



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL GRADUAÇÃO
EM
ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

CARACTERIZAÇÃO DE REJEITO PROVENIENTE DA SEPARAÇÃO
OVERFLOW DE MINÉRIO ITABIRITO, PARA ESTUDO DE POSSIBILIDADE
DE SEU APROVEITAMENTO

RAFAEL HATTLER MURTA

Belo Horizonte
2019

RAFAEL HATTLER MURTA

CARACTERIZAÇÃO DE REJEITO PROVENIENTE DA SEPARAÇÃO
OVERFLOW DE MINÉRIO ITABIRITO, PARA ESTUDO DE POSSIBILIDADE
DE SEU APROVEITAMENTO

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Valéria Cristina Palmeira Zago

RAFAEL HATTLER MURTA

CARACTERIZAÇÃO DE REJEITO PROVENIENTE DA SEPARAÇÃO
OVERFLOW DE MINÉRIO ITABIRITO, PARA ESTUDO DE
POSSIBILIDADE DE SEU APROVEITAMENTO

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais
como requisito parcial para obtenção
do título de Engenheiro Ambiental e
Sanitarista.

Data de aprovação: 04/12/2019

Banca Examinadora:



Profª. Drª. Valéria C. P. Zago – Presidente/Orientadora- CEFET-MG



Prof. Dr. Augusto César da Silva Bezerra – CEFET- MG



MSc. Thaís Helena da Costa Porfirio – ArcelorMittal Brasil

DEDICATÓRIA

À minha família, aos meus amigos e colegas pelo apoio e carinho em meu desenvolvimento pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder a vida e por me guiar, iluminar e abençoar nessa caminhada.

Aos meus pais, Marcos e Helma, pelo carinho, pelo incentivo, pela confiança e pelo exemplo.

Ao meu irmão e amigos, pela boa convivência e amizade.

Aos profissionais Raymundo Moreira, Thaís Porfírio, Jorge Worderson e Valéria Zago, pela orientação, boa vontade, sabedoria, paciência e dedicação em mim depositadas durante a elaboração deste trabalho.

Aos demais professores da graduação, pelos ensinamentos e pela contribuição na minha formação acadêmica e profissional.

E a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a minha formação.

EPÍGRAFE

“Nas grandes batalhas da vida, o primeiro passo para a vitória é o desejo de vencer.”

Mahatma Gandhi (1869-1948)

RESUMO

A mineração no Brasil é uma das atividades do setor industrial que mais produz volume de resíduos, sobretudo os oriundos do processo de extração e de beneficiamento do minério de ferro, o que acarreta um enorme passivo ambiental. É urgente e necessário encontrar alternativas eficazes de aplicação desse material descartado, visando à busca de soluções ambientalmente sustentáveis e economicamente viáveis e à promoção do novo conceito produtivo denominado Economia Circular. Diante deste cenário, o presente trabalho teve a pretensão de estudar a possibilidade do uso da lama proveniente do processo de beneficiamento do itabirito da Mina do Andrade, localizada em Bela Vista de Minas/MG, de propriedade da ArcelorMittal. Para a caracterização tecnológica do rejeito foram feitas análises de granulometria por peneiramento e por difração a laser, análise química por Fluorescência de Raios X - FRX -, análises morfológicas por Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV - e por Espectroscopia de Energia Dispersiva - EDS -, e análise mineralógica por Difração de Raios X (DRX). Os dados da revisão bibliográfica e os resultados obtidos das análises realizadas demonstram que rejeito de lama pode apresentar potencial para ser incorporado na produção de blocos intertravados de concreto, materiais cerâmicos, madeira plástica, pedra composta e pigmentos de óxido de ferro e, como aditivo, na fabricação de cimento, concreto e argamassa.

Palavras-chave: minério de ferro; rejeito; caracterização tecnológica; economia circular.

ABSTRACT

Mining in Brazil is one of the activities of the industrial sector that produces more waste volume, especially from the extraction and beneficiation processes of iron ore, which entails a huge environmental liability. It is urgent and necessary to find effective alternatives for the application of this discarded material, aiming at the search for environmentally sustainable and economically viable solutions and the promotion of the new productive concept called Circular Economy. Given this scenario, the present work aimed to study the possibility of the use of mud from the itabirite beneficiation process of the Andrade Mine, located in Bela Vista de Minas/MG, owned by ArcelorMittal. For the technological characterization of the tailings, were performed particle size analyses by sieving and laser diffraction, chemical analysis by X-Ray Fluorescence (FRX), morphological analyses by Scanning Electron Microscopy (SEM) and Dispersive Energy Spectroscopy (EDS) and mineralogical analysis by X-ray Diffraction (XRD). The data from the literature review and the results obtained from the analyzes performed show that the mud tailings may have potential to be incorporated in the production of concrete blocks, ceramic materials, plastic wood, composite stone and iron oxide pigments and, as an additive, in the manufacture of cement, concrete and mortar.

Keywords: iron ore; tailings; technological characterization; circular economy.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Mapa esquemático com a localização das principais regiões portadoras de minério de ferro em Minas Gerais | 20 |
| Figura 2 - Foto de itabirito com veios de quartzo e de óxidos de ferro..... | 23 |
| Figura 3 - Fluxograma Estéril e Rejeito | 24 |
| Figura 4 - Diferenciação Pilha e Barragem | 25 |
| Figura 5 - Corpos de prova de revestimento asfáltico contendo rejeito | 34 |
| Figura 6 - Pista pavimentada com rejeito da Mina de Conceição/MG | 35 |
| Figura 7 - Projeto da Planta Piloto | 35 |
| Figura 8 - Uso dos rejeitos na construção civil | 36 |
| Figura 9 - Uso os rejeitos em base e sub-base de estradas | 37 |
| Figura 10 - Fluxograma - Economia Circular | 38 |
| Figura 11 - Tijolos confeccionados com rejeito | 39 |
| Figura 12 - Utilização de rejeitos na arte e arquitetura na China | 39 |
| Figura 13 - Processo industrial atual, Mina do Andrade | 42 |
| Figura 14 - Britagem e peneiramento do processo de beneficiamento do Projeto Itabiritos | 43 |
| Figura 15 - Esquema de escoamento interno de um hidrociclone | 44 |
| Figura 16 - Circuito de concentração e deslamagem | 45 |
| Figura 17 - Foto do equipamento Cilas | 47 |
| Figura 18 - Foto do equipamento EDX | 47 |
| Figura 19 - Foto do equipamento MEV e EDS | 48 |
| Figura 20 - Foto do difratômetro | 49 |
| Figura 21 - Microscopia Eletrônica de Varredura x50 | 56 |
| Figura 22 - Microscopia Eletrônica de Varredura x800 | 57 |
| Figura 23 - Microscopia Eletrônica de Varredura x1000 | 57 |
| Figura 24 - Espectroscopia de Energia Dispersiva x300 | 58 |
| Figura 25 - Espectroscopia de Energia Dispersiva x2700 | 59 |
| Figura 26 - Espectroscopia de Energia Dispersiva, antes x300 e depois x2000 | 60 |
| Figura 27 - Espectroscopia de Energia Dispersiva, antes x700 e depois x1800 | 61 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Degradação genérica de reservas de minério de ferro no QF..... | 22 |
| Tabela 2 - Composição dos itabiritos encontrados no QF..... | 23 |
| Tabela 3 – Estudos do uso do rejeito fino de minério de ferro..... | 32 |
| Tabela 4 - Composição química dos minerais encontrados nos rejeitos de minério de ferro | 33 |
| Tabela 5 - Peneiramento do rejeito de lama fina | 51 |
| Tabela 6 - Percentual dos principais elementos e óxidos presentes no rejeito. | 52 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 - Comparativo de saldos do setor mineral X Brasil | 18 |
| Gráfico 2 - Distribuição percentual das substâncias minerais nas exportações brasileiras 2017 em dólares (US\$ FOB) | 19 |
| Gráfico 3 - Quantidade projetada de rejeito da mineração 2010-2030 | 24 |
| Gráfico 4 - Destinação do rejeito de mineração de ferro | 26 |
| Gráfico 5 - Classificação: argila, silte, areia, pedregulho | 51 |
| Gráfico 6 - Granulometria por difração a laser | 53 |
| Gráfico 7 - Difratoograma de Raios X, com diferentes proporções de caulinita (Ca), goethita (Go) e quartzo (Qu) | 62 |

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
BIF - *Banded Iron Formation*
CACE - China Association of Circular Economy
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
COPAM - Conselho Estadual de Política Ambiental
CCP - Compósito Cimentício Projetado
DNPM - Departamento Nacional da Produção Mineral
DRX - Difração de Raios X
EC - Economia Circular
EMF - Ellen MacArthur Foundation
EDS - Espectroscopia de Energia Dispersiva
FDC - Fundação Dom Cabral
FEAM - Fundação Estadual de Meio Ambiente
FIEMG - Federação das Indústrias de Minas Gerais
FRX - Fluorescência de Raios X
IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração
ICDD - International Centre for Diffraction Data
IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
ITM - Instalação de Tratamento de Minério
JCPDS - Joint Committee on Powder Diffraction Standards
LT - Linha de Transmissão
MG - Minas Gerais
NBR - Norma Brasileira
MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura
PDE - Pilhas de Estéril
PIB - Produto Interno Bruto
PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos
QF - Quadrilátero Ferrífero
RMMG - Recursos Minerários de Minas Gerais
ROM - *Run of Mine* (minério bruto)
SEMAD - Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Governo de Minas Gerais

SISEMA - Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos

UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá

UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto

USGS - United States Geological Survey

g – grama

kg - quilo

km² - quilômetro quadrado

kV – quilovolt

mA – miliampère

mm – milímetro

Mtpa – milhões de toneladas

µm – micrometro

°C – grau Celsius

% - porcentagem

Al - alumínio

Al₂O₃ - óxido de alumínio ou alumina

Al(OH)₃ - gibbsita

Al₂Si₂O₅(OH)₄ - caulinita

Ca - cálcio

CaO - óxido de cálcio

Ca(OH)₂ - hidróxido de cálcio

Fe - ferro

Fe₂O₃ - hematita

Fe₃O₄ - magnetita

FeO(OH) - goethita

H₂O - óxido de hidrogênio ou água

K - potássio

K₂O - óxido de potássio

KAl₂(Si₃Al)O₁₀(OH,F)₂ - muscovita

Mn - manganês

MnO₂ - óxido de manganês

Si - silício

SiO₂ - dióxido de silício ou quartzo ou sílica

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 16 |
| 2. OBJETIVOS | 17 |
| 2.1 Objetivo Geral | 17 |
| 2.2 Objetivos Específicos | 17 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| 3.1. Mineração no Brasil - Considerações Gerais..... | 17 |
| 3.1.1 Minas Gerais - Quadrilátero Ferrífero..... | 19 |
| 3.1.1.1 Rocha Itabirito | 22 |
| 3.2 Resíduos da Mineração de Ferro | 23 |
| 3.2.1 Exemplos de Normativas Estaduais Referentes a Rejeitos da Mineração .. | 27 |
| 3.2.2 Aproveitamento dos Rejeitos da Mineração de Ferro..... | 28 |
| 3.2.3 Rejeitos e Economia Circular | 37 |
| 3.3. Mina do Andrade - Projeto Itabiritos | 40 |
| 3.3.1 Processo de Beneficiamento - Atual | 41 |
| 3.3.2 Processo de Beneficiamento - Projeto Itabiritos | 42 |
| 4. METODOLOGIA..... | 43 |
| 4.1 Coleta da amostra de rejeito..... | 43 |
| 4.2 Características do Material em Estudo | 45 |
| 4.3 Caracterização Tecnológica do Rejeito | 46 |
| 4.3.1 Análise Granulométrica por Peneiramento..... | 46 |
| 4.3.2 Análise Granulométrica por Difração a Laser..... | 46 |
| 4.3.3 Análise Química por Fluorescência de Raios X - FRX | 47 |
| 4.3.4 Análise Morfológica por Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV - e Espectroscopia de Energia Dispersiva - EDS | 48 |
| 4.3.5 Análise Mineralógica por Difração de Raios X - DRX..... | 48 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 49 |
| 5.1 Análise Granulométrica por Peneiramento | 49 |
| 5.2 Análise Granulométrica por Difração a Laser | 52 |
| 5.3 Análise Química por Fluorescência de Raios X - FRX..... | 54 |
| 5.4 Análise Morfológica por Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV - e Espectroscopia de Energia Dispersiva - EDS..... | 56 |
| 5.5 Análise Mineralógica por Difração de Raios X - DRX | 62 |
| 6. CONCLUSÕES | 63 |
| 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 64 |
| REFERÊNCIAS..... | 65 |

1. INTRODUÇÃO

No século XVIII, a Revolução Industrial, marcou o crescimento da produção e o desenvolvimento da economia. No entanto, as atividades industriais, com o objetivo de gerar riquezas e bens de consumo, aumentaram significativamente a utilização dos recursos naturais. Porém, até o início do século XX, a questão ambiental e suas consequências não eram consideradas como relevantes pela sociedade.

Isso posto, houve um aumento expressivo na geração de resíduos, cuja disposição provocou, com o passar dos anos, sérios danos ambientais. Um exemplo é o que ocorreu nos primórdios da mineração no Brasil, há 300 anos, primeiramente com o ouro e, posteriormente, com o diamante, os minerais mais cobiçados e explorados (IBRAM, 2016). A sua extração, praticada por garimpo, tradicionalmente executado nas margens dos rios, modificou significativamente a paisagem e produziu irreversíveis prejuízos ao meio ambiente. A flora foi retirada, a fauna contaminada, os rios desviados de seu percurso natural, solo e água com presença de metais pesados, principalmente de mercúrio.

Visando minimizar os impactos ambientais causados pelo processo produtivo, gradativamente, a maioria dos países ocidentais criaram dispositivos legais, utilizados aos poucos também pelo Brasil. Assim, no século XX, preocupados com a disposição dos rejeitos da mineração de ferro, foram construídas as primeiras barragens de contenção, usadas até hoje no país (IBRAM, 2016).

Nos últimos anos, entretanto, a crescente ocorrência de acidentes com essas barragens no país tem alertado a sociedade brasileira, o governo e os empresários do setor minerário que é urgente e necessário buscar soluções para minimizar esse problema e as consequentes tragédias ambientais e sociais. O rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana/MG, em 5/11/2015 e, mais recentemente, em 25/01/2019, da Barragem Córrego do Feijão, em Brumadinho/MG, vem comprovar que essa questão é primordial.

Não há dúvida de que é extremamente relevante o aproveitamento dos rejeitos oriundos da mineração. É crescente o número de pesquisas e de novas tecnologias visando à sua utilização como matéria-prima em outros setores, sobretudo na construção civil, de modo a contribuir com a redução do volume de resíduos e de suas áreas de disposição, minimizando os impactos ambientais,

bem como promovendo a produção de novos materiais e a geração de emprego e de renda (ANDRADE, 2014).

O estudo aqui apresentado baseia-se na necessidade de se buscar soluções sustentáveis e economicamente viáveis, por meio do aproveitamento desses rejeitos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho teve a finalidade de realizar a caracterização física, química e mineralógica do rejeito fino proveniente da deslamagem de itabirito da Mina do Andrade e de colher dados sobre o aproveitamento do rejeito de minério de ferro, para demonstrar a possibilidade de sua utilização. Além disso, contribuir para a promoção de uma destinação mais sustentável desse rejeito e, conseqüentemente, para a redução das pilhas.

2.2 Objetivos Específicos

1. Realizar análise granulométrica do rejeito;
2. Realizar análise mineralógica quantitativa dos elementos químicos e óxidos do rejeito;
3. Apresentar exemplos de pesquisas e aplicações práticas de potencial de aproveitamento do rejeito de minério de ferro;
4. Verificar, a partir da caracterização do rejeito e dos dados pesquisados, a possibilidade de utilização do rejeito de lama como matéria-prima alternativa em outras áreas de produção.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Mineração no Brasil - Considerações Gerais

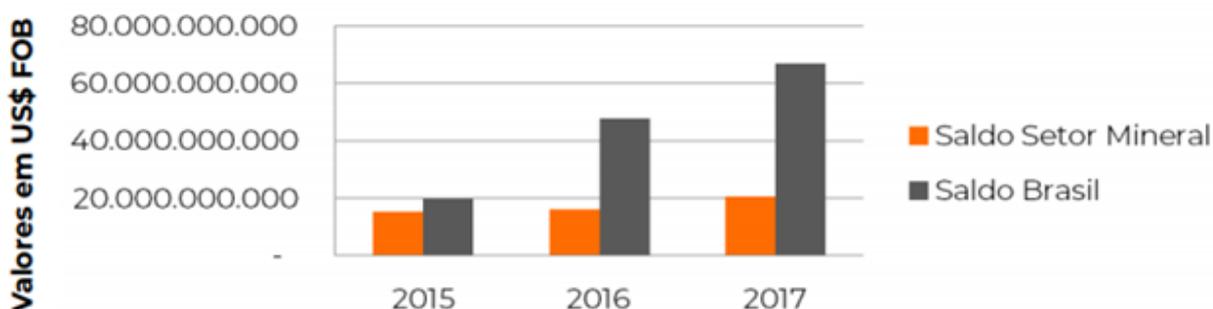
Segundo o Plano Plurianual 2016-2019 (2015), da Secretaria de Planejamento e Investimento Estratégico, o Brasil possui importantes e diversificadas reservas de minerais distribuídas por todo o seu território. A utilização desses recursos é capaz de proporcionar padrões de qualidade de vida para boa parte dos brasileiros, com amplas estruturas de apoio e uma economia consolidada. Destaca ainda que o Brasil está entre um dos maiores

países em nível de conhecimento técnico (geológico, geofísico e geoquímico) e prático, com intensa atividade de exploração mineral.

É possível inferir que o setor minerário é um dos mais importantes para as finanças e a economia do país. Segundo o IBRAM (2018a), as matérias-primas minerais estão na base das cadeias da produção industrial, sendo imprescindíveis no desenvolvimento brasileiro e na qualidade de vida da população ao longo dos séculos.

A indústria extrativa tem participação relevante no Produto Interno Bruto - PIB - e representa 1,4% de todo o PIB brasileiro, além de refletir no mercado de trabalho, gerando cerca de 180 mil empregos diretos e mais de 2,2 milhões de empregos indiretos. Além disso, a indústria mineral contribui para dar superávits à balança comercial do país, tendo exportado, em 2017, um volume superior a 403 milhões de toneladas de bens minerais e gerado uma renda por volta de US\$ FOB 28,3 bilhões, o que representou 13% das exportações totais do Brasil (IBRAM, 2018a) (Gráfico 1).

