonatos podem ser observados nos pontos que apresentam um alto relevo

Figura 28 - Imagens do microscópio ótico de estéril de minério de ferro – 12,5 mm



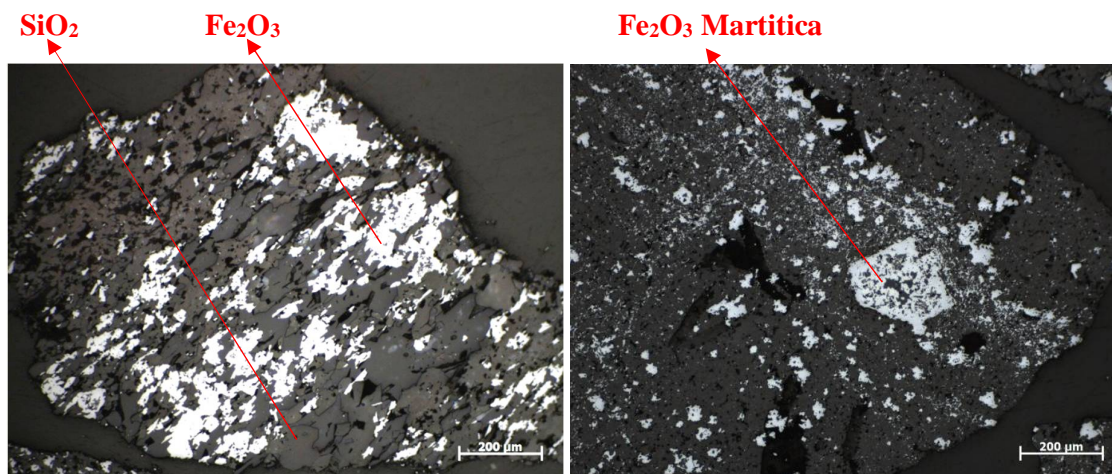
Fonte: Próprio autor.

Figura 29- Imagens do microscópio ótico de estéril de minério de ferro – 4,75 mm



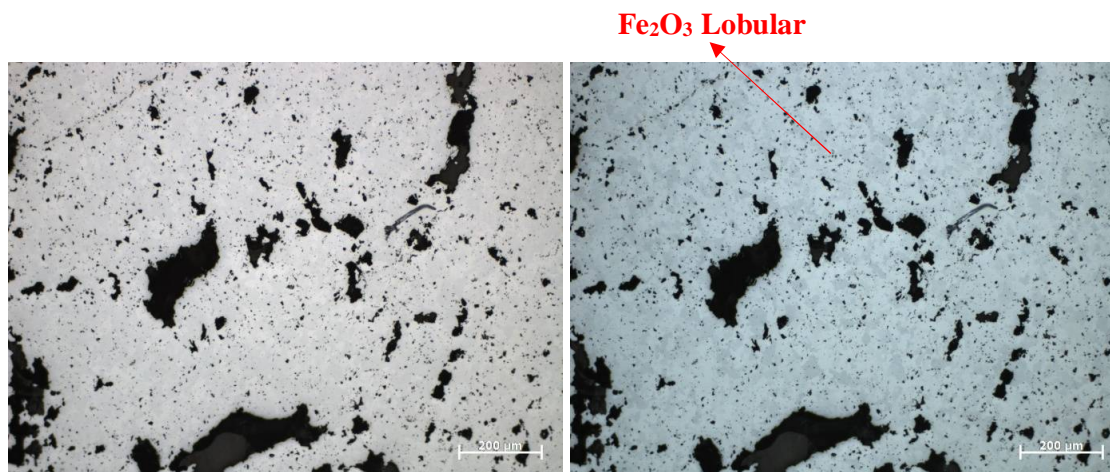
Fonte: Próprio autor.

Figura 30- Imagens do microscópio ótico de estéril de minério de ferro – 2,0 mm



Fonte: Próprio autor.

Figura 31- Imagens do microscópio óptico de estéril de minério de ferro – 2,0 mm



Fonte: Próprio autor.

O material analisado é um estéril, espera-se que a concentração da ganga seja maior que o minério de interesse que é a hematita. Isto pode ser observado na imagem 28, referente à fração 12,5 mm, pois é perceptível um teor maior de sílica (pontos mais escuros na imagem), identificado pelo mineral quartzo. Em outros pontos analisados está visível a presença de hematita e dolomita e/ou calcita e magnetita, devido a presença dos carbonatos de cálcio e magnésio.

Na figura 29, referente a fração 4,75 mm, pode-se classificar como uma partícula mista, pois é considerável ainda a mistura dos minerais. Para liberar a hematita para e permitir o uso desse material nos processos de Pelotização é preciso mais processos físicos como a britagem e moagem para o desprendimento das partículas e assim possibilitar a concentração do ferro nos materiais.

Na figura 30, referente à fração 2,0 mm, ainda se apresenta como partícula mista, porém com maior presença de hematita. Ainda é possível identificar o quartzo e os carbonatos. Nessa imagem foi possível identificar o mineral martita através da figura geométrica com contornos planos visualizados.

Pode-se afirmar que a hematita predominante no material de estudo que foi visualizada nas imagens é a hematita lobular. Na imagem da Figura 31 é possível visualizar os lóbulos característicos desse litotipo e comparando com as imagens identificadas na caracterização do minério do estudo D'Avila (2015).

