

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

ADRIANO DE OLIVEIRA VIGLIONI

CARACTERIZAÇÃO E REAPROVEITAMENTO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO  
PELLET FEED

BELO HORIZONTE  
2018

ADRIANO DE OLIVEIRA VIGLIONI

CARACTERIZAÇÃO E REAPROVEITAMENTO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO  
PELLET FEED

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 obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Dr. Marcello Dumont

BELO HORIZONTE  
2018

ADRIANO DE OLIVEIRA VIGLIONI

CARACTERIZAÇÃO E REAPROVEITAMENTO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO  
PELLET FEED

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 obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em  
**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Marcello Dumont– Orientador

---

Prof.Dr. Paulo Renato Perdigão Paiva

---

Prof. Dr. Cláudio Turani Vaz

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por guiar os meus passos e me dar força para finalizar essa etapa em minha vida.

Aos meus pais, Renê e Rosimeire, e ao meu irmão, Luiz Felipe, para os quais não tenho palavras para agradecer por todo amor, apoio incondicional e confiança ao longo dessa caminhada.

Ao meu orientador, professor e exemplo profissional Dr. Marcello Dumont por toda dedicação, apoio e compreensão com minhas dificuldades e limitações.

Ao professor Dr. Paulo Renato Perdigão Paiva, pelo apoio nos ensaios de peneiramento e de difração de raio-X.

A todos os professores que participaram na minha formação no curso de Engenharia de Materiais.

Aos todos os funcionários do CEFET-MG, pelo profissionalismo e dedicação em suas funções.

Ao todos os amigos do CEFET-MG, pela amizade, ajuda e apoio ao longo de todos esses anos de graduação.

A todos meus familiares que acreditaram na minha capacidade e me apoiaram a finalizar esse ciclo.

A todos que de certa forma contribuíram para que esse trabalho pudesse ser realizado.

## RESUMO

A mineração de ferro é uma das principais atividades econômicas do Brasil, sendo um setor responsável por geração empregos, riquezas, desenvolvimento tecnológico e, ao mesmo tempo, de um grande volume de resíduos. O aumento desse volume tem impulsionado diversos estudos relacionados ao reaproveitamento e aplicação desse rejeito nos diversos setores. Visando a redução dos impactos ambientais, dos custos operacionais e estimulando o desenvolvimento de novos negócios o reaproveitamento de rejeitos oriundos da extração mineral de ferro tem desempenhado um papel fundamental na formação de novos produtos principalmente para indústria cerâmica e da construção civil. Diante disso, o presente trabalho visa estudar a viabilidade técnica do reaproveitamento do rejeito de minério de ferro *pellet feed* nas diversas indústrias, por meio da caracterização de suas propriedades físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas. O rejeito é proveniente do processo de beneficiamento desse minério de uma planta localizada no município de Conceição do Mato Dentro, em Minas Gerais. O rejeito apresentou uma granulometria fina, equivalente ao filler, com 41,35% das partículas menores que 75  $\mu\text{m}$ . Ele é composto basicamente por quartzo –  $\text{SiO}_2$  e hematita -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , em maiores proporções, e caulinita –  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  em menor proporção. The presence of quartz was higher in the larger fractions of the tailings, while the hematite had a greater interaction in the finer grain size. A caulinita acompanhou a tendência da hematita por estar associada estruturalmente ao óxido de ferro. O método de segregação do rejeito, de acordo com sua granulometria e composição, foi fundamental para traçar as melhores rotas para o seu reaproveitamento. Concluiu-se, portanto, que o rejeito aparenta ter um grande potencial de uso como alternativa ambientalmente viável em aplicações principalmente para a indústria cerâmica e de construção civil.

### **PALAVRAS-CHAVES:**

Reaproveitamento, rejeito, minério de ferro, pellet feed.

## ABSTRACT

Iron mining is one of the main economic activities in Brazil, being a sector responsible for generating jobs, wealth, technological development and, at the same time, a large volume of tailings. The volume increase has driven several studies related to the reuse and application of tailings in the various sectors. With a view to reducing environmental impacts, operating costs and stimulating the development of new businesses, the reuse of tailings from iron ore extraction has played a key role in the formation of new products mainly for the ceramics and construction industry. Therefore, the present work aims to study the technical viability of the reuse of iron ore pellet feed tailings in the various industries, through the characterization of its physical, chemical, mineralogical and morphological properties. The material comes from the ore beneficiation process of a plant located in the municipality of Conceição do Mato Dentro, in Minas Gerais. The tailings had a fine granulometry, equivalent to the filler, with 41.35% of the particles smaller than 75  $\mu\text{m}$ . It is composed mainly of quartz -  $\text{SiO}_2$  and hematite -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , in greater proportions, and kaolinite -  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  to a lesser extent. The quartz intensity was higher in the larger fractions of the tailings, while the hematite had a higher concentration in the finer granulometry. Kaolinite followed the tendency of hematite to be structurally associated with iron oxide. The method of segregation of the tailings, according to its granulometry and composition, was fundamental to outline the best routes for its reuse. It was concluded, therefore, that the waste appears to have a great potential of use as an environmentally viable alternative in applications mainly for the ceramics and civil construction industry.

### KEYWORDS:

Reuse, tailings, iron ore, pellet feed.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção Mineral Brasileira (em US\$) .....	18
Figura 2 – Companhias Mineradoras no Brasil .....	18
Figura 3 - Número de empregos gerados pela mineração e previsão até 2030 .....	19
Figura 4 – Fluxograma do processo de beneficiamento de minério de ferro .....	25
Figura5 – Amostra de rejeito do beneficiamento de minério de ferropellet feed .....	36
Figura6 – Curva granulométrica obtida pelo método de granulometria a laser .....	40
Figura7 – Difratoograma das amostras de rejeito R2. ....	44
Figura 8 – Difratoograma das amostras de rejeito R3. ....	45
Figura 9 – Difratoograma das amostras de rejeito R4. ....	45
Figura 10 – Difratoograma das amostras de rejeito R5. ....	46
Figura 11 – Difratoograma das amostras de rejeito R6. ....	46
Figura 12 –MEV da fração 300 µm do peneiramento a seco .....	49
Figura 13 –MEV da fração 212 µm do peneiramento a seco .....	49
Figura 14 –MEV da fração 150 µm do peneiramento a seco .....	50
Figura 15 –MEV da fração 75 µm do peneiramento a seco .....	50
Figura 16 –MEV da fração menor que 75 µm do peneiramento a seco .....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais volumes de bens minerais do Brasil .....	19
Tabela 2 - Propriedades gerais dos óxidos de ferro.....	21
Tabela 3 – Reservas e produção mundial .....	22
Tabela 4 – Exportações brasileiras (Participação do minério de ferro %) .....	22
Tabela 5 - Propriedades dos principais minerais que contêm ferro.....	26
Tabela 6 – Contribuição média de cada minério na geração de resíduos.....	27
Tabela 7 - Classificação granulométrica das partículas de rejeito de minério de ferro.....	31
Figura 3 – Amostra de rejeito do beneficiamento de minério de ferro <i>pellet feed</i> .....	36
Tabela 8 – Composição granulométrica obtida pelo método de peneiramento a seco.....	39
Tabela 9 – Frações de pedregulho, areia grossa, areia fina e silte-argila no rejeito .....	39
Tabela 10 – Análise comparativa dos óxidos presentes no rejeito na amostra original e na amostra após peneiramento a seco (%).....	42
Tabela 11 – Composição mineral em percentual de peso das amostras de rejeito R2, R3, R4, R5 e R6. ....	43

## **LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
DEMAT	Departamento de Engenharia de Materiais
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	Difratômetro de RaiosX
FRX	Fluorescência de RaiosX
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR	Norma Brasileira Registrada
PIB	Produto Interno Bruto
PMB	Produção Mineral Brasileira
PNM	Plano Nacional de Mineração
PNUD	Programa de Desenvolvimento das Nações Unidas
SGM	Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

## LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
cm	Centímetro
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hematita
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Magnetita
FeOOH	Goethita
Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	Caulinita
SiO <sub>2</sub>	Quartzo
g	Gramma
K	Kelvin
keV	Kiloeletron-volts
kV	KiloVolt
mA	Miliampere
mm	Milímetro
nm	Nanómetro
μA	Microampere
μm	Micrômetro
T <sub>C</sub>	Temperatura de Curie
T <sub>M</sub>	Temperatura de Morin

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	OBJETIVOS.....	14
2.1	Objetivo Geral .....	14
2.2	Objetivos Específicos .....	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	15
3.1	Considerações gerais sobre os resíduos e rejeitos .....	15
3.2	A Mineração no Brasil.....	17
3.3	Minério de Ferro.....	20
3.3.1	Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) .....	22
3.3.2	Goethita ( $\text{FeOOH}$ ).....	23
3.3.3	Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).....	23
3.4	Beneficiamento do minério de ferro e a geração de rejeitos .....	24
3.4.1	Britagem e Moagem .....	28
3.4.2	Peneiramento e Classificação .....	28
3.4.3	Concentração .....	29
3.4.4	Espessamento e Filtragem .....	29
3.4.5	Concentrado.....	30
3.5	Características dos rejeitos de mineração de ferro .....	30
3.6	Importância da utilização de rejeitos provenientes da mineração de ferro.....	32
4	METODOLOGIA.....	36
4.1	Materiais .....	36
4.2	Métodos .....	37
4.2.1	Análise Granulométrica.....	37
4.2.2	Análise de propriedades químicas e mineralógicas .....	37
4.2.3	Análise Morfológica .....	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39

5.1	Análise da composição granulométrica do rejeito.....	39
5.2	Análise da composição química e mineralógica do rejeito .....	42
5.3	Análise morfológica do rejeito .....	49
6	CONCLUSÕES .....	52
7	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	54
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	55

## 1 INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos nas últimas décadas e a crescente demanda por minerais diversos pela sociedade moderna culminaram em um aumento da atividade mineradora pelo mundo. A mineração exerce um papel importante no desenvolvimento econômico, social e tecnológico de um país, proporcionando uma melhoria na qualidade de vida da população mundial, geração de riquezas, formação de milhares de postos de trabalho, investimentos em pesquisa, dentre vários outros fatores. Apesar dos benefícios ofertados, essa indústria assim como as demais, pode gerar impactos ambientais devido ao grande consumo de recursos minerais e da geração de efluentes e resíduos no meio ambiente (GUERRA, 2014).

A mineração de ferro, que se enquadra como uma das mais relevantes em todo mundo e contribui diretamente com esse aspecto ambiental. Isso ocorre devido a geração de um grande percentual de rejeitos provenientes do beneficiamento desse minério, que muitas vezes são dispostos diretamente sobre a superfície de terrenos ou reservatórios, como as barragens de rejeito (BOSCOV, 2008).

Diante dessa grande demanda por minério de ferro, algumas rochas com teores de ferro anteriormente indesejáveis passaram a ter sua extração viável, o que contribuiu para o crescimento na geração desses rejeitos (ANDRADE, 2014).

O Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012) avaliou a produção rejeitos de minério ferro para o período de 2010-2030, concluindo que ele representa 41% quando comparado com os rejeitos de outros bens minerais, como ouro, fosfato, titânio, entre outros (IPEA, 2011). O Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) aponta que o volume produzido de rejeitos varia de acordo com a eficiência do processo de beneficiamento empregado e com o tipo e teor do minério que é extraído (IBRAM, 2016).

Diante desse cenário, o setor enfrenta constantemente o desafio de atingir a sustentabilidade de suas atividades. As ideias que circundam esse aspecto têm levado várias companhias a investir em desenvolvimento e pesquisas afim de encontrar meios econômicos e sustentáveis de reutilizar os rejeitos gerados pela atividade de mineração (PEIXOTO et al., 2010).

Dessa forma, o reaproveitamento desses materiais além de contribuir para a redução dos impactos ambientais gerados pela indústria de mineração, apresenta-se de extrema importância econômica para as empresas, ao proporcionar um estímulo a novos negócios. Constitui-se assim como uma vantagem de se gerar novos produtos de aplicação direta principalmente nas indústrias cerâmicas, siderúrgicas e de construção civil (ANDRADE, 2014).

Nesse sentido, o presente trabalho visa caracterizar e avaliar as características e propriedades do rejeito proveniente do processo de beneficiamento do minério de ferro *pellet feed* (fino do minério com granulometria menor que 0,15 mm) e seu reaproveitamento nas diversas indústrias, por meio da caracterização de suas propriedades físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral desse trabalho é caracterizar e avaliar as características e propriedades do rejeito proveniente do processo de beneficiamento do minério de ferro *pellet feed* como aditivos/matéria-prima nos diversos setores da economia visando diminuir a disposição desses resíduos no meio ambiente.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Esse trabalho tem como objetivos específicos:

- Caracterizar o rejeito a partir de ensaios físicos, químicos, mineralógicos e morfológicos;
- Avaliar as características e propriedades do rejeito;
- Propor rotas para o seu reaproveitamento e aplicação;

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Considerações gerais sobre os resíduos e rejeitos

De acordo com Aguiar e Novaes (2002) o crescimento das atividades industriais nos últimos anos favoreceu a proliferação da poluição, impactando na qualidade de vida das pessoas e principalmente no meio ambiente. A poluição é definida como qualquer alteração seja ela química, física ou biológica que afete o ciclo biológico natural.

A mineração é uma atividade que consiste na exploração de recurso natural, o que causa impactos ambientais tanto na área minerada como também nas áreas vizinhas. Ela promove destruição direta do solo com a retirada da cobertura vegetal e altera a qualidade da água com a disposição de rejeitos e assoreamento dos cursos d'água (TONIETTO e SILVA, 2011).

Nesta atividade são gerados resíduos sólidos em todo seu processo produtivo desde a extração, passando pelo manuseio, o acondicionamento, a coleta, o transporte e a disposição final, além do sistema de tratamento das águas residuais e emissões atmosféricas (OLIVEIRA; LANGE, 2005).

Destaca-se a existência dos resíduos sólidos provenientes do processo de extração (estéril) e do beneficiamento ou tratamento (rejeitos). De modo geral eles podem ser pilhas de minérios pobres, rochas, estéreis, solos, as polpas de decantação de efluentes, sedimentos e finos e ultrafinos que não foram aproveitados no processo de beneficiamento. Além desses, há outros resíduos resultantes da operação de mineração que são, em geral, os efluentes das estações de tratamento, as baterias de veículos e maquinários, os pneus, fora os resíduos de óleo e as sucatas e em geral (IBRAM, 2016).

Segundo o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA), os estéreis são os materiais (solo, subsolo, rocha) que ocorrem naturalmente no processo de extração do minério, não sendo aproveitáveis economicamente e dispostos em pilhas. Já o chamado rejeito da mineração é o material oriundo do processo beneficiamento do minério de ferro, do qual já foi retirada a parte economicamente importante. Pode-se encontrar esse rejeito na forma de fragmentos ou partículas secas, ou em meio úmido, sendo isto determinado pelo tipo de beneficiamento do minério que é empregado (IBAMA, 1990).

Derivado do latim, o termo “resíduo” significa resto, representando as perdas de insumos e matérias primas e podendo indicar ineficiência do processo produtivo (JACOMINO *et al*, 2002).

Dito isso, é importante diferenciar Resíduo de Rejeitos. Conforme a Lei 12.305 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos em 2010, Resíduo é definido como (MME, 2010):

Material, substância, objeto ou bem descartado, resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

E Rejeito é descrito como:

Resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da NBR 10004 - CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS, caracterizam-se os resíduos sólidos em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas. Dessa forma, classifica-os quanto aos seus potenciais riscos à saúde pública e ao meio ambiente em (ABNT NBR 10004, 2004a):

- Resíduos Classe I – Perigosos;
- Resíduos Classe II – Não Perigosos, sendo este subdivido em:
  - Classe II A – Não Inertes;
  - Classe II B – Inertes.

A classificação de resíduos sólidos compreende a especificação da atividade ou processo que lhes deu origem, dos constituintes presentes e suas características, além da comparação destes com listagens de substâncias e resíduos cujo impacto ao meio ambiente e à saúde já são conhecidos (ABNT NBR 10004, 2004a).

Ainda segundo a NBR 10004 (2004a), os resíduos sólidos terrosos oriundos da atividade mineralógica, objeto desse estudo, são classificados como inertes e definidos como:

Todo aquele resíduo quando amostrado de forma representativa e submetido a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada à temperatura ambiente, não tiver seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água.

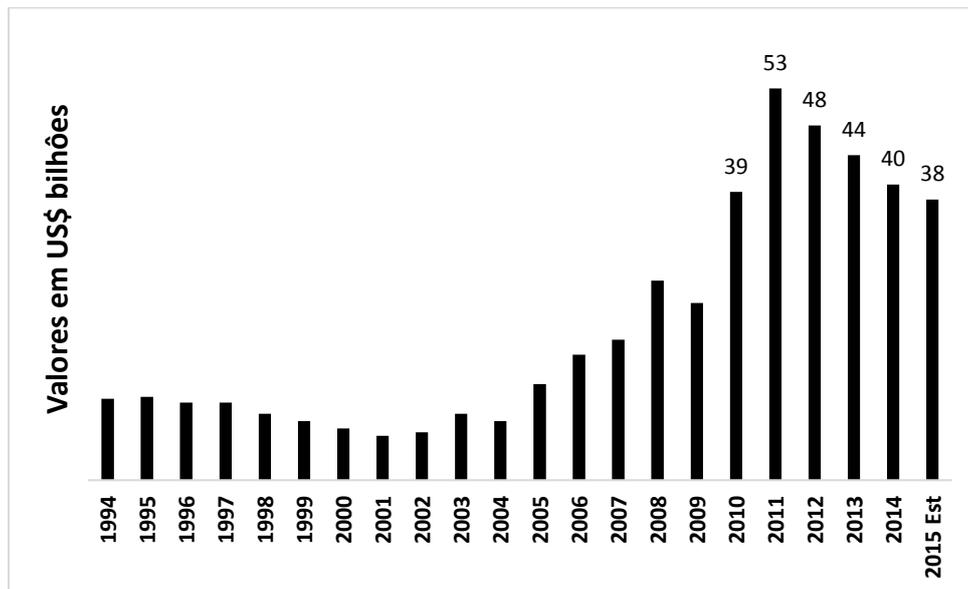
É importante destacar que há uma diferença conceitual entre reaproveitamento ou reutilização e reciclagem de resíduos para diversos tipos de materiais. Reciclagem é uma união de técnicas utilizadas na transformação de materiais, cuja objetivo é o aproveitamento de rejeitos e detritos de modo a reintroduzi-los no ciclo de produção, podendo retornar ao seu estado de origem ou transformar em produtos iguais com todas suas características iniciais (MENEZES; NEVES; FERREIRA, 2002).

Já o Reaproveitamento consiste na reutilização de um material que já foi beneficiado anteriormente para geração de novos produtos com propriedades físico-químicas e características diferentes do material original, em virtude da degradação destas a cada processo (MANSOR et al, 2010).

O reaproveitamento de rejeitos representa uma alternativa para o desenvolvimento sustentável, visto que a geração de resíduos é inevitável. Do ponto de vista ambiental e econômico essa atividade contribui com a preservação de recursos naturais, com a redução nos gastos em energia e dos controles ambientais, com o aumento da durabilidade dos materiais, além de gerar empregos e renda no âmbito social. Este tema é visto como um mercado altamente rentável por vários países e de extrema importância, sendo que em alguns deles vários resíduos não podem ser gerados durante um processo produtivo, caso os mesmos não possam ser recuperados posteriormente (MENEZES; NEVES; FERREIRA, 2002).

### **3.2 A Mineração no Brasil**

Com um território de extensão continental e com grande diversidade geológica favorável a existência de jazidas minerais, o Brasil ocupa uma posição de destaque global no setor tanto por suas reservas quanto pela produção mineral. A Produção Mineral Brasileira (PMB) é calculada em dólares americanos, considerando a produção interna bem como a parcela exportada. A evolução dessa produção evidencia o quanto o país já progrediu no crescimento e na diversificação de seu portfolio de exploração mineral, como constatado na Figura 1. (IBRAM, 2016)

**Figura 1 - Produção Mineral Brasileira (em US\$)**

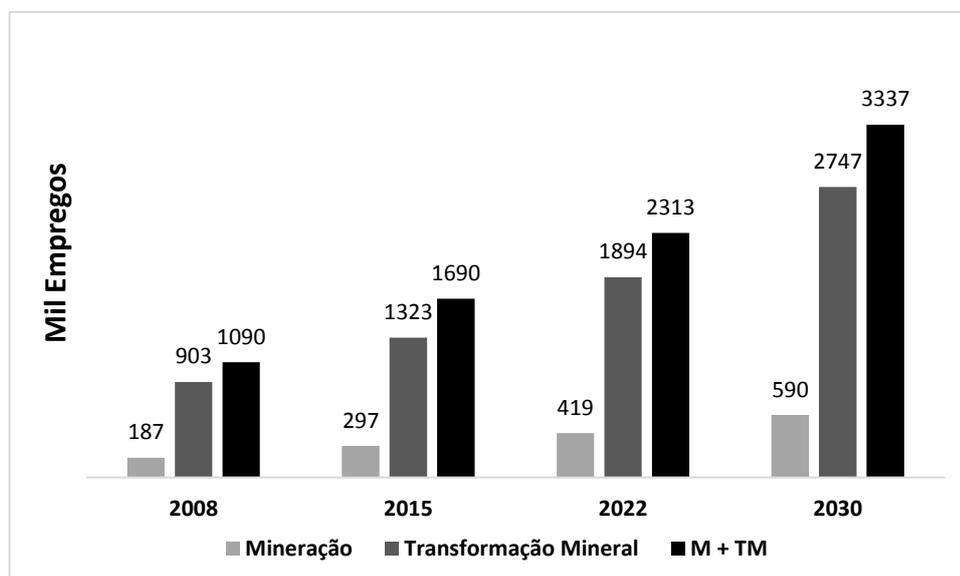
Fonte: IBRAM, 2016.

Segundo dados do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) em 2017, o número de mineradoras no país é de aproximadamente 8.870, formada predominantemente por micro e pequenas empresas e distribuídas nas diversas regiões do Brasil, conforme mostrado na Figura 2 (DNPM, 2017).

**Figura 2 – Companhias Mineradoras no Brasil**

Fonte: DNPM, 2017, elaboração IBRAM

De acordo com Plano Nacional de Mineração (PNM) 2030, do Ministério de Minas e Energia (MME), o setor é responsável pela geração de cerca um milhão de empregos diretos (Figuras 3) (MME, 2010).

**Figura 3 - Número de empregos gerados pela mineração e previsão até 2030**

Fonte: MME, 2010.

O Brasil é um papel importante no conceito global produzindo mais de 90 bens minerais em escala industrial. Exemplos desses bens são mostrados na Tabela 1. No cenário mundial, o país destaca-se como o principal produtor de nióbio, com 93,7% de participação no mercado desse metal. O país ocupa a segunda posição global na produção de magnesita com 14,5% e um dos maiores produtores de minério de ferro juntamente com a Austrália e China, (DNPM, 2017).

**Tabela 1 - Principais volumes de bens minerais do Brasil**

Bens Minerais	Valores em toneladas
Agregados Construção Civil	673.000.000
Minério de Ferro	400.000.000
Bauxita	32.000.000
Alumínio Primário	962.000
Fosfato	6.800.000
Potássio Concentrado	460.000
Zinco Concentrado	250.000
Cobre	219.000
Liga de Nióbio	80.000
Níquel Contido	80.000
Ouro	80

Fonte: DNPM, 2017

A indústria extrativa é um dos pilares de sustentação da economia do Brasil. Em 2013, o setor apresentou um superávit de US\$ 27,4 bilhões, representando 4% do PIB brasileiro (DNPM, 2015). Além disso, é um dos setores que mais realiza investimentos no país. No período entre 2014 a 2018, o montante investido foi de US\$ 53,6 bilhões, dos quais 41,8% foram destinados ao estado de Minas Gerais e 21,93% ao Pará, principais estados produtores. Esses investimentos refletem de forma positiva na qualidade de vida da população das cidades mineradoras, proporcionando um Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) maior que o dos respectivos estados, segundo estudo do Programa de Desenvolvimento das Nações Unidas (PNUD) (IBRAM, 2015).

### **3.3 Minério de Ferro**

O Minério de Ferro é uma rocha, mineral ou agregado de mineral, de origem natural ou processada, a partir da qual o Ferro pode ser obtido. Os principais óxidos de ferro e os mais relevantes para a mineração são a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e a goethita ( $\text{FeOOH}$ ). As formações ferríferas chamadas itabiritos e formadas por hematita e sílica constituem os maiores depósitos de minério de ferro do Brasil (QUARESMA, 2001).

O ferro pertence ao grupo dos elementos de transição na Tabela Periódica, com número atômico igual a 26, massa atômica de  $55,85 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$  e com uma temperatura de fusão de cerca de  $1528 \text{ }^\circ\text{C}$ . A ocorrência de ferro nativo na natureza é raro, podendo ser encontrados apenas em meteoritos, basaltos da ilha de Disko, a oeste da Groenlândia e sedimentos carbonáceos do Missouri, EUA. Em geral, ele está associado ao dióxido de carbono, oxigênio, enxofre ou silício formando carbonatos, óxidos, sulfetos e silicatos, respectivamente (DANA, 1976). Algumas das características típicas dos minérios de ferro são mostradas na Tabela 2 (CORNELL, SCHWERTMANN 1996).

**Tabela 2 - Propriedades típicas dos óxidos de ferro**

	<b>Goethita</b>	<b>Hematita</b>	<b>Magnetita</b>
<b>Sistema cristalino</b>	Ortorrômbico	Hexagonal (Romboedral)	Cúbico
<b>Dimensões da Célula (nm)</b>	a = 0,4608 b = 0,9956 c = 0,3021	a = 0,5034 b = 1,3752	a = 0,8396
<b>Peso específico (g/cm<sup>3</sup>)</b>	4,26	5,26	5,18
<b>Cor da partícula</b>	Marrom amarelado	Vermelha	Preta
<b>Magnetismo</b>	Antiferromagnética	Paramagnética (acima da T <sub>C</sub> ); fracamente ferromagnética (entre a T <sub>C</sub> e a T <sub>M</sub> ) ou antiferromagnética (abaixo da T <sub>M</sub> )	Ferrimagnética
<b>Forma típica da partícula</b>	Acicular (agulha)	Romboédrica; laminar; arredondada	Octaédrica
<b>Teor de Fe (%)</b>	62,9	69,9	72,4

Tc: Temperatura de Curie. Tc 956K. Tm: Temperatura de Morin. Tm 260K.

Fonte: Adapt. Cornell e Schwertmann (1996)

Segundo dados do DNPM (2015) as reservas mundiais desse minério totalizam 190 bilhões de toneladas, sendo que 11,9% são brasileiras. Minas Gerais (72,5%), Mato Grosso (13,1%) e Pará (10,7%) são os estados com as maiores reservas de minério de ferro do país. Em 2014 a produção brasileira atingiu 411,2 milhões de toneladas, a terceira maior produção mundial, com um aumento de 6,4% em relação ao ano anterior. Porém o valor da produção, R\$ 54,7 bilhões, reduziu 13,5% em relação ao mesmo período devido à queda do preço no mercado internacional do minério de ferro. Os principais estados produtores foram Minas Gerais, Pará e Mato Grosso do Sul com 68,4%, 29,2% e 1,2%, respectivamente. Dados de reserva e produção são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Reservas e produção mundial

Discriminação	Reservas (10 <sup>6</sup> t)		Produção (1 <sup>3</sup> t)		%
	Países	2014	2013	2014	
Brasil		22.565	386.270	411.783	12,8
China		23.000	1.450.000	1.500.000	46,6
Índia		53.000	609.000	660.000	20,5
Rússia		8.100	150.000	150.000	4,7
Ucrânia		25.000	105.000	105.000	3,3
Outros países		6.500	82.000	82.000	2,5
<b>TOTAL</b>		<b>190.000</b>	<b>327.730</b>	<b>311.217</b>	<b>100,0</b>

Fonte: DNPM

Dados consolidados pela Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (SGM) do Ministério de Minas e Energia apontaram que as exportações do setor mineral representaram 20,3% do total das exportações brasileira em 2014, conforme mostrado na Tabela 4. As exportações de minério de ferro, principal item dessa pauta, corresponderam a 56,6% do total da mineração e 11,5 % das exportações brasileiras nesse ano.

Tabela 4 – Exportações brasileiras (Participação do minério de ferro %)

	2010	2011	2012	2013	2014	2015*
<b>Indústria Extrativa</b>	47.874,08	66.674,00	54.491,81	48.901,33	45.633,86	24.997,57
<b>Minério de Ferro</b>	28.911,88	41.817,25	30.989,29	32.491,53	25.819,09	11.900,41
<b>Exportações Totais</b>	<b>201.915,29</b>	<b>256.039,57</b>	<b>242.578,01</b>	<b>242.033,57</b>	<b>225.100,88</b>	<b>160.544,73</b>

\* Jan-Out/15. Fonte: MDIC

### 3.3.1 Hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

O termo hematita vem do grego *haima* que significa sangue. É um óxido de ferro com coloração avermelhada sendo o principal mineral das jazidas de minério de ferro da Austrália e Brasil. Pode apresentar um sistema cristalino hexagonal, com parâmetros a=0,5034 nm e c=1,3752 nm com seis fórmulas mínimas por célula unitária ou sistema romboédrico, com cuja

célula unitária apresenta  $a_{rh}=054,27$  nm e  $\alpha=55,3^\circ$  com duas fórmulas mínimas (CORNELL, SCHWERTMANN, 1996).

Segundo Cornell e Schwertmann (1996) a estrutura cristalina desse óxido é formada por planos de átomos de oxigênio empacotadas hexagonalmente do tipo ABABAB ao longo do eixo cristalográfico z. Cada Fe está rodeado por seis átomos de oxigênio, que por sua vez está associado com quatro íons de  $Fe^{3+}$ . Essa estrutura tripla composta por Fe-O<sub>3</sub>-Fe influencia diretamente nas propriedades magnéticas desse material, que são fracamente ferromagnéticas em temperatura ambiente.

A morfologia da hematita varia da forma laminar e arredondada, quando ligadas a melhores condições de cristalização, a forma isodimensional (romboédrica), menos favorável a cristalização (FONTES et al., 2001).

### **3.3.2 Goethita (FeOOH)**

Goethita, homenagem ao poeta alemão J.W von Goethe, é um oxihidróxido de ferro de cor marrom amarelada. Apresenta célula unitária ortorrômbica de parâmetros  $a = 0,4608$  nm e  $b = 0,9956$  nm e  $c = 0,3021$  nm com quatro fórmulas mínimas. Sua estrutura é composta de ânions de  $O^{2-}$  e OH empacotados ao longo do eixo x e ligados a íons  $Fe^{3+}$ , que ocupa metade do sítio octaédrico. Esses íons estão em arranjos duplos no eixo z separados por sítios octaédricos vazios, que se alternam com os espaços ocupados formando uma simetria ortorrômbica (CORNELL, SCHWERTMANN, 1996).

A estrutura desse mineral é formada por uma alternância entre camadas duplas de octaedro de ferro e locais vazios, o que lhe garante um antiferromagnetismo (NETTO, 2001). Cornell e Schwertmann (1996) afirma que os cristais de goethita são acirculares e alongados ao longo do eixo z, tanto para amostras naturais e sintéticas.

### **3.3.3 Magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)**

A magnetita é um óxido ferro com cor da partícula preta e ferromagnética. Formada por célula unitária cúbica, de parâmetros  $a = 0,839$  nm, possui oito fórmulas mínimas e uma estrutura de espinélio invertido. Essa estrutura é composta de camadas octaédricas e

tetraédricas/octaédricas ao longo das direções x,y,z. Ela difere das demais por apresentar ferro bivalente  $Fe^{2+}$  e trivalente  $Fe^{3+}$ , sendo oito íons  $Fe^{3+}$  nos sítios tetraédricos e oito  $Fe^{3+}$  e oito  $Fe^{2+}$  nos sítios octaédricos (CORNELL, SCHWERTMANN, 1996).

### **3.4 Beneficiamento do minério de ferro e a geração de rejeitos**

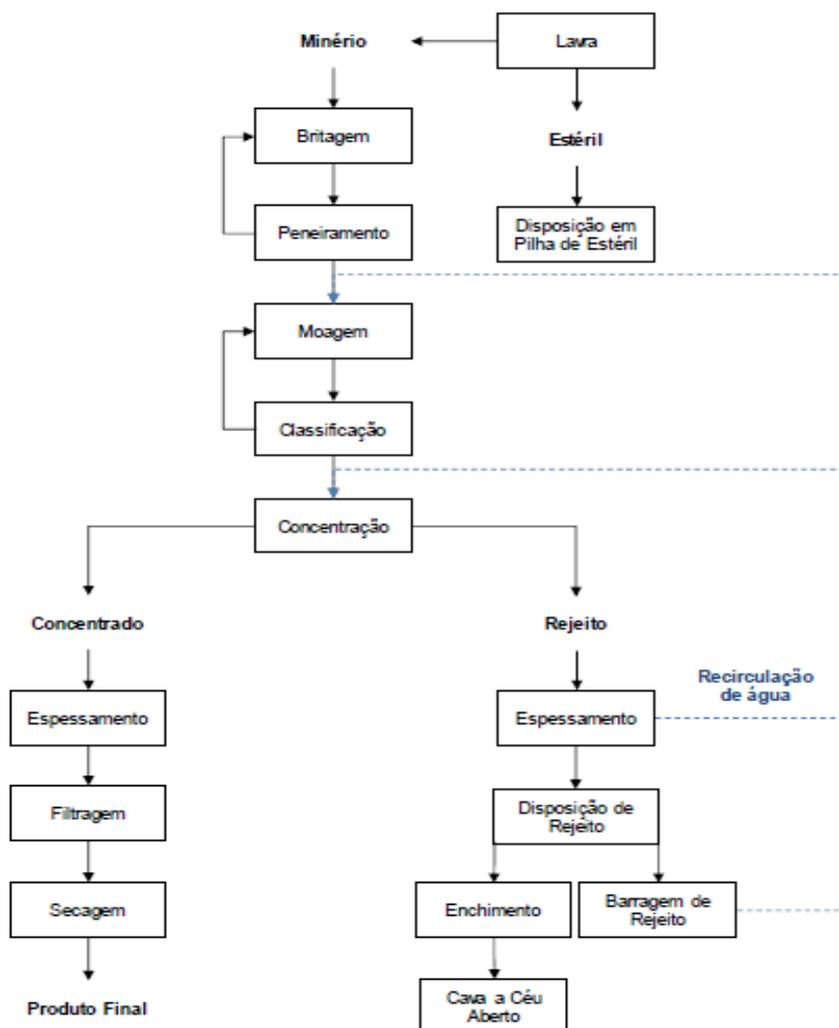
De acordo com DNPM, através das Normas Reguladoras de Mineração (NRM), pela NRM 18 – BENEFICIAMENTO, o beneficiamento é definido como um processo que visa preparar granulometricamente, concentrar ou purificar minérios por métodos físicos ou químicos sem alteração da constituição química dos minerais (DNPM, 2017).

Diante do valor unitário da tonelada do minério de ferro, para que o processo de beneficiamento seja economicamente viável, suas operações devem ser realizadas em grande escala (ordem de milhões de toneladas/ano), o que demanda equipamento de grande porte com elevada capacidade unitária. Apesar de simples, é fundamental que todas as etapas do processo sejam dimensionadas e controladas corretamente, de forma a minimizar seus custos e assegurando a qualidade final do produto beneficiado (GOMES, 2009).

Segundo Lins (2004) o processo de beneficiamento do minério de ferro consiste basicamente das seguintes operações, retratadas na Figura 4:

- ❖ Britagem e moagem
- ❖ Peneiramento e Classificação
- ❖ Concentração
- ❖ Espessamento e Filtragem
- ❖ Disposição de rejeito

**Figura 4 – Fluxograma do processo de beneficiamento de minério de ferro**



Fonte: Lins, 2004

A primeira etapa do fluxo representa a operação de lavra, ou seja, o decapeamento e desmonte das rochas por meio de explosivos. Ela termina com a transportaçã do minério bruto para a usina de beneficiamento e do estéril para a pilha de estéril (SILVA, 2010).

A sequência apresentada pode ser alterada segundo alguns fatores como o teor de minério de ferro da jazida explorada e as características mineralógicas, tal como o tipo do concentrado a ser produzido (PEREIRA, 2005; SILVA, 2010).

O minério bruto é beneficiado e gera um concentrado e um rejeito, como também verificado na Figura 4. O ideal seria que todos os minerais presentes no produto lavrado fossem aproveitados economicamente, mas não é isso que acontece. Seja porque ainda não há

tecnologia economicamente viável ou pelo fato de os processos de beneficiamento utilizados serem ineficientes. O fato é que a baixa recuperação nesse processo gera significativas perdas financeiras, além de contribuir para o aumento do volume de rejeitos depositados no meio ambiente (WOLFF, 2009).

Segundo Figueiredo (2007) a forma de disposição do rejeito está associada as suas propriedades geotécnicas, ou seja, ao tipo do minério e aos processos de beneficiamento empregados. Sua disposição pode ser feita a céu aberto, subterrânea e até de forma subaquática, apesar dessa última não ser muito utilizada devido a problemas ambientais. Dependendo da sua disposição, o teor de sólidos no rejeito pode variar, mas não provoca alterações nas características mineralógicas e nem físico-químicas do rejeito.

De maneira esquemática, Guimaraes (2011) apresenta as disposições mais utilizadas para cada tipo de rejeito, assim como sua geração nas etapas de classificação e concentração do minério de ferro como demonstrado na Tabela 5.

**Tabela 5 - Propriedades dos principais minerais que contêm ferro**

<b>Fração</b>	<b>Método de concentração</b>	<b>Produto</b>	<b>Rejeito</b>	<b>Destinação do rejeito</b>
(6,3 <ø< 31,5) mm	-	Granulado	-	-
(1<ø< 6,3)mm	Jigagem	-	Rejeito de jigagem	Pilhas de rejeitos ou moagem e incorporação ao circuito
(0,15 <ø<1)mm	Concentração magnética ou espirais	-	Produto não magnético ou rejeito de espirais	Pilhas de rejeito ou barragens
(ø<0,15)mm	Concentração magnética e/ou flotação	Pellet feed	Produto não magnético e/ou rejeito de flotação	Barragens
(ø< 0,010)mm	-	-	Lamas	Barragens

Fonte: Adap. Guimarães (2011)

Estudos realizados pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) apontam que a produção rejeitos de minério ferro para o período de 2010-2030 é de 41% quando comparado com os rejeitos de outros bens minerais, como observado na Tabela 6.

O volume produzido de rejeitos varia de acordo com a eficiência do processo de beneficiamento empregado e com o tipo e teor do minério que é extraído. Os minérios de ferro predominantemente extraído no Brasil são a hematita, extraída no estado do Pará com teor médio de 60 % de ferro, e o Itabirito, extraído em Minas Gerais com teor médio de 50 % (IBRAM, 2012).

Diante desse cenário, quando o minério de ferro é processado com o intuito de aumentar o teor de ferro do produto final, pode gerar rejeitos que contêm diferentes minerais em sua composição. O grande estoque desses rejeitos e sua pouca reutilização podem gerar riscos à saúde pública e ao meio ambiente (WOLFF, 2009).

**Tabela 6–Contribuição média de cada minério na geração de resíduos**

Substância	Quantidade Total de Resíduos (1.000 t)		Contribuição % média de cada minério no total de resíduos	
	1996-2005	2010-2030	1996-2005	2010-2030
Ferro	765.977	4.721.301	35,14	41,38
Ouro	295.295	1.111.320	13,55	9,74
Titânio	276.224	1.018.668	12,67	8,93
Fosfato/Rocha	244.456	1.128.198	11,21	9,89
Estanho	149.369	357.952	6,85	3,14
Zircônio	116.236	490.183	5,33	4,30
Calcário	89.396	341.045	4,10	2,99
Alumínio (bauxita)	69.783	493.925	3,20	4,33
Cobre	53.498	819.636	2,45	7,18
Nióbio	35.690	119.372	1,64	1,05
Níquel	35.076	637.380	1,61	5,59
Caulim	24.346	90.729	1,12	0,80
Manganês	12.064	36.071	0,55	0,32
Zinco	12.562	44.097	0,58	0,39
<b>TOTAL</b>	<b>2.179.974</b>	<b>11.409.877</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Fonte: IPEA, 2012

### **3.4.1 Britagem e Moagem**

Durante o beneficiamento a etapa de cominuição ou fragmentação consiste em operações unitárias que visam diminuir, por meio de força mecânica, o tamanho da rocha em fragmentos menores liberando os minerais de interesse. A britagem é a primeira operação e realiza a fragmentação dos blocos extraídos da mina até ao tamanho adequado para a sequência do processo de beneficiamento. Para isso, essa operação ocorre várias vezes, alternando o equipamento para se obter a granulometria apropriada para a moagem. A operação de moagem consiste na fragmentação final gerando o produto adequado para a operação de concentração. (FIGUEIRA et al., 2010).

A diferença entre essas duas operações ocorre pela faixa granulométrica e pela forma como o tamanho das partículas são reduzidos. A britagem utiliza o britador de mandíbulas e o giratório que emprega força de compressão, impacto ou cisalhamento para reduzir o material mais grosso da dimensão de metros para uma faixa de 150 cm a 3 cm. Já na moagem, utiliza-se quatro moinhos, sendo eles o autógeno, semi-autógeno, de bolas e de barras para reduzir os grãos para frações mais finas na ordem de milímetros (CHAVES e PERES, 2009).

### **3.4.2 Peneiramento e Classificação**

Como forma de auxiliar as operações de cominuição utiliza-se o peneiramento e a classificação dos fragmentos minerais. O peneiramento consiste na segregação granulométrica por meio da utilização de peneiras de aberturas fixas, em que as partículas menores atravessam a abertura das telas e as maiores ficam retidas (LINS, 2004).

O material passante é então submetido ao processo de classificação, em que é realizado uma segregação de acordo com o comportamento dos grãos em um determinado fluido, em geral aplicados à úmido para granulometrias muito finas, para o qual o peneiramento a seco não é eficiente (CORREIA, 2010).

### 3.4.3 Concentração

As operações de concentração têm o objetivo de separar as partículas de ferro dos outros minerais. Elas podem ocorrer através da concentração gravídica, separação magnética e eletroestática e/ou flotação. Na concentração gravídica há separação das partículas por meio da força da gravidade ou centrífuga. A eficiência dessa operação está relacionada tanto com o equipamento utilizado quanto com o controle de alguns fatores como taxa de alimentação, percentual de sólidos e faixas granulométricas (LINS, 2004).

A separação magnética é um processo de retirada dos minerais de ferro. É uma técnica considerada ecologicamente correta que pode ser aplicada tanto a seco e como a úmido, tornando-se viável sua utilização em regiões com pouca disponibilidade hídrica (SAMPAIO et al., 2010).

Já a separação eletrostática está relacionada as cargas superficiais geradas nos minerais a serem segregados. A eficiência desse processo está associada as das propriedades do minério como capacidade de adquirir cargas elétricas superficiais, granulometria, forma geometria, densidade e condutividade elétrica (SAMPAIO et al., 2010).

A flotação consiste em dispersar as partículas minerais em solução aquosa contendo substancias tensoativas. Essas substâncias são responsáveis por tornar as partículas de ganga hidrofóbicas, favorecendo assim a interação com bolhas de água, formando uma espuma na superfície do tanque, sendo removidas do processo (MONTE e PERES, 2010).

Ao final do processo de concentração são obtidos um concentrado e um rejeito, ambos em forma de polpa com alta concentração de água. Em seguida, eles são submetidos ao desaguamento.

### 3.4.4 Espessamento e Filtragem

O desaguamento, composto pelas operações de espessamento e filtragem, tem como finalidade diminuir a concentração de água da polpa de concentrado e de rejeito para sua

destinação final, seja ela a venda ou disposição, ou para atender as condições das operações seguintes (CHAVES et al., 2010).

Segundo França e Massarani (2010) essa etapa é fundamental para recuperar e recircular a água no processo de beneficiamento, o que se adequa aos conceitos de sustentabilidade da indústria de mineração. A retirada da parte sólida se dá pela ação da força gravitacional, conferindo a esse processo uma operacionalização simples e um baixo custo.

Os equipamentos mais utilizados na etapa de desaguamento são os espessadores e os filtros a vácuo. Os primeiros são tanques feitos de aço ou concreto com formato cilíndrico-cônico e equipados com braços raspadores que direcionam a polpa ao ponto de remoção (CHAVES et al., 2010). Os filtros operam a partir da diferença de pressão entre o tanque e a superfície do meio filtrante, retendo os sólidos nesse meio produzindo tortas secas (FRANÇA e MASSARANI, 2010).

### **3.4.5 Concentrado**

Os concentrados, que apresentam valor econômico agregado, foram classificados por Jesus (2009) em granulados e finos. Os granulados apresentam granulometria maior que 6,3 mm e os finos menores que esse valor. Os finos, por sua vez, são divididos em *sinterfeed* (0,15 mm a 6,3 mm) e *pelletfeed* (menor que 0,15 mm). Enquanto os granulados são utilizados direto em altos fornos os finos precisam passar por processos de aglomeração, como sinterização e pelotização, para serem adicionados.

### **3.5 Características dos rejeitos de mineração de ferro**

Os rejeitos são constituídos por uma fração sólida e outra líquida, caso o beneficiamento seja a úmido. A concentração típica varia de 30% a 50% em peso e suas características são de acordo com o minério que está sendo lavrado e do processo de beneficiamento (ARAÚJO, 2006). Além disso, esses materiais podem apresentar teores de alguns elementos como sílica, fósforo, alumínio, manganês e potássio, que para algumas situações são consideradas indesejáveis, tal como na fabricação de aço, na pelotização e na sinterização. Dessa forma, as

quantidades desses elementos devem ser bem controladas para evitar prejuízos nas etapas de produção e nas características finais do produto (WOLFF, 2009).

Além dos óxidos de ferro descritos anteriormente, os rejeitos de minério de ferro ainda apresentam outros minerais em sua composição como caulinita e quartzo. A caulinita -  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  é um argilomineral de silicato alumínio hidratado com formulação 39,5 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 46,5 %  $\text{SiO}_2$  e 14,0 %  $\text{H}_2\text{O}$ , sendo matéria prima da indústria cerâmica. Esse argilomineral é formado pela combinação entre lâminas de sílica e alumina, apresentando baixa sensibilidade na presença de água (SILVA et al., 2008). O quartzo -  $\text{SiO}_2$  é uma das formas cristalinas da sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e apresenta estrutura cristalina trigonal composta por tetraedros de sílica (NOCITI, 2011).

Em relação a classificação granulométrica das partículas de rejeito de minério de ferro, obteve-se uma variedade de classificação segundo diferentes autores, como constatado na Tabela 7 (LIMA, 2007; PEREIRA, 2005; SOMASUNDARN, 1980; WOLFF, 2009).

**Tabela 7 - Classificação granulométrica das partículas de rejeito de minério de ferro**

Classificações Granulométricas				
Granulometria	SOMASUNDARN (1980)	PEREIRA (2005)	LIMA (2007)	WOLFF (2009)
Grossa	Tamanho médio > 1 mm	> 0,074 mm	> 0,5 mm	> 0,050 mm
Intermediária	X	x	0,1 - 0,5 mm	x
Fina	Partículas que não são facilmente separáveis por processo físicos de concentração e cujo tamanho médio está compreendido entre 0,010 - 0,100 mm	< 0,074 mm	0,020 - 0,1 mm	< 0,050 mm
Muito Fina	X	x	0,005 - 0,020 mm	x
Ultrafina	Partículas que não são facilmente separáveis por processo convencionais de concentração, inclusive a flotação, e cujo tamanho médio está compreendido entre 0,001 - 0,010 mm	x	0,001 - 0,005 mm	< 0,010 mm
Colóide	Tamanho médio < 0,001 mm	x	0,0002 - 0,001 mm	x
SuperColóide	X	x	< 0,0002 mm	x
Lama	Colóides	< 0,074 mm	x	< 0,010 mm

Fonte: Adap. (LIMA, 2007; PEREIRA, 2005; SOMASUNDARN, 1980; WOLFF, 2009).

Após análise da Tabela 7, percebe-se que Pereira (2005), Lima (2007) e Wolff (2009) classificam as partículas de acordo com o seu tamanho, enquanto que Somasundarn (1980) as classifica baseado no seu comportamento em água. Dentre os autores estudados, Lima (2007) apresentou a maior quantidade de faixas granulométricas (sete) e Pereira (2005) a menor, com três distribuições.

De forma geral, a mineração classifica a granulometria dos rejeitos como: rejeitos grossos ou granulares (maiores que 50  $\mu\text{m}$ ), rejeitos finos (menores que 50  $\mu\text{m}$ ) e lamas ou rejeitos ultrafinos (menores do que 10  $\mu\text{m}$ ) (WOLFF, 2009).

De acordo com a classificação granulométrica, Pereira (2005) relata que os rejeitos podem ser classificados como grossos ou finos, com características granulares específicas. Segundo o autor, o rejeito fino se destaca pela boa compressibilidade no processo de adensamento. Já no caso dos rejeitos granulares, Fernandes (2005) apud Silva (2010) comprova que os mesmos apresentam uma baixa compressibilidade. Isso acontece devido a sua alta permeabilidade, com pouca ou quase nula coesão, e também a sua elevada densidade resultante das partículas de ferro provenientes da rocha matriz.

Mendes (2008), Gomes (2009), Milonas (2006) e Machado (2007) afirmam em suas pesquisas que apesar da presença de frações finas nos rejeitos do processo de beneficiamento do minério de ferro, as frações granulares que controlam as características geotécnicas do material.

Presotti (2002) aponta que mesmo as partículas dos rejeitos apresentarem características e comportamentos de areia média a fina, eles não podem ser classificados dessa maneira. Isso porque o tipo de processo de beneficiamento e a forma do minério influenciam as características físicas, químicas, mineralógicas e geotécnicas das partículas, atribuindo-lhes características específicas de rejeito.

### **3.6 Importância da utilização de rejeitos provenientes da mineração de ferro**

Diante da grande demanda de minério de ferro pelo mundo moderno, lavras com teores cada vez menores de ferro passaram a se tornar viáveis, o que causa um crescimento na geração de rejeitos, requisitando barragens de rejeitos maiores ou desenvolvimento de alternativas

sustentáveis para sua disposição. Algumas pesquisas apontaram que muitos rejeitos armazenados em barragens ou descartados por algumas mineradoras apresentaram concentrações de ferro superiores a algumas lavras em atividade no Brasil (ANDRADE, 2014).

Segundo Menezes, Neves e Ferreira (2002) o reaproveitamento de rejeitos industriais como aplicação na produção de materiais alternativos não é novo e vem sendo intensificado no mundo todo. Os principais motivos para investir em pesquisa e tecnologias nesta área são:

- Grande consumo de recursos naturais;
- Esgotamento das reservas de matérias-primas;
- Aumento do volume de resíduos sólidos e da deposição inadequada destes, que podem causar riscos ao meio ambiente e à saúde pública;
- Indisponibilidade de locais adequada para descarte de rejeitos;
- Melhoria da eficiência da qualidade do produto reciclado e do sistema produtivo.

Diante desse cenário, o reaproveitamento de rejeitos da mineração de ferro tem sido o foco de diferentes estudos nos últimos anos, visando minimizar ou até mesmo acabar com sua deposição no meio ambiente. Essas pesquisas propõem aplicações de processos e técnicas para garantir um melhor aproveitamento dos recursos minerais, além de apresentar benefícios ambientais, assim como vantagens econômicas para as indústrias. Para tal, a caracterização dos rejeitos é fundamental para viabilizar seu reaproveitamento como subproduto, matéria-prima ou em outro segmento industrial (BORGES, 2008).

Menezes, Neves, Ferreira (2002) estudaram a possibilidade de utilização dos resíduos industriais e urbanos como matérias-primas para a indústria cerâmica e concluíram que a mesma tem uma grande capacidade de absorção desses materiais devido ao seu elevado volume de produção e capacidade de neutralizar e estabilizar vários resíduos tóxicos.

Em sua pesquisa, Nociti (2011) avaliou a viabilidade técnica de se utilizar rejeitos de minério de ferro do tipo arenoso e lama para fabricar bloco cerâmicos. Por meio de ensaios de limite de liquidez e de plasticidade determinou-se as proporções a serem utilizados na confecção, sendo de 7,5% para rejeitos arenosos e 5% para lama. Com essa definição, em seguida as amostras foram conformadas em prensagem uniaxial e sinterizadas à 900 °C. Após essa etapa, as mesmas foram submetidas aos seguintes ensaios: de contração, perda de massa, análise térmica, rugosidade, resistência mecânica e porosidade aparente. Dessa forma,

concluiu-se que as quantidades utilizadas de rejeito não afetaram o desempenho dos blocos e esses atenderem as exigências normativas, sendo sua aplicação viável tecnicamente.

Souza et al. (2008) avaliou as propriedades mecânicas e físicas de materiais cerâmicos com rejeito de mineração de ferro e constatou que não ocorreu retração desse material nas temperaturas de 700°C, 900°C e 1100 °C. Aquela que continha 5% de proporção de rejeito, em peso, teve um desempenho melhor nos ensaios de resistência mecânica e absorção de água, quando comparado com a cerâmica convencional. Com a proporção de 10% tanto a resistência mecânica quanto a absorção de água diminuíram, mas mesmo assim o material apresentou um desempenho satisfatório. Já nas proporções de rejeito acima de 10% os resultados foram deficientes. Souza et al. (2008) concluiu que na proporção de até 10% de rejeito os resultados foram satisfatórios, sendo que o rejeito agiu como material de preenchimento, contribuindo para a redução da porosidade e garantindo um maior desempenho as peças cerâmicas.

Silva (2014) estudou o uso dos rejeitos de concentração do minério de ferro na produção de cerâmicas e de blocos intertravados de concreto (pavers). No primeiro caso adicionou-se os rejeitos na proporção de 0% e 5%, substituindo o uso da argila, e a cerâmica final obteve uma resistência à flexão maior do que as cerâmicas sem adição de rejeitos. No segundo processo, os resíduos sólidos, em substituição à areia de sílica, se mostraram materiais viáveis na confecção dos pavers, que apresentam uma maior porosidade, uma resistência mecânica considerável, além de não representarem risco ao meio ambiente quando submetidos a intempéries.

Guerra (2014) analisou sobre a viabilidade técnica de utilização do rejeito de minério de ferro *pellet feed* para produzir blocos de concreto intertravados. Para tal foram realizados ensaios físicos, químicos, mineralógicos e ambiental no material e concluiu-se que o mesmo apresenta propriedades satisfatórias para ser empregado como material *filler* nos pavimentos intertravados. Confeccionou-se três corpos de prova, sendo um de referência e outros dois contendo o rejeito nas proporções 5% e 10%. Esses blocos com adição de rejeitos apresentaram melhores resistências que aquele de referência, confirmando o potencial uso do rejeito de minério de ferro na produção de pavimentos.

Andrade (2014) avaliou as perspectivas do reaproveitamento dos rejeitos de minério de ferro na construção civil, constatando que esses materiais apresentam características e propriedades similares as exigidas por vários materiais de construção. Verificou ainda que devido a composição química e mineralógica, a granulometria e a formação de partículas, os

principais usos desses rejeitos na fabricação de concretos, argamassas e cerâmicas, obras de pavimentação e agregação no cimento.

Machado (2014) estudou o potencial uso do rejeito da mineração na blendagem do calcário comercial para correção do solo. Echeverri (2012) analisou sobre o potencial uso de resíduos de mineração de ferro como filtro para barragens, em substituição a areia natural encontrada nos rios e dunas.

Aristimunho e Bertonicini (2012) analisaram a aplicação de rejeitos de mineração de ferro na forma de pó na fabricação de argamassa de cimento Portland. Após a realização de ensaios mecânicos e físicos em corpos de prova feitos com diferentes proporções de areia, cimento e rejeito, e tendo o rejeito como substituto das matérias-primas, concluiu-se que na substituição de 100% da areia pelo rejeito encontrou o maior valor de resistência dos demais.

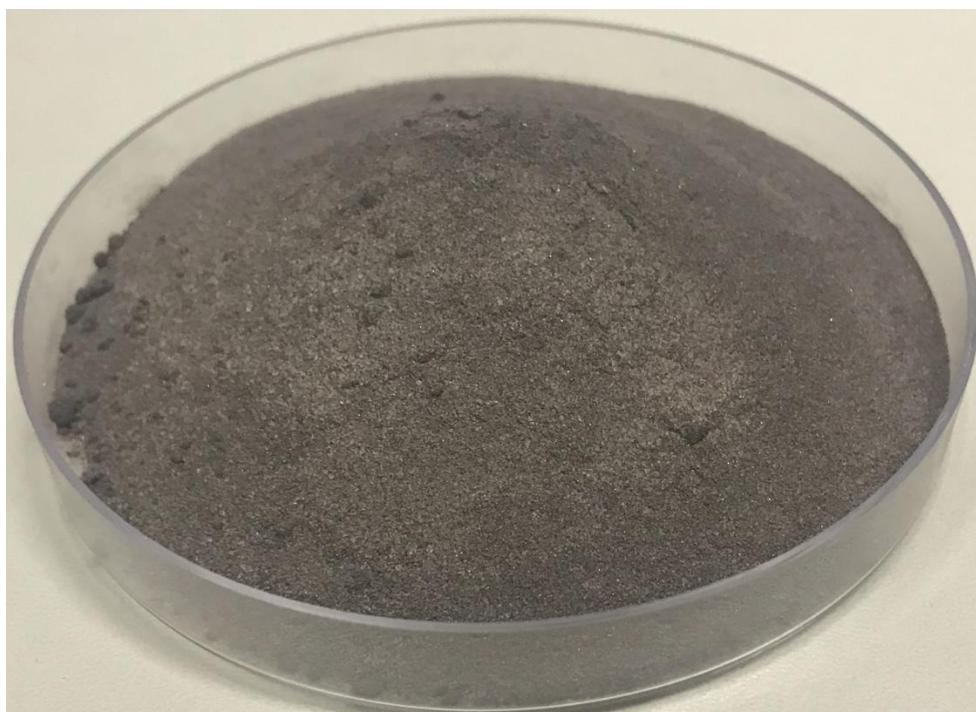
Como exposto, há diversos estudos para aplicação de rejeitos oriundos da mineração em diferentes setores industriais, principalmente na construção civil e na indústria cerâmica. Porém, ressalta-se que para o rejeito de minério de ferro *pellet feed*, especificamente, existem muito poucos estudos até então publicados, estimulando a elaboração dessa presente pesquisa.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Materiais

Foi utilizado nesse estudo amostra de rejeito proveniente do processo de beneficiamento do minério de ferro para a produção de concentrado *pellet feed*. A planta em que o material foi beneficiado localiza-se no município de Conceição do Mato Dentro, em Minas Gerais. A amostra do rejeito foi coletada de forma pontual conforme NBR 10007- Amostragem de Resíduos (ABNT, 2004b) e a coleta se deu ao final do processo de espessamento. A mesma foi filtrada, seca e condicionada em saco plástico e colocadas em uma bombona plástica. É mostrado na Figura 5 o aspecto do material tal qual recebido.

**Figura5 – Amostra de rejeito do beneficiamento de minério de ferro *pellet feed***



Fonte: Próprio autor

## **4.2 Métodos**

Para caracterizações da amostra de rejeito foram realizadas análises físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas. Para tal foram empregados os ensaios granulométricos por peneiramento e a laser, fluorescência de RaiosX, difração de RaiosX e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

### **4.2 Análise Granulométrica**

Uma amostra de massa de 250,0g de rejeito de minério de ferro foi peneirada manualmente a seco, utilizando uma série de peneiras com abertura de 300 $\mu$ m, 212 $\mu$ m, 150  $\mu$ m e 75 $\mu$ m. As peneiras usadas nesse ensaio são da fabricante BERTEL e foram previamente lavadas em água e secas em ar comprimido. Todas elas estavam em ótimo estado de conservação e em boas condições de operação.

O peneiramento contou com o auxílio de um pincel para melhor passagem do material entre as peneiras. Toda a amostra do rejeito foi preparada segundo a norma NBR 6457 (ABNT, 1986). Ao final do ensaio, a massa retida em cada peneira foi pesada em balança semi-analítica.

O material passante pela abertura de 75  $\mu$ m, retido no fundo do conjunto de peneiras utilizadas, foi analisado por granulometria a laser. Para esse ensaio foi utilizado o analisador de tamanho de partículas da marca CILAS, modelo 1090. Foi realizado em meio aquoso, com tempo de dispersão por agitação mecânica e ultrassom de 60 segundos e obscuração de 12%. Foi inserido no equipamento aproximadamente 5,0 g de rejeito, realizando a leitura em uma faixa de 0,04  $\mu$ m a 500  $\mu$ m.

#### **4.2.2 Análise de propriedades químicas e mineralógicas**

Após o ensaio de granulometria por peneiramento uma fração de aproximadamente 1,0 g do material retido em cada peneira e uma amostra do rejeito inicial foram colocadas em porta-amostras poliméricos e submetidas a análise utilizando um Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva, modelo Shimadzu EDX-720.

As condições de operação do equipamento empregadas nesse ensaio foram: tensão do tubo de 50 keV (Ti a U) e 15 keV (Na a Sc), com corrente no tubo de 23  $\mu\text{A}$  e 199  $\mu\text{A}$ , respectivamente, colimador de 10 mm, tempo morto do detector de 39%, realizado a ar e detector de Si(Li) refrigerado com nitrogênio líquido, com tempo real de integração de 100 segundos.

As fases minerais presentes nas amostras foram identificadas por difração de Raios X, por meio do método do pó. Para isso utilizou-se um difratômetro da marca Shimadzu, modelo XRD7000. Esse equipamento operou nas seguintes condições: ângulo de varredura de  $10^\circ$  a  $80^\circ$ , passo de  $0,02^\circ$  (sendo 2 minutos por passo), tubo de cobre com tensão e corrente no tubo de 40 kV e 30 mA, respectivamente. As fases foram identificadas utilizando o banco de dados DPF02 (ICDD, 2003).

#### **4.2.3 Análise Morfológica**

A morfologia das partículas das amostras de rejeito, após o ensaio granulométrico, foi avaliada via microscopia eletrônica de varredura. Para tal, utilizou-se de um microscópio da marca Shimadzu, modelo SUPERSCAN 36 SSX-550. O ensaio foi realizado em uma tensão de 15 kV e uma corrente de  $69\mu\text{A}$ .

Antes de serem introduzidas no microscópio, cada amostra foi aderida em fitas de carbono e metalizadas com películas de ouro no equipamento SANYU ELECTRON, modelo SC-701, em uma corrente de 5 mA durante 5 minutos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Análise da composição granulométrica do rejeito

As frações e a curva granulométrica obtidas pelos métodos de peneiramento a seco e de granulometria a laser são mostradas na Tabela 8 e na Figura 6, respectivamente. A curva de granulometria a laser foi gerada com o material passante na peneira de abertura de 75  $\mu\text{m}$ .

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

Peneira ( $\mu\text{m}$ )	% Retida	% Retida Acumulada
300	1,04	1,04
212	5,84	6,88
150	15,39	22,27
75	36,38	58,65
< 75	41,35	100,00

Fonte: Próprio Autor

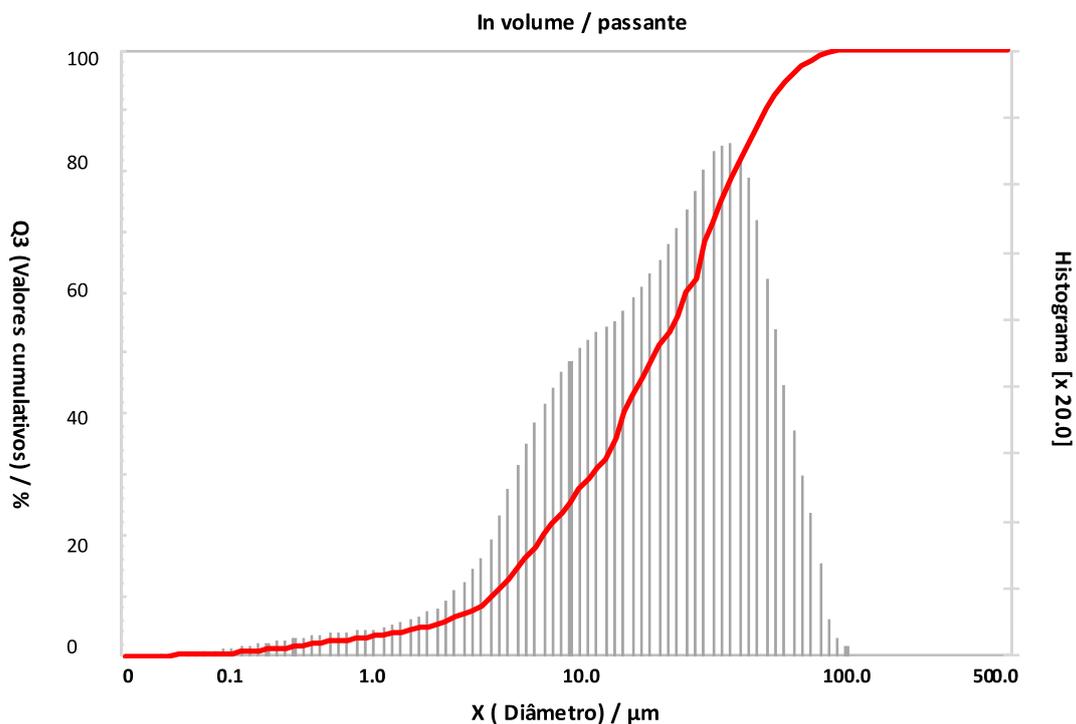
Pela norma D 3282/04 – PRÁTICA PADRÃO PARA CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS E MISTURAS SOLO-AGREGADO PARA FINS DE CONSTRUÇÃO DE RODOVIAS (ASTM, 2009), pode-se determinar as frações de pedregulho, areia grossa, areia fina e silte-argila, conforme mostrado na Tabela 9.

**Tabela 9 – Frações de pedregulho, areia grossa, areia fina e silte-argila no rejeito**

Frações do Rejeito (mm)	Massa Retida (%)
Pedregulho (2,0 a 75,0)	0
Areia Grossa (0,425 a 2,00)	0
Areia Fina (0,075 a 0,425)	58,65
Silte-Argila (< 0,075)	41,35

Fonte: Próprio autor.

**Figura6 – Curva granulométrica obtida pelo método de granulometria a laser**



Fonte: Próprio Autor

Percebe-se que 58,65 % do rejeito é classificado como areia fina e 41,35% do rejeito enquadra-se como material *filler*, classificados por SILVA et al. (2005) como aqueles grãos passantes pela peneira de 75  $\mu\text{m}$ . Além disso, desse material passante há uma predominância da faixa granulométrica entre 40  $\mu\text{m}$  a 70  $\mu\text{m}$ , o que confere ao rejeito uma granulometria fina, como determinado por Somasundarn (1980), Pereira (2005) e Wolff (2009). Ostamanhos médios das partículas a 10% ( $D_{10}$ ), 50% ( $D_{50}$ ) e 90% ( $D_{90}$ ) foram 10,32  $\mu\text{m}$ , 35,10  $\mu\text{m}$ , 74,33  $\mu\text{m}$ , respectivamente, e seu tamanho média igual a 39,28  $\mu\text{m}$ .

Uma alternativa para o reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro é como agregados para concretos (ANDRADE, 2014). Porém o teor de finos presentes no rejeito, também chamado de material pulverulento, é indesejável para essa aplicação. Pela norma NBR 7211/09 – AGREGADOS PARA CONCRETO (ABNT, 1986), o material utilizado para esse fim deve apresentar um valor máximo de 3% a 5% de finos, de acordo com a finalidade do concreto. No entanto, esse teor elevado é interessante para o uso como aditivo no concreto como estudado por Bauer et al. (2012) e Silva (2014); utilização na fabricação de materiais cerâmicos conforme resultados de Silva (2014) e Nociti (2011); e empregado como matéria-prima para

concentrados asfálticos conforme proposto por Bauer (2012) e Bastos (2013); e na fabricação de argamassas, como testado por Fontes et al. (2014) e Aristimunho e Bertocini (2012).

Fernandes (2005) aponta que os rejeitos granulares constituídos de areia fina apresentam alta permeabilidade e baixa compressibilidade. Apesar do ângulo de atrito desses materiais encontrarem-se entre 25° a 35°, a areia fina apresenta uma coesa muito baixa ou até nula. Segundo ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP (2002), o cimento Portland com a adição de areia fina resulta em argamassas e concretos muito utilizados em obras de engenharia. As propriedades e características finais desses materiais vão depender da qualidade e das proporções da areia agregada.

Estudos de Silva (2014) avaliaram a aplicação de rejeitos finos da mineração de ferro como agregados na produção de blocos de concreto para pavimentação. Os resultados confirmaram que essa granulometria dificulta a desmoldagem dos blocos, mas aumenta a resistência mecânica do material, além de não representar risco ambiental como comprovado pelo ensaio de lixiviação realizado.

A partir dos estudos mencionados, observa-se que quando há segregação do rejeito, separando os materiais finos dos arenosos, as aplicações apresentadas podem ser potencializadas, já que o material final fica mais homogêneo do ponto de vista granulométrico. Isso porque quando se deseja utilizar o rejeito como agregado de concreto ou aplicação para argamassa é ideal que as partículas estejam na fração arenosa. Já para uso como aditivo de cimento ou em materiais cerâmicos é desejável uma maior presença de finos.

Os resultados encontrados sugerem que esse rejeito pode ser utilizado na produção de argamassas, pavimentos para rodovias, agregação a cimentos e como matéria-prima na produção de cerâmicas, porém, essas aplicações ainda não conclusivas pois ainda não se conhece todas as propriedades do material.

No entanto, é fundamental que a composição granulométrica esteja associada a composição química, mineralógica e morfológica do rejeito para melhor averiguar a aplicação desse material e indicar a melhor rota do seu reaproveitamento. Além disso, propriedades físicas e mecânicas também devem ser testadas.

O método de separação granulométrica por peneiramento manual a seco, em alguns casos, pode apresentar partículas fora da sua faixa granulométrica, o que é considerado um

comportamento normal para esse ensaio. Isso porque, apesar dele fornecer resultados em intervalos de tamanho absoluto (o tamanho da peneira corresponde ao tamanho da abertura de sua malha), não garante que as partículas passantes não apresentem dimensões maiores do que a malha da peneira. Exemplos disso, são os casos de partículas em formato de agulha ou cilíndricas que conseguem passar pela malha mesmo apresentando uma granulometria superior à abertura da mesma. Há ainda a possibilidade de ruptura das malhas das peneiras, e como elas são de ordem de micrometros são imperceptíveis a olho nu (WOLFF, 2009).

## 5.2 Análise da composição química e mineralógica do rejeito

Os resultados qualitativos dos compostos químicos obtidos por fluorescência de Raios X presentes na amostra de rejeito de minério de ferro *pellet feed* podem ser vistos nas Tabelas 10 e 11. Foi realizada uma análise comparativa entre a amostra original, sem distribuição granulométrica, e a amostra após o ensaio de peneiramento a seco. Dessa forma, R1 compreende-se a amostra original, enquanto que R2, R3, R4, R5 e R6 referem-se às frações retidas nas peneiras de 300  $\mu\text{m}$ , 212  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$ , 75  $\mu\text{m}$  e no compartimento de fundo (menor que 75  $\mu\text{m}$ ), respectivamente.

**Tabela 10 – Análise comparativa dos óxidos presentes no rejeito na amostra original e na amostra após peneiramento a seco (%)**

Amostra	Teor SiO <sub>2</sub> (%)	Teor Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Teor Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Teor K <sub>2</sub> O (%)	Teor CaO (%)
R1	50	41	8	< 1	-
R2	93	1	4	-	1
R3	99	1	-	-	-
R4	92	4	5	< 1	< 1
R5	90	6	4	-	-
R6	36	54	9	< 1	-

Fonte: Próprio autor

**Tabela 11 – Composição mineral em percentual de peso das amostras de rejeito R2, R3, R4, R5 e R6.**

<b>Amostra</b>	<b>Teor Fe (%)</b>	<b>Teor Si (%)</b>	<b>Teor Al (%)</b>	<b>Teor K (%)</b>	<b>Teor Ca (%)</b>
R1	50	41	8	< 1	-
R2	3	90	4	-	3
R3	3	97	-	-	-
R4	9	87	4	< 1	< 1
R5	13	84	4	-	-
R6	70	25	7	< 1	-

Fonte: Próprio autor

Por meio da fluorescência de raios-X verificou-se que a constituição química do rejeito é basicamente de óxidos de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), em maiores proporções, e de óxidos de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e de potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) em menores proporções. Fazendo uma análise das amostras R2 a R6 percebe-se que, em média, 82 % são compostas de óxido de silício e 13 % compostas de óxido de ferro.

O teor de óxido de silício é maior nas frações do rejeito de 75  $\mu\text{m}$  a 300  $\mu\text{m}$ , enquanto que o teor de óxido de ferro aumentou à medida que as partículas do rejeito ficaram menores, sendo mais concentrado que o óxido de silício na fração menor que 75  $\mu\text{m}$ . Esse fato foi confirmado por Viera (2008) em seu estudo sobre os rejeitos de flotação mecânica da Samarco Mineração. Ele concluiu que quanto menores as partículas do rejeito maior é o percentual de óxido de ferro e quanto maiores os tamanhos dessas partículas maiores o teor de óxido de silício.

Santos (2010) constatou em sua pesquisa com rejeitos da Mina do Pico da VALE que as frações finas do rejeito apresentavam proporções mais elevadas de óxido de ferro. Além disso, verificou que as frações coloidais exibiam maiores teores de aluminossilicatos, fato demonstrado pelo maior percentual de óxido de alumínio na amostra R6.

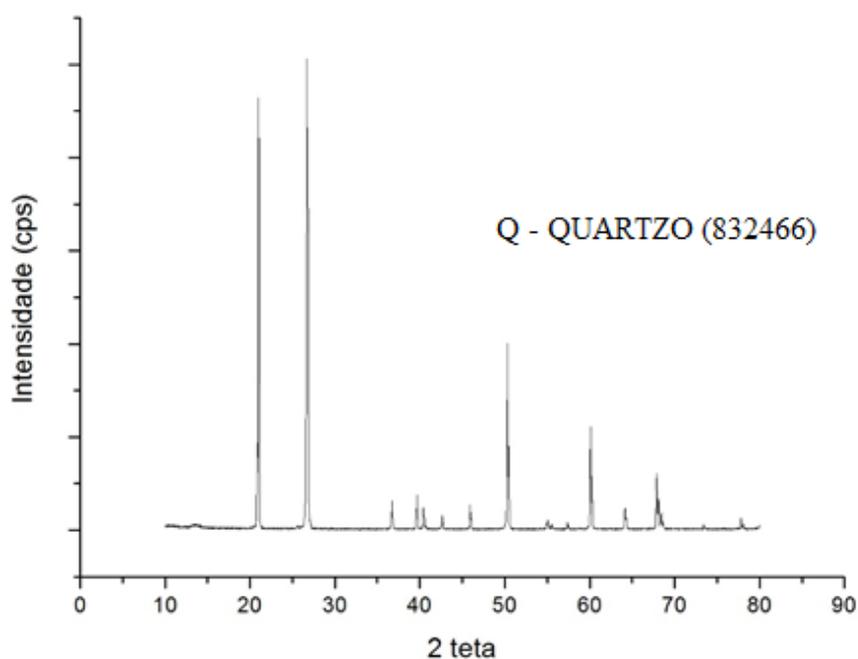
A presença de óxidos de alumínio pode ser justificada tanto pela geologia da região que é rica em filitos com aluminossilicatos quanto pela ocorrência de substituição isomórfica do ferro pelo alumínio nos óxidos de ferro, como apontado por Couto et al. (2010). Esse fato é comprovado por Gomes (2009) em relato que, de forma geral, os óxidos de alumínio

apresentam maiores teores nas frações mais finas do rejeito por estarem associados, em sua maioria, à fração silte-argila.

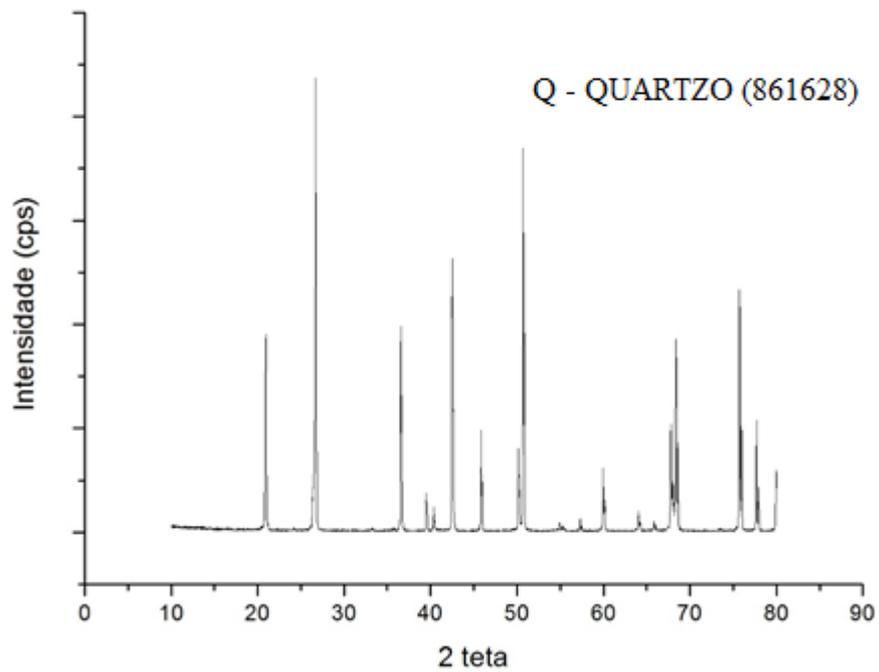
O elevado teor de óxido ferro no rejeito é facilmente explicado pela qualidade do minério que é extraído na região de Conceição do Mato Dentro, MG. Porém, por se tratar de uma coleta de rejeito de forma pontual direcionada para a fins acadêmico, não se pode afirmar que o processo de beneficiamento é passível de melhoria.

A identificação das fases minerais, obtidas por difração de raios-X, presentes nas amostras R2, R3, R4, R5 e R6 do rejeito podem ser observadas nos difratogramas mostrados na Figura7, Figura 8, Figura 9, Figura 10 e Figura 11.

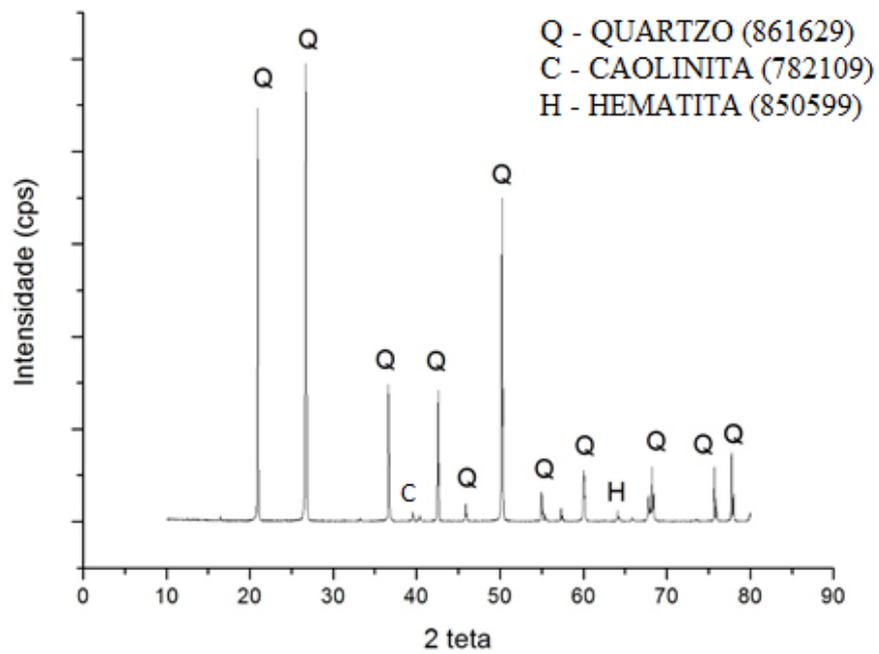
**Figura7 – Difratograma das amostras de rejeito R2.**



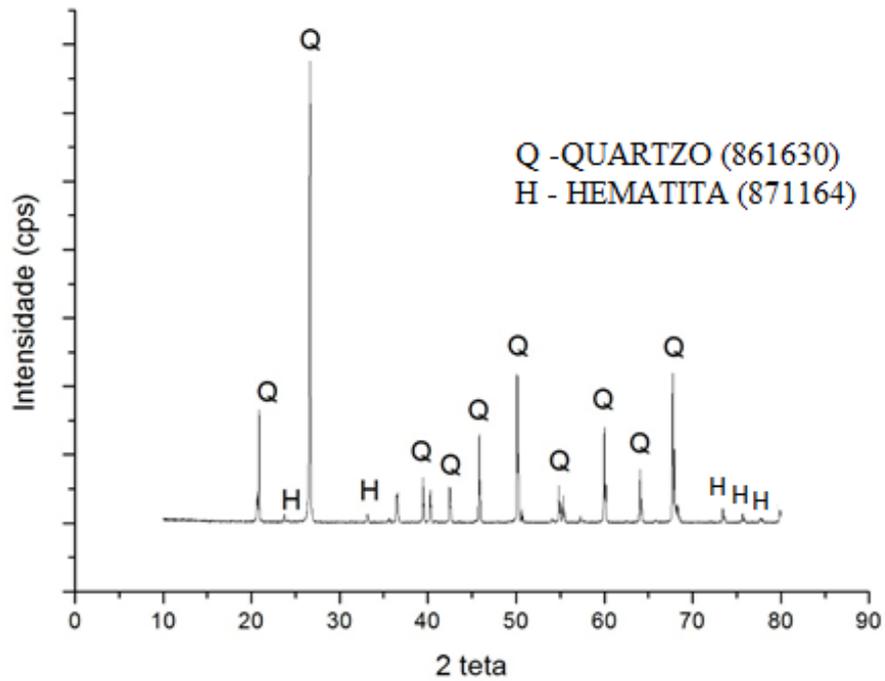
Fonte: Próprio autor

**Figura 8 – Difratoograma das amostras de rejeito R3.**

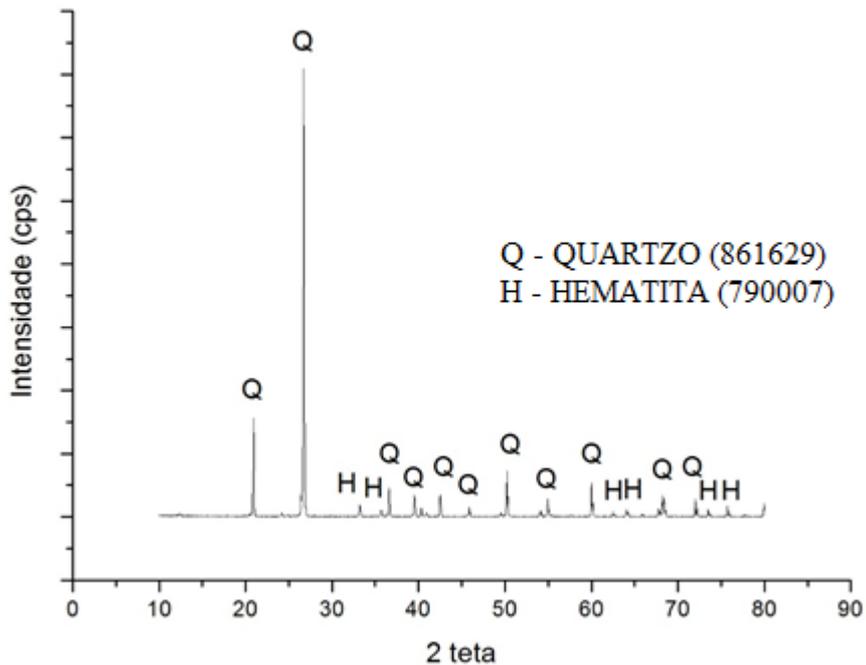
Fonte: Próprio autor

**Figura 9 – Difratoograma das amostras de rejeito R4.**

Fonte: Próprio autor.

**Figura 10 – Difratoograma das amostras de rejeito R5.**

Fonte: Próprio autor.

**Figura 11 – Difratoograma das amostras de rejeito R6.**

Fonte: Próprio autor.

Nas amostras R2, R3 e R4 são observadas reflexões intensas nos ângulos de  $2\theta$  de  $21,8^\circ$ ,  $26,6^\circ$  e  $51,2^\circ$ . Esses ângulos são referentes a fase quartzo (832466, 861628 e 861629). Essas reflexões ainda se fizeram presentes nas amostras R5 e R6, porém com menor intensidade, com exceção daquele presente no ângulo  $26,6^\circ$  que se manteve acentuada. Em R4 nota-se pequena reflexão nos ângulos de  $2\theta$  de  $39,6^\circ$  e  $64,3^\circ$  referentes as fases caulinita (782109) e hematita (850599), respectivamente. Já nas amostras R5 e R6 percebe-se também baixas reflexões referentes a hematita (871164 e 790007) nos ângulos de  $2\theta$  de  $24,3^\circ$ ,  $33,8^\circ$ ,  $64,8^\circ$ ,  $73,2^\circ$  e  $76,7^\circ$ .

De acordo com os dados obtidos é possível verificar que o rejeito estudado é composto basicamente por quartzo e hematita, em maiores proporções, e caulinita, em menor quantidade. Logo, o resultado encontrado é coerente com aqueles obtidos no FRX, que constatou a presença de óxidos de silício, ferro e alumínio no rejeito, sendo que os dois primeiros representam 95,2 % do total.

O quartzo está presente em todas as frações do rejeito, sendo sua concentração mais predominante quanto maior o tamanho das partículas, como constatado nas amostras R2 e R3 (Figura 7 e Figura 8).

Conforme apontado por Andrade (2014), o quartzo pode ser aplicado como agregado miúdo para argamassa, material alternativo (filer) para enchimento dos concretos asfálticos, material para incorporação em cerâmicos e em cimentos ou concreto, na forma de material inerte. Devido a sua boa resistência e durabilidade, Echeverri (2012) aponta que o quartzo tem grande aplicabilidade na engenharia, como componentes filtrantes e agregados para concreto.

Em relação a aplicabilidade de quartzo na fabricação de cerâmicas vermelhas, Nociti (2011) aponta que uma grande quantidade de sílica além de danificar o equipamento durante o processo de extrusão, vitrifica a cerâmica, reduzindo sua absorção e tornando-a mais quebradiça. Com isso aumenta a temperatura de queima do material, exigindo assim um maior consumo de combustível.

De acordo com Bauer et al. (2012) o quartzo quando finamente dividido por ser empregado como aditivo no concreto, numa proporção que pode variar de 5% a 15%, modificando assim as propriedades mecânicas e físicas do material. Quando inerte, esse material melhora as características de resistência à compressão do concreto. Em sua pesquisa sobre a aplicação de rejeitos de minério de ferro na construção de camadas de pavimentos urbanos ou rodoviários, Peixoto (2013) concluiu que a presença do quartzo na matéria prima

contribui na hidratação do cimento, na formação do gel e no desenvolvimento do processo de endurecimento deste ligante.

A hematita é resultante da perda, ao longo do processo de beneficiamento, do minério de ferro, como indicado por Guerra (2014). Esse mineral tem uma maior concentração em frações menores do rejeito, principalmente naquela menor que 75  $\mu\text{m}$ . A utilização da hematita, que possui uma coloração avermelhada típica, como agregado para concreto e argamassa é indesejável devido a questões estéticas. Além disso, grande quantidade desse mineral pode ocasionar no surgimento de rachaduras e trincas, em virtude do efeito da dilatação. Por outro lado, em menor concentração ela é útil na fabricação desses materiais devido ao seu caráter fundente e por melhorar suas propriedades mecânicas (BAUER, 2012).

Zhao et al. (2014) afirma que a presença de óxidos de ferro, principalmente de hematita, em agregados miúdos pode ser aplicada na fabricação de concretos de alta densidade e resistência mecânica. Esses materiais são chamados de concretos pesados e utilizados em usinas nucleares como blindagens ou escudos biológicos, devido ao seu potencial de absorver radiação. Já Zhang et al. (2006) indica a aplicação do rejeito com alto teor de ferro para fabricação de cimento, uma vez que ele pode substituir a utilização de ferro em pó no cimento convencional.

Segundo Bitencourt (2004) e Grun (2007) a grande quantidade de óxido de ferro presente no rejeito, principalmente na amostra R6, torna-se inviável sua aplicação como substituto da argila em materiais cerâmicos. Por um lado, ele é responsável por reduzir a plasticidade e a resistência mecânica da cerâmica, mas também diminui a retração, facilitando a secagem. Contudo, quando adicionado em pequenas proporções contribui com a queima nesses materiais e sua manutenção durante o processo de resfriamento. Dessa forma, evita o surgimento de defeitos nas peças fabricadas, além de contribuir com a economia de energia nos fornos (ANDRADE, 2014).

A presença da fase caulinita se dá pela existência de argila no rejeito, como evidenciado por Guerra (2014) em seu estudo. Nota-se que a concentração desse argilomineral é maior na fração mais fina do rejeito, onde a concentração de ferro é maior. Esse fato comprova o que foi apontado por Couto et al. (2010) em sua pesquisa que o alumínio tem a capacidade de substituir isomorficamente o ferro na hematita, sugerindo sua presença na estrutura do óxido de ferro. Em

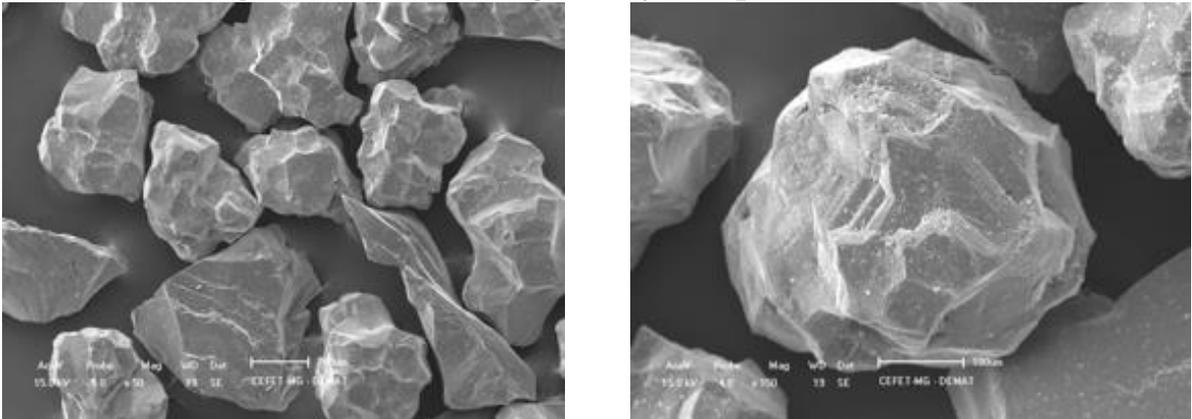
consequência disso, o autor aponta a dificuldade de remoção desse mineral por métodos físicos de concentração.

Em seu estudo Peixoto (2013) buscou reaproveitar rejeitos de minério de ferro estabilizado quimicamente para obras de pavimentação, a partir de ligantes como cimento, cal e escória de aciaria. Nesse ponto, a caulinita se mostrou um material fundamental nas reações cimentantes para estabilizar quimicamente as amostras com escória e cal.

### 5.3 Análise morfológica do rejeito

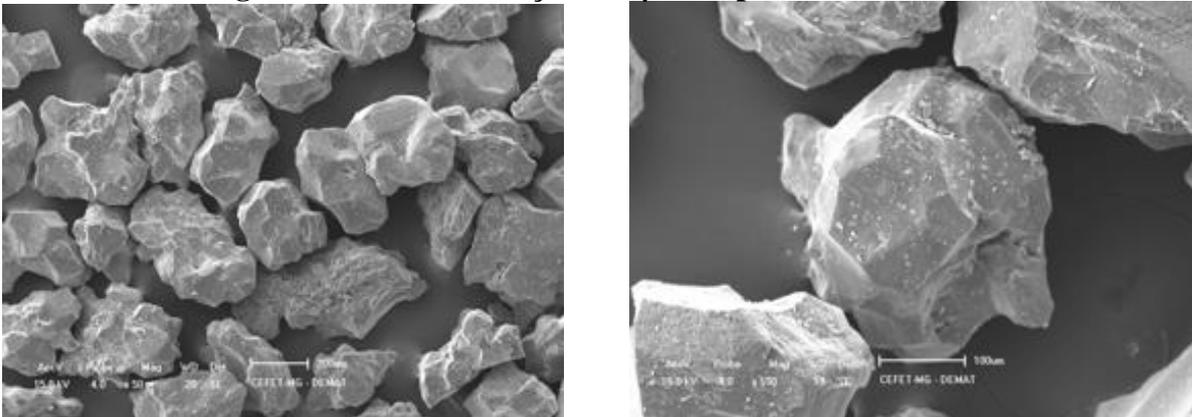
Os resultados obtidos por MEV podem ser observados nas Figura 12, Figura 13, Figura 14, Figura 15 e Figura 16. Para cada amostra foi realizado duas ampliações distintas.

**Figura 12 –MEV da fração 300 µm do peneiramento a seco**



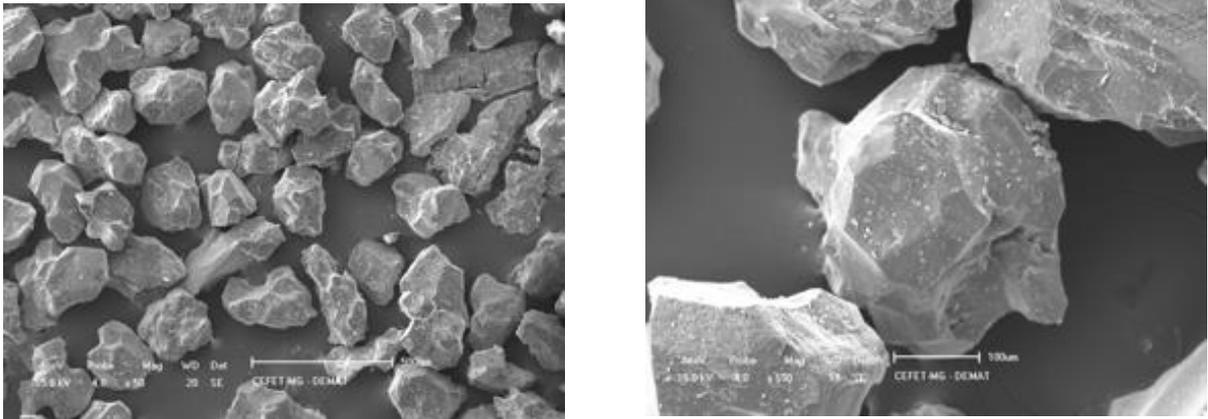
Fonte: Próprio autor

**Figura 13 –MEV da fração 212 µm do peneiramento a seco**



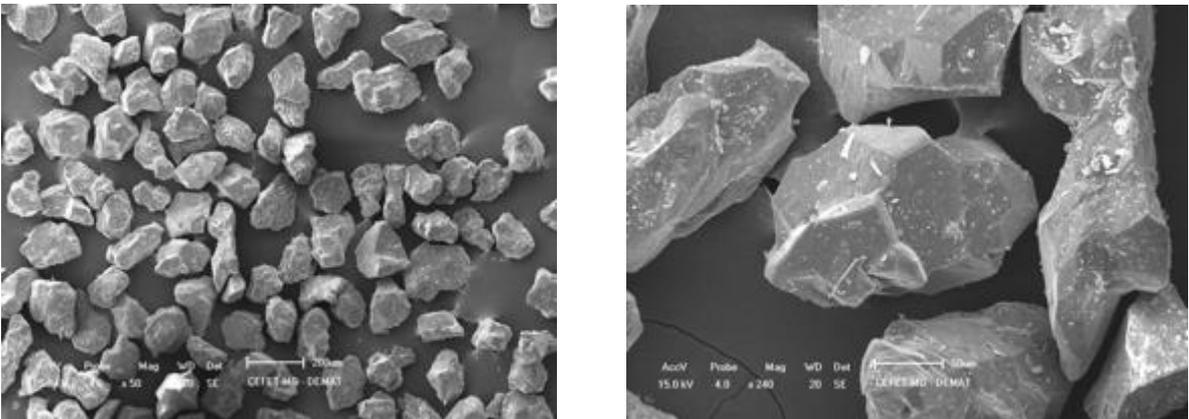
Fonte: Próprio autor

**Figura 14 –MEV da fração 150  $\mu\text{m}$  do peneiramento a seco**



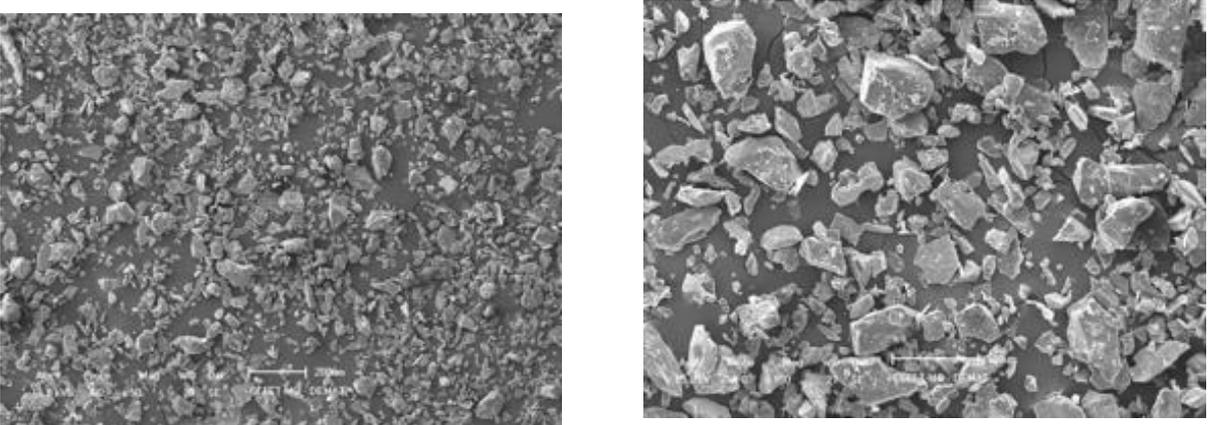
Fonte: Próprio autor

**Figura 15 –MEV da fração 75  $\mu\text{m}$  do peneiramento a seco**



Fonte: Próprio autor

**Figura 16 –MEV da fração menor que 75  $\mu\text{m}$  do peneiramento a seco**



Fonte: Próprio autor

Observa-se que em todas as frações peneiradas os formatos das partículas são irregulares com aspecto de fragmentos. Nota-se a presença de partículas finas em todas as imagens

apresentadas, corroborando com os resultados das curvas granulométricas. Quanto a esfericidade das partículas, verifica-se que elas apresentam em geral baixa esfericidade.

Por meio da análise da Figura 12, Figura 13 e Figura 14 percebe-se um grande percentual de partículas subarredondadas e angulosas. Na Figura 15 nota-se a presença de partículas prolatas. Já na Figura 16 constatou-se o formato de partículas tabulares e laminares. Conforme apontado por Andrade (2014), os formatos subarredondadas, angulosas e prolatas são provenientes do quartzo, enquanto que as tabulares são provenientes da hematita e as laminares da caulinita.

Echeverri (2012) apontou em sua pesquisa que a presença de minerais laminares influencia na permeabilidade do material a ser formado. Esse formato de partícula orienta o fluxo favorecendo o aumento da condutividade hidráulica. Dessa forma, se projeta como um material passível de ser utilizado como matéria-prima na fabricação de filtros.

Além disso, percebe-se um material pulverulento bem fino aderidos as partículas maiores, característico dos argilominerais (ANDRADE, 2014). A medida que a fração da peneira diminui nota-se uma maior quantidade de partículas finas com dimensões menores que 0,075 mm, exibindo uma maior dispersão granulométrica e melhor distribuição do tamanho dos grãos.

Como já exposto anteriormente, materiais pulverulentos não são desejáveis quanto ao uso como agregado miúdo para concreto. No entanto, podem ser empregados como aditivos na fabricação de concretos como substâncias cimentantes, inertes, pozolantes e agentes de cristalização. Esses materiais tem a capacidade de modificar de forma positiva as características físicas e mecânicas do concreto (BAUER et al., 2012).

## 6 CONCLUSÕES

A mineração de ferro é uma das principais atividades econômicas mundiais, tendo o Brasil como um dos principais produtores e detentores das maiores reservas desse mineral. O reaproveitamento dos rejeitos gerados por essa atividade é essencial para a continuidade do negócio, contribuindo com os avanços tecnológicos em pesquisas e novos métodos de reutilização, além de trazer benefícios ambientais e sociais.

A caracterização física do rejeito de minério de ferro *pellet feed* apresentou uma granulometria fina, equivalente ao *filler*, em que 41,35% das partículas foram menores que 75  $\mu\text{m}$ . O rejeito é composto basicamente por quartzo –  $\text{SiO}_2$  e hematita -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , em maiores proporções, e caulinita –  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  em menor proporção. O quartzo se fez presente em todas as frações do rejeito com um percentual variando de 93,2% na amostra com maior granulometria até 36,25% na parcela mais fina.

Morfologicamente o rejeito apresentou partículas com baixa esfericidade e formatos com homogeneidade semelhante. O formato do quartzo variou de subarredondadas e angulosas nas partículas maiores, a prolatas nas frações menores do rejeito. As formas tabulares e laminares caracterizaram a presença de hematitas e caulinitas, respectivamente. Notou-se ainda a presença de material pulverulento, principalmente aderido as partículas de maior granulometria. Percebeu uma maior dispersão granulométrica e melhor distribuição do tamanho dos grãos a medida que a fração do rejeito foi diminuindo.

O método utilizado de segregar o rejeito separando-o de acordo com a granulometria e, conseqüentemente, com suas características químicas e minerais, potencializou sua aplicação uma vez que o material final fica mais homogêneo do ponto de vista granulométrico e de sua composição. Com isso, o reaproveitamento do rejeito se torna mais viável, podendo apresentar um melhor desempenho de acordo com sua utilização final.

Dessa forma, o concentrado de sílica (quartzo) pode ser empregado como agregados de matéria-prima para argamassas, cimentos, concretos asfálticos para obras de pavimentação e para materiais filtrantes.

No caso da hematita, suas aplicações variam de acordo com seu teor na amostra. Em alta concentração desse mineral, a amostra do rejeito pode ser utilizada na fabricação de concretos de alta densidade e resistência mecânica e como matéria-prima alternativa na

fabricação de cimento. Em menores proporções pode ser aplicada como agregado para concretos e argamassas e como substituto da argila na fabricação de materiais cerâmicos.

Como a caulinita apresentou uma baixa concentração no rejeito e por estar associada estruturalmente a hematita, vislumbra-se aplicações em conjunta a esse mineral. Logo, ela pode ser aplicada na fabricação de cimentos e concretos para materiais de alto desempenho e, principalmente, na indústria cerâmica na produção de tijolos, telhas, porcelanas, louças sanitárias.

Com base na fundamentação teórica apresentada e diante das análises físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas realizadas, conclui-se que o rejeito em questão apresentou um grande potencial de reaproveitamento, seja na indústria cerâmica, na construção civil, ou na formulação de novos produtos utilizando parte desse rejeito.

## 7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de complementar e dar continuidade à presente pesquisa listou-se abaixo algumas propostas de trabalhos futuros que poderiam ser desenvolvidas tendo como foco o reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro *pellet feed*.

- Realizar a caracterização ambiental do rejeito partir dos parâmetros definidos pela norma NBR 10004 – Resíduos Sólidos (ABNT, 2004a) para confirmar sua classificação como Resíduo Classe II B – Inerte.
- Produzir corpos de provas com o rejeito bruto e com as amostras R2, R3, R4, R5 e R6. Em seguida, realizar ensaios mecânicos nesses corpos e fazer um comparativo entre os resultados encontrados;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. ABCP. (2002). Guia Básico de Utilização do Cimento Portland. 7 Ed. São Paulo. 28p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR7211:2009. Agregados para concretos - especificações. Rio de Janeiro, 1986.

AGUIAR, M.R.M.P., NOVAES, A.C. **Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos**. Quim. Nova, v. 25, n. 6B, p.1145-1154, Mai/2002.

ANDRADE, L. C.R. **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil**. Viçosa, MG, 2014.96f. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

ARISTIMUNHO, P. B.; BERTOCINI, S.R..**Aplicação de lama de minério de ferro em forma de pó na presença de cimento portland**. Rev. IBRACON Estrut. Mater., São Paulo, v. 5, n. 2, Apr. 2012.

ARAÚJO, C.B. (2006). **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/index>>. Acessado em: 19/01/2008.

ASTM D3282 – 09. In: Annual Book of ASTM Standards. Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. ASTM, West Conshohocken (PA). 2009.

BAUER, L. A. F. NORONHA, M. A. A. FALC.O BAUER, R. J. **Uso de aditivos no concreto**. In: FALC.O BAUER, L. A. Materiais de Construção. Vol. 1. 5ed. 35-63 p. 2012.

BITENCOURT, E. R. **Utilização de Matéria-Prima Alternativa na Fabricação de Tijolos de Argila Vermelha e Branca**. 2004. 50f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville,2004.

BORGES, A. A., **Caracterização da parcela magnética de minério de ferro fosfático de carbonito**. REM – Revista de Escola de Minas, vol. 61, n 1, Ouro Preto. 2008.

BOSCOV, M.E. (2008). Geotecnia Ambiental. Ed. Oficina de Letras. São Paulo, v.1, n 2, 248p.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM – 2030), Brasília: MME, 2010, 1v.

CALLISTER, W.D., Ciência e Engenharia dos Materiais – Uma Introdução, 5a ed. LTC,

pág 303.

CHAVES, Arthur P.; MASINI, Eldon A.; CHIAPPA, Ricardo; OLIVEIRA, Antônio H.; CORDEIRO, Ricardo A. C.; GANIME, José F.; GUIMARÃES, Rogério C.; FERNANDES, Cláudio. Espessamento. In: **Teoria e prática do tratamento de minérios: desaguamento, espessamento e filtragem**. 3. ed. São Paulo: Signus Editora, 2010. v. 2, cap. 2, p. 50-148.

CHAVES, Arthur P.; PERES, Antônio E. C. **Teoria e prática do tratamento de minérios: britagem, peneiramento e moagem**. 4. ed. São Paulo: Signus Editora, 2009. v. 3, 258 p.

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

COUTO, M. L. F. et al. **Formas de ocorrência de alumínio e fósforo em minérios de ferro**. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v. 6, p. 206-209, 2010.

DANA J. D. Manual de Mineralogia, vol 1, 1a ed. Livros Técnicos e Científicos – 1976.

DNPM, Departamento Nacional de Produção Mineral -. SUMÁRIO MINERAL. Disponível em: <<https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2016/mcs2016.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2017.

FERNANDES, D. P. (2010). **Estudo de Estabilização Química, Geo-mecânica e Ambiental das Escórias de Aciaria LD para fins de Aplicação como Material de Lastro Ferroviário em Vias Sinalizadas**. Dissertação de mestrado. Universidade federal de Ouro Preto, MG. 142p.

FIGUEIRA, Hedda V. O.; LUZ, Adão B.; ALMEIDA, Salvador L. M. Britagem e moagem. In: Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 4, p. 143-210.

FONTES, M.P.F., CAMARGO O.A., SPOSITO, G. (2001). **Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente interperizados**. ScientiaAgrícola, v.58, n. 3, p 627-646, jul/set. 2001.

FRANÇA, Silvia C. A.; MASSARANI, Giulio. **Separação sólido-líquido. In: Tratamento de minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 15, p. 637- 678.

GOMES, M. A. **Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro**. Ouro Preto: UFOP. 77p. 2009. (Dissertação de mestrado)

GRUN, E. **Caracterização de Argilas Provenientes de Canelinha/SC e Estudo de Formulações de Massas Cerâmicas**. 2007. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Centro de Ciências Tecnológicas da UDESC. Universidade do Estado de Santa Catarina 2007.

Guerra, A. N. L. P. **Caracterização e utilização de rejeito de minério de ferro PELLETFEED em pavimentos de blocos intertravados de concreto**. 2014. 124 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

GUIMARÃES, N.C (2011). **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 129 p.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE. 1990. Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração: Técnicas de revegetação. Ibama, Brasília. 96 p.

IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração. 1. Edição. 128 p. 2016 Disponível em: <http://www.ibram.org.br> Acessado em: 25/02/2018.

IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Guia para planejamento do fechamento de mina. 1. Edição. 224 p. 2013 Disponível em: <http://www.ibram.org.br> Acessado em: 01/03/2018.

IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Informações e análises da economia mineral brasileira. 7. Edição. 2012. Disponível em: : <http://www.ibram.org.br>. Acessado em: 03/03/2018.

IBRAM -INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - INFORMAÇÕES SOBRE A ECONOMIA MINERAL BRASILEIRA 2015. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005957.pdf>>. Acesso em: 08 mar. 2018.

ICDD – INTERNACIONAL CENTRE FOR DIFFRACTION DATA. Disponível em: <<http://www.icdd.com/>>. Acesso em:09/07/2018.

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Caderno de Diagnóstico: Resíduos Sólidos da Atividade de mineração. IPEA, Brasília, 41p. 2011.

JACOMINO, V. M. F. et al. **Controle Ambiental das Indústrias de Ferro- Gusa em Altos-Fornos a Carvão Vegetal**. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, 2002. p.181-197.

JESUS, Carlos A. G. **Economia mineral do Brasil**. Belo Horizonte: DNPM, 2009. Disponível em:<<https://sistemas.dnpm.gov.br/>>. Acessado em: 30 abr. 2018.

LINS, Fernando A. F. Concentração gravítica. In: Tratamento de minérios. 5. ed.Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 7, p. 301-325.

LUZ A. B.; SAMPAIO J. A.; ALMEIDA S. L. M.; Tratamentos de Minérios, 2004, Centro Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro, pág 4-5.

LUZ, Adão B.; LINS, Fernando A. F. **Introdução ao tratamento de minério**. In: Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 1, p. 3-18.

MACHADO, W. G. F. (2007). **Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeitos da Mineração**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 155p.

MANSOR, M.T.C et al. Caderno de Educação Ambiental 6- Resíduos Sólidos. Secretaria do Meio Ambiente Resíduos Sólidos / Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Coordenadoria de Planejamento Ambiental. São Paulo: SMA, 2010.76p.

MENEZES, R. R., NEVES, G. A., FERREIRA, H. C. **O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 6, n. 2, p. 303-313, 2002.

MENDES, M.B. (2008). **Comportamento geotécnico de uma barragem de rejeito de minério de ferro alteada para montante.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 189p.

MILONAS, J.G. (2006). **Análise do processo de reconstituição de amostras para caracterização do comportamento de barragens de rejeito de minério de ferro em aterro hidráulico.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 146 p.

MME – Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM – 2030). Brasília, DF. MME 2010, v. 1.178 p.

NEVES, C.A.R e SILVA, L.R. Universo da Mineração Brasileira. Ministério de Minas e Energia. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 2007. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br>> Acesso:05mar.2018.

NETTO, S.M. (2001). **Caracterização cristaloquímica da incorporação de ions cobre(II) em goethita (FeOOH) sintética.** Universidade Estadual de Campinas. Tese de doutorado em Ciências. Campinas –SP. Disponível em: <<http://www.miniweb.com.br/geografia/Artigos/geologia/SMNetto.pdf>>. Acesso em: 24/03/18.

NOCITI, D. M. **Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabricação de cerâmicas vermelha.** Guaratinguetá:UNESP. 101 p. 2011. (Dissertação Mestrado)

OLIVEIRA, G. A. G., LANGE, L. C. **Gerenciamento dos Resíduos Sólidos Industriais na Área Mineira da Bacia Hidrográfica do Médio São Francisco.** Saneamento Ambiental Brasileiro. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 2005. p. 1-13.

PEIXOTO, R. A. F.; KAMADA, C. E.; FRANCA, M. B. B. ; SINGULANI, M. (2007). **Peças de Concreto para Pavimentação Fabricados a Partir da Substituição Total da Fração Inerte Natural da Mistura (agregados miúdos e graúdos) por Resíduo Sólido de Siderurgia.** Relatório Técnico, Convênio FCM-CST, Belo Horizonte, Ed. FCM, 88p.

PEREIRA, Eleonardo L. **Estudo do potencial de liquefação de rejeito de minério de ferro sob carregamento estático.** Ouro Preto: UFOP, 2005. 185 p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós-Graduação do Departamento de Construção Civil) –Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

MONTE, Marisa B. M.; PERES, Antônio E. C. **Química de superfície na flotação. In: Tratamento de minérios.** 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 10, p 399-457.

PRESOTTI, Ednelson S. **Influência do teor de ferro nos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro.** Ouro Preto: UFOP, 2002. 109 p. Dissertação de mestrado

(Programa de Pós-Graduação do Departamento de Construção Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2002.

QUARESMA, L.F. - Balanço Mineral Brasileiro 2001, Elemento Ferro. DNPM, Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília, DF.

ROCHA, L.; PERES, A. E. C. **Aproveitamento econômico das lamas de ferro.** Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 62, p. 291-295, jul. – set. 2009.

SAMPAIO, João A.; LUZ, Adão B.; FRANÇA, Silvia C. A. **Separação magnética e eletrostática.** In: Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 9, p. 367-393.

SANTOS, E. P. **Alternativas para o tratamento de ultrafinos de minério de ferro da Mina do Pico/MG por flotação em coluna.** Rio Grande do Sul: UFRGS. 113 p. 2010. (Dissertação de Mestrado)

SILVA, Rodolfo G. O. **Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de ferro.** Ouro Preto: UFOP, 2010. 132 p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós Graduação em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

SILVA, F. L., **Aproveitamento e reciclagem de resíduos da concentração de Minério de Ferro na Produção de Pavers e Cerâmica.** 126f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Rede Temática em Engenharia de Materiais.

TONIETTO, A.; SILVA, J.J.M.C. **Valoração de danos nos casos de mineração de ferro no Brasil.** Revista Brasileira de Criminalística, 1:31-38, 2011.

ECHEVERRI, J. (2012). **Aplicabilidade dos Rejeitos de Mineração de Ferro para Utilização em Filtros de Barragens.** Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-209, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 112p.

VIEIRA, M. G. **Produção de um pellet feed a partir da concentração do rejeito da flotação mecânica da Samarco.** Belo Horizonte: UFMG. 90 p.2008. (Dissertação de Mestrado).

WOLFF, A. P. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da VALE.** Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto. 107 p. 2009. (Dissertação Mestrado).

ZHANG, S. XUE, X. LUI, X. DUAN, P. YANG, H. JIANG, T. WANG, T. LIU, R. Current situation and comprehensive utilization of iron ore tailing resources. Journal of Mining Science. Vol 42. N. 4. 2006.

ZHAO, S. FAN, J. SUN, W. Construction and Building Materials. Construction and Building Materials. Vol.50. 540–548 p. 2014. Disponível em: [www.elsevier.com/locate/conbuildmat](http://www.elsevier.com/locate/conbuildmat) Acessado em 04/07/2014.