Gráfico 1 - Comparativo de saldos do setor mineral X Brasil

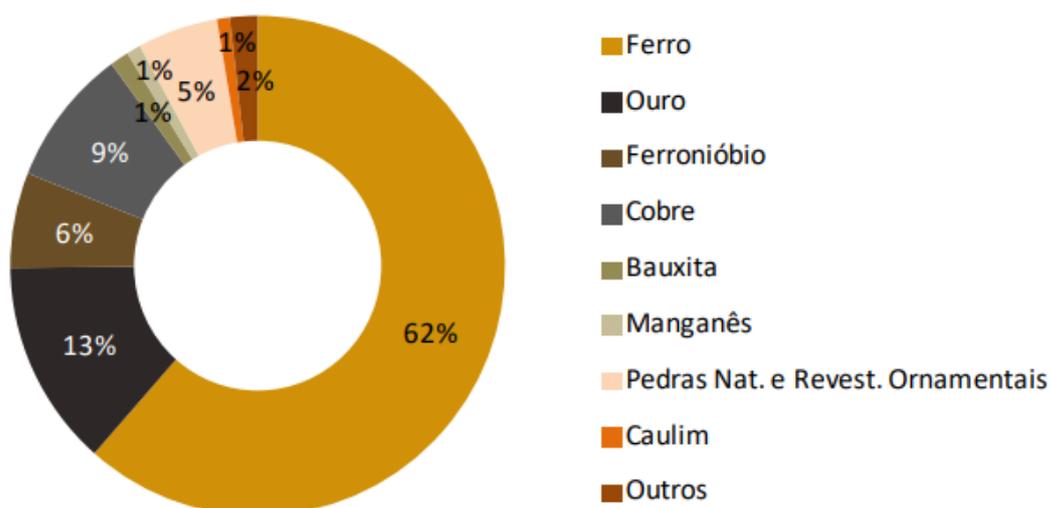


Fonte: IBRAM, 2018a

O produto que muito tem contribuído para o alcance desses resultados é o minério de ferro, considerado o recurso mineral mais valioso do mundo, tendo em vista estar na base da siderurgia, responsável pela fabricação de produtos de consumo final de grande competitividade e valor global. Aproximadamente 98% de todo o minério de ferro extraído no mundo destina-se à produção do aço, matéria-prima na indústria de transportes e automobilística, na engenharia civil, na produção de aparelhos eletroeletrônicos e em vários outros setores (CAXITO & DIAS, 2018).

Importante citar que o Brasil ocupa o terceiro lugar na produção e exportação mundial desse mineral. O minério de ferro está em segundo lugar nas exportações do país, superado apenas pela soja, em valores quantitativos de receita. Destaca-se na balança comercial da mineração por representar cerca de 62% do total de substâncias minerais exportadas brasileiras, conforme mostra o Gráfico 2 (IBRAM, 2018b).

Gráfico 2 - Distribuição percentual das substâncias minerais nas exportações brasileiras 2017 em dólares (US\$ FOB)



Fonte: IBRAM, 2018b

Minas Gerais ocupa lugar de destaque nesse contexto. É o estado minerador mais importante do país, responsável por aproximadamente 53% da produção brasileira de minerais metálicos e 29% de minérios em geral. Em 2013, Minas obteve um saldo de exportação e importação de bens minerais superior a US\$ 17 bilhões (IBRAM, 2014).

3.1.1 Minas Gerais - Quadrilátero Ferrífero

No Estado de Minas Gerais, os principais depósitos de minério de ferro ocorrem em três regiões: Quadrilátero Ferrífero, Conceição do Mato Dentro e Nova Aurora (Porteirinha), conforme ilustra a Figura 1 (CAXITO & DIAS, 2018).

Figura 1 - Mapa esquemático com a localização das principais regiões portadoras de minério de ferro em Minas Gerais



Obs: A) Quadrilátero Ferrífero B) Conceição do Mato Dentro, e C) Nova Aurora.

Fonte: CAXITO & DIAS, 2018

A região que mais se sobressai, conhecida mundialmente por possuir grandes reservas de ferro, depósitos de ouro e diversas e importantes minas, é a chamada Quadrilátero Ferrífero - QF. Segundo Costa (2013), essa denominação foi adotada pela primeira vez por Orville Derby, em 1910, no Congresso Internacional de Geologia, em Estocolmo. Na década de 1950, pesquisadores do serviço geológico dos Estados Unidos, United States Geological Survey - USGS - e do Departamento Nacional da Produção Mineral - DNPM - mapearam a região e avaliaram as suas reservas, o que resultou em publicações até hoje utilizadas como referência em estudos geológicos do Quadrilátero Ferrífero (AZEVEDO *et al.*, 2012).

O Quadrilátero Ferrífero possui área de aproximadamente 7.000km² e está localizado na Serra do Espinhaço, na região Central de Minas Gerais, ao sul de Belo Horizonte. É uma das regiões mais estudadas no país, em termos de cartografia geológica, por possuir uma ampla variedade de minerais com elevado valor no mercado mundial. Por mais de 300 anos, ali se realiza intensa atividade minerária, principalmente de ouro e de ferro. No Ciclo do Ouro, período em que a exportação do ouro era considerada a principal atividade econômica do Brasil,

estima-se que cerca de 1.000 t desse mineral tenha sido extraído do Quadrilátero Ferrífero (CAXITO & DIAS, 2018).

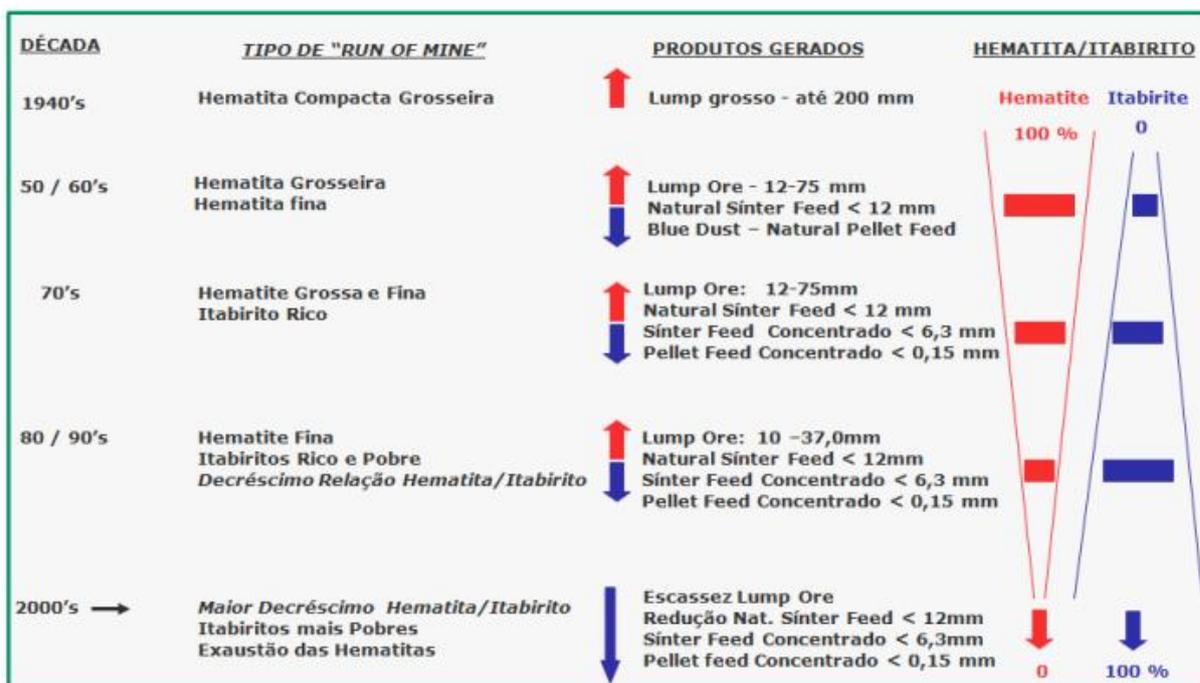
De acordo com Mourão (2008), são dois os principais tipos de formações ferríferas exploradas atualmente no Quadrilátero Ferrífero: os hematíticos, com alto teor de ferro, e os itabiríticos ou minérios quartzosos, com teores de ferro mais baixos. O minério hematítico é mais homogêneo, constituído basicamente de hematita, apresentando cerca de 60% de teor médio de ferro. Já os itabiritos são corpos mais heterogêneos, constituídos pela alternância de óxidos de ferro, como hematita e magnetita, e quartzo (sílica), com teores de ferro variando entre 25% e 55%.

Além dos hematíticos e dos itabiríticos, são encontrados no Quadrilátero Ferrífero outros tipos de minério de ferro mais pobres em ferro e, portanto, de menor valor econômico, como a canga e o minério de rolamento. Destaca-se que a canga, apesar ser um minério secundário, tem sido aproveitada nas usinas de carvão vegetal, devido à sua porosidade (IBRAM, 2012).

Em função da grande demanda por minério de ferro no mundo atual e das hematitas se encontrarem em processo de exaustão nas reservas dessa região, gradativamente foram sendo aproveitados os itabiritos, que passaram a ter destaque na produção minerária do nosso Estado e do país. Ressalta-se que a exploração dos itabiritos de Minas Gerais e a descoberta da Província Mineral de Carajás, no Pará, foram os principais incentivos para o crescimento dos recursos econômicos do Brasil de 1950 a 2000 (MOURÃO, 2008).

A participação significativa do aproveitamento dos itabiritos, nos últimos anos, pode ser verificada na Tabela 1, resultado de um estudo elaborado por Mourão (2008).

Tabela 1 - Degradação genérica de reservas de minério de ferro no QF



Fonte: MOURÃO, 2008

Como se pode verificar, enquanto a participação da hematita vem se reduzindo, é crescente a participação do itabirito na exploração das reservas de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero.

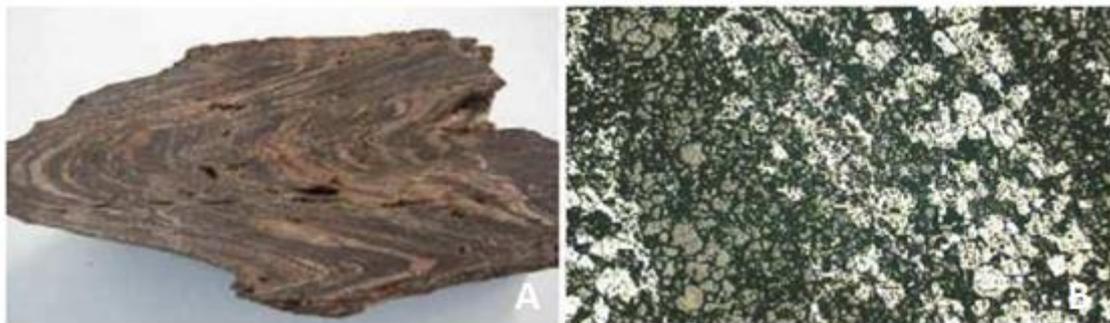
3.1.1.1 Rocha Itabirito

A denominação itabirito foi citada pela primeira vez em 1822, na publicação intitulada "Quadro Geognóstico do Brasil", do conhecido geólogo alemão Wilhelm Ludwig von Eschwege, que definiu certos tipos de rocha desconhecidas na Europa, como itabirito, itacolomito e tapanhoacanga, hoje conhecida por canga. O nome itabirito foi adotado em 1923 pelo antigo Arraial de Itabira do Campo, atual Município de Itabirito, em Minas Gerais, onde essa formação é encontrada em abundância. Itabirito é o termo normalmente utilizado no Brasil para esse tipo de formação e, em inglês, é *Banded Iron Formation* - BIF (RENGER, 2005).

O itabirito é uma rocha metamórfica e fortemente oxidada, com baixo teor de ferro, cerca de 25% a 55%, constituído pela alternância de veios de óxidos de ferro, como hematita (principal), goethita e magnetita e de quartzo ou sílica, que podem apresentar espessuras variadas (TAVARES, 2012). A parte ferruginosa

apresenta coloração escura, e a parte clara é composta quase totalmente por quartzo (Figura 2).

Figura 2 - Foto de itabirito com veios de quartzo (A) e de óxidos de ferro (B)



Fonte: TOLENTINO, 2010

No Quadrilátero Ferrífero os itabiritos apresentam diversos tipos de composição (Tabela 2).

Tabela 2 - Composição dos itabiritos encontrados no QF

| TIPOS DE FORMAÇÃO FERRÍFERA | COMPONENTES MINERALÓGICOS PRINCIPAIS | COMPONENTES ACESSÓRIOS |
|-----------------------------|---|---|
| Itabirito comum | Hematita, martita, kenomagnetita, quartzo | Clorita, sericita, dolomita ferroana, caolinita, cianita, Óxidos de Mn, sulfetos, apatita, pirofilita |
| Itabirito dolomítico | Martita, hematita, kenomagnetita, dolomita ferroana | Calcita, grunerita-cummingtonita, clorita, stilpnomelana, biotita, tremolita, actinolita, quartzo (chert), sulfetos, pirofilita |
| Itabirito anfíbolítico | Martita, hematita, kenomagnetita, maghemita, grunerita-cummingtonita, tremolita, actinolita, quartzo. | carbonato, talco, dolomita ferroana, egirina, biotita, Mg-riebeckita, kupferita, sulfetos |

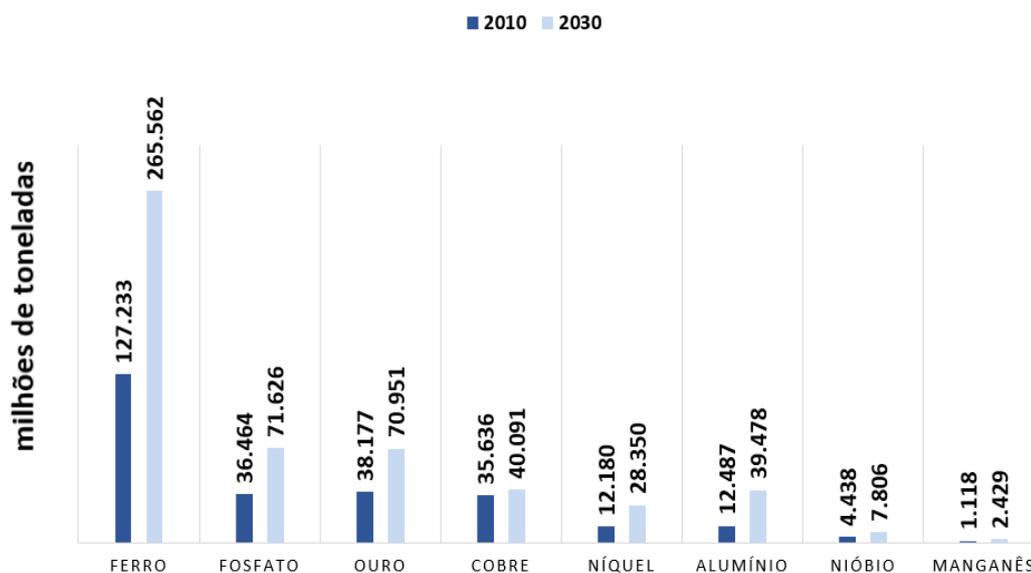
Fonte: ROSIÈRE & CHEMALE JR, 2000

3.2 Resíduos da Mineração de Ferro

Em todo e qualquer processo produtivo é inevitável haver geração de resíduos. Então se pode afirmar que para cada extração de uma substância mineral há uma tipologia de rejeito correspondente (IBRAM, 2016).

A mineração está entre as atividades do setor industrial que mais produz resíduos, destacando-se o processo de extração do ferro. Por meio dos processos de lavra e de beneficiamento desse minério, que envolve uma série de operações, são geradas milhões de toneladas de rejeitos (Gráfico 3) (MENDES, 2018).

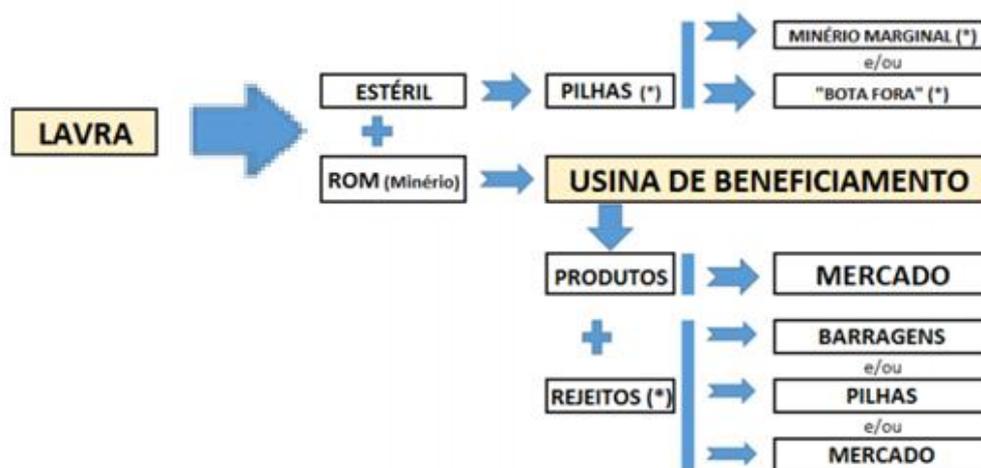
Gráfico 3 - Quantidade projetada de rejeito da mineração 2010-2030



Fonte: MENDES, 2018

Na obtenção do minério de ferro, ressalta-se a existência de dois grandes grupos de resíduos: os estéreis, removidos para viabilizar a extração do minério, isto é, parte do minério que não tem aplicação financeira, e os rejeitos, que resultam do processo de tratamento e/ou beneficiamento do minério (SILVA *et al.*, 2012) (Figura 3).

Figura 3 - Fluxograma Estéril e Rejeito



(*): Outras cadeias produtivas e/ou uso futuro

Fonte: ARCOVERDE *et al.*, 2018

Conforme o tipo de minério processado, há diferença nas características mineralógicas e geotécnicas apresentadas, o que indica a existência de rejeitos de diferentes composições físicas e químicas. Segundo Espósito (2000), “Os rejeitos, quando de granulometria fina, são denominados lama, e, quando de granulometria grossa (acima de 0,074mm), são denominados rejeitos granulares”.