Gonçalves (2015) identificou também em minérios dolomíticos em sua pesquisa de caracterização a partir do microscópio óptico a presença de hematita martítica e quartzo, a identificação dos carbonatos foi exposta como outros minerais e chegou à seguinte conclusão: as partículas da amostra de itabirito dolomítico não apresentam variações significativas em relação à textura, e morfologia e outros minerais não identificados em luz refletida, que posteriormente com outras técnicas analíticas, supôs-se serem carbonatos.

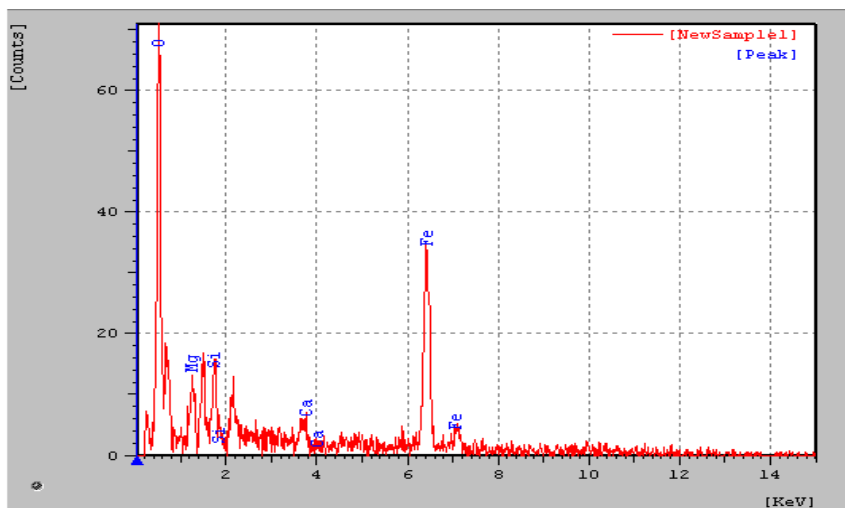
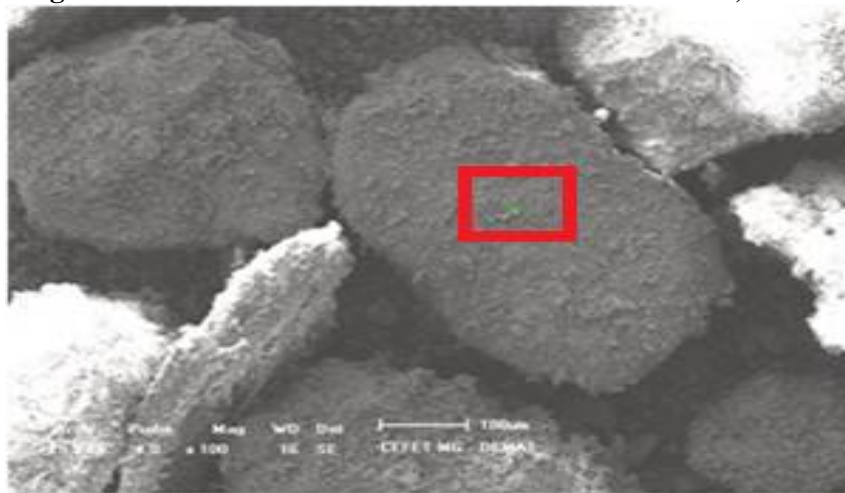
No estudo realizado por Costa (2013), que também fez a caracterização do material dolomítico, chegou-se à conclusão da presença dos seguintes minerais: hematita lobular, quartzo e carbonatos (além de outros presentes específicos para o material analisado). Foi possível afirmar que minérios dolomíticos podem vir a ser considerados ativos das empresas produtoras e assim tem o potencial para aumentar o portfólio de materiais comercializáveis, devido a viabilidade do uso como matéria prima para serem usadas em siderurgia e Pelotização.

Esperava-se a visualização dos minerais goethita, gipsita e talco, porém, provavelmente devido à baixa concentração não foi possível a identificação, além de outros minerais inerentes a composição. Para a completa caracterização seria necessária uma análise quantitativa juntamente com os dados da difração de raios X com a identificação das fases.

5.3.3 Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

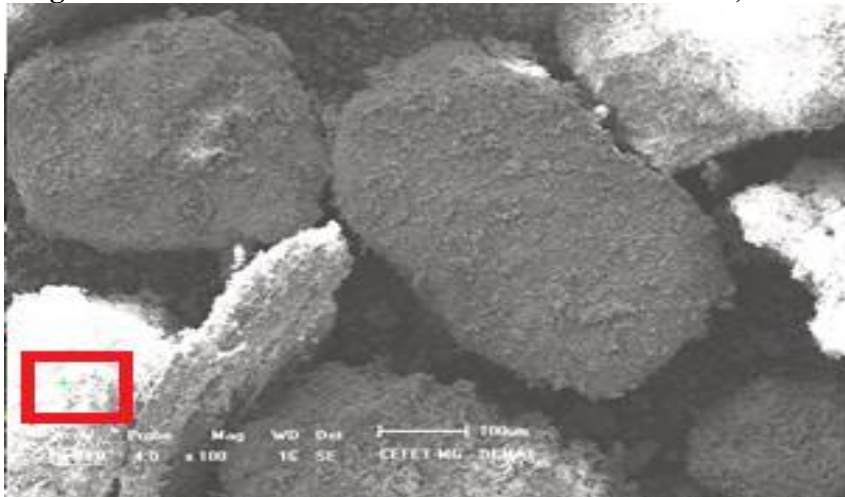
Seguindo uma análise a partir das faixas separadas pelo peneiramento a seco, as morfologias avaliadas foram das seguintes frações: 0,600 mm, 0,300 mm e 0,150 mm. Foi possível observar um aspecto granular e isso pode ser atribuído ao não refinamento do material que é avaliado da mesma forma após a separação do estéril agregado o minério na extração da cava. Em todos os resultados de EDS estão sinalizadas as presenças dos elementos: oxigênio, magnésio, sílica, cálcio, fósforo e ferro assim como já apresentado na análise de fluorescência de raios X. A presença dos elementos citados supõem, em conjunto com as demais técnicas já apresentadas, que o estéril analisado é um itabirito dolomítico. As imagens das análises no MEV com análise elementar EDS estão representadas pelas imagens 32, 33, 34, 35, 36 e 37, está em destaque o ponto que foi feita a análise elementar.

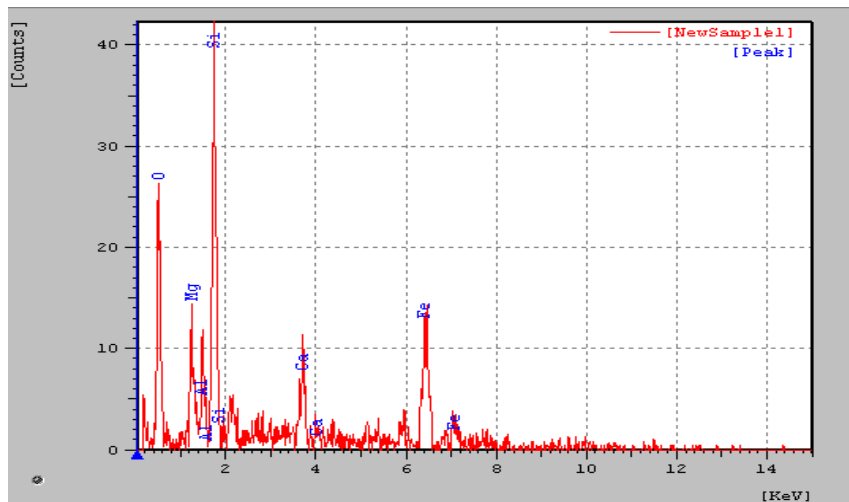
Figura 32– MEV/ EDS - estéril de minério de Ferro – 0,600mm



Fonte: Próprio autor.

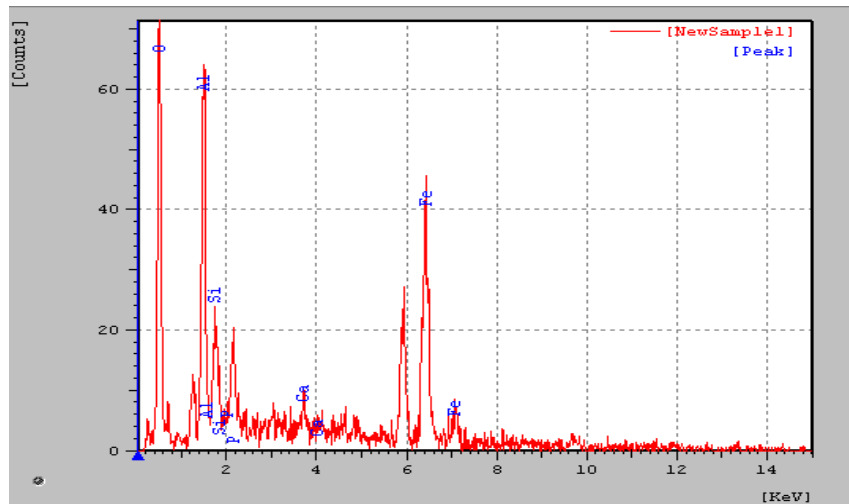
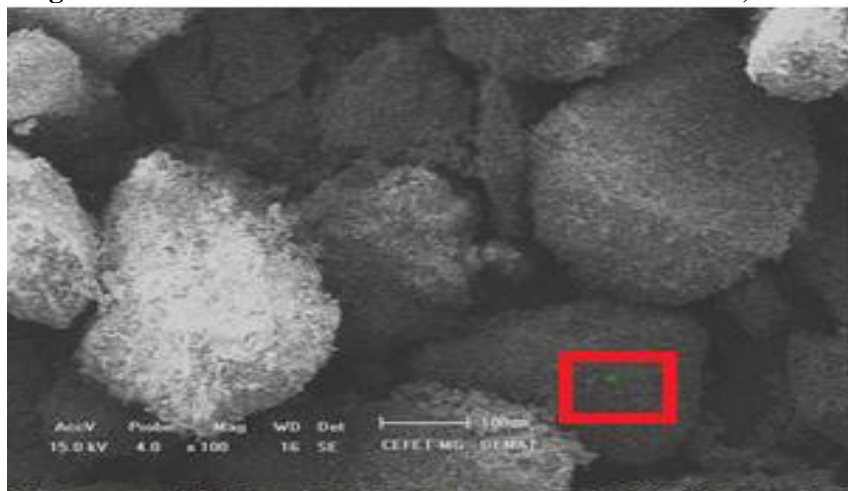
Figura 33– MEV/ EDS - estéril de minério de Ferro – 0,600mm