De maneira geral, o estéril é disposto em pilhas, denominadas Pilhas de Estéril - PDE -, e o rejeito obtido do processo de beneficiamento do minério em reservatórios criados por diques de contenção ou barragens, feitas com o próprio rejeito ou com estruturas de suporte. Esses dois modos de disposição são exemplificados na Figura 4.

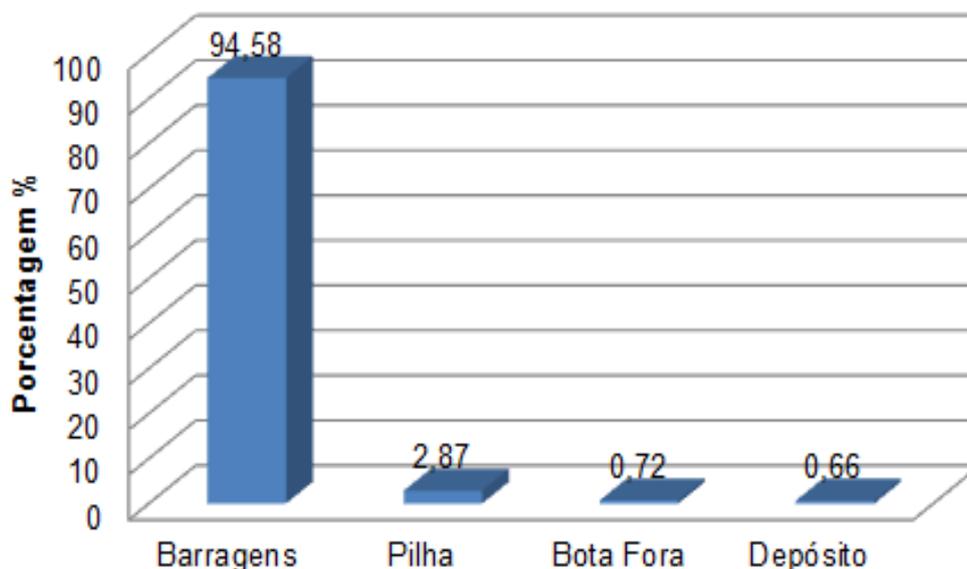
Figura 4 - Diferenciação Pilha e Barragem



Fonte: ARCOVERDE *et al.*, 2018

As barragens caracterizam a principal forma de disposição de rejeitos da mineração no Estado de Minas Gerais (Gráfico 4) (BRANDÃO, 2018).

Gráfico 4 - Destinação do rejeito de mineração de ferro



Fonte: ARCOVERDE *et al.*, 2018

Nesse contexto e em virtude dos enormes volumes de rejeitos envolvidos, é necessário haver um planejamento criterioso quanto à segurança e à estabilidade dos sistemas de contenção. Por serem estruturas de grande porte, as barragens podem apresentar danos potenciais em decorrência do seu rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mal monitoramento e fiscalização (ANDRADE, 2014).

Riscos e impactos ambientais são comumente associados às barragens de rejeitos. Hoje acidentes envolvendo o seu rompimento é notícia nos meios de comunicação, principalmente em Minas Gerais, muitas vezes causados por problemas de gestão de segurança. Lamentavelmente são inestimáveis os prejuízos causados pela ruptura de uma barragem, com perda da fauna e da flora local e, até mesmo, de vidas humanas (IBRAM, 2016).

Além dos danos ambientais, como a degradação e a remoção de camadas do solo, a supressão da flora e da fauna, o assoreamento e a contaminação dos cursos d'água, rios e mananciais, é fundamental salientar os sérios impactos de natureza social, como a extinção de comunidades próximas aos locais em que as barragens estão inseridas, a destruição de edificações e moradias, o comprometimento da qualidade da água destinada ao abastecimento público e, sobretudo, o comprometimento da qualidade de vida local. (CARVALHO, 2012).

Os rompimentos da Barragem do Fundão, em 5/11/2015, em Mariana, e da Barragem do Córrego do Feijão, em 25/01/2019, em Brumadinho, no Estado de Minas Gerais, mostram que há várias e importantes lições a serem aprendidas pelo setor minerário, sobretudo no que diz respeito ao grau de instabilidade das barragens, aos relatórios e equipamentos de monitoramento, que, devem ser continuamente revisados e atualizados.

3.2.1 Exemplos de Normativas Estaduais Referentes a Rejeitos da Mineração

Cabe destacar as seguintes normas de regulamentação em Minas Gerais, a respeito de ações relativas à implantação de barragens, à redução de impactos ambientais e ao aproveitamento de rejeitos (BRANDÃO, 2018).

A Lei Estadual nº 21.972, de 21 janeiro de 2016, que dispõe sobre o Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - SISEMA - e incentiva o desenvolvimento sustentável e a melhoria da qualidade ambiental através da recuperação e preservação dos recursos naturais.

“Art. 30 – O Poder Executivo fomentará, por todos os meios, alternativas à implantação de barragens, com a finalidade de promover a preservação do meio ambiente e a redução dos impactos ambientais gerados por empreendimentos de mineração.” (MINAS GERAIS, 2016, [s.p])

A Lei Estadual nº 19.976/2011, de 27 de dezembro de 2011, recém alterada pela Lei Estadual nº 22.796/2017, e 28 de dezembro de 2017, que assim dispõe em seu Art.8-A:

“Art. 8º-A: O Poder Executivo poderá conceder desconto de até 70% (setenta por cento) do valor da TFRM a que se refere o caput do art. 8º, na forma e nos prazos previstos em regulamento.

Parágrafo único – O desconto a que se refere o caput poderá ser concedido pelo Poder Executivo, na forma, nos prazos e nas condições previstos em regulamento, para o contribuinte que utilizar tecnologia alternativa à disposição em barragem para a destinação ou para o aproveitamento econômico dos rejeitos ou resíduos de mineração.” (MINAS GERAIS, 2011, [s.p])

A Deliberação Normativa COPAM nº 228, de 28 de novembro de 2018, que define critérios para as atividades de disposição de rejeito e estéril da mineração em cava de mina e de reaproveitamento desses materiais quando dispostos em pilha, barragem ou em cava.

No início de 2019, houve um momento evidente de transformação no que tange à segurança das barragens de contenção espalhadas por todo o Brasil, com regulamentações federal e estadual mais rígidas e detalhadas, em função do desastre ocorrido em Brumadinho, com o rompimento de uma barragem de rejeitos. A Resolução Conjunta SEMAD/FEAM nº 2.784, de 21 de março de 2019, surge com a função de descaracterização de todas as barragens em Minas Gerais de contenção de rejeitos e resíduos que foram confeccionados pelo método a montante ou alteamento a montante, o mesmo método utilizado na barragem de Brumadinho. E assim dispõe:

“Determina a descaracterização de todas as barragens de contenção de rejeitos e resíduos, alteadas pelo método a montante, provenientes de atividades minerárias, existentes em Minas Gerais e dá outras providências.”
(MINAS GERAIS, 2019, [s.p])

3.2.2 Aproveitamento dos Rejeitos da Mineração de Ferro

É importante se ter o entendimento de que o rejeito de hoje pode ser o minério de amanhã, pois as tecnologias vão sendo aprimoradas e se torna economicamente viável o aproveitamento do rejeito (IBRAM, 2016). Exemplo interessante do que se propõe hoje é o reprocessamento de barragens que há muitos anos estavam desativadas, mas que ainda possuem uma alta porcentagem de minério de ferro para comercialização.

A preocupação com a preservação do meio ambiente, combinada com a escassez de algumas matérias-primas e, muitas vezes, à dificuldade de recuperação do ferro contido nas lamas geradas pelo beneficiamento e/ou tratamento do minério está incentivando a realização de pesquisas que visam ao aproveitamento dos rejeitos em outros processos produtivos.

Estudos têm comprovado que os rejeitos do minério de ferro apresentam ótima oportunidade de serem aplicados na fabricação de insumos para a construção civil e na produção de material para fins rodoviários.

De acordo com os resultados analisados por Nociti (2011), os rejeitos oriundos da atividade mineradora de ferro, tanto o arenoso quanto a lama, podem ser utilizados na produção de cerâmicas vermelhas, como telhas, tijolos, blocos e elementos vazados, sobretudo em cerâmicas de vedação, ou seja, elementos sem função estrutural.

Tavares (2012) estudou a viabilidade técnica de produção de pigmentos inorgânicos utilizando a lama proveniente do beneficiamento do itabirito. Comprovou que, devido às suas características muito finas, esse rejeito pode ser empregado na produção de tintas, cujas características de cobertura, tingimento, viscosidade, aderência, secagem e acabamento são equivalentes as que hoje estão disponíveis no mercado. São inúmeras as suas aplicações, como em substratos metálicos, substratos cerâmicos, substratos de madeira (madeira e madeira plástica) e em blocos intertravados.

Conforme concluíram Bauer *et al.* (2012), os rejeitos provenientes da extração de minério de ferro com alto teor de finos, também chamado de material pulverulento, são apropriados para serem utilizados como aditivo na produção de concreto, podendo modificar, de forma positiva, suas características físicas e mecânicas.

Aristimunho & Bertocini (2012) moldaram corpos-de-prova com várias proporções de lama em pó de minério de ferro, cimento e areia e os submetem a ensaios físicos e mecânicos. Os resultados obtidos demonstraram que o rejeito, sobretudo quando aplicado em substituição de 20% da areia, melhora o desempenho mecânico das argamassas produzidas, comprovando assim a viabilidade técnica do uso da lama em pó para a fabricação desse material.

Já Souza (2013) testou a aplicação de rejeito proveniente da exploração da rocha itabirito no processo de obtenção de madeira plástica. A madeira plástica obtida, além de possuir as propriedades físicas desejadas e apresentar boa resistência à radiação solar, pode durar por mais de 80 anos, sem perdas físicas significativas. Seu viés ecológico é muito grande, pois permite reciclar polímeros que demorariam centenas de anos para se decomporem.

Estudo realizado por Sant'ana Filho (2013) comprovou que o rejeito da mineração de ferro, apesar de apresentar granulometria composta por partículas de tamanho reduzido, mostrou-se adequado para a produção de blocos intertravados, também chamados de *pavers*, elementos pré-moldados de concreto ou elementos de concreto para pavimentação. Esses blocos são ideais para serem utilizados em vias públicas urbanas, ciclovias, calçadas de casas e condomínios, pátios de manobra, garagens, praças e outros pavimentos.

Resultados alcançados por Bastos (2013) permitiram avaliar que os referidos rejeitos podem ser aplicados na composição de misturas para camadas de pavimentos urbanos ou rodovias, quando estabilizados química ou granulometricamente, apresentando vantagem do ponto de vista ambiental.

Conforme afirmou Silva (2014), os rejeitos de concentração de minério de ferro mostraram-se tecnicamente viáveis para substituírem agregados finos e grossos de blocos intertravados de concreto e de cerâmicas vermelhas, com ganhos tecnológicos e econômicos, resultados compatíveis aos encontrados na literatura e de acordo com as normas brasileiras.

Lameiras & Silva (2015) investigaram o processo de fabricação de pedras compostas com a aplicação de resíduo de minério de ferro e comprovaram que os rejeitos arenoso e argiloso podem ser utilizados na sua produção. A pedra composta, também conhecida como pedra de engenharia ou concreto polimérico, é bastante comercializada na Europa e nos Estados Unidos. Possui aparência semelhante à pedra natural e é usada para revestimento de parede e pavimentação.

Magalhães (2018) analisou a possibilidade do uso do rejeito proveniente do beneficiamento de minério de ferro como material para substituição parcial do cimento Portland. De maneira geral, os resultados foram positivos no que tange à sua utilização como material pozolânico, gerando um produto até mesmo mais resistente a agentes químicos, o que demonstra a sua viabilidade para uso na indústria cimenteira.

Chen *et al.* (2011) avaliaram a possibilidade de fabricar tijolos utilizando o rejeito de minério de ferro da província de Hubei, na China. Além dos rejeitos foram adicionados argila e cinza volante para melhorar a qualidade do produto. Foram produzidos tijolos, cujas características de resistência mecânica e absorção de água, bem como propriedades físicas e mecânicas, como durabilidade, foram bem conformadas ao padrão chinês exigido para tijolos queimados comuns.

Em busca de agregados alternativos mais baratos e menos prejudiciais ao meio ambiente, Huang *et al.* (2013) pesquisaram sobre o uso do rejeito de ferro em substituição à areia de microssílica (SiO_2) na produção de Compósito Cimentício Projetado - CCP. Constaram que os CCPs produzidos com a adição dos rejeitos podem apresentar propriedades de tração e compressão

comparáveis aos fabricados com areia de microssílica (SiO_2), desde que o tamanho dos rejeitos seja adequado. Dessa maneira, foi testado e comprovado o uso de resíduos de minério de ferro como agregado na confecção de CCPs altamente dúcteis e verdes.

Também foi objetivo de Shettima *et al.* (2016) avaliar o uso do rejeito oriundo da extração de minério de ferro como substituto da areia natural na produção de concreto. Foram realizados vários testes com misturas de concreto contendo 25%, 50%, 75% e 100% do rejeito, e os resultados indicaram boa resistência, quando comparados aos do concreto convencional, destacando que a melhor proporção encontrada foi de 25%. Recomendaram, portanto, a utilização do rejeito como agregado na produção de concreto em substituição à areia, minimizando os custos e o esgotamento dos recursos naturais.

De acordo com Luo *et al.* (2016), há possibilidade de utilizar rejeitos de minério de ferro para substituir a argila como matéria-prima na produção de clínquer, um insumo básico do cimento Portland. Os resultados encontrados atestam que o produto fabricado com o rejeito apresenta maior reatividade e capacidade de combustão, além de desempenho físico e mecânico semelhante ao produzido com argila e que o uso do rejeito não afetou a formação de fases mineralógicas características do cimento Portland.

Fontes *et al.* (2016) analisaram a utilização do rejeito de minério de ferro na produção de argamassa, substituindo, em variadas proporções, o agregado natural pelo rejeito. Os resultados alcançados demonstraram que as argamassas produzidas são mais apropriadas para revestimento e assentamento de tijolos, apresentando melhores propriedades mecânicas quando comparadas às convencionais.

Estudo realizado por Galvão *et al.* (2018) propôs o uso de rejeitos de minério de ferro como pigmento na produção de tinta, a que deram a denominação de tinta sustentável. A tinta apresentou características únicas, como opacidade, cor avermelhada, durabilidade e custo de produção reduzido.

De maneira resumida o uso do rejeito fino pode ser aproveitado e reciclado na produção de insumos para a construção civil, com ganhos tecnológicos e econômicos, como aditivo ou incorporado na fabricação dos seguintes materiais (Tabela 3).

Tabela 3 – Estudos do uso do rejeito fino de minério de ferro

| Utilização do Rejeito | Autor e Ano |
|----------------------------------|---|
| Aditivo em argamassa | Magalhães (2018) |
| Aditivo em cimento | Andrade (2014) |
| Aditivo em concreto | Andrade (2014), Bauer <i>et al.</i> (2012) |
| Blocos intertravados de concreto | Sant'ana Filho (2013) e Silva (2014) |
| Materiais cerâmicos | Andrade (2014), Chen <i>et al.</i> (2011), Nociti (2011), Silva (2014), Zhang <i>et al.</i> (2006) e Yellishetty <i>et al.</i> (2008) |
| Madeira plástica | Souza (2013) |
| Pedra composta | Lameiras & Silva (2015) |
| Pigmentos de óxidos de ferro | Tavares (2012) e Galvão <i>et al.</i> (2018) |

Diante do exposto, é relevante destacar que, nas últimas décadas, o aproveitamento dos rejeitos da mineração de ferro tem sido o foco de inúmeros debates, estudos e pesquisas. Nesse sentido, a caracterização e a granulometria associada às composições químicas e mineralógicas desses resíduos têm sido de fundamental importância para concluir se eles podem ser reaproveitados na própria usina ou em outro setor de produção industrial (ANDRADE, 2014).

Vale ressaltar que, primeiramente, os rejeitos devem passar por processos de classificação de acordo com a NBR 10004/2004, visando tanto à análise de suas características de periculosidade quanto a aspectos ambientais. Por meio dessa norma técnica, os resíduos são classificados em: Classe I (perigosos), Classe II-A (não inertes) e Classe II-B (inertes) (SANT'ANA FILHO, 2013). De acordo com dados fornecidos pela ArcelorMittal, o rejeito fino objeto deste estudo pode ser classificado como não perigoso, Classe II, por não haver, em suma, adição de químicos ou outras substâncias ao processo.

De acordo com Silva (2014) e Tavares (2012), os rejeitos oriundos da extração do minério de ferro apresentam, em geral, a seguinte composição mineralógica: caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), quartzo (SiO_2), muscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$), hematita (Fe_2O_3) e magnetita (Fe_3O_4), como demonstra a Tabela 4.

Tabela 4 - Composição química dos minerais encontrados nos rejeitos de minério de ferro

| Mineral | Fórmula Química | Composição |
|-----------|---|--|
| Caulinita | $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ | 39,5% SiO_2 46,5% de Al_2O_3 14,0% de H_2O |
| Goethita | $\text{FeO}(\text{OH})$ | 90,0% de Fe_2O_3 10,0% de H_2O |
| Quartzo | SiO_2 | 46,74% de Si 53,26% de O |
| Muscovita | $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$ | 45,0% de SiO_2 38,5% de Al_2O_3 12,0% de K_2O 4,5% de H_2O |
| Hematita | Fe_2O_3 | 70,0% de Fe 30,0% de O |
| Magnetita | Fe_3O_4 | 31,0% de FeO 69,0% de Fe_2O_3 |

Fonte: Adaptado de NAVARRO *et al.*, 2017

Inúmeros pesquisadores já comprovaram que as características químicas dos rejeitos do minério de ferro são muito próximas às requeridas para a fabricação de produtos cerâmicos e que, devido sobretudo à sua granulometria e resistência, podem ser utilizados na área de construção civil e de pavimentação. (ZHANG *et al.*, 2006).

Por fim, com o objetivo de exemplificar o aproveitamento do rejeito de minério de ferro em Minas Gerais e sua transformação em produtos na área de construção civil e pavimentação, serão apresentadas a seguir ações realizadas com sucesso por três mineradoras do Quadrilátero Ferrífero.

A Minerita - Minérios Itaúna Ltda. - é produtora de minério de ferro oriundo da mina Lagoa das Flores, localizada em Itatiaiuçu/MG, em operação desde 1971. Com a utilização de rejeitos da mineração, visando à proteção do meio ambiente e à diminuição dos impactos significativos adversos de seus processos, destacadamente a poluição e o esgotamento de recursos naturais,

fundou a empresa Blocoita, que fabrica artefatos pré-moldados de concreto, blocos e lajotas para pisos (MINERITA, 2019).