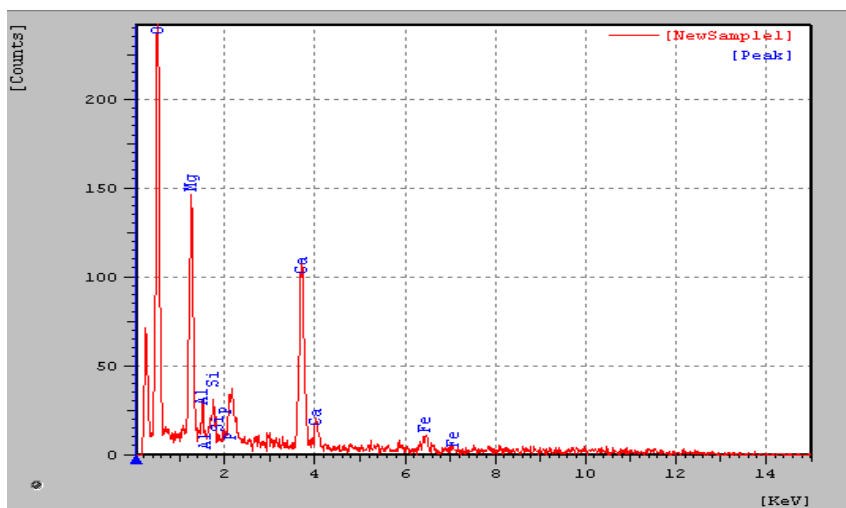
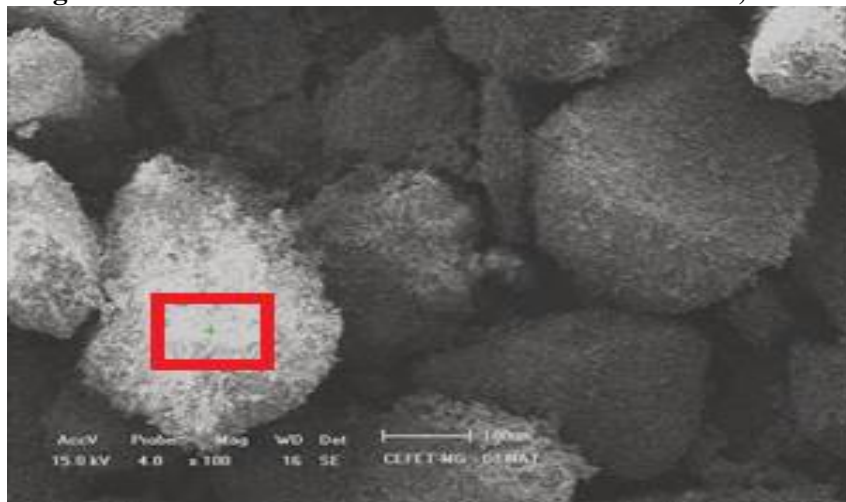


Fonte: Próprio autor.

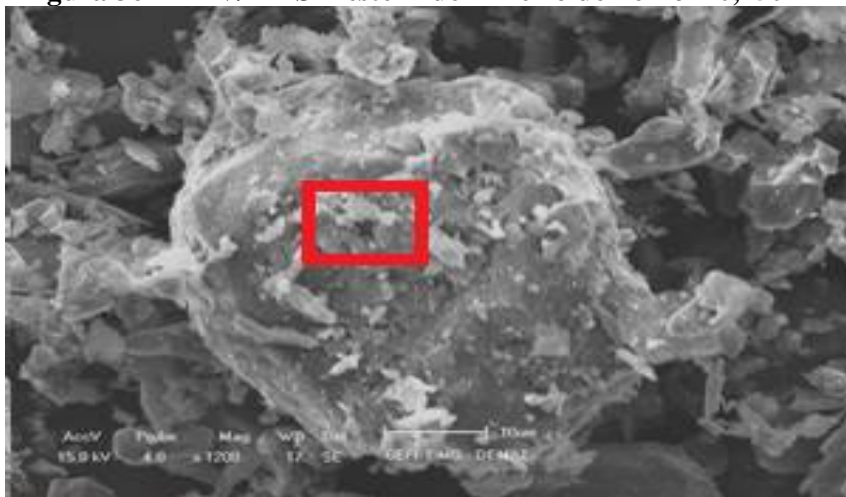
Figura 34 – MEV/ EDS - estéril de minério de Ferro – 0,300mm

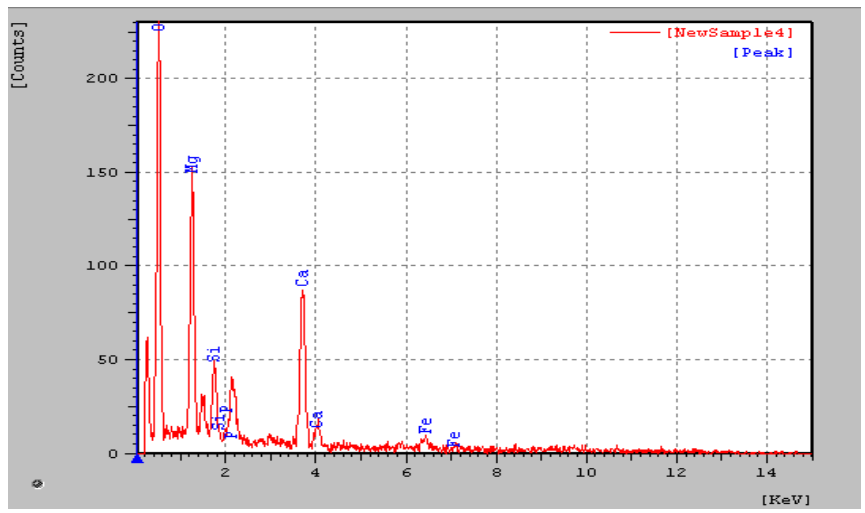


Fonte: Próprio autor.

Figura 35– MEV/ EDS - estéril de minério de Ferro – 0,300mm

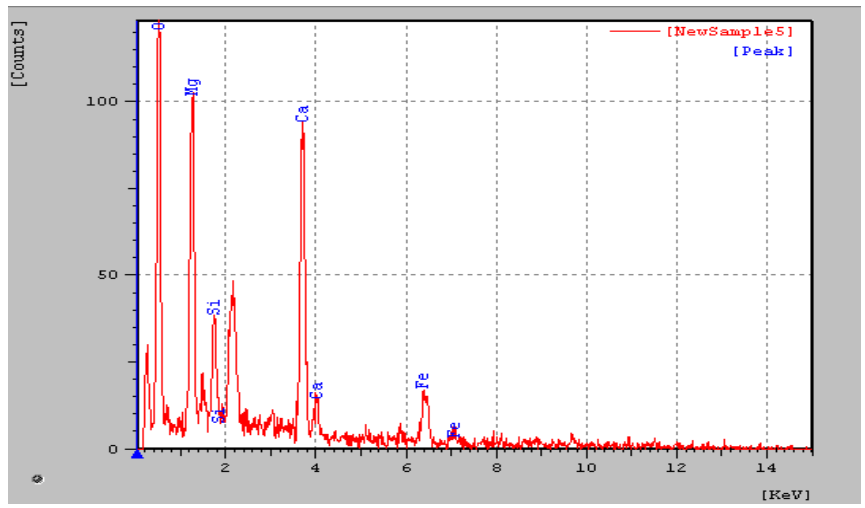
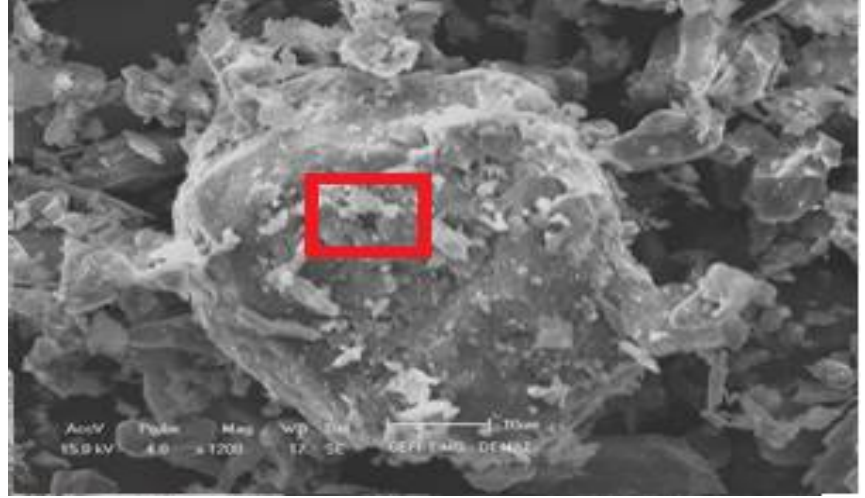
Fonte: Próprio autor.

Figura 36– MEV/ EDS - estéril de minério de Ferro – 0,150 mm



Fonte: Próprio autor.

Figura 37– MEV/ EDS - estéril de minério de Ferro – 0,150 mm



Fonte: Próprio autor.

Pode-se sugerir a presença dos seguintes minerais: talco devido à presença dos elementos Al, Si, Fe; calcita ou dolomita por apresentar Ca, C, O e magnesita ou dolomita Mg, O, Fe identificados pelas características morfológicas e a análise qualitativa dos gráficos apresentados e comparando com as imagens como o trabalho feito por Costa, 2013.

Nos gráficos da análise dos elementos químicos realizada pontualmente nas imagens registradas pelo MEV há picos de carbonos que são os primeiros, próximo ao eixo, que podem estar associados aos carbonatos como também considerado como contaminante das faixas que recobriram o material para a preparação da leitura no equipamento.

Analisando a morfologia das partículas supõem que as que apresentam o formato subarredondado são provenientes do quartzo, enquanto os formatos tabulares podem ser associados com óxidos de ferro hematita e os formatos laminares com os minerais: calcita, caulinita e magnesita.

6 CONCLUSÃO

Diante do cenário atual a exploração de minério de ferro continua crescente, porém para acessar a fração mais rica comercialmente é necessária a retirada cada vez maior da fração economicamente não viável: o estéril. Dessa forma, se faz necessário a avaliação do uso deste material. O ganho associado ao reaproveitamento atinge a todos, pois traz benefícios no que tange a segurança, a sustentabilidade e economia.