Em 2013, a Minerita foi agraciada com o Prêmio Boas Práticas Ambientais, concedido pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Governo de Minas Gerais - SEMAD - e pela Federação das Indústrias de Minas Gerais - FIEMG. A empresa recebeu esse prêmio pelo sucesso no aproveitamento de rejeitos de minério de ferro na produção de blocos pré-moldados. No ano seguinte, em reconhecimento às pessoas e às organizações que contribuem para a melhoria da qualidade de vida em Minas Gerais, a Minerita ganhou o Prêmio Bom Exemplo - Categoria Meio Ambiente, uma parceria da TV Globo Minas, Fundação Dom Cabral - FDC -, Federação das Indústrias de Minas Gerais - FIEMG - e jornal O Tempo. O prêmio foi concedido pelo projeto "Recuperação de areia fina de mineração para a construção", elaborado pela empresa (MINERITA, 2019).

Por sua vez, a mineradora Vale está realizando estudos sobre a viabilidade técnica do aproveitamento de rejeitos de minério de ferro em pavimentos rodoviários. Em parceria com a Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI -, utilizou 1200t de rejeito da barragem da Mina de Conceição, como agente redutor do consumo de cimento em camadas de base e sub-base de pistas experimentais na própria mina, como mostra as Figuras 5 e 6 (RESENDE, 2018).

Figura 5 - Corpos de prova de revestimento asfáltico contendo rejeito



Fonte: RESENDE, 2018

Figura 6 - Pista pavimentada com rejeito da Mina de Conceição/MG



Fonte: RESENDE, 2018

Outra medida importante da mineradora para garantir a utilização dos rejeitos arenoso e fino e promover a Economia Circular é a elaboração de um projeto de usina piloto de produção de pré-moldados de concreto para a construção civil, na Mina do Pico, em Itabirito. A produção inicial se destina a pisos intertravados para consumo interno e doação às comunidades vizinhas (Figura 7) (Resende, 2018).

Figura 7 - Projeto da Planta Piloto



Fonte: RESENDE (2018)

Além dessas ações, a Vale está promovendo dois projetos de aproveitamento dos rejeitos de mineração de ferro. Um deles é o Projeto Vale Quartz, que visa ao uso dos rejeitos com alto teor de sílica na produção de rochas

compostas, destinadas à fabricação de bancadas de cozinha, banheiro e pisos, utilizando 93% de rejeito e 7% de resina por placa produzida. A expectativa da empresa é consumir cerca de 30,2 milhões de toneladas de rejeito por ano para atender a demanda mundial de rochas compostas. O outro é o Projeto Materiais para Aplicações Tecnológicas, que objetiva a obtenção de nanotubos naturais, a partir da caulinita presente nos rejeitos.

Já a Samarco, desde 2005, estuda formas e desenvolve soluções para o aproveitamento dos rejeitos provenientes do beneficiamento de minério de ferro. Em 2013 e 2014, utilizou blocos produzidos com 30% de rejeito arenoso no calçamento de unidades industriais da empresa e do Bairro Porto Grande, em Guarapari, no Espírito Santo (SAMARCO, 2019).

Em 2017, em parceria com a BeGreen, fazenda urbana localizada no Boulevard Shopping, em Belo Horizonte/MG, a mineradora forneceu rejeito arenoso para a produção de blocos intertravados usados no piso do empreendimento. A empresa Uni-Stein foi a responsável pela fabricação dos blocos, que apresentam segurança e durabilidade de um bloco convencional, além de ser mais ecológico. A Samarco também forneceu lama para a produção de madeira plástica, chamada Ecomadeira, utilizada na confecção das mesas e das cadeiras ali expostas. Além disso, a lama foi empregada como pigmento para dar coloração à madeira (SAMARCO, 2019).

Na Figura 8 são apresentados exemplos de casas construídas a partir de blocos, cujo material é composto de frações granulosas e finas provenientes do rejeito do processo de beneficiamento do minério de ferro.

Figura 8 - Uso dos rejeitos na construção civil



Fonte: ARCOVERDE *et al.*, 2018

Outra aplicação seria como uso na base e sub-base de estradas, como pode ser visto na Figura 9. Dependendo das especificações e do enquadramento, o material pode sofrer processo de beneficiamento prévio, britagem e peneiramento, para depois ser utilizado *in natura* sobre camadas.

Figura 9 - Uso os rejeitos em base e sub-base de estradas



Fonte: ARCOVERDE *et al.*, 2018

Vale frisar que tanto a Minerita como a Vale e a Samarco, além de repensarem o aproveitamento dos rejeitos oriundos da extração do minério de ferro, têm como objetivo apoiar a diversificação da economia dos municípios onde suas minas estão localizadas, com foco na promoção de soluções sustentáveis e na busca da melhoria contínua do seu sistema de gestão.

3.2.3 Rejeitos e Economia Circular

Como já foi citado, o crescimento populacional e, conseqüentemente, o aumento da demanda por recursos naturais, que são finitos, nos despertam para a discussão sobre o impacto do descarte no meio ambiente. Nesse sentido, temos o grande desafio de desenvolver uma economia mais sustentável, com formas eficientes de gestão dos recursos secundários. Segundo Liu (2018), é necessário promover mudanças, repensar no nosso atual sistema produtivo, que se baseia em dois principais pontos: recursos infinitos e capacidade regenerativa do planeta. Esse conceito de produção, chamado de Economia Linear, se caracteriza no modelo de extrair, transformar, usar e descartar, gerando resíduos que não recebem novos usos e se acumulam exponencialmente.

Na busca de soluções para minimizar o consumo de produtos, a geração de lixo e a conseqüente poluição ambiental, além da eliminação do desperdício e da perda de energia, ou seja, na busca de um mundo mais sustentável, estudiosos apontam um modelo econômico que funciona em circuitos fechados,

denominado Economia Circular - EC. De acordo com relatório da Ellen MacArthur Foundation - EMF -, organização fundada em 2010 para pesquisar e incentivar a adoção desse novo conceito, a EC se constitui em contraposição ao processo produtivo linear. O modelo adota a prática dos 3R: reduzir, reutilizar e reciclar, substituindo o término da vida útil de um produto com a restauração (LIU, 2018). Em outras palavras, a Economia Circular visa ao reaproveitamento dos resíduos como insumos para a produção de novos materiais e à alimentação do sistema com energia renovável. Desse modo, o que era antes descartado torna-se nutriente para um novo ciclo (Figura 10).

Figura 10 - Fluxograma - Economia Circular



Fonte: ARCOVERDE *et al.*, 2018

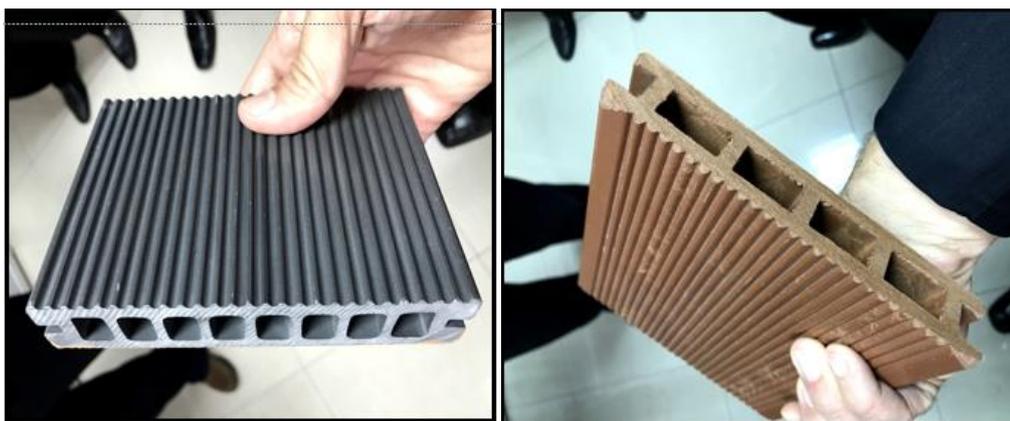
Vários países reconhecem a importância desse novo conceito e, de forma lenta e gradual, estão o adotando. Cabe destacar, como referência mundial em aproveitamento de resíduos, a China, país em que a Economia Circular está inserida na Lei de Promoção da Produção Limpa, de 2002. O governo criou metas e adotou medidas de apoio ao desenvolvimento de novas tecnologias para a utilização de rejeitos, de modo a promover a presença dos novos produtos gerados no mercado chinês (RESENDE, 2018).

E isso ocorre por meio de diversas ações que envolvem parcerias entre o governo chinês, indústrias e universidades. A China Association of Circular Economy - CACE - é um exemplo dessas parcerias e se tornou referência na promoção da Economia Circular. A organização reconhece que ainda há muito

a ser feito em relação à adoção do novo modelo naquele país e vem realizando viagens internacionais, no intuito de aprender as melhores práticas adotadas no mundo e de compartilhar suas experiências para o aproveitamento de resíduos, dentre eles, os da mineração (LIU, 2017).

De acordo com palestra proferida em 2018 pelo Renato Teixeira Brandão, da Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM -, a China está empenhada em promover o desenvolvimento sustentável e a sistemática utilização dos seus resíduos sólidos industriais. Os rejeitos da escória do alto-forno e da lama vermelha da mineração são utilizados na fabricação de novos materiais, destinados principalmente à construção civil, como argamassa, brita, areia, tijolos e produtos refratários. Exemplos de produtos gerados com a utilização de rejeitos da mineração chinesa são mostradas nas Figuras 11 e 12.

Figura 11 - Tijolos confeccionados com rejeito



Fonte: BRANDÃO, 2018

Figura 12 - Utilização de rejeitos na arte e arquitetura na China



Fonte: BRANDÃO, 2018

No Brasil, a Economia Circular é um tema pouco explorado, mas, aos poucos, vem ganhando importância. A expectativa é de que esse novo modelo econômico também possa ser implementado nos setores mineral e siderúrgico do país. Destacam-se, como exemplos bem sucedidos, medidas e ações praticadas em Minas Gerais pelas empresas Vale e Samarco, no que diz respeito à utilização de rejeitos do minério de ferro, sobretudo na área da construção civil e de pavimentação, bem como a criação, em maio de 2016, da Plataforma R3 Mineral, com o objetivo de estudar e debater o aproveitamento de resíduos da mineração no Estado e suas aplicações. Essa plataforma é composta por mineradoras, pesquisadores, instituições de tecnologia e inovação, entidades de classe e organizações interessadas no tema, que têm a importante tarefa de colocar em prática a Economia Circular, aproveitando os rejeitos minerários para servirem de matéria-prima em outros processos produtivos (LIU, 2017).

Destaca-se que, em 2010, o governo brasileiro aprovou a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS -, que visa à redução do volume de resíduos e à adoção de práticas de consumo sustentável, de modo a assegurar que os produtos sejam reintegrados em outras cadeias de produção. A lei cria metas para a eliminação dos lixões e institui a responsabilidade compartilhada dos agentes geradores de resíduos, dos fabricantes, dos cidadãos consumidores e dos serviços públicos de manejo dos resíduos sólidos.

Por fim, é relevante frisar que a Economia Circular nos oferece uma nova forma de pensar, de desenhar o nosso modo de produção e de nos organizarmos social e economicamente. Ao incentivar a reciclagem, a utilização de produtos antes descartados e alimentar o sistema com energia renovável, esse conceito nos desperta para uma maneira mais sustentável de nos relacionarmos com o mundo em que vivemos, na construção de um modelo econômico restaurativo e de um futuro mais sustentável e positivo (EMF, 2013).

3.3. Mina do Andrade - Projeto Itabiritos

A Mina do Andrade está localizada em Bela Vista de Minas/MG - e pertence à empresa ArcelorMittal Mineração. Produz atualmente 3,5 milhões de toneladas *Run of Mine* - ROM - (minério bruto) por ano, emprega cerca de 310

peças e abastece a usina siderúrgica da empresa instalada em João Monlevade/MG, que produz fio-máquina para aplicações industriais.

A ArcelorMittal está dando início ao projeto denominado Itabiritos na Mina do Andrade, que prevê a adequação da usina de beneficiamento para fornecer minério de melhor qualidade à usina de João Monlevade, o que acarretará, conseqüentemente, no aumento da vida útil da mina. Pode-se afirmar que esse projeto é um dos mais relevantes para a ArcelorMittal, pois, no atual contexto econômico mundial, a qualidade e a produtividade são fundamentais para a valoração da empresa (PORFÍRIO & SANTOS, 2017).

O projeto consiste no beneficiamento de itabiritos, considerados minérios pobres, isto é, com baixo teor de ferro e elevada presença de sílica e fósforo. Com um olhar mais sustentável, pode-se afirmar que o que era inapropriado para a transformação industrial vai se tornar produto, pois, com o uso de novas tecnologias, torna-se economicamente viável extrair ferro desse mineral. “O itabirito não tinha aplicação industrial na ArcelorMittal, já que não possuíamos o maquinário necessário para processá-lo. Com a planta, ele será aproveitado”, explicou o Diretor-Geral da BioFlorestas e Mina do Andrade, Wagner Barbosa (comunicação pessoal).

Conforme está previsto, o uso da tecnologia de beneficiamento a úmido viabilizará o aproveitamento das massas de itabiritos removidas para a liberação das hematitas, contribuindo para que sejam dispostas menores quantidades de rejeitos em barragens ou pilhas, como hoje é feito. Além disso, a utilização simultânea desses dois minerais resultará na melhoria da qualidade dos produtos oferecidos ao alto forno da usina de João Monlevade/MG.

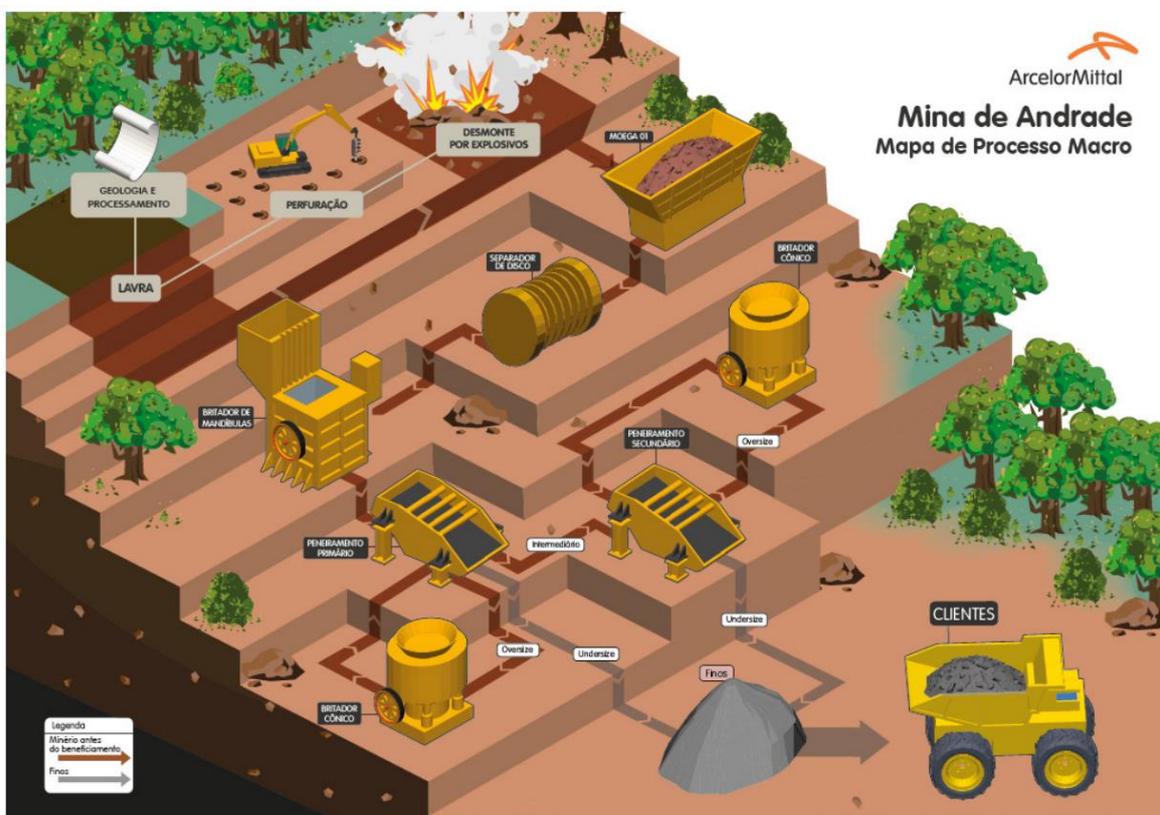
Importante citar que a implantação do Projeto Itabiritos ocorrerá em uma área específica, já antropizada pela atividade minerária existente. Desse modo, o processo de licenciamento ambiental não necessita de licença para supressão vegetal, o que facilita o trâmite do licenciamento no órgão público competente (PORFÍRIO & SANTOS, 2017).

3.3.1 Processo de Beneficiamento - Atual

Hoje a Mina do Andrade processa minério hematítico em uma instalação de britagem e peneiramento, produzindo *sinter feed* para atender à usina de João

Monlevade. A Instalação de Tratamento de Minério - ITM - dessa mina tem capacidade de processamento de 3,5Mtpa de minério de ferro hematítico. O atual processo de beneficiamento é composto por pilha pulmão de blendagem, britagem primária, britagem secundária, peneiramento primário, peneiramento secundário e britagem terciária. As estruturas de apoio a essa planta são: a subestação, a casa de compressores, cinco áreas de transferência, pátio de embarque ferroviário de produtos e sala de controle (PORFÍRIO & SANTOS, 2017) (Figura 13).

Figura 13 - Processo industrial atual, Mina do Andrade



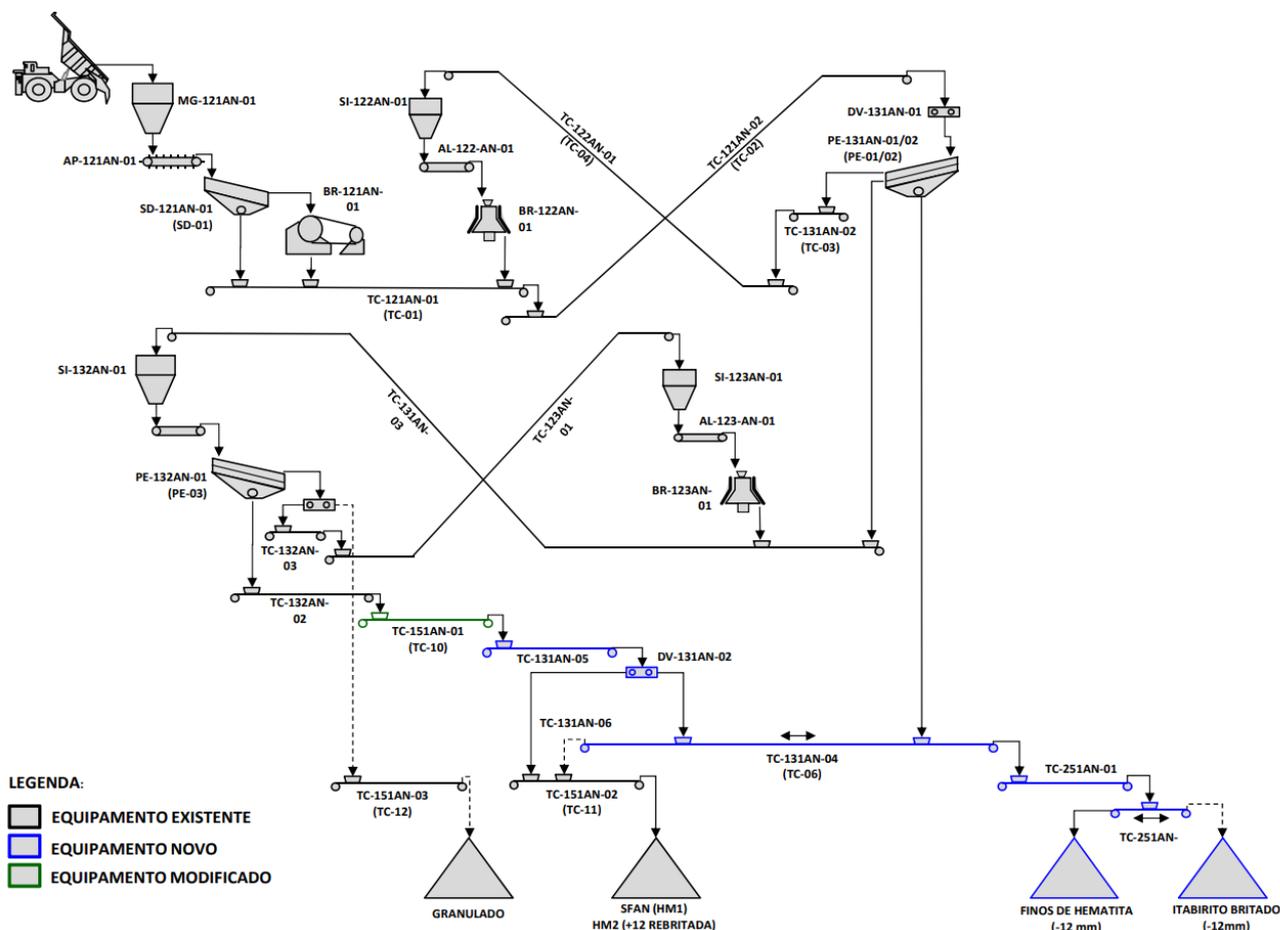
Fonte: PORFÍRIO & SANTOS, 2017

3.3.2 Processo de Beneficiamento - Projeto Itabiritos

O Projeto Itabiritos utilizará as estruturas já existentes e implantará outras, a fim de possibilitar o beneficiamento dos itabiritos e aumentar a vida útil da mina. Serão incorporados diversos equipamentos, como: britador de mandíbulas (BR-121AN-01), peneira vibratória inclinada (PE-131AN - 01/02), britador cônico (BR-122AN-01), peneira vibratória tipo banana (PE-132AN-1), britador cônico (BR-

123AN-01), peneira vibratória horizontal (PE-231AN-01), peneira vibratória horizontal (PE-232AN-01), prensa de rolos (HP-221AN-01) (Figura 14).

Figura 14 - Britagem e peneiramento do processo de beneficiamento do Projeto Itabiritos



Fonte: ECM Projetos Industriais, 2017

Para a implantação das estruturas de tratamento de minério serão empregadas cerca de 300 pessoas, e para a implantação da Linha de Transmissão - LT - de 13,8kV, aproximadamente 30 trabalhadores.

4. METODOLOGIA

4.1 Coleta da amostra de rejeito

A amostra objeto deste estudo foi coletada da lama de rejeito do minério de ferro originada do processo piloto de beneficiamento de itabiritos da Mina do Andrade, ArcelorMittal. Segundo teste realizado pelo Laboratório Loctest,

situado em Bela Vista de Minas/MG, trata-se da Argila Siltosa Marrom Escuro, resultante do processo de deslamagem, por meio do qual se faz a remoção das partículas mais finas, ou seja, das lamas, que prejudicam o desempenho nas operações subsequentes do beneficiamento do minério de ferro (TOTOU, 2010). O equipamento mais utilizado nesse processo denomina-se hidrociclone. O maquinário faz a separação em *underflow*, isto é, das partículas maiores, como pedregulhos e areia, e em *overflow*, das partículas menores, como silte e argila (Figura 15).

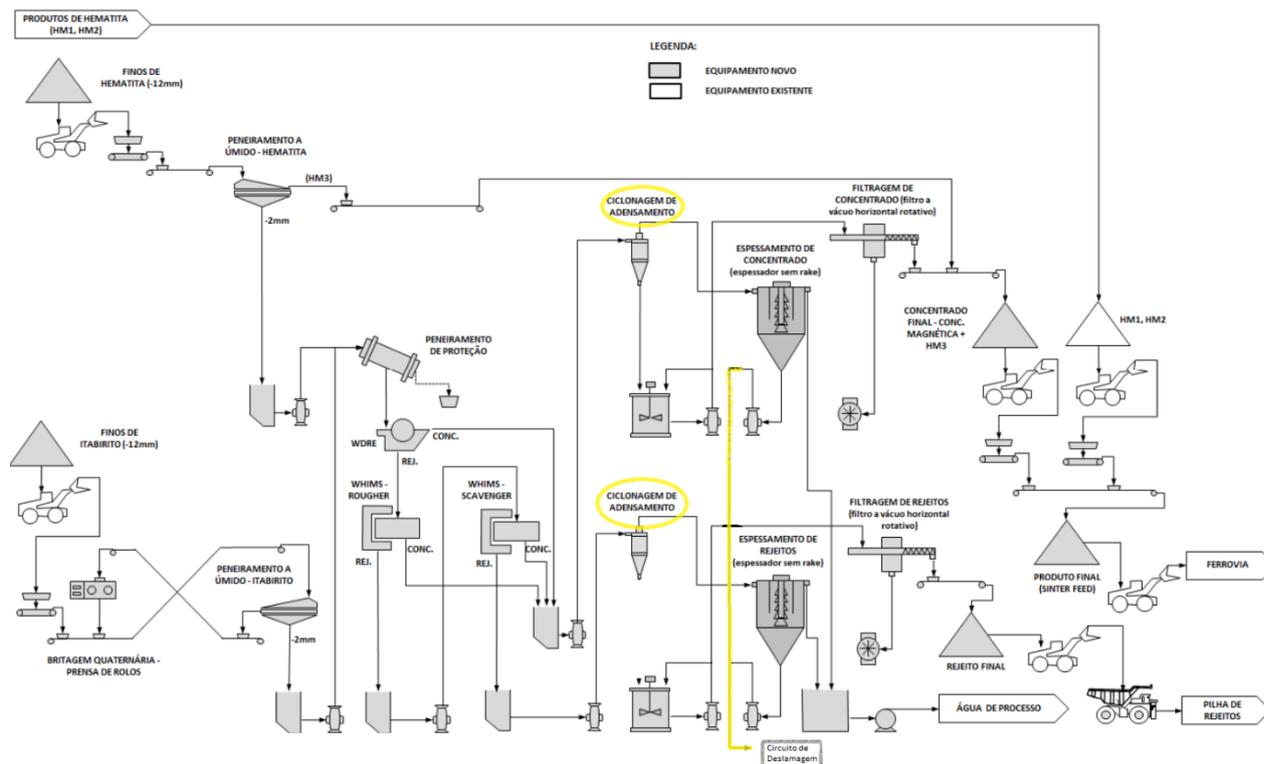
Figura 15 - Esquema de escoamento interno de um hidrociclone



Fonte: PEREIRA, 2005

O presente estudo consiste na análise da viabilidade de uso do rejeito fino proveniente da separação *overflow* do circuito de deslamagem (Figura 16).

Figura 16 - Circuito de concentração e deslamagem



Fonte: ECM Projetos Industriais, 2017

4.2 Características do Material em Estudo

A amostra do rejeito de lama proveniente da extração do minério de ferro da Mina do Andrade foi coletada do circuito de deslamagem, durante o processo piloto de beneficiamento. Após passar pelo processo de deslamagem, o rejeito ficou dias secando em baias, para depois ser acomodado em pilhas, junto ao estéril bruto, o que originou, conseqüentemente, uma amostra em forma de pó. Como estamos tratando de uma escala-piloto, pois a licença de operação só estará pronta em 2020, e como esse material corresponde a aproximadamente 5% do total do rejeito do itabirito processado, foram gerados apenas 2,5kg para a realização das análises laboratoriais. Cerca da metade do pó da lama foi reservada, em caso de eventual necessidade de contraprova ou de ensaios complementares.

Durante a realização deste trabalho houve acompanhamento *in loco* do processo produtivo e acesso a documentações e informações a respeito do

Projeto Itabiritos da empresa ArcelorMittal, bem como a *softwares* e equipamentos laboratoriais do CEFET-MG, para a realização das análises.

As escolhas das análises do material foram embasadas nas mais diferentes formas de categorização de rejeitos, no que tange a características químicas e físicas da amostra, com a finalidade de se realizar um estudo estruturado e completo.

4.3 Caracterização Tecnológica do Rejeito

Para a determinação da caracterização tecnológica do rejeito em pó em estudo foram realizadas análises de granulometria por peneiramento e por difração a laser, análise química por Fluorescência de Raios X - FRX -, análises morfológicas por Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV - e por Espectroscopia de Energia Dispersiva - EDS -, e análise mineralógica por Difração de Raios X - DRX.

4.3.1 Análise Granulométrica por Peneiramento

A determinação da granulometria por peneiramento foi feita pelo Laboratório Loctest, em Bela Vista de Minas/MG. A amostra bruta foi submetida a uma etapa de peneiramento por meio de peneiras de variadas aberturas: 2mm, 1,2mm, 0,6mm, 0,42mm, 0,3mm, 0,15mm e 0,074mm. Em cada peneira foi anotada a massa do material acumulado e do material peneirado, além dos percentuais deste último. O ensaio foi realizado em temperatura ambiente de 22,5°C.

4.3.2 Análise Granulométrica por Difração a Laser

A análise granulométrica do rejeito por difração a laser foi realizada pelo Laboratório de Cerâmicas Finas do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG -, Campus I. Utilizou-se o equipamento CILAS, modelo 1090 Laser Particle Size Analyzer, com faixa de leitura de 0,04µm a 500µm. (Figura 17). Para a realização da análise, em temperatura ambiente de 22,5°C, foram utilizados aproximadamente 5,0g da amostra, e empregada água destilada como meio. Para evitar aglomeração, foram aplicados 60 segundos de ultrassom.

Figura 17 - Foto do equipamento Cilas



4.3.3 Análise Química por Fluorescência de Raios X - FRX

A quantificação dos componentes químicos e dos óxidos presentes na amostra foi feita pelo Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG -, Campus I. Os resultados foram gerados por meio do equipamento EDX-720, marca Shimadzu, atmosfera a ar e colimador de 3mm (Figura 18). O ensaio foi realizado à temperatura ambiente 22,5°C.

Figura 18 - Foto do equipamento EDX



4.3.4 Análise Morfológica por Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV - e Espectroscopia de Energia Dispersiva - EDS

A morfologia das partículas presentes na amostra foi feita pelo Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG -, Campus I. O equipamento utilizado para a Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV - foi o SUPERSCAN SSX-550, marca Shimadzu, possui capacidade de captar imagens de superfícies com alta resolução (macro, meso e microestruturais), corrente de 4mA e aceleração 15kV. Para a identificação pontual dos teores semi-quantitativos dos minerais do material em estudo, empregou-se a técnica de Espectroscopia Dispersiva de Energia - EDS -, o que só pode ser feito por estar acoplada ao equipamento uma microssonda (Figura 19). Vale ressaltar que, antes da amostra ser inserida no MEV, foi necessário fixá-la com fitas adesivas em um suporte de prata e metalizá-la por meio de uma película de ouro. O teste foi realizado em temperatura ambiente de 22,5°C.

Figura 19 - Foto do equipamento MEV e EDS



4.3.5 Análise Mineralógica por Difração de Raios X - DRX

A análise mineralógica do material foi realizada pelo Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG -, Campus I. Pelo método do pó utilizou-se o difratômetro de marca Shimadzu,

modelo XRD-7000, que funcionou com as seguintes especificações: ângulo de varredura de 10° a 80°, passo de 0,02 grau, velocidade de varredura 2 minutos por passo, tensão de 40kV, corrente de 30mA, tubo de cobre e temperatura ambiente de 22,5°C . Esse método permite identificar picos de intensidade de cada mineral, realizando uma comparação com os dados padrão da International Centre for Diffraction Data - ICDD - do Joint Committee on Powder Diffraction Standards - JCPDS. Todas essas informações foram processadas no software Match 3 Crystal Impact. Na figura 20 é apresentado o equipamento utilizado.

Figura 20 - Foto do difratômetro



5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos com as análises realizadas são apresentados a seguir e, posteriormente, discute-se a relação entre os resultados e os comentários de alguns estudiosos sobre o tema.

5.1 Análise Granulométrica por Peneiramento

Os resultados quantitativos referente à granulometria por peneiramento, levantados pela empresa Loctest, foram exemplificados na Tabela 5.

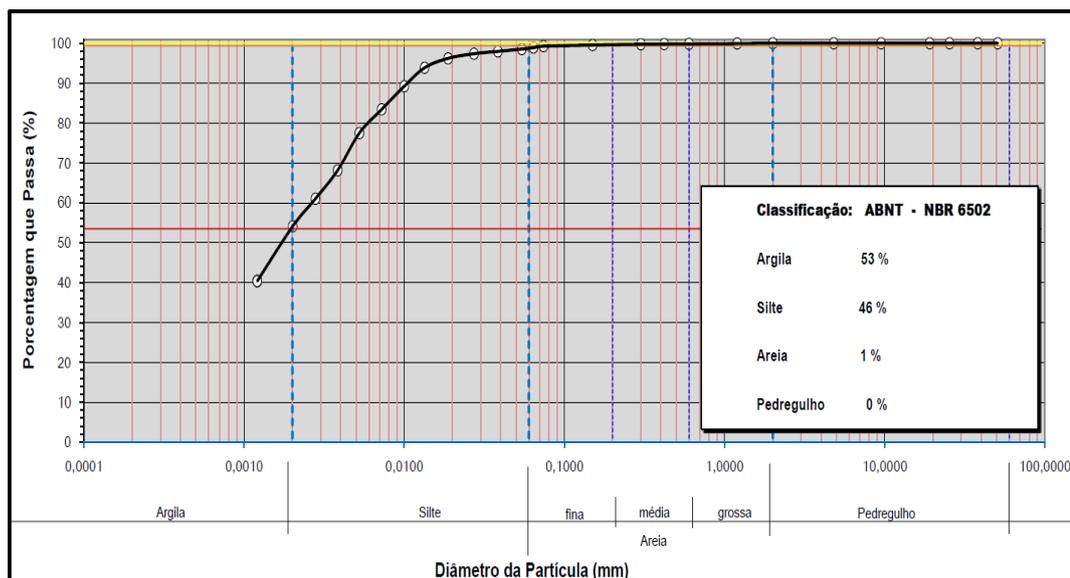
Tabela 5 - Peneiramento do rejeito de lama fina

| Peneiramento do Rejeito de Lama Fina | | | | |
|--------------------------------------|----------------|------------------|-----------|-------------|
| Peneiras | | Rejeito | | % que passa |
| | | Retido acumulado | Que passa | |
| # | ϕ (mm) | g | g | |
| 10 | 2 | 0 | 66.49 | 100 |
| 16 | 1.2 | 0.06 | 66.43 | 100 |
| 30 | 0.6 | 0.12 | 66.37 | 100 |
| 40 | 0.42 | 0.15 | 66.34 | 100 |
| 50 | 0.3 | 0.18 | 66.31 | 100 |
| 100 | 0.15 | 0.31 | 66.18 | 100 |
| 200 | 0.074 | 0.51 | 65.98 | 99 |

A amostra foi submetida, ao teste de peneiramento com peneiras mais finas, isto é, de aberturas menores: 2mm; 1,2mm; 0,6mm; 0,42mm; 0,3mm; 0,15mm e 0,074mm. Os resultados encontrados indicam que apenas 1% do rejeito ficou retido na peneira de 0,074mm. Assim sendo, pode-se deduzir que o material em estudo é fino e apresenta características próprias.

Após a realização de diversos testes de peneiramento feitos pela empresa Loctest e levando em conta os dados da Tabela 4 apresentada anteriormente (Peneiramento do Rejeito de Lama Fina), foi possível construir o Gráfico 5, que representa a classificação para rochas e solos, de acordo com a sua granulometria e a NBR 6502/1995.

Gráfico 5 - Classificação: argila, silte, areia, pedregulho



Desse modo, pode-se constatar que a amostra é constituída, em sua maior parte, por argila (53%) e silte (46%). Cabe salientar que, segundo a norma, para um material ser considerado argila, deve possuir grãos de dimensões inferiores a 0,002mm; para ser considerado silte, granulometria de 0,002mm a 0,05mm; e, para ser considerado areia, apresentar diâmetros de 0,06mm a 2,0mm.

De acordo com a norma ABNT NBR 7211/2009, os grãos finos variam no que diz respeito à sua utilização como agregado miúdo para concreto. Considera-se zona ótima, entre 2,20mm a 2,90mm; zona utilizável, entre 1,55mm a 2,20mm; e zona utilizável superior, entre 2,90mm a 3,50mm. Apesar disso, conforme também preconiza a norma, para materiais com granulometria diferente das citadas, é possível a sua utilização no concreto, desde que estudos prévios de dosagem comprovem a sua aplicabilidade.