A análise granulométrica do estéril de mineração da região do Quadrilátero Ferrífero apresentou maior percentual 79,78% nas maiores faixas de 25 mm a 2,0 mm, dessa forma o tipo predominante nessa análise foi classificado como pedregulho. As demais frações de 1,8 mm a 0,150 mm foram classificadas como areia 11 % e 8,48 % como silte, essa classificação feita a partir da NBR 7225 (1983).

A análise química permitiu a identificação dos óxidos de cálcio e magnésio, elementos da composição principal que caracterizam itabiritos dolomíticos. Os teores médios de CaO 9,276% e de MgO 8,573%, permitem sugerir que os materiais de estudo estão na faixa avaliada para esse litotipo. Os demais óxidos de sílica e ferro já eram esperados devido os bandamento de quartzo e hematita que estão presentes na análise visual do material.

Morfologicamente na análise do MEV o estéril apresentou aspecto granular e isso pode ser atribuído ao não refinamento do material que foi avaliado da mesma forma após a separação do estéril agregado o minério na extração da cava. As formas subarredondadas sugeriram a presença do quartzo. As formas tabulares e laminares sugeriram as formações de hematitas e calcita, caulinitas e ou magnesita.

A análise no microscópio ótico de luz refletiva confirmou a presença de minerais já citados: quartzo e hematita e uma suposição da presença de carbonatos, pois para esse último o microscópio ótico usado deveria ser o de luz transmitida para identificação de óxidos transparentes.

Os estéreis dolomíticos com as frações granulares que compreendem as faixas de 40 mm a 8 mm poderão ser direcionadas para diferentes fins que trarão benefícios econômicos. Entre eles é possível citar o uso na construção civil como brita, na siderurgia para o uso como fundentes. Para as demais frações dos finos de 8mm até o passante da peneira de 0,150 o uso do estéril com a presença dos óxidos de cálcio e magnésio pode ser sugerido para: correção do solo e a pelotização, respeitando as especificações de cada processo.

Uma vez identificado o benefício econômico, as questões ambientais e de segurança também estão associadas. A diminuição do estéril estocado diminui a necessidade de solicitação de novas licenças para criação das novas pilhas e diminui também os riscos operacionais associados, reduzindo o monitoramento e aumentando a estabilidade das operações ao redor das movimentações realizadas nas minas.

Portanto, após a apresentação teórica complementada com as análises físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas realizadas, conclui-se que estéril da região do Quadrilátero Ferrífero apresenta rotas de reaproveitamento e é possível propor de aplicação com retorno econômico, ambiental e para fins de melhorar a segurança operacional.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para complementar o estudo apresentado, segue algumas sugestões para trabalhos futuros que podem usar a base de caracterização realizada nesse trabalho, para o uso do estéril oriundo da exploração de minério de ferro.

- Produzir corpos de prova com as frações que foram classificadas com brita 1 e 2, e submetê-los a teste mecânicos para avaliação do uso em concretos, conforme a NBR8953.
- Produzir corpos de provas com a fração de granulometria menor que 0,150 mm submetê-los a teste mecânicos e metalúrgicos para avaliação do uso em pelotas.
- Testar o uso do material para correção do solo, avaliando os benefícios que foram citados, como a correção da acidez e melhora na fertilidade do solo.
- Avaliar o uso das frações passante da peneira de 2,00mm que são classificadas como areia.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR6457. Amostras de solo – Preparações para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. 02.423, 1986.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR7211: Agregados para concretos - especificações. Rio de Janeiro, 1983.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR7225: Materiais de pedras e agregados naturais. Rio de Janeiro, 1993.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR8953: Concreto para fins industriais – classificação por grupos de resistência. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004:Classificação de Resíduos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b.

ANM. **Informe Mineral, 2018**. Disponível em:<<http://www.anm.gov.br/>>. Acesso em 20 de março, 2019.

ARAGÃO, G.A.S. **Classificação de pilha de estéril na mineração de ferro**. 2008. 133f. Tese (Mestrado)-Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

BASTOS, P.S.S. **Fundamentos do concreto armado**. Notas de aula. Estrutura de Concreto I – Universidade Estadual Paulista – UNESP. Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil. Bauru, 2006.

BRAGA, P. F. A.; FRANÇA, S. C. A.; SAMPAIO, J. A. **Tratamento de minérios**. Práticas laboratoriais. <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/>>.3-11, 2007.

BENEDUZZI, E.B. **Rochagem: agregação das rochas como alternativa sustentável para a fertilização e adubação dos solos**. 2011. 90f. Tese (Conclusão de Curso - Graduação) – Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre.

CARVALHO, M. G. A. **Estratégia ambiental pró-ativa: sequenciamento de lavra concomitantemente com a disposição de estéril dentro da mina**, 2009, 113 p, Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

COELHO, A.M. **Eficiência de calcário de diferentes granulometrias na correção da acidez do solo**. 2004. 4f. Comunicado Técnico. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, Sete Lagoas, 2004.

CPRM. Disponível em: <<http://sigep.cprm.gov.br/glossario/verbete/esteril.htm>>. Acesso em 24 de março, 2019.

COSTA, J.C.V. **Caracterização do itabirito dolomítico da mina de conceição, visando aproveitamento como matéria-prima na siderurgia.** 90f. Tese - Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

D'AVILA, L. de S. C. **Influência das Características do Itabirito Concentrado no Desempenho do Processo de Sinterização.** 92f. Tese - Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

DEPEC – Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos. **Minério de ferro.** Abril de 2017. Disponível em: <https://www.economiaemdia.com.br/EconomiaEmDia/pdf/infset_minerio_de_ferro.pdf>. Acesso em 09 de maio de 2017.

DNPM. Disponível em: <http://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/nrm_19.htm>. Acesso em 24 de março, 2019.

EMBRAPA, Agência Embrapa de Informação Tecnológica. **Origem da acidez.** Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/soja/arvore/CONTAG01_34_271020069132.html>. Acesso em 09 de maio de 2017.

EMBRAPA, Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Sistema de produção Embrapa. **Sistema de produção de amendoim.** Disponível em: <https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducaolf6_1galceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=3803&p_r_p_-996514994_topicoId=3450>. Acesso em 24 de abril de 2019.

FERREIRA, G.E.1, FONSECA JUNIOR, C.A.F. **Mercado de agregados no Brasil.** XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology, Goiânia - GO, 20 a 24 de Outubro 2013

FILHO, R. J, de S. **Minerais e agricultura.** Abril, 2016. Disponível em: <<http://www.rsafilho.com.br/wp-content/uploads/2010/06/Palestra-CREA-BA.pdf>> Acesso em: 28 de maio, 2017.

FARIAS, C. E.G. **Mineração e meio ambiente no Brasil.** Relatório Preparado para o CGEE, 2002. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_pnla/_arquivos/minera.pdf>. Acesso em: 20 de março de 2019.

FARIA, L.R. **Disposição de estéril em cava – um estudo de caso.** 2016. 103f. Dissertação (Pós graduação)-Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

FERNANDES, F.R.C LUZ, A.B. CASTILHOS, Z.C. **Rochas, minerais e rotas tecnológicas para produção de fertilizantes alternativos.** (Ed.). Agrominerais para o Brasil. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. p. 61-88.

FREIRE, W. **Considerações jurídicas sobre o estéril e o rejeito na mineração**, 2014. Disponível em: <<http://williamfreire.com.br/publicacoes/artigos/consideracoes-juridicas-sobre-o-esteril-e-o-rejeito-na-mineracao/?lang=pt-br>> Acesso em: 28 de maio, 2017.

GEOTEX. **Calcita: Propriedades Ópticas**. Disponível em: <https://www.geoxnet.com/_mineralestransparentes/calcita.php>. Acesso em 25 de maio, 2019.

GOMES, C.B. **Estudo da reutilização do rejeito de minério de ferro para produção de adoquim**. 2016. 72f. Monografia (Conclusão de Curso - Graduação) – Engenharia de Materiais, CEFET-MG, Belo Horizonte.

GONÇALVES, T.A.R. **Técnicas de microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura automatizada (QEMSCAN®) e análise de imagens aplicadas a diferentes tipologias de minério de ferro**. 2015. Tese de Mestrado (Pós Graduação Tecnologia Mineral). Escola de Engenharia Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

GUEDES, G. B.; FERNANDES, F. R. C. **A consolidação de um setor minero metalúrgico e primário exportador no Brasil, um dos cinco maiores produtores de recursos minerais do mundo**. 2016. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1934>>. Acesso em 09 de maio de 2017.

GUIMARÃES, R.; NEGRI, A. de; RODELLA, D.; WERDER, P. **Minicurso: mina de ferro, quanto vale**. Metodologia de Ensino de Química, Universidade de São Paulo, 2016.

IBRAM. **Informações e análises da economia mineral brasileira – 7º edição - ferro**. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br>>. Acesso em 09 fev, 2019.

IBRAM. **Gestão e manejo de rejeitos da mineração**. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br>>. Acesso em 09 fev, 2019.

IBRAM. **Relatório anual de atividade, julho de 2017 – junho de 2018**. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br>>. Acesso em 09 fev, 2019.

JUNIA, N.L.D.C.D. **Caracterização mineralógica, geoquímica e tecnológica das formações ferríferas carbonáticas do depósito de jangada, visando aproveitamento econômico, quadrilátero ferrífero, minas gerais**. 2017. 223f. Tese (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

JUNIA, N.L.D.C.D., FIGUEIREDO, S. R. C., BRANDÃO, P. R. G. **Caracterização tecnológica e mineralógica do itabiritos quartzo-dolomítico e dolomítico com baixo teor de ferro da mina de jangada e uso da separação magnética como método de concentração**. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ ISSN 0101-9759 e-ISSN 1982-3908 - Vol. 41 - 3 / 2018 p. 195-206.

LUZ, A.B.; LINS, F.A.F. **Introdução ao tratamento de minérios. Capítulo 1.** Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia Coordenação de Processos Minerai – COPM. Rio de Janeiro, 2010.

MACHADO, M.L.P. **Siderurgia – da matéria prima ao aço laminado.** Coordenadoria de Engenharia Metalúrgica–UFF/RJ, 2006.

MAGNESITA, luz refletida – nicois descruzados e cruzados. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=jEYQ3UJ4BKI>>. Acesso em 25 maio, 2019.

MARTINS, E.de S. **Uso de resíduos da mineração na agricultura.** Embrapa. Congresso Brasileiro de Mineração. Exposibram, 2017. Disponível em: <https://portaldaminleracao.com.br/wp-content/uploads/2018/05/cmb-2017-painel-2-eder-de-souza-martinsa.pdf>>. Acesso em: 24 de abril, 2019.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, Disponível em <http://www.redeaplmineral.org.br/pormin/noticias/minerais-e-rochas-descricao-aplicacao-e-ocorrencias/agregados_minerais_propiedades_aplicabilidade_ocorrencias.pdf>. Acesso em 15 de abril, 2017.