Também em relação ao tamanho das partículas, Yellishetty *et al.* (2008) afirmaram que, para uso como agregado na produção de concreto, é mais adequado utilizar rejeito com granulometria de 12,5mm a 20mm; em obras de construção civil, partículas com granulometria entre 4,75mm a 12,5mm; e, na fabricação de tijolos, granulometria inferior a 4,75 mm.

Como o rejeito objeto deste estudo apresenta dimensões inferiores às exigidas pela ABNT NBR 7211/2009, conclui-se que não pode ser aplicado como agregado miúdo na produção de concreto. Entretanto, a presença de grande quantidade de partículas finas favorece o seu uso como aditivo mineral no concreto, segundo Andrade (2014) e Bauer *et al.* (2012), de modo a melhorar suas características de resistência à compressão.

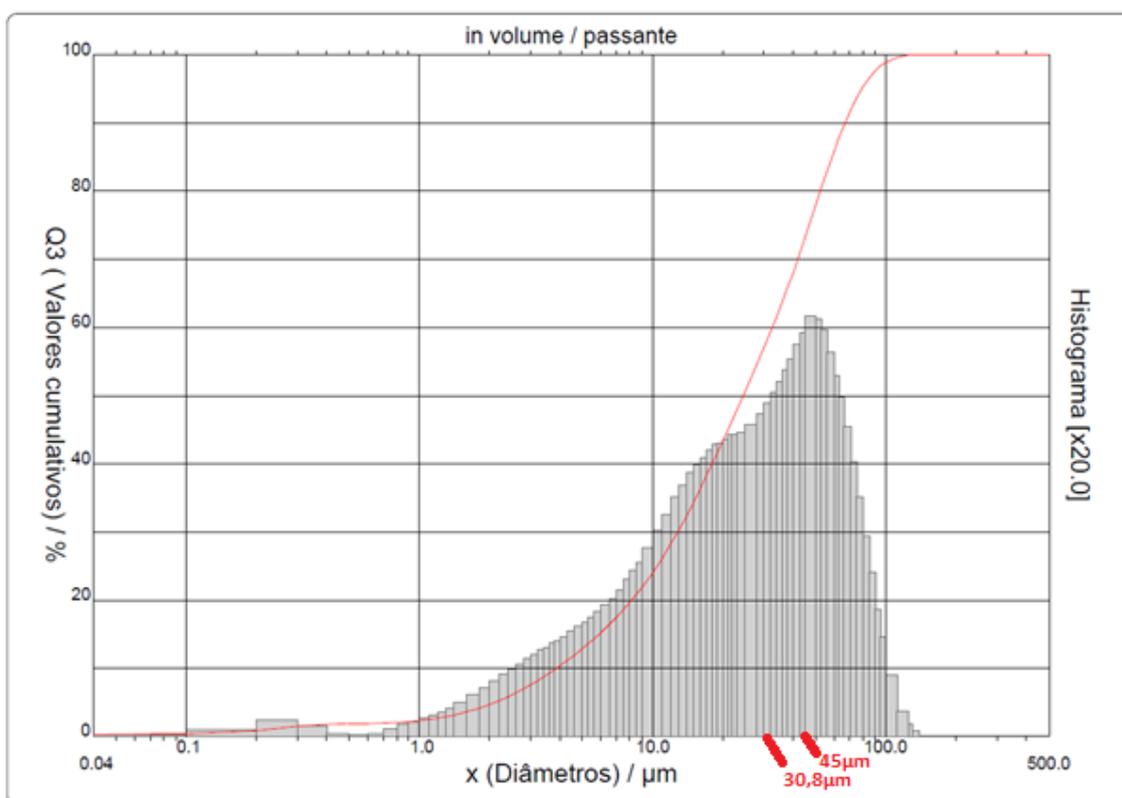
Vale destacar que, segundo Magalhães (2018), uma variável de relevante importância no que tange à utilização de materiais como aditivos na produção de concreto e argamassa é a granulometria. Ficou comprovado que as partículas finas ocupam os espaços dos poros na pasta de cimento, o que resulta no melhor desempenho de determinadas propriedades físicas do material.

Estudo realizado por Andrade (2014) concluiu ainda que é desejável maiores concentrações de finos para uso como aditivo em cimento e incorporado em materiais cerâmicos. Já para agregado de concreto e aplicação em argamassa é melhor que seja utilizado na fração areia (0,15mm a 4,8mm). Ressaltou, no entanto, que o rejeito na forma bruta pode ter inúmeros usos no que tange à sua utilização em pavimentos rodoviários.

5.2 Análise Granulométrica por Difração a Laser

A curva granulométrica obtida pelo método de granulometria a laser, aplicado ao solo fino, pode ser visualizada no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Granulometria por difração a laser



Analisando o Gráfico 6, constata-se que o diâmetro das partículas contidas na amostra varia de 0,1 μm a 100 μm , o que demonstra a amplitude granulométrica presente no rejeito. Verifica-se também que o intervalo de 10 μm a 100 μm representa 72% da amostra, ou seja, o rejeito possui características de partículas finas (SOMASUNDARAN, 1980).

A partir dessa análise também foi possível obter outros dados granulométricos, como diâmetro médio de 30,8 μm ; diâmetro mínimo de 0,04 μm ; diâmetro máximo de 140 μm ; diâmetro a 10% de material passante 3,91 μm ; diâmetro a 50% de material passante 24,59 μm ; e diâmetro a 90% de material passante 66,35 μm .

Segundo Somasundaran (1980), para um material ser considerado fino, ele deve apresentar partículas de diâmetro entre 10 μm e 100 μm ; ultrafino, entre 1 μm e 10 μm ; e colóide (partículas não podem ser observadas a olho nu), diâmetro menor que 1 μm . Isso posto, o material aqui estudado pode ser enquadrado na categoria de partículas finas.

Segundo a NBR 12653/2014, que estabelece os requisitos para materiais pozolânicos destinados ao uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta, para um material ser enquadrado nessa categoria, um dos quesitos físicos é ter, no máximo, 20% das partículas com tamanho acima de 45 μ m. Como o material analisado apresenta 27% das partículas acima de 45 μ m, ele não se enquadra nas exigências requeridas por essa norma. Porém, se o material passar por um sistema de peneiramento e moagem, terá suas partículas reduzidas e conseqüentemente poderá se enquadrar no requisito mencionado.

No entanto, devido ao alto teor de finos, é favorável sua utilização como aditivo na produção de cimento, segundo Andrade (2014) e Magalhães (2018), e de argamassa, segundo Aristimunho & Bertocini (2012) e (Magalhães, 2018), pois contribui para elevar a resistência desses materiais.

5.3 Análise Química por Fluorescência de Raios X - FRX

Os resultados semi quantitativos relativos à análise química por Fluorescência de Raios X foram subdivididos em proporção de elementos e de óxidos presentes na amostra (Tabela 6).

Tabela 6 - Percentual dos principais elementos e óxidos presentes no rejeito

| Análise Química | | | |
|-----------------|-------|--------------------------------|-------|
| Elementar | | Óxidos | |
| Si | 48.3% | SiO ₂ | 61.7% |
| Fe | 43.1% | Fe ₂ O ₃ | 28.6% |
| Al | 7.5% | Al ₂ O ₃ | 9.0% |
| K | 0.8% | K ₂ O | 0.5% |
| Mn | 0.2% | MnO | 0.1% |
| Ca | 0.1% | CaO | 0.1% |

Observa-se que, para a análise elementar, o silício (Si) se destaca como elemento mais abundante, seguido pelo ferro (Fe), e pelo alumínio (Al). Já a análise dos óxidos presentes confirma os valores elementares encontrados: dióxido de silício (SiO₂), óxido de ferro (Fe₂O₃) e óxido de alumínio (Al₂O₃), respectivamente.

Segundo Gomes (2009), nas frações mais finas do rejeito, provavelmente agregados à fração silte e argila, estão associados os óxidos de alumínio.

Conforme afirma Tavares (2012), os rejeitos de minério advindos do processo de beneficiamento do itabirito é um *bland* com diferentes óxidos de ferro (principalmente a hematita, em frações maiores), quartzo, também em frações maiores, e caulinita, em frações mais finas.

A grande quantidade de óxido de ferro presente na amostra torna viável a sua incorporação à argila para a fabricação de materiais cerâmicos, desde que incorporada em pequena quantidade. Dessa forma, o rejeito contribui para manter a temperatura dos objetos nos processos de resfriamento, de modo a evitar trincas, fissuras e bolhas em sua superfície, além de auxiliar na economia de energia consumida pelos fornos de queima (ANDRADE, 2014).

Por outro lado, a utilização em grandes porcentagens dos óxidos de ferro na produção de concreto e de argamassa é considerada indesejada do ponto de vista visual e mecânico, pela coloração avermelhada do rejeito e por aumentar a probabilidade de ocorrência de trincas e rachaduras, devido ao fator dilatação. Mas, se inseridos em pequenas quantidades, podem ser úteis no aprimoramento das propriedades mecânicas do material produzido (BAUER *et al.*, 2012).

A ABNT NBR 12653/2014 ainda apresenta alguns requisitos químicos para a atividade pozolânica de resíduos minerais e, para isso, classifica as pozolanas em três grupos: Classe N: origem vulcânica e artificial de origem de subprodutos industriais; Classe C: cinzas volantes finamente moídas provenientes de termoelétricas; Classe E: outras pozolanas. Para que um material seja considerado pozolânico de Classe E, como é o caso do rejeito em estudo, um dos requisitos químicos necessários, de acordo com a referida norma é que o somatório das porcentagens de SiO_2 (61,70%), Al_2O_3 (9,01%) e Fe_2O_3 (28,59%) deve ter valor igual ou superior a 50%. A soma das porcentagens dos óxidos citados da amostra corresponde a 99,31%, ou seja, o rejeito analisado atende a essa exigência. Entretanto, é preciso realizar outros testes para serem atendidas as outras especificações químicas, dentre elas teor de umidade e perda ao fogo.

5.4 Análise Morfológica por Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV - e Espectroscopia de Energia Dispersiva - EDS

A análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura foi realizada nas seguintes proporções de aproximação: x50 (Figura 21), x300 (Figura 22), x500 (Figura 23), x800 (Figura 24) e x1000 (Figura 25).

De modo geral, observa-se nas figuras uma variedade de partículas em relação à sua forma e ao seu tamanho. Segundo Andrade (2014), partículas subarredondadas a angulosas, são provavelmente quartzo; outras, tabulares, provavelmente hematita; laminares, provavelmente caulinita. É possível notar baixa presença de partículas esféricas e ainda um material pulveroso, uma mistura de goethita, hematita e quartzo de difícil distinção.

Figura 21 - Microscopia Eletrônica de Varredura x50

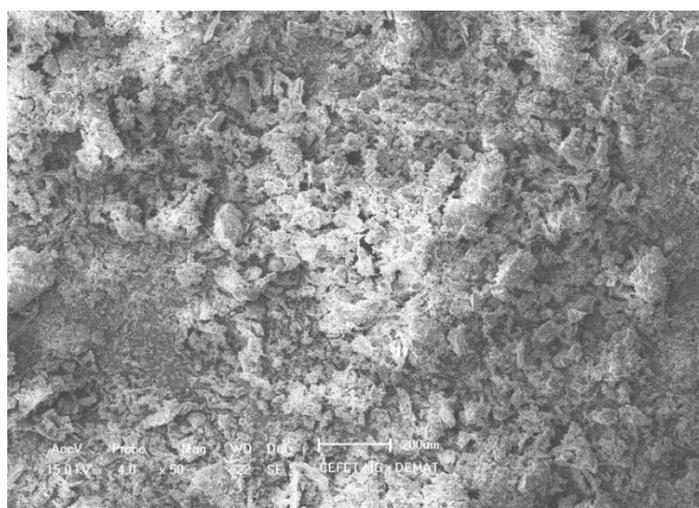


Figura 22 - Microscopia Eletrônica de Varredura x800

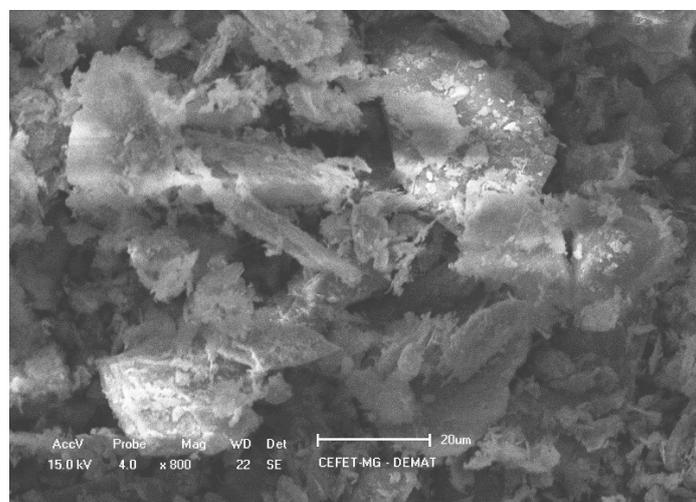
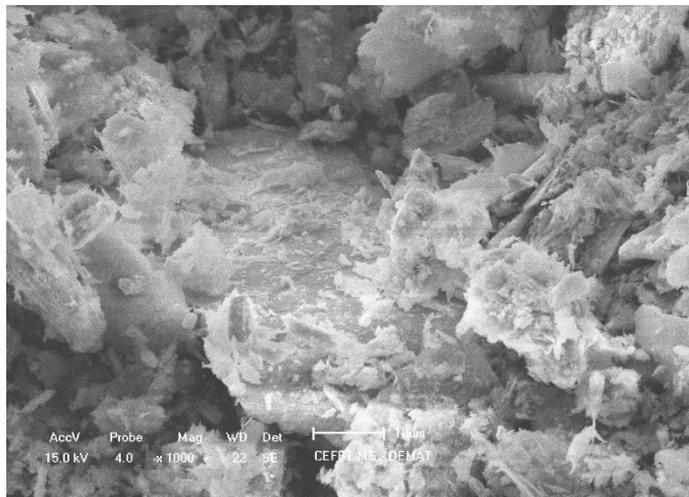
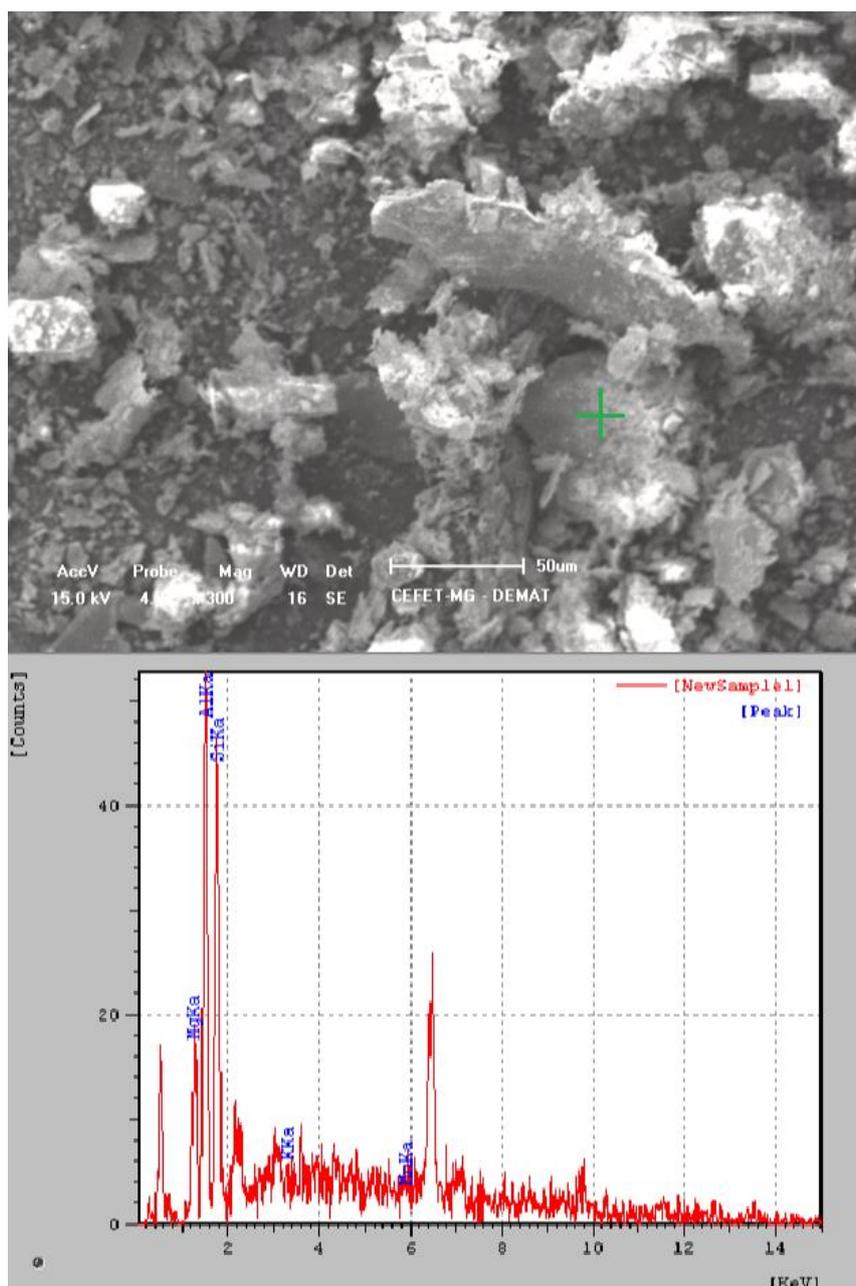


Figura 23 - Microscopia Eletrônica de Varredura x1000



Tendo em vista a necessidade de se conhecer mais detalhadamente cada uma das partículas presentes na Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV -, foi imprescindível realizar a Espectroscopia de Energia Dispersiva - EDS. Desse modo, obtêm-se informações pontuais e quantitativas dos elementos químicos contidos no rejeito. A análise foi feita em cada partícula retirada dos pontos localizados pela seta pequena verde. A partir disso, foi gerado um gráfico em que as abcissas representam os picos dos vários elementos químicos próximos ao local demarcado pela seta, e as ordenadas representam a intensidade com que esses elementos se encontram no referido ponto.

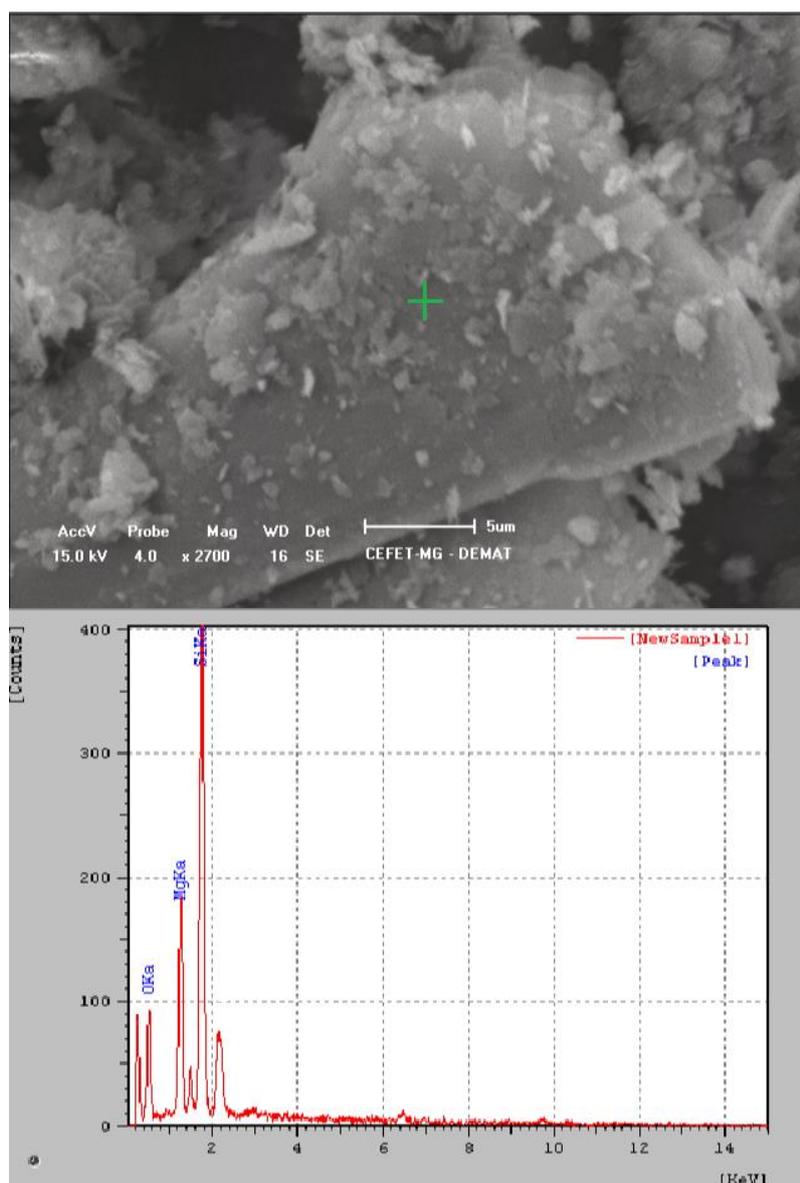
Figura 24 - Espectroscopia de Energia Dispersiva x300



Como mostra a figura 24, dentre as partículas ou grãos submetidos à análise, encontra-se uma partícula com concentrações de sílica (42,11%), alumínio (39,74%), magnésio (11,50%), manganês (3,68%) e potássio (2,96%). Provavelmente se trata do mineral caulinita, cuja fórmula química é $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (39,5% de Al_2O_3 , 46,5% de SiO_2 e 14,0% de H_2O) ou do mineral muscovita, fórmula química $\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$.

Cabe frisar que, a muscovita pode ser utilizada como aditivo em diferentes tipos de tintas, cada uma delas com suas características próprias. Por possuir forma lamelar, esse mineral afeta a viscosidade do meio, reduzindo a sedimentação na tintura (KALEDOVÁ *et. al.*, 2010).

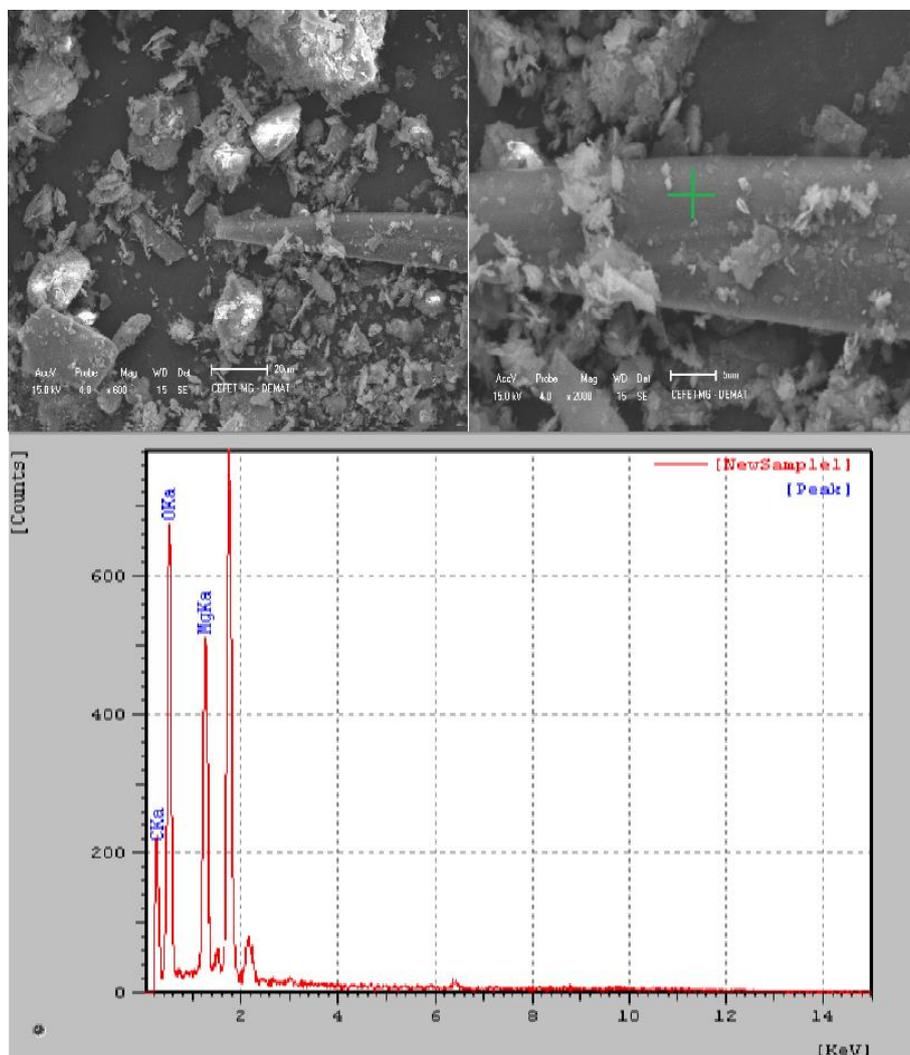
Figura 25 - Espectroscopia de Energia Dispersiva x2700



Como ilustra a Figura 25, outra partícula analisada apresenta concentrações de oxigênio (30,97%), sílica (15%) e magnésio (7,5%). Esta composição coincide com a do mineral quartzo, cuja fórmula química é SiO_2 (46,74% de sílica e 53,26% de oxigênio). Geralmente, se verifica a presença de

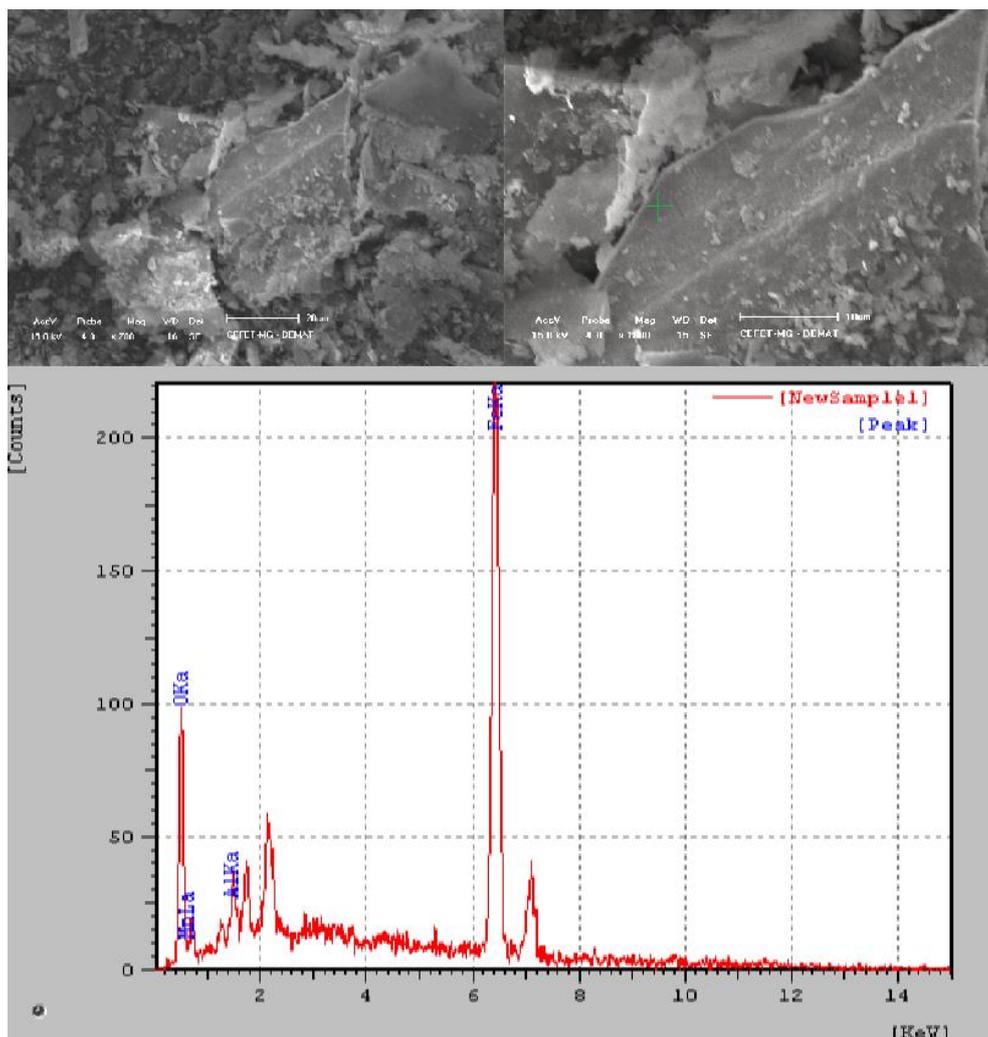
quartzo em rejeitos ultrafinos com tamanho próximo a $50\mu\text{m}$, tendo em vista serem partículas muito duras e de elevada resistência (ROCHA *et al.*, 2010).

Figura 26 - Espectroscopia de Energia Dispersiva, antes x300 e depois x2000



A Figura 26 representa uma sequência de duas imagens: a primeira, com x300 de aproximação, e a segunda, com x2000 de aproximação, para melhor localizar onde se encontra a partícula submetida à análise de Espectroscopia de Energia Dispersiva, indicada pela seta verde. A análise demonstra que na partícula há concentrações de oxigênio (53,43%), carbono (28,96%), sílica (9,452%) e magnésio (7,01%).

Figura 27 - Espectroscopia de Energia Dispersiva, antes x700 e depois x1800



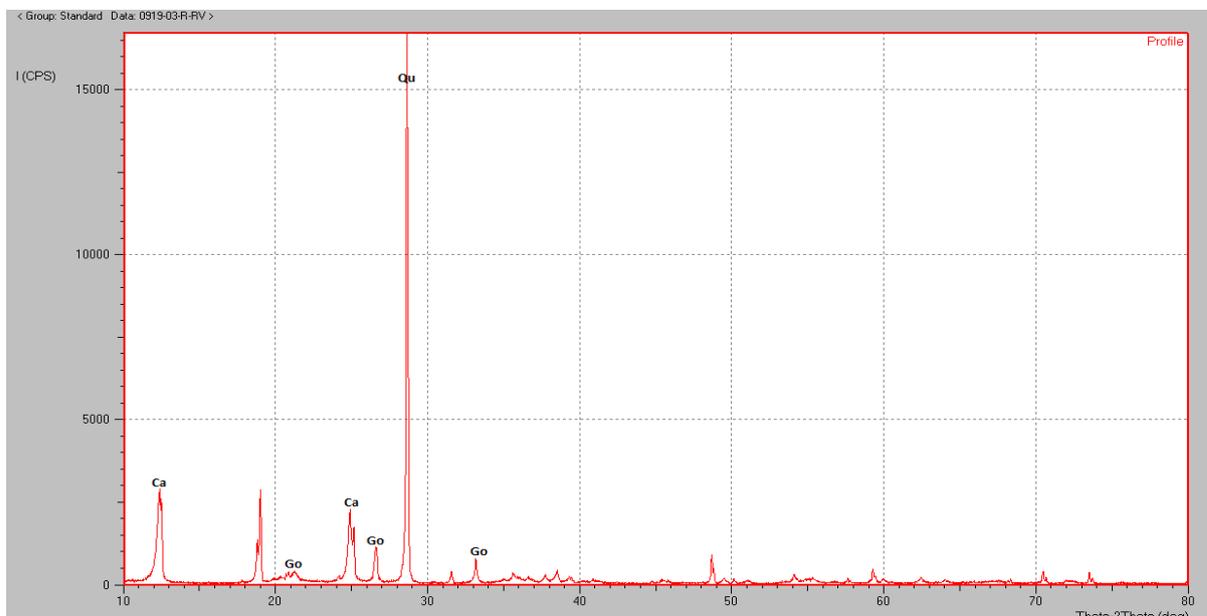
Já a análise da partícula indicada na Figura 27 revelou a presença de teores de ferro (56,06%), oxigênio (35,44%), manganês (3,29%) e alumínio (2,60%). Logo, a partícula apontada é, possivelmente, um mineral de hematita (Fe_2O_3), goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) ou magnetita (Fe_3O_4), que possuem alta concentração de ferro em sua composição química.

Estudo feito por Tavares (2012) sobre a viabilidade de se utilizar minerais de ferro na indústria de tinta, conclui que partículas de hematita, de tamanho maior e mais duras, não prejudicam os requisitos físicos necessários para a produção de pigmentos.

5.5 Análise Mineralógica por Difração de Raios X - DRX

A difração e análise dos seus respectivos picos de intensidade pode ser visualizado no Gráfico 7.

Gráfico 7 - Difratoograma de Raios X, com diferentes proporções de caulinita(Ca), goethita (Go) e quartzo (Qu)



Ao analisar o conjunto de picos do Gráfico 7, é possível identificar diferentes minerais, sendo que cada pico pode ser considerado como um dado semi quantitativo. Observou-se que há uma presença significativa de quartzo (SiO_2), o que está em conformidade com o resultado obtido por meio da análise química por Fluorescência de Raios X, que mostrou ser o material em estudo composto por 61,7% de SiO_2 .

Averiguou-se que os silicatos de alumínio estão na forma de caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$), o que também foi comprovado por meio do EDS, em alguns médios picos, e que os óxidos de ferro estão na forma de goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), em pequena quantidade. No difratograma apresentado não se detectou picos que correspondessem aos minerais muscovita, hematita e magnetita.

Segundo Bastos (2013), a presença de argilominerais, como a caulinita, explica suas propriedades cimentantes. Esse argilomineral é composto pela combinação alternada de lâminas de sílica e alumina, apresentando baixa superfície específica e pouca sensibilidade em contato com a água. Nociti (2011) complementa que a caulinita é matéria-prima básica para a fabricação e confecção de porcelanas, louças sanitárias, entre outros.

Segundo Bastos (2013), o quartzo contribui na hidratação do cimento e na relação de endurecimento do mesmo dos compostos ligantes.

Em relação à pigmentação, encontram-se diferentes tons de castanho, laranja, amarelo e vermelho, devido à presença de goethita. Apesar de ser opaco, esse mineral apresenta um brilho adamantino e a forma de agregado fibroso, podendo ser utilizado na fabricação de cerâmicas vermelhas (NOCITI, 2011).

6. CONCLUSÕES

Com base nos dados da revisão bibliográfica e nos testes laboratoriais realizados, pode-se concluir que o rejeito analisado, oriundo do processo de beneficiamento dos itabiritos da Mina do Andrade:

1 - É constituído, em sua maior parte, por partículas com granulometria correspondente à argila e silte;

2 - É composto basicamente por goethita, quartzo e caulinita;

3 - Para ser considerado material pozolânico destinado ao uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta, conforme dispõe a NBR 12653/2014, necessita passar por processo de peneiramento e moagem, com a finalidade de reduzir o tamanho de suas partículas e atender ao requisito físico constante da referida norma;

4 - Por apresentar a soma das porcentagens de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 superior a 50%, atende a um dos requisitos químicos da NBR 12653/2014 para ser considerado material pozolânico de Classe E. No entanto necessita ser realizados outros estudos posteriores como a concentração de SO_3 que precisa ser menor que 5% e certificar que a amostra em estudo irá reagir com Ca(OH)_2 , hidróxido de cálcio, nas concentrações adequadas para verificar as propriedades aglomerantes do material;

5 - Pode apresentar potencial para ser aproveitado e reciclado na produção de insumos para a construção civil, com ganhos tecnológicos e econômicos, sobretudo no que diz respeito à sua incorporação na fabricação de blocos intertravados de concreto, materiais cerâmicos, madeira plástica, pedra

composta e pigmentos de óxido de ferro e, como aditivo, em cimento, concreto e argamassa.

Vale salientar que a conclusão apresentada para a utilização do rejeito de lama, objeto deste estudo, baseia-se em trabalhos preliminares de investigação. Portanto, para se afirmar efetivamente que as aplicações citadas se adequam à amostra analisada, há necessidade de serem elaborados estudos e análises mais específicas e a realização de corpos de prova, ou seja, de comprovação prática.

Destaca-se ainda que, embora a utilização de rejeitos do setor minerário em nosso país estar dando os seus primeiros passos, há um nítido potencial de matéria-prima para o futuro. Nos últimos anos, estão sendo identificadas necessidades e desafios, como incorporar a economia circular, que precisam ser estruturadas dentro do setor minerário e em todo processo produtivo. A questão é de extrema importância, pois o conhecimento e a tecnologia disponíveis podem transformar esse material, hoje descartado, em produto de valor, promovendo iniciativas que valorizam sobretudo a preservação do meio ambiente e a segurança de todos os envolvidos na atividade.

Tendo em vista a necessidade de atuarmos hoje em busca de soluções ambientalmente sustentáveis e economicamente viáveis, a nossa expectativa é de que este trabalho possa oferecer maior conhecimento no que se refere ao aproveitamento da lama oriunda da Mina do Andrade e incentivar a mineradora ArcelorMittal a refletir mais sobre o novo modelo econômico conhecido por Economia Circular.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por fim, recomenda-se que trabalhos futuros sejam realizados com a finalidade de:

- Estudar e definir as aplicações mais adequadas ao aproveitamento da lama oriunda da Mina do Andrade, com a realização de testes laboratoriais mais específicos, corpos de prova e experimentos;
- Estudar a possibilidade de se implantar uma usina de aproveitamento do rejeito, com escolha do local ideal para a sua instalação, cálculo do rendimento

do produto, do gasto com o deslocamento do material, bem como com a compra e a manutenção dos equipamentos mecânicos, o pagamento da mão-de-obra e outras despesas;

- Avaliar, no que tange à produção de novos materiais e insumos, a possibilidade de aumento de caixa da mineradora, bem como de redução do passivo ambiental e de geração de emprego e renda, de modo a estimular a economia local e regional e melhorar a qualidade de vida das comunidades vizinhas ao novo empreendimento;

- Estudar e estabelecer um ponto de equilíbrio econômico e sustentável para o aproveitamento do rejeito, com o desenvolvimento de novas tecnologias e a adoção do novo modelo de produção denominado Economia Circular, de modo que a empresa possa manter a competitividade no mercado e o seu compromisso com a sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**, Rochas e Solos - Terminologia. Rio de Janeiro. 1995.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**, Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro. 2009.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**. Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro. 2004.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**. Materiais Pozolânicos. Rio de Janeiro. 2014.

ANDRADE, L. C. R. **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, *in natura* e segregados, para aplicação como material de construção civil**. 2014. Tese (Pós-graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa - UFV -, Viçosa, 2014. Disponível em: <<https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/6664>>. Acesso em: 08/6/2019.

ARCOVERDE, Walter Lins; GAMA, Evandro Moraes da; HEIDER, Mathias. **Políticas Públicas na Gestão dos Resíduos da Mineração**. In: Seminário Reaproveitamento de Rejeitos de Mineração e Economia Circular. Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <<https://www.feam.br/noticias/1/1683>>. Acesso em: 08/6/2019.

ARISTIMUNHO, Péterson Benites; BERTOCINI, Sandra Regina. **Aplicação de lama de minério de ferro em forma de pó na presença de cimento Portland**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 5, n. 2, 2012. Disponível em: <http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/riem/volume5_n2.asp>. Acesso em: 23/8/2019.

AZEVEDO, Úrsula Ruchkys de; MACHADO, Maria Márcia Magela; CASTRO, Paulo de Tarso Amorim; RENGER, Friedrich Ewald; TREVISOL, Andréa; BEATO, Décio Antônio Chaves. **Geoparque Quadrilátero Ferrífero (MG) - proposta**. Geoparques do Brasil/Proposta. CPRM, v. 1, 2012. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/17149>>. Acessado em: 03/6/2019.

BASTOS, Lucas Augusto Castro. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária**. 2013 Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP -, Ouro Preto, MG. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/6523>>. Acesso em: 23/8/2019.

BAUER, Luiz Alfredo Falcão; NORONHA, Maria Aparecida Azevedo; BAUER, Roberto José Falcão. **Uso de aditivos no concreto**. In: BAUER, Luiz Alfredo Falcão (Coord.). Materiais de Construção. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., v. 1, 2012.

BRANDÃO, Renato Teixeira. **As ações e os desafios do Estado de Minas Gerais no incentivo ao reaproveitamento de rejeitos**. In: Seminário Reaproveitamento de Rejeitos e Economia Circular. Belo Horizonte: DNPM, 2018. Disponível em: <<https://www.feam.br/noticias/1/1683>>. Acesso em: 08/6/2019.

BRASIL. **Plano Plurianual 2016-2019**. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Secretaria de Planejamento e Investimento Estratégico. Brasília, 2015. Disponível em: <planejamento.gov.br/assuntos/planeja/plano-plurianual>. Acesso em: 20/6/19.

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos - Lei nº 12.305/2010, de 2 de agosto de 2010**. Brasília: Diário Oficial da União, 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 08/9/19.

CARVALHO, Bruno César Lage de. **Aproveitamento de minérios de ferro de baixo teor: tendências, tecnologias utilizadas e influências no sequenciamento de lavra**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP -, Ouro Preto, MG. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2346>>. Acesso em: 08/9/19.

CAXITO, Fabrício; DIAS, Tatiana Gonçalves. **FERRO**. Recursos Minerários de Minas Gerais - RMMG -, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <<http://recursomineralmg.codemge.com.br/wp-content/uploads/2018/10/Ferro.pdf>>. Acesso em: 08/6/2019.

CHEN, Yongliang; ZHANG, Yimin; CHEN, Tiejun; ZHAO, Yunliang; BAO, Shenxu. **Preparation of eco-friendly construction bricks from hematite tailings**. Construction and Building Materials, v. 25, 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/229235941_Preparation_of_eco-friendly_construction_bricks_from_hematite_tailings>. Acesso em: 01/9/2019.

COSTA, Júlio César Versiani. **Caracterização do itabirito dolomítico da Mina de Conceição, visando aproveitamento como matéria-prima na siderurgia**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG -, Belo Horizonte, MG. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-9EAFQV>>. Acesso em: 08/7/2019.

ECM Projetos Industriais. **Projeto Básico da UTM - Unidade de Tratamento de Minério - Itabiritos, Mina do Andrade: Relatório Final (MA-2000-PRC-RL-6000)**. Belo Horizonte: agosto de 2017.

EMF - Ellen MacArthur Foundation. **Towards the Circular Economy: Economic and business rationale for an accelerated transition**. 2013. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/downloads/publications>>. Acesso em: 08/9/2019.

ESPÓSITO, Terezinha de Jesus. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico**. 2000. Tese (Doutorado em Geotecnia e Publicação) - Universidade de Brasília, Brasília, DF. Disponível em: <<https://www.coursehero.com/file/25486532/Tese-Esposito-2000-GTD-004A00pdf/>>. Acesso em: 16/6/2019.

FONTES, Wanna Carvalho; MENDES, Júlia Castro; SILVA, Sidney Nicodemos da; PEIXOTO, Ricardo André Fiorotti. **Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams**. Construction and Building Materials, v. 112, 2016. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/6757/1/ARTIGO_MortarsLayingCoating.pdf>. Acesso em: 01/9/2019.

GALVÃO, José Lucas Barros; ANDRADE, Humberto Dias; BRIGOLINI, Guilherme; PEIXOTO, Ricardo André Fiorotti; MENDES, Julia Castro. **Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints**. Journal of Cleaner Production, v. 200, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/326714740_Reuse_of_iron_ore_tailings_from_tailings_dams_as_pigment_for_sustainable_paints>. Acesso em: 29/08/2019.

GOMES, Marcos Antônio. **Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral), Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP -, Ouro Preto, MG. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2397>>. Acesso em: 08/9/2019.

HUANG, Xiaoyan; RANADE, Ravi; LI, Victor; NI, Wen. **Development of green engineered cementitious composites using iron ore tailings as aggregates**. Construction and Building Materials, v. 44, 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/257389888_Development_of_green_engineered_cementitious_composites_using_iron_ore_tailings_as_aggregates>. Acesso em: 03/9/2019.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. **Eleições 2018: Políticas Públicas para Indústria Mineral**. 1ª ed., Brasília, 2018a. Disponível em: <<http://portaldaminerao.com.br/wp-content/uploads/2018/11/eleicoes-2018-politicas-publicas-para-a-industria-mineral.pdf>>. Acesso em: 11/6/2019.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. **Gestão e Manejo de Rejeitos de Mineração**. 1ª ed., Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006222.pdf>>. Acesso em: 08/6/2019.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira**. 7 ed., Brasília, 2012. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002806.pdf>>. Acesso em: 08/6/2019.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações obre a Economia Mineral do Estado de Minas Gerais**. Brasília, 2014. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00004355.pdf>>. Acesso em: 10/6/2019.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. **Relatório Anual de Atividades Julho de 2017 - Junho de 2018**. Brasília, 2018b. Disponível em: <http://portaldaminerao.com.br/ibram/wp-content/uploads/2018/07/Diagrama%C3%A7%C3%A3o_Relat%C3%B3rioAnual_vers%C3%A3oweb.pdf>. Acesso em: 10/6/2019.

KALEDOVÁ, Andrea; VESELÝ, David; KALENDA, Petr. **Properties of paints with hematite coated muscovite and talc particles**. Applied Clay Science, v. 48, n. 4, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.03.007>>. Acesso em: 20/9/2019.

LAMEIRAS, Fernando Soares; SILVA, Gláucia Danielle Leirose da. **Methodology to control the influence of processing factors during composite stone fabrication**. REM: Revista Escola de Minas, v. 68, n. 1, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672015680208>>. Acesso em: 20/8/2019.

LIU, George. **A China e seu modelo de uso de rejeitos da mineração**. 2017. Disponível em: <<http://portaldaminerao.com.br/artigo-china-e-seu-modelo-de-uso-de-rejeitos-da-mineracao>>. Acesso em: 09/9/2019.

LIU, George. **Economia circular em sentido amplo e sua aplicação em resíduos de mineração e rejeitos na China**. In: Seminário Reaproveitamento de Rejeitos e Economia Circular. Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <<http://www.feam.br/noticias/1/1683>>. Acesso em: 08/9/2019.

LUO, Li; ZHANG, Yimin; BAO, Shenxu; CHEN, Tiejun. **Utilization of iron ore tailings as raw material for Portland cement clinker production**. Advances in Materials Science and Engineering, v. 2016, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1155/2016/1596047>>. Acesso em: 07/9/2019.

MAGALHÃES, Luciano Fernandes de. **Avaliação do rejeito de minério de ferro como material cimentício suplementar**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG -, Belo Horizonte. Disponível em: <http://www.posmat.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/120/2018/02/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Luciano_Fernandes.pdf>. Acesso em: 25/8/2019.

MENDES, Enir. **Políticas de Incentivo ao Aproveitamento de Resíduos Sólidos e Rejeitos da Mineração**. In: Seminário Reaproveitamento de Rejeitos e Economia Circular. Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <<http://www.feam.br/noticias/1/1683>>. Acesso em: 10/6/2019.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa COPAM nº 228, de 28 de novembro de 2018**. Conselho Estadual de Política Ambiental. Belo Horizonte, Minas Gerais, Diário do Executivo, 2018. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=47138>>. Acesso em: 08/6/2019.

MINAS GERAIS. **Lei Estadual nº 19.976, de 27 de dezembro de 2011**. Belo Horizonte, Minas Gerais, Diário do Executivo, 2011. Disponível em: <<https://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/completa/completa.html?tipo=LEI&num=19976&ano=2011>>. Acesso em: 09/6/2019.

MINAS GERAIS. **Lei Estadual nº 21.972, de 21 de janeiro de 2016**. Belo Horizonte, Minas Gerais, Diário do Executivo, 2016. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=40095>>. Acesso em: 08/9/2019.

MINAS GERAIS. **Lei Estadual nº 22.796, de 28 de dezembro de 2017**. Belo Horizonte, Minas Gerais, Diário do Executivo, 2017. Disponível em: <<https://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/completa/completa-nova-min.html?tipo=LEI&num=22796&comp=&ano=2017&texto=original>>. Acesso em: 08/6/2019.

MINAS GERAIS. **Resolução Conjunta SEMAD/FEAM nº 2.784, de 21 de março de 2019**. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável e Fundação Estadual do Meio Ambiente, Belo Horizonte, Minas Gerais, Diário do Executivo, 2019. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=48138>>. Acesso em: 08/6/2019.

MINERITA, 2019. **Aproveitamento de Resíduos**. Disponível em: <<http://www.minerita.com.br>>. Acesso em: 08/9/2019.

MOURÃO, José Murilo. **Estudo prospectivo do setor siderúrgico: NT do minério de ferro e pelotas, situação atual e tendências 2025**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Brasília, 2008. Disponível em: <https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Nota+Tecnica+TR02+MINERIO+DE+FERRO+E+PELOTAS_rev_04_4766.pdf/e4611287-faa1-4244-b9a2-931c42385229?version=1.0>. Acesso em: 05/6/2019.

NAVARRO, Guilherme Rafael Beltran; ZANARDO, Antenor; MONITBELLER, Cibele Carolina, LEME, Thaís Gützlfaf. **Livro de referência de minerais comuns e economicamente relevantes: Hidróxidos**. Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert, 2017. Disponível em: <<https://museuhe.com.br/banco-de-dados>>. Acesso em: 08/9/2019.

NOCITI, Denyse Meirelles. **Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabricação de cerâmicas vermelhas**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na área de Materiais), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, SP. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/94442>>. Acesso em: 23/8/2019.

PEREIRA, Eleonardo Lucas. **Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil na área de Geotecnia), Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP -, Ouro Preto, MG. Disponível em: <<https://repositorio.ufop.br/handle/123456789/6039>>. Acesso em: 30/10/2019.

PORFÍRIO, Thais; SANTOS, Lucíola. **Relatório Técnico para subsidiar solicitação de dispensa de EIA/RIMA da Mina do Andrade, Projeto Itabiritos**. Formulário de Orientação Básica - FOB - nº 1307595/2016. ArcelorMittal, Bela Vista de Minas, MG, março de 2017.

RENGER, Friedrich Ewald. **O “Quadro Geognóstico do Brasil” de Wilhelm Ludwig von Eschwege: Breves comentários à sua visão da geologia no Brasil.** Geonomos, v. 13, n. 1 e 2, 2005. Disponível em: <<https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistageonomos/article/view/11562>>. Acesso em: 10/9/2019.

RESENDE, Laís. **Estratégia e inovações para o reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro na Vale.** In: Seminário Reaproveitamento de Rejeitos e Economia Circular. Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <<http://www.feam.br/noticias/1/1683>>. Acesso em: 08/9/2019.

ROCHA, Luciano; CANÇADO, Raul Zanoni Lopes; PERES, Antônio Eduardo Clark. **Iron ore slimes flotation.** Minerals Engineering, v. 23, 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687510000658>>. Acesso em: 14/8/2019.

ROSIÈRE, Carlos Alberto; CHEMALE JR, Farid. **Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero - Uma visão geral e discussão.** Geonomos, v. 8, n. 2, 2000. Disponível em: <<https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistageonomos/article/view/11571>>. Acesso em: 11/6/2019.

SAMARCO. **Aproveitamento de rejeitos.** 2019. Disponível em: <<https://www.samarco.com/aproveitamento-de-rejeitos/>>. Acesso em: 09/5/2019.

SANT'ANA FILHO, Joaquim Nery. **Estudos de reaproveitamento dos resíduos das barragens de minério de ferro para uso na pavimentação de rodovias e fabricação de blocos intertravados.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Matérias) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG -, Belo Horizonte, MG. Disponível em: <http://www.posmat.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/120/2017/08/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Joaquim_Nery_Filho.pdf>. Acesso em: 23/8/2019.

SHETTIMA, Umara Ali; HUSSIN, Mohd; Warid, AHMAD, Yusof; MIRZA, Jahangir. **Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete.** Construction and Building Materials, v. 120, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/303439762_Evaluation_of_iron_ore_tailings_as_replacement_for_fine_aggregate_in_concrete>. Acesso em: 20/8/2019.

SILVA, Ana Paula Moreira da; VIANA, João Paulo; CAVALCANTE, André Luís Brasil. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas - Relatório de pesquisa.** Brasília: IPEA, 2012. Disponível em: <<http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/7702>>. Acesso em: 05/5/2019.

SILVA, Fabiane Leocádia da. **Aproveitamento e reciclagem de resíduos de concentração de minério de ferro na produção de pavers e cerâmica.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Rede Temática em Engenharia de Materiais - REDEMAT -, Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP -, Ouro Preto, MG. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3501>>. Acesso em: 18/7/2019.

SOMASUNDARAN, Ponisseril. **Principles of flocculation, dispersion and selective flocculation.** In: SOMASUNDARAN, Ponisseril. *Fine particles processing*. v. II, c. 48, 1980. Disponível em: <<http://www.columbia.edu/~ps24/PDFs/Principles%20of%20Flocculation%20Dispersion%20Selective%20Flocculation.pdf>>. Acesso em: 15/8/2019.

SOUZA, Rafael Eler de. **Utilização de resíduo de mineração para obtenção de madeira plástica.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Rede Temática em Engenharia de Materiais - REDEMAT -, Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP -, Ouro Preto, MG. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3054>>. Acesso em: 16/8/2019.

TAVARES, Paulo Henrique Campos Prado. **Obtenção de pigmentos de óxido de ferro a partir da lama gerada no beneficiamento de itabirito.** 2012. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Rede Temática em Engenharia de Materiais - REDEMAT -, Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP -, Ouro Preto, MG. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/3576/1/TESE_Obten%C3%A7%C3%A3oPigmentos%C3%93xido.pdf>. Acesso em: 10/8/2019.

TOLENTINO, Marcus Vinicius Campos. **Estudo da viabilidade técnica do aproveitamento do resíduo arenoso da mineração do itabirito.** 2010. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais) - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDNT -, Belo Horizonte, MG. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/70529231-Estudo-da-viabilidade-tecnica-do-aproveitamento-do-residuo-arenoso-da-mineracao-do-itabirito-marcus-vinicius-campos-tolentino.html>>. Acesso em: 10/8/2019.

TOTOU, Adriano Raimundo. **Efeito da dispersão na deslamagem e flotação de polpas de minérios hematíticos itabiríticos.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas), Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP -, Ouro Preto, MG. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2341>>. Acesso em: 16/11/2019.

YELLISHETTY, Mohan; KARPE, Vanda; REDDY, Erri Hymakar; Subhash, K. N.; RANJITH, Pathegama Gamage. **Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study.** Resources, Conservation and Recycling, v. 52, n. 11, 2008. Disponível em: <<https://research.monash.edu/en/publications/reuse-of-iron-ore-mineral-wastes-in-civil-engineering-constructio>>. Acesso em: 17/8/2019.

ZHANG, Shuhui; XUE, Xiangxin; LIU, Xiaogang; DUAN, Peining; YANG, He; JIANG, Tao; WANG, Dongshen; LIU, Ran. **Current situation and comprehensive utilization of iron ore tailing resources.** Journal of Mining Science, v. 42, n. 4, 2006. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/226961588_Current_situation_and_comprehensive_utilization_of_iron_ore_tailing_resources>. Acesso em: 5/8/2019.