NEUMANN, R.; SCHNEIDER, C. L.; ALCOVER-NETO, A. **Caracterização tecnológica de minérios parte II.** Coordenação de Processos Minerai – CPOM. Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia. Rio de Janeiro, Ago de 2010.

NOTASGEO. **Remineralizando o solo com pó de rocha.** Disponível em: <<https://www.notasgeo.com.br/2018/05/remineralizando-o-solo-com-po-de-rocha.html>>. Acesso em: 24 de abril, 2019.

NORDESTERURAL. **Diferentes tipos de rocha brasileiras que podem ser usadas como adubo.** Disponível em: <<http://nordesterural.com.br/diferentes-tipos-de-rochas-brasileiras-que-podem-ser-usadas-como-adubo/#>>. Acesso em: 24 de abril, 2019.

OLIVEIRA, R.W.H. **Caracterização da escória de ferro silício-manganês para a aplicação como agregado em pavimentação ferroviária.** 2013. 239f. Mestrado. Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

OMACHI, G. Y. **Estudos para o aumento da vida útil das minas de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero.** 2015. 64f. Mestrado, Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

PÁDUA, E. J. P. **Rochagem como adubação complementar para culturas oleaginosas.** 2012. 92f. Mestrado-Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, Lavras.

PARIA, C.J.B. **Avaliação do efeito de escala no estudo da resistência ao cisalhamento de um estéril de minério de ferro.** 2015. 132f. Mestrado - Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

PIRES, F.R.M. (1979). **Structural geology and stratigraphy at the junction of the curral anticline and the moeda syncline, quadrilátero ferrífero, Minas Gerais, Brazil.** Michigan. 220p. (Ph.D. Dissertation, Michigan Technological University).

PULINO, A. M. **Índices de estimativa de custos de fechamento de pilhas de estéril e barragens de rejeitos.** 2010. 136f. Monografia - Pós graduação - Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

RODRIGUES, A. B. **Alternativa para disposição de rejeitos da mineração.** 2017. 38f. Monografia (Conclusão de Curso - Graduação). Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

ROCHA, A. C. P. **Avaliação do material estéril de formação ferrífera em mineração para disposição seletiva e reaproveitamento futuro.** 2015. 64f. Pós-graduação - Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

ROSIERE, A. C., CHEMALE F. Jr. **Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do quadrilátero ferrífero – uma visão geral e discussão.** Revista Geonômos. UFMG, Belo Horizonte, MG. vol. 8 (2), p. 27-43, 2000.

SAMPAIO, J. A. e ALMEIDA, S. L. M. (2005). **Calcário e dolomito.** Rochas e Minerais Industriais, n. 41, Rio de Janeiro, CETEM.

SILVA, J. P. S. **Impactos ambientais causados por mineração.** Revista Espaço da Sophia - nº 08 – novembro/2007 – mensal – ano I.

SILVA, G. P.; FONTES, M. P. F.; COSTA, L. M.; BARROS N.F; **Caracterização química, física e mineralógica de estéréis e rejeito da mineração de ferro da mina de alegria, Mariana-MG.** Pesquisa Agropecuária Tropical, 2006 p. 45-56.

SILVEROL, A. C.; MACHADO, L.F. **Aproveitamento da fração fina de britagem para fertilização de solos através da técnica de rochagem.** 2005. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo / Departamento de Ecologia e Recursos Naturais da Universidade Federal do Espírito Santo. Espírito Santo e São Paulo.

SPIER, C. A. **Geoquímica e gênese das formações ferríferas bandadas e do minério de ferro da Mina de Águas Claras, Quadrilátero Ferrífero, MG.** 2005. 323f. Tese Doutorado - Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H. **Rochagem: uma questão de soberania nacional.** Congresso Brasileiro de Geoquímica. III Simpósio de Geoquímica dos Países do Mercosul – Outubro/2011. Gramado, Rio Grande do Sul.

VALE. **Minério de ferro e pelotas.** Disponível em <<http://www.vale.com/brasil/PT/business/mining/iron-ore-pellets/Paginas/default.aspx>>. Acesso em 15 abr. 2017.

VALE. DRUMOND. N. **Itabiritos dolomíticos e dolomitas ferruginosas mina de Capão Xavier**. Relatório Pré-projeto. Gerência de Planejamento de Curto Prazo Paraopeba. “Conteúdo disponível em meio eletrônico particular da empresa”. Dez, 2014.

VALE. DRUMOND. N. **Caracterização das formações ferríferas dolomíticas da Mina Jangada, visando aproveitamento econômico**. II Seminário de Tecnologia de Planejamento e Desenvolvimento de Minas Sul. “Conteúdo disponível em meio eletrônico particular da empresa”. Dez, 2014.

VALVERDE, F.M. **Agregados para construção civil**. Balanço Mineral Brasileiro 2001. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes-economia-mineral/arquivos/agregados-para-contrucao-civil.pdf>>. Acesso em 15 de abril, 2001,

ZAGOTO, J. T. **Estudo do rejeito de lavra de rochas ornamentais do Espírito Santo para produção de brita**. 2016. 63f. Dissertação (Mestrado), Tecnologia Mineral, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul.