

LUANA CAETANO ROCHA DE ANDRADE

**CARACTERIZAÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE FERRO, *IN*
NATURA E SEGREGADOS, PARA APLICAÇÃO COMO MATERIAL DE
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL**

2014

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

A553c
2014

Andrade, Luana Caetano Rocha de, 1984-

Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, *in natura*
e segregados, para aplicação como material de construção civil /
Luana Caetano Rocha de Andrade. – Viçosa, MG, 2014.
xiii, 96f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Eduardo Antônio Gomes Marques.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.82-91.

1. Resíduos industriais. 2. Minérios de ferro. 3. Materiais de
construção. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia
Civil. II. Título.

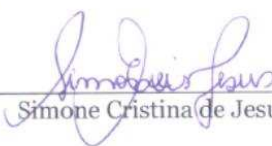
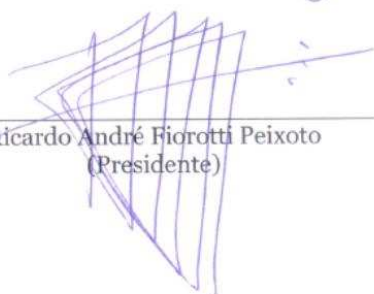
CDD 22. ed. 363.728

LUANA CAETANO ROCHA DE ANDRADE

**CARACTERIZAÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE FERRO, IN
NATURA E SEGREGADOS, PARA APLICAÇÃO COMO MATERIAL DE
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 08 de dezembro de 2014.

 _____ Igor Rodrigues de Assis	 _____ Izabel Christina D'Almeida Azevedo
 _____ Rita de Cássia Silva Sant'Anna Alvarenga	 _____ Simone Cristina de Jesus
 _____ Ricardo André Fiorotti Peixoto (Presidente)	

AGRADECIMENTOS

Ao professor e exemplo profissional Eduardo Antonio Gomes Marques pela orientação e amizade que se iniciaram ainda em minha graduação e se desenvolveram ao longo do mestrado e doutorado.

Ao professor Ricardo André Fiorotti Peixoto pela coorientação e pelas oportunidades de aprendizagem e crescimento.

A todos os professores que participaram de minha formação na Universidade Federal de Viçosa e me fizeram compreender o sentido das palavras “*Ediscere, Scire, Agere, Vincere*”.

Aos pesquisadores do grupo Reciclos-CNPq, à gerência de Geotecnia da VALE do Quadrilátero Ferrífero, aos funcionários e estudantes do “Laboratório de Materiais de Construção” da UFOP, ao Professor Sidney Nicodemos da Silva e aos técnicos do “Laboratório de Ensaio Não Destrutivos” do CEFET-MG, ao Professor Igor de Assis Rodrigues do DPS-UFV e à Professora Simone Cristina de Jesus do DEC-UFTM, que deram imenso suporte e contribuição para realização desta pesquisa.

Aos amigos de Viçosa, que sempre serão exemplos e inspiração.

Aos amigos de Uberaba, Alyne, Alex, Ana Carolina, Ana Paula, Bruno, Daniel, Flávio, Guilherme, Julio Cesar, Lauro, Mário, Mariluce, Natália, Priscila, Simone, Victor e Vinícius, que estiveram presentes, motivando e apoiando.

Ao meu namorado, amigo e companheiro Rafael Lima que se fez presente em momentos cruciais, suavizando, com seu estímulo e companhia, as árduas jornadas de trabalho.

Aos meus familiares pelo apoio e compreensão incondicional que sempre demonstraram.

Aos meus pais, Castro e Lígia, e aos meus irmãos, André e Matheus, para os quais nem encontro palavras que demonstrem todo meu amor e gratidão.

À Deus, que acredito estar presente em todos os momentos de minha vida, guiando e iluminando meu caminho.

SUMÁRIO

Lista de Tabelas	vi
Lista de Figuras	viii
Lista de Siglas	x
Resumo	xii
Abstract	xiii
1. Introdução	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo Geral	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Aspectos ambientais, riscos e danos potenciais associados à utilização de barragens como forma de disposição final de rejeitos da mineração de ferro	3
2.2. Rejeitos da mineração de ferro.....	7
2.3. Materiais de construção: uma revisão no contexto do reaproveitamento de rejeitos da mineração de ferro	11
3. Material e Métodos.....	22
3.1. Identificação do panorama geral das barragens de rejeito da mineração de ferro do Brasil.....	22
3.2. Avaliação de impactos ambientais de barragens de rejeito do Quadrilátero Ferrífero	23
3.3. Caracterização granulométrica, química, mineralógica e morfológica de rejeitos de barragens da mineração de ferro do Quadrilátero Ferrífero	26
3.3.1. Aspectos gerais das áreas de estudo	26
3.3.2. Métodos de coleta e análises.....	29
3.3.2.1. Plano de Amostragem	30

3.3.2.2.	Coleta e preparo das amostras	31
3.3.2.3.	Análise da composição granulométrica	32
3.3.2.4.	Análise da composição química e mineralógica	33
3.3.2.5.	Análise morfológica.....	35
3.4.	Método para obtenção de concentrados de minério de ferro, sílica e argila a partir de rejeitos da mineração de ferro	36
4.	Resultados e Discussões	39
4.1.	Panorama das barragens de rejeito da mineração de ferro no Brasil....	39
4.2.	Avaliação de impactos associados às barragens de rejeito da mineração de ferro	40
4.2.1.	Avaliação de impactos ambientais da fase de construção de uma barragem de rejeitos	41
4.2.1.1.	Impactos ao Meio Físico	41
4.2.1.2.	Impactos ao Meio Biológico e Ecossistemas Naturais	43
4.2.1.3.	Impactos ao Meio Socioeconômico.....	44
4.2.2.	Avaliação de impactos ambientais da fase de operação de uma barragem de rejeitos	44
4.2.2.1.	Impactos ao Meio Físico	45
4.2.2.2.	Impactos ao Meio Biológico e Ecossistemas Naturais	46
4.2.2.3.	Impactos ao Meio Socioeconômico.....	46
4.2.3.	Possíveis impactos após a desativação de uma barragem de rejeito	47
4.2.3.1.	Impactos ao Meio Físico	47
4.2.3.2.	Impactos ao Meio Biológico e Ecossistemas Naturais	48
4.2.3.3.	Impactos ao Meio Socioeconômico.....	48
4.3.	Caracterização de rejeitos brutos de barragens da mineração de ferro do Quadrilátero Ferrífero com vistas ao reaproveitamento na construção civil ..	49
4.3.1.	Análise da composição granulométrica dos rejeitos brutos.....	49

4.3.2. Análise da composição química e mineralógica dos rejeitos brutos	54
4.3.3. Análise morfológica dos rejeitos brutos	58
4.4. Análise comparativa dos concentrados de minério de ferro, sílica e argila obtidos do processamento de rejeitos da mineração de ferro do Quadrilátero Ferrífero	60
4.4.1. Análise comparativa da composição granulométrica	60
4.4.2. Análise comparativa da composição química e mineralógica.....	62
4.5. Perspectivas para aplicação de concentrados de sílica e argila obtidos do processamento de rejeitos da mineração de ferro do Quadrilátero Ferrífero na construção civil	67
4.5.1. Caracterização de concentrados de sílica obtidos da segregação de rejeitos da mineração de ferro.....	67
4.5.1.1. Análise da composição granulométrica.....	67
4.5.1.2. Análise da composição química e mineralógica	68
4.5.1.3. Análise morfológica.....	69
4.5.2. Caracterização de concentrados de argila obtidos da segregação de rejeitos da mineração de ferro.....	71
4.5.2.1. Análise da composição granulométrica	71
4.5.2.2. Análise da composição química e mineralógica	72
4.5.2.3. Análise morfológica.....	73
4.5.3. Utilização de concentrados de sílica e argila obtidos da segregação de rejeitos da mineração de ferro na construção civil	75
5. Conclusões	77
6. Referências	82
Apêndice 1.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química dos minerais normalmente encontrados em rejeitos da mineração de ferro, identificados por difração de raios-X.....	7
Tabela 2 - Resultados de análises teor de ferro total de diferentes amostras de rejeito de minério de ferro de minas da VALE.	8
Tabela 3 – Especificação da distribuição granulométrica para utilização de materiais como agregado miúdo (ABNT NBR 7211/09)	13
Tabela 4 - Composição das cinzas volantes utilizadas como pozolanas na fabricação do cimento	15
Tabela 5 - Especificação para material de enchimento em concretos asfálticos (DNER-EM 367/97).....	20
Tabela 6 - Indicadores, atributos e valores para avaliação dos impactos ambientais	25
Tabela 7 – Altura, área e volume final das barragens F1, F2, F3 e F4.....	28
Tabela 8 - Condições de operação para análise no μ EDX	34
Tabela 9 - Percentuais de areia grossa, areia média e areia grossa nos rejeitos brutos.....	51
Tabela 10 - Dimensão máxima característica e módulo de finura dos rejeitos analisados	52
Tabela 11 - Resultados semi-quantitativos da fluorescência de raios-X (% em peso)	54
Tabela 12 - Composição mineral em percentual de peso dos rejeitos analisados	57
Tabela 13 - Proporção de óxidos, determinados por microfluorescência de raios-X, presentes nas amostras de rejeito bruto e concentrados de minério, sílica e argila	63
Tabela 14 - Distribuição percentual dos minerais encontrados nas amostras de rejeito bruto e nos concentrados de minério, sílica e argila	65
Tabela 15 - Percentual em peso de areia fina e silte-argila em concentrados de sílica das barragens F1, F2, F3 e F4	68
Tabela 16 - Percentual em peso de óxidos em concentrados de sílica das barragens F1, F2, F3 e F4	68

Tabela 17 - Percentual em peso de minerais em concentrados de sílica das barragens F1, F2, F3 e F4	69
Tabela 18 - Percentual em peso de óxidos em concentrados de argila das barragens F1, F2, F3 e F4	72
Tabela 19 - Percentual em peso de minerais em concentrados de sílica das barragens F1, F2, F3 e F4	73
Tabela 20 - Avaliação dos possíveis impactos ao meio físico na fase de construção de uma barragem de rejeito.	93
Tabela 21 - Avaliação dos possíveis impactos ao meio biológico e ecossistemas naturais na fase de construção de uma barragem de rejeito.	93
Tabela 22 - Avaliação dos possíveis impactos ao meio socioeconômico na fase de construção de uma barragem de rejeito.	94
Tabela 23 - Avaliação dos possíveis impactos ao meio físico na fase de operação de uma barragem de rejeito.	94
Tabela 24 - Avaliação dos possíveis impactos ao meio biológico e ecossistemas naturais na fase de operação de uma barragem de rejeito.	95
Tabela 25 - Avaliação dos possíveis impactos ao meio socioeconômico na fase de operação de uma barragem de rejeito.....	95
Tabela 26 - Avaliação dos possíveis impactos ao meio físico de uma barragem de rejeitos desativada.....	95
Tabela 27 - Avaliação dos possíveis impactos ao meio biológico e de ecossistemas naturais de uma barragem de rejeitos desativada.....	96
Tabela 28 - Avaliação dos possíveis impactos ao socioeconômico de uma barragem de rejeitos desativada	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais destinos de rejeitos dentro da mineração no estado de Minas Gerais. Fonte: FEAM, 2011	4
Figura 2 –(a) Praia formada pela barragem F1, com pequeno lago ao fundo. (b) Praia formada pela barragem F2.	27
Figura 3 - (a) Praia formada pela barragem F3. (b) Barragem F4, vista panorâmica.	28
Figura 4 - Fluxograma de metodologia para análise tecnológica dos rejeitos. ...	29
Figura 5 - Pontos de coleta nas barragens F1, F2 e F3.	30
Figura 6 - Pontos de coleta na barragem F4.	31
Figura 7 - Fluxograma do processo de segregação de rejeitos da mineração de ferro desenvolvido por Peixoto <i>et al.</i> (2013).	37
Figura 8 - Distribuição das barragens da PNSB de acordo com a categoria de risco. Fonte: DNPM, 2013.	40
Figura 9 - Distribuição das barragens da PNSB de acordo com a categoria de dano potencial associado. Fonte: DNPM, 2013.	40
Figura 10 - Curva granulométrica obtida por peneiramento e zonas ótima e utilizável para agregado miúdo de acordo com a norma ABNT NBR 7211/09. ...	50
Figura 11 - Curva granulométrica obtida pelo método de granulometria a laser.	50
Figura 12 - Análise comparativa entre as frações pedregulho, areia grossa, areia fina e silte-argila dos rejeitos de cada barragem de acordo com norma ASTM D 3282/04.	51
Figura 13 - Análise comparativa dos óxidos presentes nos rejeitos analisados das barragens F1, F2, F3 e F4.	55
Figura 14 - Difrátogramas dos rejeitos das barragens F1, F2, F3 e F4.	56
Figura 15 - Microscopia eletrônica de varredura dos rejeitos brutos da barragem F1.	59
Figura 16 - Microscopia eletrônica de varredura dos rejeitos brutos da barragem F2.	59
Figura 17 - Microscopia eletrônica de varredura dos rejeitos brutos da barragem F3.	60
Figura 18 -Microscopia eletrônica de varredura dos rejeitos da barragem F4. .	60

Figura 19 - Curva granulométrica obtida pela granulometria a laser dos concentrados de minério, sílica e argila das barragens F1, F2, F3 e F4.....	61
Figura 20 - Comparação entre os D50 das amostras analisadas.	62
Figura 21 - Comparação entre os percentuais de óxidos na amostra de rejeito bruto.	63
Figura 22 - Comparação entre os percentuais de óxidos nos concentrados de minério.	63
Figura 23 - Comparação entre os percentuais de óxidos nos concentrados de sílica.	64
Figura 24 - Comparação entre os percentuais de óxidos nos concentrados de argila.	64
Figura 25 - Comparação entre os percentuais de minerais nas amostras de rejeito bruto.....	66
Figura 26 - Comparação entre os percentuais de minerais nos concentrados de minério.	66
Figura 27 - Comparação entre os percentuais de minerais nos concentrados de sílica.	66
Figura 28 - Comparação entre os percentuais de minerais nos concentrados de argila.	66
Figura 29 - Curva Granulométrica dos concentrados de sílica das barragens F1, F2, F3 e F4.....	67
Figura 30 - Microscopia eletrônica de varredura do concentrado de sílica da barragem F1.....	70
Figura 31 - Microscopia eletrônica de varredura do concentrado de sílica da barragem F2.	70
Figura 32 - Microscopia eletrônica de varredura do concentrado de sílica da barragem F3.	70
Figura 33 - Microscopia eletrônica de varredura do concentrado de sílica da barragem F4.	71
Figura 34 - Curva Granulométrica dos concentrados de argila das barragens F1, F2, F3 e F4.....	71
Figura 35 - Microscopia eletrônica de varredura do concentrado de argila da barragem F1.....	74

Figura 36 - Microscopia eletrônica de varredura do concentrado de argila da barragem F2.	74
Figura 37 - Microscopia eletrônica de varredura do concentrado de argila da barragem F3.	74
Figura 38 - Microscopia eletrônica de varredura do concentrado de argila da barragem F4.	75

LISTA DE SIGLAS

μEDX – Microfluorescência de Raios-X
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIA – Avaliação de Impactos Ambientais
APP – Área de Preservação Permanente
ASTM – <i>American Society for Testing Materials</i>
CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente
COPAM – Conselho de Política Ambiental
DEC – Departamento de Engenharia Civil
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral
DPS – Departamento de Solos
DRX – Difração de Raios-X
EM – Especificação de Material
FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais
IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

ICDD - *International Centre for Diffraction Data*

ICP – Espectrometria por Plasma de Acoplamento Indutivo

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MG – Minas Gerais

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

PNSB – Política Nacional de Segurança em Barragens

RN – Rio Grande do Norte

SIRGAS – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

SNISB – Sistema Nacional de Informação de Segurança em Barragens

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

UFTM – Universidade Federal do Triângulo Mineiro

UFV – Universidade Federal de Viçosa

USGS – *Unites States Geological Survey*

UTM – *Universal Transverse Mercator*

RESUMO

ANDRADE, Luana Caetano Rocha de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2014. **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, *in natura* e segregados, para aplicação como material de construção civil.** Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques. Coorientador: Ricardo André Fiorotti Peixoto.

Fatores como aumento da demanda mundial por minério de ferro, decréscimo da qualidade do minério extraído e impactos associados à disposição final de rejeitos têm motivado estudos que visam o reaproveitamento dos materiais contidos em barragens de rejeito da mineração de ferro. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar as perspectivas para o reaproveitamento de rejeitos da mineração de ferro na construção civil. Para tanto, realizou-se um estudo envolvendo: a avaliação de impactos ambientais, riscos e danos potenciais associados à estas barragens; a análise de método para segregação a seco de rejeitos da mineração de ferro; e a caracterização destes rejeitos na forma bruta e em concentrados de minério de ferro, sílica e argila. Os riscos e danos potenciais associados foram analisados com base em dados do DNPM, *database* 2103. A avaliação de impactos ambientais foi realizada pelo método de valoração de atributos, levando-se em consideração barragens de rejeito do Quadrilátero Ferrífero. Por fim, para caracterização de rejeitos, procedeu-se à análises de granulometria por peneiramento e a *laser*, microfluorescência de raios-X, difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura de rejeitos de quatro barragens do Quadrilátero Ferrífero. Desta forma, determinou-se a distribuição do tamanho das partículas, a composição química, a identificação das fases minerais e a morfologia das partículas. Os resultados obtidos demonstram, do ponto de vista técnico, que os rejeitos apresentam características e propriedades semelhantes às requeridas por diferentes materiais de construção. Os principais usos para estes rejeitos na construção civil, tendo em vista a granulometria, composição química e mineralógica e forma das partículas, estão associados à incorporação no cimento, fabricação de concretos, argamassas e cerâmicas e utilização em obras de pavimentação. Constata-se, dessa forma, um cenário bastante propício para aplicação dos rejeitos da mineração de ferro como materiais da construção civil.

ABSTRACT

ANDRADE, Luana Caetano Rocha de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, december 2014. **Characterization of iron mining tailings, *in natura* and segregated, for use as construction material.** Adviser: Eduardo Antonio Gomes Marques. Co-adviser: Ricardo André Fiorotti Peixoto.

The increasing global demand for iron ore, in addition to a reduction in ore content and environmental impacts associated with the disposal of ore waste have motivated studies about the reuse of materials from tailings dams. In this context, this work aims to evaluate some existing alternatives to reuse tailings from iron mines as materials for civil construction. To accomplish this objective, the work was divided into three phases: evaluation of the environmental impacts, risks and potential damages related to tailings dams; analysis of a dry segregation method for iron ore waste; and characterization of these tailings based on its total composition and on its iron ore, silica and clay fractions. Data from DNPM, database 2013, were used to analyze the potential risk of these tailings. The evaluation of environmental impacts was performed by using the attribute valuation method, considering tailings dams from Quadrilátero Ferrífero region. The characterization of tailings was done through sieving and laser particle size analysis, X-ray microfluorescence, X-ray diffraction and electronic microscopy scan of material collected on four tailings dams within the Quadrilátero Ferrífero. This methodology has enabled the determination of particle size distribution, chemical composition, mineral phases identification and particle morphology for all samples. The results show that, from a technical approach, that the tailings have characteristics similar to some materials currently used in civil construction in Brazil. Based on the particle size analysis, chemical and mineralogical composition, and on particle shape analysis, it was found that waste from these tailing dams can be incorporated to cement, concrete, mortar, ceramics and paving works. Additionally, reutilization of these materials can reduce risks and environmental impacts caused by the construction, operation and deactivation of tailings dams. The results from this work demonstrates that waste from iron ore mines is suitable to be used as material for civil construction.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o ferro ocupa o primeiro lugar na lista de exportações dentre os minerais explorados em território brasileiro, sendo responsável por, aproximadamente, 80% das rendas geradas pela exportação de minérios no país (IBRAM, 2012). Segundo o USGS (2014) a produção de minério de ferro no Brasil foi estimada em 398 milhões de toneladas em 2013, equivalente a 13,5% do total global. Este número coloca o Brasil entre os maiores produtores de ferro do mundo, comparado somente à China e à Austrália. No que diz respeito às reservas de minério de ferro, o Brasil, com reservas estimadas em 31 bilhões de toneladas, fica atrás somente da Austrália, com 35 bilhões de toneladas.

O aumento da produção de minério de ferro observado nas últimas décadas fez com que as interações entre essa atividade e o meio ambiente assumissem grande relevância. Neste cenário, observa-se que a mineração de ferro apresenta importância decisiva junto ao desenvolvimento, entretanto, ela gera um grande ônus para a sociedade: surgimento de uma enorme extensão de áreas drasticamente alteradas que, na maioria das vezes, não poderá ter um uso racional futuro. Estudos demonstram que os impactos causados por essa atividade são inúmeros e que se não forem devidamente controlados podem causar danos não somente à área diretamente afetada, mas também à sociedade, ao meio ambiente e à economia do local (KOPEZINSKI, 2000).

Um dos principais aspectos ambientais relacionados à extração do ferro é o grande volume de resíduo gerado no processo de beneficiamento, tratamento dado ao minério para o máximo aproveitamento do material de interesse. Alguns métodos de beneficiamento de minérios exigem a moagem dos materiais e adição de água e produtos químicos na planta de tratamento, produzindo nesse processo, um grande volume de resíduo em forma de polpa, chamado de rejeito, que é armazenado em barragens.

Atualmente, em função da alta demanda por minério de ferro, rochas com teores de ferro cada vez mais baixos passaram a ter sua lavra viabilizada, o que implica em aumento na quantidade de rejeitos gerada, requerendo barragens de rejeito com tamanhos cada vez maiores para sua disposição (VALE, 2012). Os

rejeitos dispostos em barragens, entretanto, podem conter grandes quantidades de ferro, que podem retornar ao processo produtivo, e de materiais passíveis de serem utilizados na construção civil.

É neste contexto que se insere o presente trabalho, que visa apresentar um panorama da disposição de rejeitos da mineração de ferro no Brasil. Além disso, avaliar a possibilidade de reaproveitamento destes rejeitos na construção civil, mediante a análise de suas características granulométricas, químicas, mineralógicas e morfológicas.

1.1. Objetivos

1.1.1. *Objetivo Geral*

Avaliar as perspectivas para o reaproveitamento de rejeitos da mineração de ferro, na forma bruta e em concentrados de sílica e argila, como materiais da construção civil. Além disso, apresentar um panorama geral dos riscos, danos pontenciais e impactos ambientais associados às barragens de rejeito.

1.1.2. *Objetivos Específicos*

A presente pesquisa apresenta, ainda, como objetivos específicos:

- ✓ Apresentar panorama geral da disposição de rejeitos da mineração de ferro no Brasil;
- ✓ Avaliar impactos ambientais advindos da construção, operação e desativação de barragens de rejeito da mineração de ferro do Quadrilátero Ferrífero;
- ✓ Analisar composição granulométrica, química, mineralógica e morfológica de rejeitos contidos em barragens de rejeito de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero;
- ✓ Avaliar método de segregação a seco de rejeitos em concentrados de minério de ferro, sílica e argila;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Aspectos ambientais, riscos e danos potenciais associados à utilização de barragens como forma de disposição final de rejeitos da mineração de ferro

A produção do ferro apresenta, associadas ao seu processo produtivo, as etapas de preparação da área, extração ou lavra, beneficiamento e comercialização do minério de ferro. Durante a etapa inicial de preparação da área, todo material sem valor econômico, também denominado estéril, retirado antes da extração do minério de ferro é, via de regra, armazenado em pilhas de estéril. A extração ou lavra consiste na retirada, normalmente a céu aberto, do mineral que contém um teor economicamente viável de ferro. Posteriormente, o material extraído é encaminhado para o beneficiamento, no qual o minério de ferro é tratado e transformado em produtos comercializáveis, de acordo com sua granulometria e características químicas.

Desta forma, para aumentar a qualidade e o teor de ferro do produto final, na maioria das vezes, é necessário se proceder ao beneficiamento do minério. Entende-se por beneficiamento o tratamento dado aos minérios, visando preparar granulometricamente, concentrar ou purificar minérios por métodos físicos ou químicos sem alterar a constituição química dos minerais. Em decorrência desta etapa grandes volumes e massas de resíduos misturados à água são gerados, material a que se dá o nome de rejeito (DNPM, 2012).

Depois de gerado, o rejeito obtido do processo de beneficiamento, de forma geral, é disposto em minas subterrâneas, em cavas exauridas de minas, em pilhas, por empilhamento a seco ou em barragens de rejeitos, dentre outros. Entretanto, segundo FEAM (2011), as barragens caracterizam a principal forma de disposição de rejeitos minerários no estado de Minas Gerais, armazenando em torno de 85 % dos rejeitos da mineração (Figura 1).

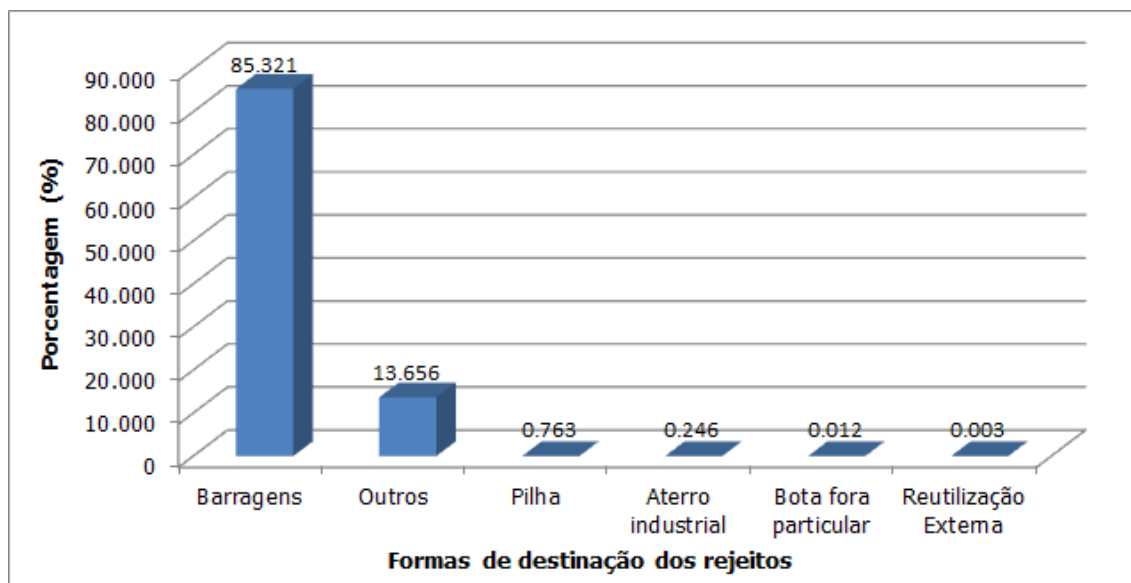


Figura 1 - Principais destinos de rejeitos dentro da mineração no estado de Minas Gerais.
Fonte: FEAM, 2011

Silva (2007), Duarte (2008) e Castro *et al.* (2011); descreveram as barragens de rejeitos como empreendimentos que apresentam significativos impactos ambientais associados, tais como:

- ✓ Desmatamento na fase de construção;
- ✓ Poluição da água superficial e subterrânea durante a operação e após o fechamento da mina;
- ✓ Geração de poeira gerada na praia de rejeito; e
- ✓ Impacto visual em todas as fases da vida útil da barragem.

Ainda no que diz respeito aos impactos ambientais, as águas direcionadas para as barragens de rejeito, de um modo geral, são reutilizadas no processamento de minérios. Os sólidos, entretanto, irão compor a barragem de rejeito indefinidamente, se nenhum outro uso for dado a ele. Desta forma, as barragens de rejeito que são, normalmente, obras de engenharia de grande porte, dão origem a impactos ambientais desde a sua construção, que poderão persistir até mesmo após a sua desativação.

Além dos impactos ambientais, as barragens de rejeito apresentam aspectos relacionados à segurança que são de grande relevância. Por serem, muitas vezes, estruturas de grande porte, as barragens de rejeito podem apresentar

expressivos danos potenciais em decorrência de seu rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento.

Eventos recentes de rompimentos de barragens de rejeitos exemplificam o grande risco inerente a estas estruturas. Em agosto em 2014, um desastre com uma barragem da empresa mineradora Imperial Metals Corp. despejou 5 milhões de metros cúbicos de rejeitos no rio Iskut, na província de British Columbia no Canadá. Segundo o Conselho de Defesa dos Recursos Naturais do Canadá, este derramamento casou impactos negativos em toda a América do Norte, uma vez que o rio Iskut deságua no rio Stikine, que cruza o território dos Estados Unidos (BAKER et al., 2014).

No Brasil, em setembro de 2014, o rompimento de uma barragem de rejeitos da mineração Herculano, localizada no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, deixou mortos e feridos. Além disso, causou graves impactos ambientais em córregos da bacia hidrográfica do Rio das Velhas que abastece a região metropolitana de Belo Horizonte (CRUZ, 2014).

Tão relevante é o tema em questão que tem sido foco de discussões em empresas, órgãos ambientais e no meio acadêmico, inserido, principalmente, no contexto do fechamento de minas. Segundo Bjelkevik (2011) é reconhecido e aceito que barragens de rejeito apresentam impactos significantes ao meio ambiente, à saúde pública e à comunidade local. Desta forma, deve ser estabelecido desde o início da atividade minerária, um plano de fechamento de mina que contemple a estabilidade física, química, ecológica e das condições sociais das barragens de rejeito, para se prevenir futuros impactos.

Em seu Guia de Fechamento de Mina, o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), afirma que as barragens de rejeito apresentam riscos significativos no que diz respeito à estabilidade e ruptura, interferência nas águas subterrâneas, restrições para uso futuro e falha no sistema de cobertura e drenagem (IBRAM, 2013).

Ozkan & Ipekoglu (2002), em estudo sobre impactos associados às barragens de rejeitos, apresentam um panorama detalhado das possíveis falhas em barragens que podem ocasionar riscos à segurança e impactos ambientais. De acordo com os autores, falhas na estrutura das barragens, tais como galgamento, erosão, *piping* e liquefação; podem afetar diretamente a qualidade ambiental de seu

entorno. Em longo prazo, a presença da barragem pode, ainda, resultar na contaminação da água superficial e subterrânea, emissão de materiais particulados e em distúrbios aos habitats e comunidade local.

Destarte, as barragens de rejeito podem originar impactos ambientais expressivos, ocupando áreas de grandes proporções. O gerenciamento adequado destes locais de disposição de rejeito é, portanto, de extrema importância e deve ser realizado em toda a sua vida útil, passando pela escolha da área, projeto, construção, operação e desativação.

Neste contexto, DNPM (2002); *Commonwealth of Australia* (2006); *The Mining Association of Canada* (2011) & IBRAM (2013), vêm propondo recomendações para o adequado gerenciamento das barragens de rejeitos. Dentre as suas disposições, encontra-se a inserção, no plano de fechamento de mina, da identificação e avaliação dos aspectos ambientais significativos, de saúde e segurança e riscos associado a estas barragens. Além disso, que se apresentem estudos de impactos ambientais e medidas de mitigação dos impactos ambientais negativos advindos de suas fases de construção, operação e desativação.

No Brasil, dentre as normas de regulamentação das ações com vistas à segurança e minimização de impactos ambientais em todas as fases da vida útil de uma barragem, cabe destacar:

- ✓ Lei Federal n. 6938/81 - estabelece a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) e inclui, em seu Art. 18, a Avaliação de Impactos Ambientais (AIA) como parte integrante do processo de licenciamento de atividades e empreendimentos efetiva ou potencialmente poluidores ou causadores de degradação ambiental.
- ✓ Resolução CONAMA n. 01/86 – estabelece critérios básicos e diretrizes para o uso e implementação da AIA.
- ✓ Lei Federal n. 12334/10 – estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).
- ✓ Deliberação Normativa COPAM n. 87/05 do estado de Minas Gerais – dispõe sobre o cadastro estadual de barragens.

2.2. Rejeitos da mineração de ferro

Segundo IBRAM (2012) os minérios de ferro, predominantemente explorados no Brasil, são a hematita (Fe_2O_3), uns dos principais minerais de ferro, e o itabirito, formações ferríferas compostas de hematita e quartzo (sílica). A hematita é extraída principalmente no estado do Pará, e apresenta teor médio de ferro em torno de 60%. Já o itabirito é extraído principalmente na região do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, com teor de ferro em torno de 50%. Apesar deste valor médio, já estão sendo extraídos itabiritos com teores mais baixos de ferro chegando a estar entre 25 e 30% (ALLORE MINERAÇÃO, 2012).

Além destes, a magnetita (Fe_3O_4), a goethita (FeOOH) e a siderita (FeCO_3) são minerais que apresentam consideráveis concentrações de ferro em suas composições. O minério de ferro, entretanto, é composto, tanto destes minerais de ferro, que apresentam valor econômico agregado, quanto de outros minerais, que não apresentam valor econômico para a mineração de ferro.

Neste sentido, os minerais de ferro, quando processados com objetivo de aumentar o teor de ferro contido no produto final, podem gerar rejeitos que contêm diferentes minerais em sua composição. Normalmente, os minerais associados aos rejeitos da mineração de ferro são caulinita, gibbsita, goethita, hematita, magnetita e quartzo (WOLFF, 2009). As fórmulas químicas e a composição destes minerais podem ser observadas no Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química dos minerais normalmente encontrados em rejeitos da mineração de ferro, identificados por difração de raios-X

Mineral	Fórmula Química	Composição
Caulinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Silicato de alumínio hidratado: 39,5% de Al_2O_3 46,5% de SiO_2 14,0% H_2O .
Gibbsita	$\text{Al}(\text{OH})_3$	Hidróxido de alumínio: 65,4% de Al_2O_3 34,6% de H_2O
Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$	Óxido de ferro hidratado: 90,0% de Fe_2O_3 10,0% de H_2O
Hematita	Fe_2O_3	Óxido de ferro: 70,0% de Fe 30,0% de O
Magnetita	Fe_3O_4	Óxido de ferro:

		31,0% de FeO
		69,0% de Fe ₂ O ₃
Quartzo (Sílica)	SiO ₂	Óxido de silício:
		46,74 % de Si
		53,26 % de O

Fonte: (MACHADO *et al.*, 2003)

Em função da grande demanda de minério de ferro pela sociedade moderna, rochas com teores cada vez mais baixos de ferro passaram a ter sua lavra viabilizada, o que implica em aumento na quantidade de rejeitos gerada, requerendo barragens de rejeito com tamanhos cada vez maiores para sua disposição. Neste contexto, grandes empresas mineradoras, tais como VALE, Ferrous, MMX e Samarco têm investido na extração de minérios de baixo teor que chegam a apresentar quantidades de ferro inferiores a 40% (VALE, 2012).

O que se tem observado atualmente, é que os rejeitos descartados e armazenados em algumas barragens podem apresentar concentração de ferro superior a alguns minérios de baixo teor, lavrados por empresas minerárias no Brasil. Analisando-se resultados apresentados por Wolff (2009), em estudo realizado para determinação do teor total de ferro de rejeitos de minério de ferro de minas da VALE, por meio de análise de Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES), observam-se concentrações que variam de 44,3 a 64,0%, em rejeitos de nove minas diferentes, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados de análises teor de ferro total de diferentes amostras de rejeito de minério de ferro de minas da VALE.

Amostra	Fe
-	%
1	44,8
2	56,3
3	46,5
4	44,3
5	45,6
6	53,4
7	51,8
8	48,6
9	64,0

Fonte: Wolff, 2009 (adaptado)

De acordo com Gomes *et al.* (2011), que promoveu a caracterização dos finos de uma barragem de rejeito da mineração de ferro, foram encontrados teores médios de 48,08% de Fe_2O_3 , 20,58% de SiO_2 e 3,16% de Al_2O_3 nestes rejeitos, sendo praticamente todo ferro proveniente da hematita. Supõe-se que esta seja uma realidade em muitas barragens de rejeito da mineração de ferro já encerradas no Brasil, principalmente no Quadrilátero Ferrífero, onde grande quantidade de minérios com altos teores de ferro já foram extraídos e beneficiados por processos pouco eficazes.f

Diante do cenário apresentado, a caracterização, visando o reaproveitamento de resíduos sólidos advindos de barragens de rejeitos da mineração de ferro, tem sido o foco de diferentes pesquisas nas últimas décadas. Para Borges (2008) o reaproveitamento dos resíduos existentes em barragens já desativadas pode apresentar grande viabilidade tanto econômica, quanto ambiental. Para tanto, a caracterização dos rejeitos se torna essencial, favorecendo, assim, a viabilização de seu reaproveitamento como subproduto na própria usina de beneficiamento ou em outro segmento industrial.

Entretanto, mais do que a caracterização, a granulometria associada às composição química e mineralógica é informação de grande importância para o reaproveitamento dos rejeitos da mineração de ferro. Isto por que, para aplicação destes rejeitos como materiais de construção, uso para o qual estes rejeitos são bastante considerados, o conhecimento destas características associadas é essencial. Neste âmbito, são apresentados a seguir estudos e pesquisas envolvendo a análise de tamanho de partículas e composição química e mineralógica em diferentes rejeitos da mineração de ferro.

Em estudo realizado com rejeitos da Mina do Pico - VALE, considerando diferentes frações separadas por sedimentação, constatou-se que frações finas do rejeito, $D_{50} = 11,9 \mu\text{m}$, apresentaram elevadas proporções de óxido de ferro. Além disso, observou-se que as frações coloidais, $D_{50} = 1 \mu\text{m}$, indicaram maiores proporções de óxidos de ferro hidratados e aluminossilicatos (SANTOS, 2010).

Vieira (2008), em análise de rejeitos da flotação mecânica da Samarco Mineração, concluiu que quanto maiores os tamanhos de partículas, maior o percentual de óxido de silício encontrado em análises químicas e mineralógicas; e quanto menores os tamanhos de partículas, maior o teor de óxido de ferro.

Corroborando com Vieira (2008), Praes *et al.* (2013), em caracterização de rejeitos de colunas de flotação do tratamento do minério de ferro, concluíram que o óxido de ferro está, normalmente, associado à granulometria mais fina dos rejeitos, mais precisamente, para o caso avaliado, abaixo de 37 μm .

Em pesquisa realizada com rejeitos da mineradora Anglo Ferrous foram obtidos valores de ferro, sílica e alumina da ordem de 42,88%, 28,99% e 5,11%, respectivamente, para partículas menores que 7,1 μm . Tais valores correspondem ao maior teor de ferro e menor valor de sílica obtidos pela análise conjunta da granulometria e química para estes rejeitos (ROCHA *et al.*, 2010; ROCHA & PERES, 2009).

Wolff (2009) determinou o percentual de ferro de diferentes faixas granulométricas, separadas por peneiramento, em rejeitos de nove minas diferentes da VALE. Os resultados encontrados demonstram que os maiores teores de ferro estão relacionados às partículas de diâmetro entre 10 a 15 μm . Entretanto, altos valores de ferro também foram encontrados para as partículas com diâmetro superiores a 15 μm . Neste estudo, os menores percentuais de ferro obtidos foram associados às partículas inferiores a 10 μm .

Por fim, Oliveira (2006) determinou a composição química de frações granulométricas de rejeitos obtidos do espessador de lamas da Usina de Conceição da VALE, localizada no Quadrilátero Ferrífero. As análises apontaram os maiores teores de ferro em partículas entre 9 e 23 μm e maiores percentuais de sílica na faixa de 45 a 106 μm .

Com base nas pesquisas apresentadas não é possível afirmar que exista um padrão de associação entre os tamanhos de partículas e a composição química destes rejeitos. Entretanto, percebe-se uma tendência de rejeitos da mineração de ferro que, como dito anteriormente, serem compostos basicamente por óxidos de ferro, sílica e alumínio, apresentando maior percentual de ferro em suas menores frações e maiores teores de sílica em suas maiores frações.

2.3. Materiais de construção: uma revisão no contexto do reaproveitamento de rejeitos da mineração de ferro

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei Federal nº 12.305/10, a disposição final de resíduos no meio ambiente deve ser empregada somente como o último recurso. Neste sentido, dentro de um plano gerenciamento de resíduos, a que estão sujeitos todos os empreendimentos minerários (art. 20, inciso I da PNRS), as barragens de rejeito devem ser vistas como alternativas provisórias para o armazenamento e não como uma solução ambiental final para os resíduos sólidos gerados na mineração.

A utilização da fração ferrosa dos rejeitos representa potencial ganho econômico para atividade mineradora, dado o alto valor agregado desse material, e o custo relativamente baixo para seu reprocessamento e recuperação (PEIXOTO *et al.*, 2013). Entretanto, grande parte do volume de uma barragem de rejeito é composta por resíduos não ferrosos, classificados como material inerte, ou Classe II B, de acordo com a norma ABNT NBR 10004/04.

Coelho (2008), analisando a utilização de rejeito de uma mina de ferro do Quadrilátero Ferrífero, afirma que os rejeitos de mineração constituem materiais potencialmente interessantes para a construção civil, desde que atendidas as premissas de melhoria de suas propriedades geotécnicas. Desta forma, os rejeitos da mineração de ferro podem ter usos diversos na construção civil.

As características químicas destes resíduos, por exemplo, são muito próximas às requeridas para fabricação de produtos de cerâmica. A fabricação de pavimento e substituição dos agregados para concreto são também opções para as quais a composição química não é muito rigorosa, tendo maior importância a granulometria e a resistência do material e podem ser avaliados para utilização na construção civil. Por fim, entre outros usos, pode-se avaliar a aplicação dos rejeitos para fabricação do cimento, uma vez que o alto teor de ferro no cimento pode eliminar a incorporação do ferro em pó no cimento convencional (ZHANG *et al.*, 2006).

Yellishetty *et al.* (2008) analisaram a adequação de resíduos da mineração de ferro, considerando tanto o material gerado antes do processamento do minério,

chamado estéril, quanto o material gerado depois do beneficiamento do minério, ou seja, o rejeito, de uma mina de ferro da Índia para uso na construção civil. Neste estudo, conclui-se que as partículas com granulometria de 12,5 a 20 mm são bastante adequadas para uso na fabricação de concreto. As partículas com granulometria entre 4,75 a 12,5 também foram avaliadas com êxito quando utilizadas como agregado para obras de construção diversas. Por fim, as partículas inferiores a 4,75 mm se mostraram bastante adequadas à fabricação de tijolos.

Estudos envolvendo o concreto, material de construção mais utilizado na sociedade moderna, têm sido realizados igualmente visando o reaproveitamento de rejeitos da mineração de ferro. Segundo Aïtcin (2000), atualmente o concreto tem sido enxergado como mais do que uma simples mistura de cimento, água e agregados. O autor afirma que, cada vez mais, tem-se aceitado a incorporação de diferentes minerais e materiais em sua composição. Além disso, nota-se que o concreto e o cimento estão evoluindo no que diz respeito ao meio ambiente, dentro de uma perspectiva de desenvolvimento sustentável, e que isto se deve ao fato de mais componentes alternativos terem sido adicionados ao clínquer.

No Brasil, os agregados para concreto têm especificações apresentadas pela norma ABNT NBR 7211/09, que divide os agregados em miúdos – cujos grãos passam pela peneira de 4,75 mm – e graúdos – cujos grãos passam pela peneira de abertura de 75 mm e ficam retidos na peneira de abertura de 4,75 mm.

De acordo com Albuquerque (2012), os agregados miúdos são sedimentos clásticos inconsolidados, de grãos em geral quartzosos, que são utilizados para os seguintes fins:

- ✓ Argamassas, de assentamento e revestimento, misturadas com cimento, com cal ou com cal e cimento em granulometria fina ou muito fina;
- ✓ Concretos asfálticos, já que juntamente com o *filer*, tem importante propriedade de impedir o amolecimento do concreto nos pavimentos em dias de calor;
- ✓ Concreto de cimento; e
- ✓ Pavimentos rodoviários.

A distribuição granulométrica para utilização de materiais como agregado miúdo, determinada de acordo com ABNT NBR NM 248/03, deve atender aos limites expostos na Tabela 3. Entretanto, podem ser utilizados materiais com distribuição granulométrica diferentes destes limites, desde que realizados estudos prévios de dosagem para que se comprove a aplicabilidade.

Tabela 3 – Especificação da distribuição granulométrica para utilização de materiais como agregado miúdo (ABNT NBR 7211/09)

Abertura da Peneira (mm)	Porcentagem retida acumulada, em peso			
	Zona Ótima		Zona Utilizável	
	Limite Inferior	Limite superior	Limite Inferior	Limite Superior
9.5	0%	0%	0%	0%
6.3	0%	0%	0%	7%
4.8	0%	5%	0%	10%
2.4	10%	20%	0%	25%
1.2	20%	30%	5%	50%
0.6	35%	55%	15%	70%
0.3	65%	85%	50%	95%
0.15	90%	95%	85%	100%

Esta mesma norma estabelece que deve-se ter um máximo de 3 a 5% de material pulverulento, ou seja, material de diâmetro inferior a 0,075 mm, para concreto submetido a desgaste superficial e concreto protegido de desgaste superficial, respectivamente. Materiais carbonosos, impurezas orgânicas, argila em torrões, materiais friáveis, óxidos de sódio e potássio, cloretos e sulfatos também são considerados impurezas no agregado miúdo (ALBUQUERQUE, 2012).

Zhao *et al.* (2014) e Toffolo *et al.* (2014) em estudo de rejeitos de barragens de rejeito, observaram que, do ponto de vista do comportamento mecânico, é viável a utilização de rejeitos de minério de ferro para substituir parcialmente a areia natural em concretos. Os autores afirmam que rejeitos da mineração de ferro incluem várias fases inertes e que grande parte de suas partículas são maiores do que as do cimento, o que indica que ele pode ser utilizado como agregado fino em concretos convencionais e mesmo de alto desempenho, com intuito de aumentar sua resistência.

Resultados relevantes foram obtidos em estudo sobre a viabilidade técnica do aproveitamento do rejeito oriundo de atividades mineradoras de ferro como agregado na produção do concreto para a fabricação de elementos pré-fabricados destinados à pavimentação. Segundo Costa *et al.* (2014) as resistências características à compressão dos bloquetes produzidos com rejeito da mineração de ferro apresentaram valores muito próximos às obtidas na produção de referência da indústria, constituindo-se aceno favorável para o desenvolvimento desta tecnologia.

Silva (2014) avaliou a aplicação de rejeitos da mineração de ferro para produção de *pavers* – blocos de concreto para pavimentação. A adição de rejeitos finos de concentração de minério de ferro pode dificultar a desmoldagem dos blocos de concreto quando utilizados como agregados, mas melhoram a resistência do material. Além disso, a adição dos rejeitos aos blocos de concreto não representa risco ao meio ambiente, quando submetidos às intempéries, fato comprovado por meio de ensaio de lixiviação.

Avaliando resíduos da mineração de ferro na produção de elementos de concreto para pavimentação, Toffolo *et al.* (2014) também encontraram resultados satisfatórios. O estudo comparativo das características físicas e mecânicas de blocos de concreto para pavimentação fabricados com substituição dos agregados artificiais pelos agregados naturais, em dosagens específicas, indica bons resultados de resistência à compressão, expansibilidade, absorção de água e aponta a viabilidade do emprego de agregados artificiais provenientes da reciclagem do rejeito de mineração para a fabricação destes blocos.

Como mencionado anteriormente, os materiais pulverulentos são indesejáveis quando se trata de uso como agregado miúdo para concreto. Entretanto, podem ser utilizados como aditivo no concreto como substâncias inertes, cimentantes, pozolantes e agentes de cristalização. Quando adicionados ao concreto tais materiais podem modificar de forma positiva suas características físicas e mecânicas (BAUER *et al.*, 2012).

De acordo com Bauer *et al.* (2012) materiais inertes, como o quartzo, finamente divididos, podem ser utilizados como aditivos no concreto, na proporção de 5 a 15%, modificando suas características físicas e mecânicas. Quando inertes, estes

materiais puerulentos podem melhorar as características de resistência à compressão no concreto.

Também são passíveis de ser adicionados ao concreto materiais silicosos ou silico-aluminosos que, sozinhos, possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes (JOHN *et al.*, 2003). Tais materiais são denominados pozolanas e apresentam especificação na norma ABNT NBR 12653/14.

Nesta norma, as pozolanas são divididas em três classes, como se segue:

- ✓ Classe N – pozolanas naturais e artificiais, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, cherts silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas;
- ✓ Classe C – cinzas volantes produzidas pela queima do carvão mineral em termoeletricas; e
- ✓ Classe E – quaisquer materiais com atividade pozolânica, ou seja, que apresentem capacidade de reagir com hidróxido de cálcio em presença de água e formar compostos com propriedades cimentícias.

A norma estabelece, ainda, que uma das características químicas para que o material seja utilizado como pozolona classe E é que ele apresente teor de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ maior que 50%, determinado por meio de método de ensaio específico. Muitas vezes, um material silicoso ou silico-aluminoso, pode ter a atividade pozolânica ativada mediante tratamento térmico, promovido com intuito de tornar amorfos os materiais silicosos ou silico-aluminosos finamente divididos.

A Tabela 4 apresenta a composição química de materiais denominados cinzas volantes, que têm sido utilizados como pozolanas adicionadas ao cimento Portland para fabricação do concreto.

Tabela 4 - Composição das cinzas volantes utilizadas como pozolanas na fabricação do cimento

Constituintes	Teor(%)
SiO_2	55,62 a 60,85
Al_2O_3	28,85 a 29,25
Fe_2O_3	3,15 a 7,15
Outros óxidos	3,55 a 6,29

Fonte: Marciano e Kihara (1997) & Isaia (1995) *upud* John *et al.* (2003)

A incorporação dos materiais pozolânicos ao concreto, melhora a sua trabalhabilidade, protege o concreto contra a expansão, aumenta a impermeabilidade e melhora a resistência do concreto à ação da água do mar ou outras águas agressivas como as sulfatadas. A utilização de pozolanas trata-se de um assunto bastante complexo, devido a determinação de sua composição e industrialização. Entretanto, a aplicação deste material tem-se tornado uma imposição de natureza econômica e tecnológica, principalmente em grandes obras, onde suas qualidades apresentam grande relevância. No Brasil, até o momento, as iniciativas são extremamente incipientes no que diz respeito à utilização desse material (OLIVEIRA, 2012).

Neste contexto, também o cimento Portland, utilizado para fabricação do concreto, já tem incorporado uma ampla variedade de resíduos em sua fabricação, incluindo cinzas volantes da combustão do carvão, escória granulada de alto-forno da produção do aço e sílica ativa da produção de ferro-silício. No entanto, estes materiais são, na maioria das vezes, utilizados apenas para substituir uma porção do cimento, em torno de 10-50% (embora, por vezes, usado em maior quantidade). Isto posto, é possível afirmar que existe grande interesse em ampliar o uso de materiais alternativos na fabricação do cimento Portland com objetivo de criar cimentos feitos inteiramente ou quase inteiramente a partir de materiais de reaproveitamento; e os resíduos da mineração de ferro apresentam grande potencial para este tipo de uso (JUENGER *et al.*, 2011).

A aplicação de rejeitos da mineração de ferro na forma de pó foi estudada, também, para aplicação em argamassa de cimento Portland por Aristimunho & Bertocini (2012). Ensaio físicos e mecânicos foram realizados em corpos de prova com variadas proporções de cimento, areia e rejeito, tendo sido avaliada a utilização do rejeito como adições, como substituto da areia e como substituto do cimento. Os resultados demonstraram uma melhora no desempenho pela substituição da areia pelo rejeito, sendo o maior valor de resistência encontrado para uma substituição de 100% da areia.

De acordo com a norma ABNT NBR 13281/01 as argamassas são misturas homogêneas de agregado miúdo, aglomerante inorgânico e água, contendo ou

não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento. Pouca informação existe sobre as especificações de agregados e aditivos para argamassas. Entretanto, algumas pesquisas apontam para a viabilidade da aplicação de rejeitos da mineração de ferro em substituição destes materiais na fabricação da argamassa.

Fontes *et al.* (2014) utilizaram resíduos da mineração de ferro como matéria prima alternativa no desenvolvimento de argamassas de revestimento e assentamento. As argamassas foram dosadas segundo proporção 1:3 com cimento, cal hidratada e agregados, natural e reciclado. Os resultados alcançados permitiram avaliar que é possível usar o resíduo das barragens de contenção de rejeitos de minério de ferro como matéria-prima de forma técnica e ambientalmente adequada para a redução dos impactos ambientais da mineração com a produção de argamassas.

Bastos (2013) propôs a substituição de agregado de argamassas e peças em concreto pré-fabricado como *pavers* para o revestimento de pavimentos por rejeitos da mineração de ferro. Esses foram adicionados com substituição de até 80% de agregados natural por rejeitos de barragens de minério de ferro nos *pavers* e de 100% de substituição nas argamassas, produzindo significativas melhorias nas propriedades mecânicas e de durabilidade destes elementos. Este mesmo autor propôs, ainda, a produção de argamassas mistas de cimento Portland em que utilizou-se rejeitos de barragem de minério de ferro como agregados e como aglomerantes. As argamassas produzidas apresentaram viabilidade técnica e ambiental, exibindo ainda características favoráveis a produção de revestimentos.

A substituição das argilas, utilizadas para fabricação das cerâmicas, por rejeitos da mineração de ferro também tem sido avaliada em pesquisas recentes. De acordo com Cabral Júnior *et al.* (2008) o baixo valor agregado das argilas para fabricação da cerâmica vermelha faz com que a mineração opere de maneira a abastecer somente mercados locais. Desta forma, o estudo da viabilidade de aplicação do material contido em barragens de rejeito neste segmento aumentaria a oferta deste tipo de material de construção.

As cerâmicas são materiais de construção obtidos pela secagem e cozimento de materiais argilosos. Segundo Verçosa (2012), para obtenção de cerâmicas com

excelente resistência à compressão é desejável um teor de argila de 60%, sendo o restante composto por silte, areia fina e areia média. Como o segmento não apresenta especificações químicas muito rigorosas, o que irá determinar a viabilidade de utilização de um material como matéria-prima da indústria cerâmica será predominantemente a sua composição granulométrica e os testes de resistência mecânica aplicados para cada produto específico.

As argilas para fabricação de cerâmicas apresentam constituição química amplamente variada, mas pode-se dizer que são compostas predominantemente de argilominerais silicatados de alumínio e ferro. Esta variabilidade natural das características das argilas e o emprego de técnicas de processamento relativamente simples para fabricação de cerâmicas vermelhas, tais como tijolos e telhas, facilitam a incorporação de outros tipos de materiais. Alguns tipos de resíduos até facilitam o processamento e melhoram a qualidade do produto final (DONDI *et al.*, 1997).

Neste cenário, Silva (2014) avaliou a incorporação de rejeitos da mineração de ferro para produção de cerâmica e observou que a adição de rejeitos em materiais cerâmicos pode ser tecnicamente viável. Os resultados relativos às propriedades tecnológicas destes materiais apresentaram variações razoáveis na retração linear de secagem e queima, absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente, resistência à flexão e perda ao fogo, gerando sempre resultados compatíveis com os encontrados na literatura e dentro das normas brasileiras.

Chen *et al.* (2011) avaliaram a possibilidade de utilização de rejeitos da mineração de ferro da China para construção de tijolos, que foram denominados tijolos ecológicos. Além dos rejeitos, foram adicionadas ao processo argila e cinzas, obtidas de precipitadores eletrostáticos de uma usina térmica, para melhoria da qualidade do tijolo. A conclusão do estudo demonstrou a viabilidade de se fabricar tijolos utilizando-se rejeitos da mineração de ferro, podendo a porcentagem de rejeito utilizado ser de até 84% do peso total dos compostos, observando-se os teores de água, pressão, tempo e temperatura.

Souza *et al.* (2008) incorporaram o rejeito de minério de ferro, advindo de uma usina de pelletização, à massa argilosa utilizada para fabricação de cerâmica, a fim de avaliar as alterações na microestrutura do material. Os resultados

mostraram que a adição do rejeito à massa argilosa altera significativamente a microestrutura da cerâmica, sendo que incorporações de até 10% em peso do rejeito são benéficas para a qualidade da cerâmica, por meio da redução da porosidade.

Estudo realizado por Vieira *et al.* (2006), com objetivo de caracterizar rejeitos da mineração de ferro e avaliar a influência de sua adição nas propriedades físicas e mecânicas de uma típica massa de cerâmica vermelha, demonstrou que a granulometria deste material é adequada para incorporação em cerâmica vermelha, apresentando 96% das partículas com diâmetro esférico equivalente abaixo de 2 μm . Além disso, verificou-se que o rejeito incorporado na quantidade de 5% em peso melhorou a absorção de água e a resistência mecânica da cerâmica.

Chaves (2009) avaliou o comportamento de argila do pólo cerâmico da grande Natal/RN enriquecida com resíduos da mineração de ferro e obteve resultados de tensão de ruptura à flexão, em todas as amostras, com até 10% de resíduos da mineração de ferro, superiores a matriz sem incorporação de resíduos.

Por fim, Nociti (2011) constatou que ao se agregar até 5,0% de rejeitos finos à massa cerâmica para a fabricação de tijolos maciços, os mesmos atendem aos valores do módulo de ruptura à flexão exigidos pelas normas. Valores superiores a este, provocam uma queda na resistência, não sendo favorável para tijolos estruturais.

Os rejeitos da mineração de ferro podem ter, também, o uso viabilizado na área de pavimentação, como demonstrado nos estudos descritos a seguir. Campanha (2011) e Oliveira (2013), revelaram que o material apresenta características compatíveis com as exigências para utilização em camadas de sub-base e base em solo-cimento para pavimentos flexíveis. De acordo com Silva (2013) o solo-cimento é uma mistura de solo com aglomerante hidráulico artificial, cimento Portland, de tal modo que haja uma estabilidade entre estes dois materiais, melhorando as propriedades da mistura. Myrrha (2003) apresenta o solo-cimento como um material alternativo de baixo custo que pode ser utilizado como pavimentos.

Bastos *et al.* (2013) afirmam ser possível produzir camadas de pavimentos com rejeitos de barragem de minério de ferro que atendam parâmetros normativos

para resistência mecânica, e ainda que a mistura entre rejeitos de barragem de minério de ferro e outros rejeitos granulares podem produzir uma mistura estabilizada granulometricamente de grande capacidade mecânica.

Também com vistas à aplicação de rejeitos em pavimentos, análise realizada com material coletado em barragem de rejeito do Quadrilátero Ferrífero, constatou grande potencial de uso do rejeito de minério de ferro como material de enchimento alternativo, denominado *filer*, para concretos asfálticos. A incorporação deste material nas misturas asfálticas demonstrou desempenho mecânico satisfatório com ganhos de natureza ambiental quando comparados aos agregados pétreos (SILVA, 2010).

Para a fabricação de concreto asfáltico misturam-se, em proporções calculadas, frações de diferentes graduações, incluindo entre elas o *filer*. O *filer* trata-se de material quimicamente inerte, impalpável e finamente dividido (entre 5 a 80 µm), que quando adicionado à betumes fluidos, na proporção de 5 a 10%, melhora sua qualidade no que diz respeito ao amolecimento em dias de grande calor (OLIVEIRA, 2012).

A norma DNER-EM 367/97, estabelece que o *filer* deve ser um material mineral inerte em relação aos demais componentes da mistura, finamente dividido, passando pelo menos 65% na peneira de 0,075 mm. A Tabela 5 apresenta a especificação granulométrica para este material.

Tabela 5 - Especificação para material de enchimento em concretos asfálticos (DNER-EM 367/97)

Abertura da malha (mm)	%, em peso, passando
0,42	100
0,18	95-100
0,075	65-100

Analisando o panorama apresentado, os impactos sociais e ambientais advindos da disposição final de rejeitos em barragens; a redução da disponibilidade e qualidade de materiais naturais para empresas da mineração de ferro e de construção civil; e os resultados satisfatórios obtidos na utilização de rejeitos de mineração de ferro como materiais da construção, vislumbra-se um cenário

bastante favorável para solução ambiental das barragens de rejeito e o reaproveitamento dos resíduos sólidos ali presentes, como poderá ser visualizado a seguir.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Identificação do panorama geral das barragens de rejeito da mineração de ferro do Brasil

A fim de embasar o gerenciamento e monitoramento adequado das barragens de rejeito no Brasil, a Lei Federal n. 12334/10, dispõe que o órgão fiscalizador deve implantar e manter o cadastro das barragens para fins de incorporação ao Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Deve, ainda, exigir do empreendedor o cadastramento e a atualização das informações relativas às barragens de sua responsabilidade. Atualmente, o órgão responsável pela efetivação dos cadastros das barragens ligadas à mineração no Brasil é o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM).

Além disso, a mesma lei estabelece que barragens com as seguintes características sejam classificadas por categoria de risco e por dano potencial associado e inseridas na PNSB, de acordo com o estabelecido por órgão competente:

- ✓ altura do maciço maior ou igual a 15 metros;
- ✓ capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³;
- ✓ reservatório que contenha resíduos perigosos, conforme normas técnicas aplicáveis; ou
- ✓ categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas.

Desta forma, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), em sua Resolução CNRH n. 143/12, fornece metodologia para enquadrar as barragens para disposição de resíduos e rejeitos por categoria de risco, que pode ser alto, médio ou baixo, de acordo com características técnicas, do estado de conservação do empreendimento e do atendimento ao Plano de Segurança da Barragem. Ademais, o CNRH apresenta metodologia para classificação destas barragens por categoria de dano potencial associado, que pode, também, ser alto, médio ou baixo, e deve se dar em função do potencial de perdas de vidas

humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da possível ruptura da barragem.

Para apresentação do panorama das barragens de rejeito da mineração de ferro do Brasil foi realizado um levantamento de dados junto ao SNISB, disponibilizados no *site* do DNPM, *database* 2013. Por meio destes dados foram identificados o número de barragens de rejeito da mineração de ferro no Brasil, a localização destas barragens, a fase da vida útil em que se encontram – construção, operação ou inativa – e, ainda, a classificação de risco e danos potencial associado a estas barragens.

3.2. Avaliação de impactos ambientais de barragens de rejeito do Quadrilátero Ferrífero

A metodologia para avaliação dos impactos ambientais está fundamentada na Resolução CONAMA n. 01/86. Esta resolução estabelece que a avaliação de impactos ambientais deve ser realizada para as fases de construção, operação e encerramento das atividades, promovendo-se um diagnóstico dos impactos para os meios físico (subsolo, as águas, o ar e o clima), biológico e ecossistemas naturais (fauna e flora) e socioeconômico (interação homem, ambiente e economia). Além disso, que deve ser composta pela identificação, previsão da magnitude e interpretação da importância dos prováveis impactos relevantes.

Neste sentido, para identificação dos impactos ambientais ao longo da vida útil de uma barragem de rejeito, procedeu-se ao levantamento prévio, com base em dados secundários, dos possíveis impactos associados às suas fases de construção, operação e desativação. Posteriormente, foram realizadas visitas *in loco* à três barragens de rejeito da mineração de ferro localizadas no Quadrilátero Ferrífero, que se encontravam nas fases de construção, operação e desativação, a fim de se realizar o reconhecimento das características do ambiente afetado e a validação dos impactos previamente identificados.

Após a identificação dos impactos ambientais é preciso classificá-los de acordo com sua importância e significância, que são definidas no presente trabalho como a magnitude dos impactos. Neste sentido, para a classificação dos

impactos foi utilizada metodologia aplicada pela VALE em suas avaliações de impactos ambientais, que se baseia no método de ponderação de atributos para definição da magnitude, apresentado por Sánchez (2008).

Por meio desta metodologia são avaliados indicadores chaves para classificação dos impactos ambientais, sendo estes: natureza; reversibilidade; abrangência; relevância; duração; incidência e prazo para manifestação. A avaliação dos indicadores é baseada em atributos que são valorados em função de sua importância para a classificação dos impactos quanto à sua magnitude.

A magnitude de um impacto pode ser traduzida como a importância e significância da alteração da qualidade ambiental do meio que está sendo objeto da avaliação. Na avaliação de impactos ambientais apresentada a seguir, a magnitude é determinada a partir do módulo do resultado do produto dos valores associados aos indicadores e atributos de valoração de impactos ambientais (II). Feito isto, a magnitude é expressa por meio dos seguintes parâmetros e padrões:

- ✓ **Desprezível (DE)**— decorrente obrigatoriamente de impactos classificados como irrelevantes, cujo valor é igual a zero (0);
- ✓ **Baixa (BX)**—o resultado do produto dos valores atribuídos aos atributos de valoração inseridos entre 1 e 6, inclusive;
- ✓ **Moderada (MD)**— o resultado do produto dos valores atribuídos aos atributos de valoração inseridos entre 8 e 18, inclusive;
- ✓ **Alta (AT)**— o resultado do produto dos valores atribuídos aos atributos de valoração inseridos entre 24 e 81, inclusive.

Na ocasião do cálculo da magnitude dos impactos, os resultados negativos correspondem a impactos adversos e os resultados positivos correspondem a impactos benéficos ao meio ambiente, entretanto, para definição da magnitude é utilizado o módulo dos valores. Desta forma, quanto maiores os valores obtidos, maior é a magnitude do impacto avaliado.

Os indicadores duração, incidência e prazo para manifestação dos impactos são utilizados apenas para caracterização do impacto ambiental, não interferindo em sua magnitude. A Tabela 6 apresenta os indicadores, atributos, com suas descrições e valores atribuídos para classificação dos impactos ambientais.

Tabela 6 - Indicadores, atributos e valores para avaliação dos impactos ambientais

Indicador de valoração do impacto (IAI)	Atributos (At)	Descrição	Valor (Vr)
Natureza (N)	Positivo (+)	Impacto benéfico	1
	Negativo (-)	Impacto adverso	-1
Reversibilidade (RV)	Reversível (R)	Cessada atividade o retorna, no curto prazo, a condições semelhantes às iniciais	1
	Reversível a médio e longo prazo (R ^{ML})	Cessada atividade o retorna, no médio e longo prazo, a condições semelhantes às iniciais	2
	Irreversível (I)	Cessada atividade o impacto permanece	3
Abrangência (AB)	Pontual (P)	Impacto restrito à área do empreendimento	1
	Local (L)	Impacto extrapola a área do empreendimento, porém se restringe a sua área de influência direta	2
	Regional (RG)	Impacto extrapola a área do empreendimento e atinge escala regional	3
Relevância (RL)	Irrelevante (IR)	Impacto não pode ser percebido ou mensurado	0
	Baixa relevância (BR)	Impacto é percebido, porém não caracteriza perdas ou ganhos de qualidade ambiental	1
	Média relevância (MR)	Impacto é percebido e caracteriza perdas ou ganhos de qualidade ambiental	4
	Alta relevância (AR)	Impacto é percebido e caracteriza perdas ou ganhos de qualidade ambiental expressivos	9
Indicador Complementar	Atributos	Descrição	
Duração (D)	Temporário (T)	Alteração de caráter transitório dentro de um etapa da atividade	
	Permanente (P)	Alteração de caráter permanente dentro de um etapa da atividade	
Incidência (I)	Direto (DI)	Impacto em decorrência direta da atividade – impacto primário	
	Indireto (IN)	Impacto em decorrência de um impacto direto – impacto secundário	
Prazo para manifestação (PM)	Curto prazo (CP)	Impacto se manifesta imediatamente após a realização da atividade que o originou	
	Médio a longos prazos (M ^{LP})	Impacto se manifesta após um intervalo de tempo da realização da atividade que o originou	

3.3. Caracterização granulométrica, química, mineralógica e morfológica de rejeitos de barragens da mineração de ferro do Quadrilátero Ferrífero

3.3.1. Aspectos gerais das áreas de estudo

Para se proceder à caracterização de rejeitos da mineração de ferro do Quadrilátero Ferrífero, foi realizada uma parceria com a empresa VALE para coleta e análise destes materiais. As áreas de estudo foram selecionadas levando em consideração o potencial de riscos ambientais e relevância econômica, de acordo com dados fornecidos pela VALE e o inventário estadual de barragens de 2012 da Fundação Estadual do Meio Ambiente do Estado de Minas Gerais (FEAM).

Desta forma, foram consideradas áreas de estudo do presente projeto quatro barragens de rejeitos da mineração de ferro, denominadas F1, F2, F3 e F4, classificadas como classe III (alto risco ambiental), segundo classificação disposta na Deliberação Normativa COPAM n. 87/05 do Estado de Minas Gerais, para as quais a VALE pretende dar novas utilizações não somente às áreas, mas também aos resíduos ali armazenados.

Estas barragens são compostas, praticamente, por rejeitos advindos do beneficiamento do itabirito e hematita, principais minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Estes minérios apresentam teor de ferro em torno de 50% e 60%, respectivamente, e originam rejeitos compostos, em sua maioria, por sílica (SiO_2) e óxidos de ferro remanescentes. Sabe-se, portanto, que as barragens F1, F2 e F3, receberam maior quantidade de rejeitos de itabiritos e a barragem F4 maior quantidade de rejeitos de hematita.

Dentre estas barragens, três (F1, F2 e F3) fazem parte do Complexo Itabirito, de propriedade da VALE. Tais barragens localizam-se na bacia do rio das Velhas, estando próximas a centros urbanos relevantes, como, por exemplo, Conselheiro Lafaiete, Ouro Preto, Mariana, Itabirito e Belo Horizonte.

As barragens F1 e F2 entraram em operação em 1978 e 1988, respectivamente, e encontram-se em vales adjacentes, estando praticamente secas

superficialmente, apenas com a formação de um pequeno espelho d'água na área da barragem F1, devido à presença de nascentes e de água proveniente da drenagem de águas pluviais, como pode ser visualizado nas Figura 2a e 1b.

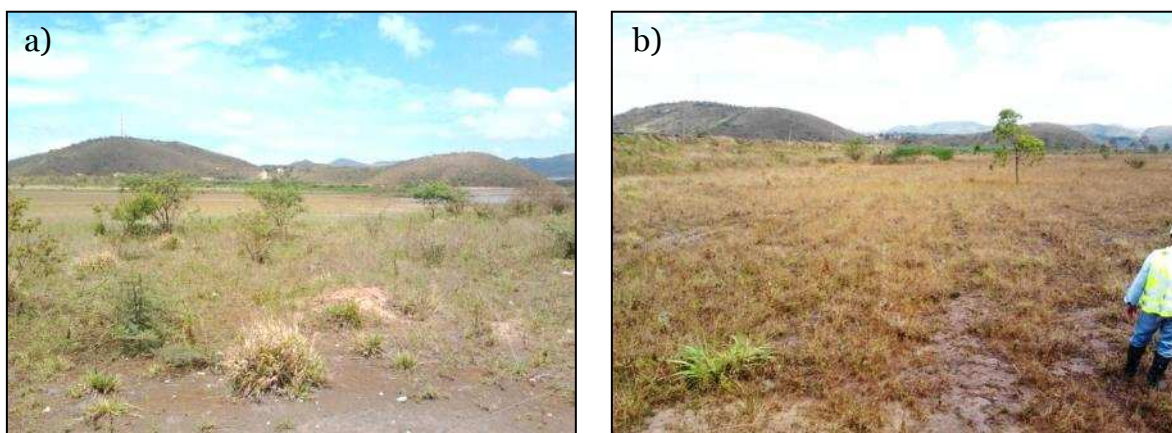


Figura 2 –(a) Praia formada pela barragem F1, com pequeno lago ao fundo. (b) Praia formada pela barragem F2.

A barragem F3, que foi construída no ano de 1999 e está localizada em vale próximo à F1 e F2, já apresenta maior quantidade de água, com a formação de um lago na parte mais distante do corpo da barragem, como pode ser visualizado na Figura 3a.

A liberação das áreas ocupadas por estas barragens é de grande relevância para a VALE, uma vez que ainda existe grande quantidade de minério na região. A estimativa da VALE é que ainda seja extraído minério de ferro por 70 anos no complexo em que estas barragens estão inseridas, o que é preocupante, uma vez que as áreas para construção de barragens na região estão se esgotando. Duas novas barragens já estão previstas, cada uma com vida útil estimada de 10 anos, podendo variar em função da qualidade do minério beneficiado e da produção desejada. A liberação da área de barragem F3 tem importância, ainda, por se tratar de uma área localizada a montante de núcleos populacionais, o que aumenta o risco associado a esta estrutura.

Somada às áreas necessárias para instalação de barragens de rejeito, existe ainda a demanda por áreas para armazenamento de material estéril, sendo a instalação de pilhas de estéril um dos possíveis usos para áreas ocupadas pelas barragens F1, F2 e F3.

A barragem F4 (Figura 3b), construída no ano 2000, encontra-se próxima aos centros urbanos de Ouro Preto, Itabirito e Região Metropolitana de Belo Horizonte, estando inserida na bacia do córrego Vargem Grande. Apesar de sua capacidade de armazenamento já estar esgotada, ela ainda recebe o rejeito de uma usina de beneficiamento em razão da retirada do rejeito mais antigo presente na barragem, em um projeto de recuperação de seus finos que teve início em 2011.

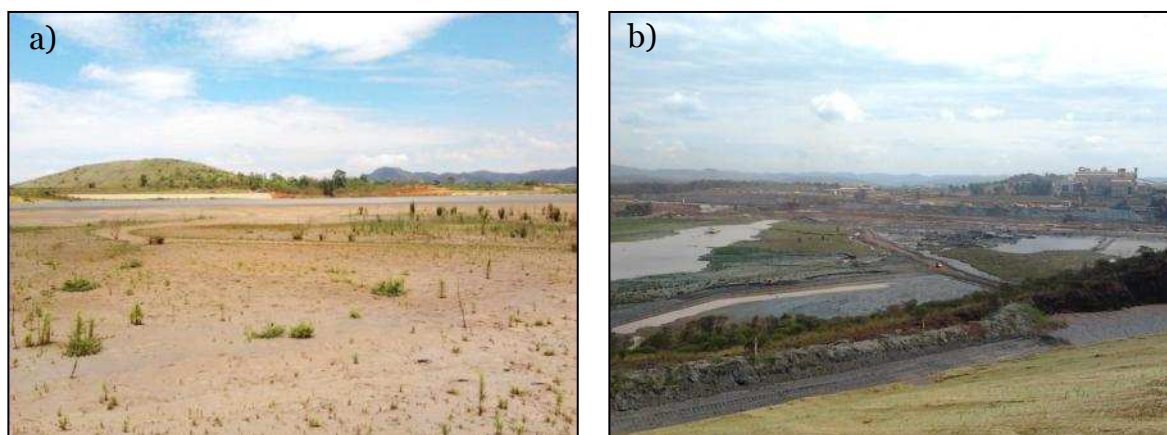


Figura 3 - (a) Praia formada pela barragem F3. (b) Barragem F4, vista panorâmica.

Como o material retirado da barragem é bastante rico em ferro, parte é destinada a pequenas usinas de beneficiamento, localizadas no interior da própria barragem, sendo misturada com o produto de outras usinas de beneficiamento inseridas no complexo. Outra parte do rejeito retirado é armazenada em uma área de cava exaurida próxima à área da barragem para uso posterior. A liberação da área da barragem F4 é, portanto, de fundamental importância para a VALE, uma vez que a disposição de rejeitos do complexo em que está localizada é realizada somente nesta barragem e só acontece mediante liberação de espaço pela retirada do material mais antigo.

Conforme citado anteriormente, as barragens de rejeito são obras de engenharia de grande porte e ocupam áreas de grandes proporções. Um resumo com a altura, área e volume final nestas barragens é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Altura, área e volume final das barragens F1, F2, F3 e F4

Barragem de	Altura da	Área atual da	Volume Final do
-------------	-----------	---------------	-----------------

rejeito	barragem (m)	barragem (ha)	Reservatório da Barragem (m ³)
F1	93	35	26.000.000
F2	88	45	24.000.000
F3	74	105	27.000.000
F4	45	100	9.500.000

3.3.2. Métodos de coleta e análises

Para caracterização dos rejeitos, tanto na forma bruta, quanto na forma segregada, das barragens supracitadas, foi utilizada a sequência de métodos apresentada na Figura 4, que será detalhada nos tópicos a seguir.

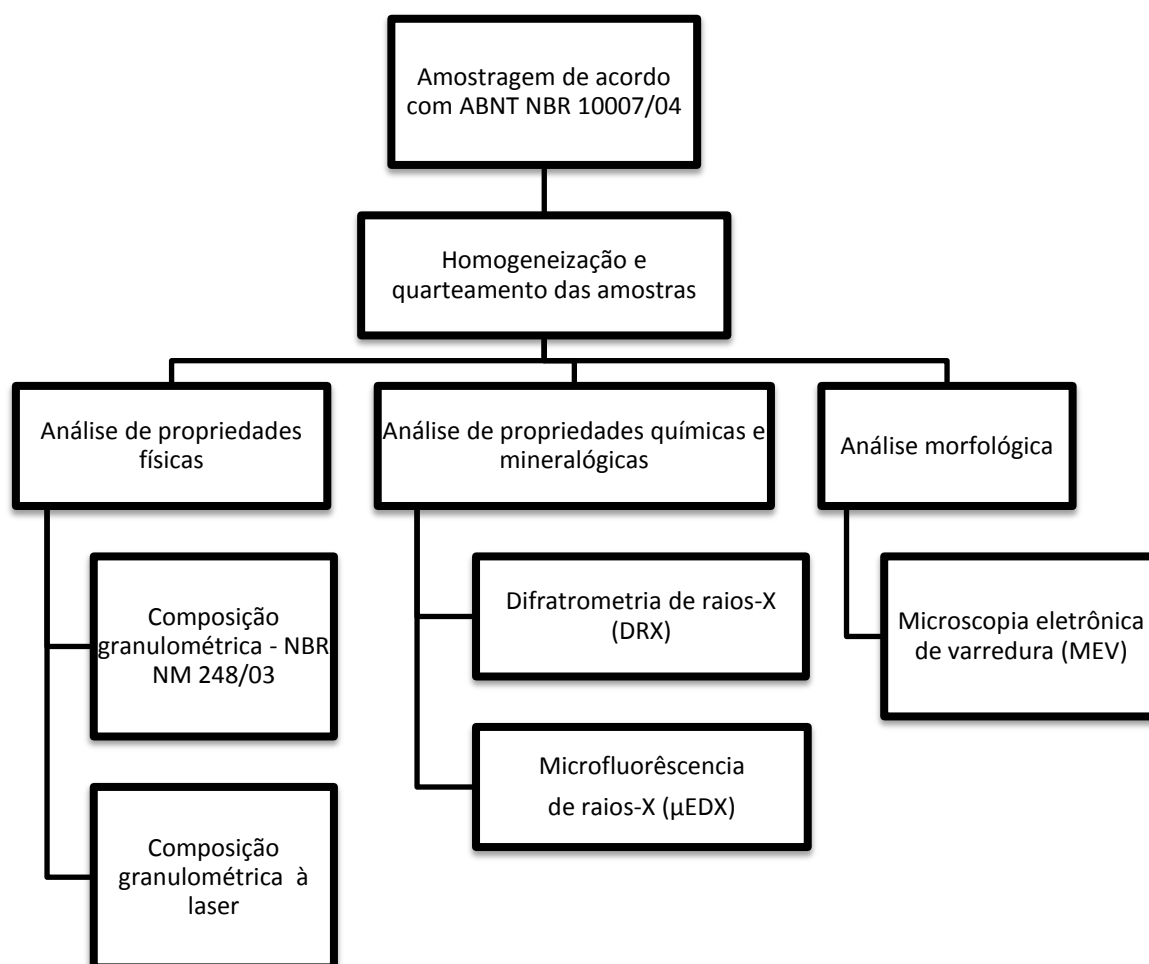


Figura 4 - Fluxograma de metodologia para análise tecnológica dos rejeitos.

Além das análises para caracterização, foi realizado uma análise comparativa com características de materiais de construção para os quais os rejeitos poderiam ser utilizados. Para tanto, foram utilizadas especificações e literatura da área de materiais de construção.

3.3.2.1. Plano de Amostragem

O plano de amostragem para coleta do material das barragens de rejeito foi elaborado observando-se instruções inseridas na norma da ABNT NBR 10007/04, que fixa requisitos exigíveis para amostragem de resíduos sólidos em lagoas de resíduos. Para tanto, foi realizada uma avaliação do local, na qual foram definidos os pontos de amostragem, o número de amostras a serem coletadas, seus volumes e forma de armazenamento.

Desta forma, para cada barragem foram selecionados três pontos, especialmente distribuídos de forma a abranger a maior área possível das barragens de rejeito, totalizando doze pontos de amostragem. As barragens de rejeito e os pontos de coleta podem ser visualizados na Figura 5 e na Figura 6.

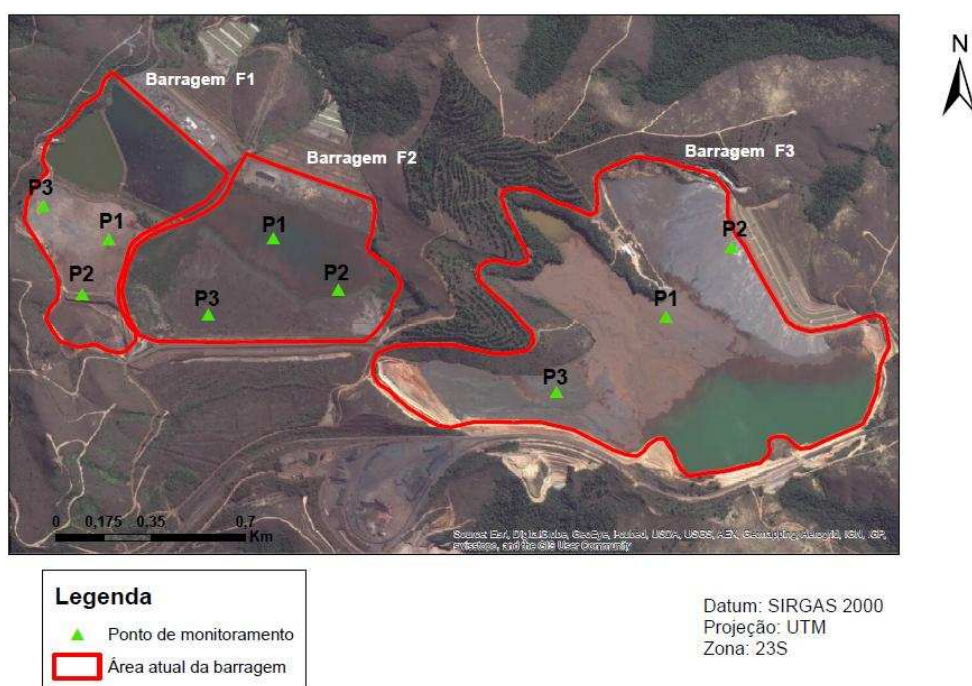


Figura 5 - Pontos de coleta nas barragens F1, F2 e F3.

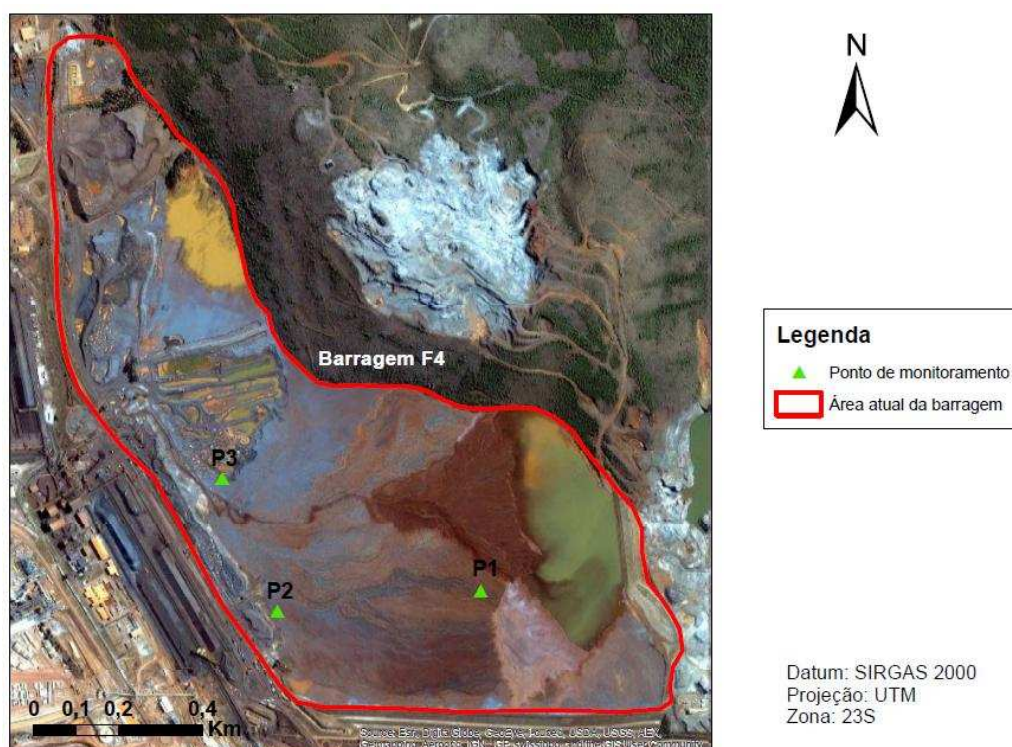


Figura 6 - Pontos de coleta na barragem F4.

Pode-se observar que os pontos de amostragem da barragem F4 abrangeram apenas a parte sul da barragem, devido a operações de manutenção em curso durante o período das coletas de material. Na porção noroeste da barragem, onde se visualiza um rejeito de cor bastante escura, é onde está havendo a retirada do rejeito antigo e lançamento do rejeito da atual usina de beneficiamento, justificando ainda a restrição ao plano de coleta de amostras.

3.3.2.2. Coleta e preparo das amostras

Em cada ponto foram coletados, aproximadamente, 180 dm³ de amostra até a profundidade de 40 cm. As amostras obtidas foram armazenadas em tambores de polietileno de alta densidade com volume de 200 dm³, devidamente identificados e lacrados hermeticamente. Posteriormente, os materiais coletados em cada barragem foram misturados e homogeneizados, gerando uma amostra composta, que foi quarteada para obtenção das quantidades

necessárias para cada análise. Além disso, parte da amostra bruta coletada foi submetida a um processo de segregação para obtenção de concentrados de minério de ferro, sílica e argila.

3.3.2.3. Análise da composição granulométrica

A determinação da composição granulométrica de um material visa classificar as partículas de uma amostra de acordo com seus tamanhos e medir as frações correspondentes a cada tamanho. Neste trabalho os rejeitos foram submetidos à análise granulométrica por peneiramento, segundo a norma ABNT NBR NM 248, que apresenta procedimento para determinação da granulometria de agregados, e também pelo método da granulometria a *laser* para partículas inferiores a 0,5 mm.

Para determinação da curva granulométrica pelo método do peneiramento, realizado para as amostras brutas, foram passadas pela seguinte série de peneiras: 9,5 mm, 6,3 mm, 4,8 mm, 2,4 mm, 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm e 0,15 mm. Para cada peneira foram anotadas as massas retidas e determinados os percentuais retido e passante acumulados. Na apresentação dos resultados das amostras brutas, os dados utilizados para as partículas abaixo de 0,3 mm foram os obtidos pelo método da granulometria a *laser*. Esta análise foi realizada somente para as amostras brutas, uma vez que todo o material segregado apresentou granulometria inferior a 0,5 mm, passível de leitura no granulômetro a *laser*.

A determinação da granulometria a *laser* se dá pela medição dos ângulos de difração de um feixe de *laser* emitido em direção a uma amostra. Quando o feixe encontra as partículas da amostra, parte é difratada, gerando padrões de difração, que dependem do tamanho das partículas e que são captados por lentes acopladas ao equipamento. Tais padrões são registrados, processados e enviados a um computador de onde se obtém os dados para uma curva granulométrica. Para esta análise, as amostras brutas foram passadas em uma peneira de 300 µm e as amostras segregadas foram utilizadas em seus tamanhos

originais, em ambos os casos o percentual de partículas foi obtido para 100 classes de tamanhos.

A granulometria a *laser* foi realizada no “Laboratório de Ensaio Não Destrutivos” do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). Para tanto, foi utilizado o analisador de tamanho de partículas, marca CILAS, modelo 1090, empregando como meio água destilada, com tempo de dispersão de 60 segundos e detergente neutro como dispersante. Para cada análise foram inseridos no equipamento aproximadamente 5,0 g de amostra, procedendo-se à leitura em uma faixa de 0,04 a 500 μm .

Com base nos dados de granulometria por peneiramento determinou-se as frações de pedregulho (2,0 a 75 mm), areia grossa (0,425 a 2,0 mm), areia fina (0,075 a 0,425 mm) e silte-argila (<0,075 mm) presentes nos rejeitos, de acordo com a norma ASTM D 3282/04. Além disso, com base em classificação específica da área de materiais de construção apresentada por Alburque (2012) serão determinadas as frações de areia fina (0,15 a 0,6 mm), areia média (0,6 a 2,4 mm) e areia grossa (2,4 a 4,8 mm).

As análises de granulometria foram realizadas no “Laboratório de Materiais de Construção” da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). A utilização de métodos voltados à caracterização física de agregados se deve ao fato de que pretende-se avaliar a possibilidade de utilização de tais rejeitos na construção civil.

3.3.2.4. Análise da composição química e mineralógica

Para identificação e quantificação dos minerais e componentes químicos presentes nas amostras procedeu-se à análise semi-quantitativa dos óxidos por microfluorescência de raios-X e identificação e análise semi-quantitativa das fases minerais, utilizando-se difratometria de raios-X.

A análise semi-quantitativa dos óxidos foi realizada pelo método espectrométrico de microfluorescência de raios-X de comprimento de onda dispersivo (μEDX). A detecção de óxidos por este método se dá por meio da

aplicação de raios-X na superfície da amostra e a posterior análise da fluorescência dos raios-X emitidos quando os íons contidos na amostra voltam ao seu estado fundamental.

Esta análise foi realizada no laboratório de Geoquímica do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa (UFV) mediante a inserção das amostras, previamente colocadas no formato de pastilhas prensadas, em um espectrômetro de microfluorescência de raios-X por energia dispersiva da marca Shimadzu, modelo μ EDX-1300, utilizando a calibração de fábrica do instrumento. As condições instrumentais de medida utilizadas são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Condições de operação para análise no μ EDX

Característica	Condição
Tubo de raios-X	Alvo de Ródio
Detector	Si(Li)
Distância de trabalho da amostra	1.5 mm
Resfriamento	N ₂ líquido (-185°C)
Diâmetro analisado (irradiado)	50 μ m
Região espectral analisada	0.00–20.475; 0-40.950 keV
Pontos por espectro	4096 pontos
Atmosfera de medida	Ar atmosférico
Tensão elétrica	15 e 50 kV
Corrente elétrica (fixo)	100 e 25 μ A auto (25 % Dead time)
Tempo de medida (<i>real time</i>)	300 s ponto ⁻¹
Método de quantificação	FP (Na-Sc e Ti-U)

A forma com que os componentes químicos estão organizados, ou seja, as fases minerais presentes nas amostras, foram identificados por difratometria de raios-X, empregando-se o método do pó. A difração de raios-X permite a determinação qualitativa e semi-quantitativa dos minerais presentes na amostra. Esta análise se processa por meio da emissão de um feixe de raios-X sobre uma lâmina, contendo a amostra a ser analisada, o que gera padrões de difrações, de acordo com as distâncias interplanares dos cristais ali presentes. Tais padrões de difração são captados e traduzidos em ângulos de difração, de acordo com a equação de Bragg, e têm a intensidade medida pelo equipamento, dando origem ao difratograma por meio dos quais os minerais podem ser identificados.

Esta análise foi realizada no “Laboratório de Ensaaios Não Destrutivos” do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG, utilizando-se um difratômetro de marca Shimadzu, modelo XRD-7000, que operou sob as seguintes condições: ângulo de varredura de 10° a 80°; passo de 0,02 graus; 2 minutos por passo; tubo de Cobre; 40kV e 30mA.

Para identificação das fases minerais presentes nos rejeitos, os dados obtidos na difração de raios-X foram trabalhados no software X Powder 12. Neste software a identificação das fases foi realizada observando-se os padrões de difração característicos de cada mineral e intensidade relativa, utilizando-se a base de dados PDF-2 do *International Centre for Diffraction Data* (ICDD). Posteriormente, os dados de DRX foram refinados pelo método apresentado por Rietveld (1969) conhecido como método Rietveld. Para o refinamento utilizou-se o programa computacional Fullprof (2008), obtendo-se o percentual de cada fase mineral presente nas amostras.

O método de Rietveld consiste no ajuste ponto a ponto de todas as intensidades obtidas experimentalmente com as intensidades calculadas com base em modelos cristalinos padrões, efeitos óticos de difração, fatores instrumentais, entre outras características da amostra. Os parâmetros incluídos no modelo são refinados, por meio do método dos mínimos quadrados, visando à minimização do erro. Atualmente, o método Rietveld é uma das técnicas mais precisas para análise quantitativa de difratogramas de raios-X obtidos pelo método do pó (FREITAS *et al.*, 2011).

3.3.2.5. Análise morfológica

A morfologia das partículas presentes nas amostras de rejeitos foi obtida via microscopia eletrônica de varredura (MEV), com objetivo de apresentar uma identificação química e mineralógica pontual de seus constituintes, além de demonstrar aspectos relacionados à microestrutura dos rejeitos.

Esta análise também foi realizada no “Laboratório de Ensaaios Não Destrutivos” do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG, utilizando-se um microscópio de varredura eletrônica da marca Shimadzu, modelo SUPERS CAN

SSX-550, capaz de captar imagens de superfícies em alta resolução. Antes de serem introduzidas no microscópio as amostras foram aderidas a fitas adesivas, onde foram contornadas com prata condutora e posteriormente metalizadas com um película de ouro.

3.4. Método para obtenção de concentrados de minério de ferro, sílica e argila a partir de rejeitos da mineração de ferro

O método para segregação dos rejeitos no presente trabalho e apresentado a seguir foi desenvolvido pelo grupo de pesquisa Reciclos-CNPq, tendo sido depositado para reconhecimento de propriedade intelectual por Peixoto *et al.* (2013). Este método para segregação dos rejeitos a seco consiste na obtenção de concentrados de minério de ferro, sílica e argila a partir de rejeitos da mineração de ferro por meio das operações de secagem, moagem, separação por densidade e separação magnética, sem uso de água.

A separação por densidade é amplamente utilizada em processos de separação e concentração de minérios. Já a separação magnética é um método consagrado na área de processamento de minérios para concentração e/ou purificação de muitas substâncias minerais. Esta operação pode ser utilizada de acordo com as diferentes respostas ao campo magnético, apresentadas pelas espécies mineralógicas, individualmente. A separação magnética pode ser feita tanto a seco como a úmido. Apesar da granulometria do material a ser utilizado estar 100% abaixo de 2 milímetros, o método a seco foi utilizado.

No presente estudo, o minério de ferro é o principal elemento ferromagnético encontrado no resíduo, sendo necessária uma alta intensidade para atraí-lo no processo de separação magnética (500 a 5000 Gauss para separação). Desta forma, para separar o minério de ferro da sílica e dos outros óxidos, foi utilizado separador magnético do tipo tambor, de alta a média intensidade (acima 3,12 a 15 de campo magnético e 1000 a 7000 gauss, ou 0,1 a 0,7 Tesla de indução magnética).

O fluxo operacional do processo de separação do minério de ferro, da sílica e da argila contidos em resíduos provenientes do processo de beneficiamento de

minérios de ferro por meio de secagem, separação por densidade, moagem e separação magnética é compreendido por: silos de armazenamento de resíduos ou depósito (1); equipamento para realização de secagem prévia (2); sistema de cominuição e moagem a seco (3); bateria de ciclones com separador magnético para separação da argila (4); filtro de mangas para separação de argila(5); silo ou depósito para coleta da argila (6); separador de aleta a seco (7); moinho de impacto (8); nova bateria de ciclones com separador magnético (9); um novo moinho de impacto (10); mais uma bateria de ciclone com separador magnético (11); mais um moinho de impacto (12); outra bateria de ciclones com separador magnético (13); separador magnético (14); silo ou depósito de sílica (15); e silo ou depósito de minério (16). Um fluxograma operacional do processo é apresentado na Figura 7.

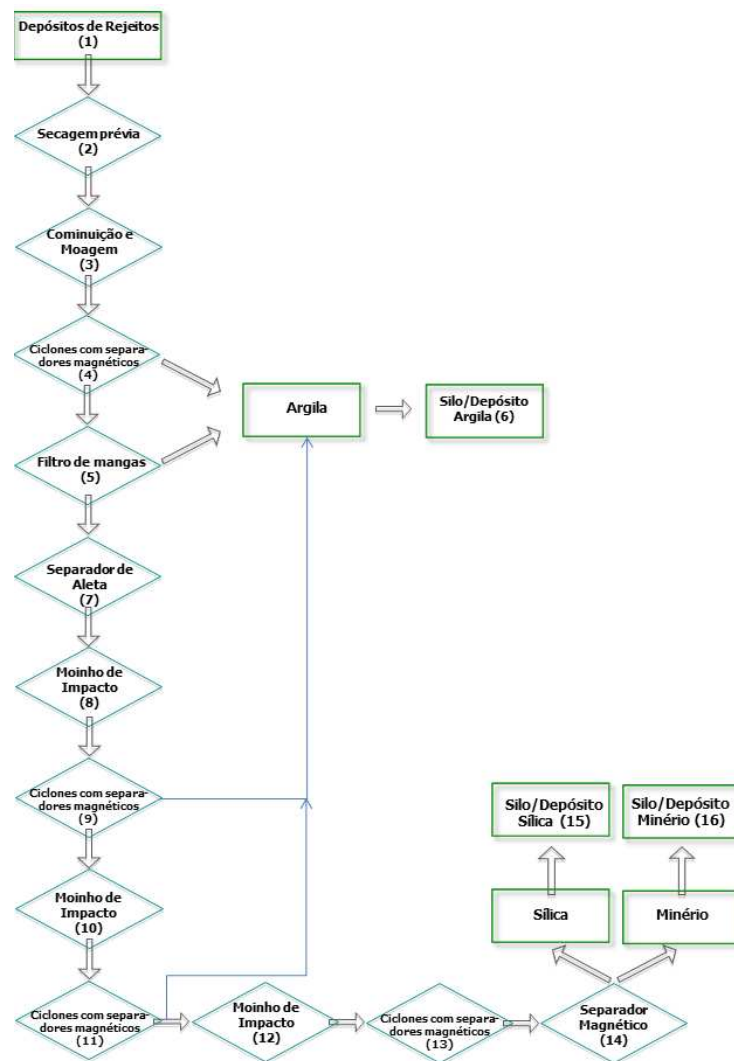


Figura 7 - Fluxograma do processo de segregação de rejeitos da mineração de ferro desenvolvido por Peixoto *et al.* (2013).

De maneira detalhada, o processo proposto por Peixoto *et al.* (2013) é iniciado com o carregamento do resíduo, tal qual este sai das barragens de rejeito ou do depósito de resíduos em um silo de armazenamento de resíduo (1) situado próximo do equipamento que realizará a secagem (2). Este equipamento deve ser, preferencialmente, um secador rotativo horizontal, mas também pode ser utilizado qualquer outro equipamento que realize a secagem do material para 5 a 10% de umidade. No caso de resíduo seco, não é necessária esta etapa.

Em seguida, o resíduo passa por um processo de cominuição e moagem (3), realizado por meio de um moinho de impacto a seco do tipo martelo, mas podendo ser também moinho de bolas ou de barras. O resíduo é então transportado para um equipamento para realizar a primeira separação da argila (4) podendo ser, preferencialmente, uma bateria de 2 até 30 ciclones com separador magnético acoplado a seco, ou qualquer outro equipamento que faça a separação por densidade. Após a sequência de separadores magnéticos, a argila é arrastada para um filtro de mangas (5) e coletada preferencialmente em um silo (6), mas podendo também ser coletada em *bags* ou depositada em local apropriado.

O resíduo contendo minério, sílica e também alguma parte de argila é carregado em um separador por densidade a seco (7) preferencialmente do tipo rotativo de aleta, mas podendo ser utilizado de paleta ou qualquer outro tipo. O material segue então para um novo moinho de impacto a seco (8). Depois desta etapa o material é encaminhado para o segundo sistema de separação da argila, constituído, preferencialmente, de uma bateria de ciclones com separador magnético a seco (9).

O material advindo deste processo segue para mais uma sequência de moinho de impacto (10 e 12), com bateria de ciclones com separador magnético acoplado (11 e 13). A partir daí o material segue para um separador magnético (14) para a realização da separação final do minério e da sílica. A sílica segue então para um silo ou depósito final (15), e o minério para outro (16).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Panorama das barragens de rejeito da mineração de ferro no Brasil

Estão cadastradas no banco de dados do DNPM, *database* 2013, 247 barragens de rejeito da mineração de ferro. Destas, aproximadamente 88% estão situadas no estado de Minas Gerais, mais especificamente no Quadrilátero Ferrífero. Do restante, 6% se localizam no Mato Grosso do Sul, 2% no Pará, 1% no Amapá e 3% não tiveram a localização identificada.

Tal distribuição se deve, principalmente, ao fato de Minas Gerais ser o maior produtor de ferro nacional, e ao tipo de processo de beneficiamento do minério de ferro utilizado pelas empresas mineradoras em Minas Gerais, que agrega grandes quantidades de água em seu processo. Já no Pará, segundo estado em produção de ferro no Brasil, no Complexo Minerador Carajás da VALE, o processo de beneficiamento do minério de ferro utiliza somente a umidade natural para peneirar o material, o que implica na ausência de barragens de rejeito (VALE, 2012).

No que diz respeito à fase em que se encontram as barragens de rejeito cadastradas, levando em consideração a sua vida útil, 78% encontram-se em operação, 21% estão desativadas e 1% está em construção. Cabe salientar que 92% das barragens desativadas encontram-se no Quadrilátero Ferrífero, assim como a totalidade das barragens em construção.

Ainda com base nos dados apresentados pelo DNPM no cadastro nacional de barragens de mineração, 60% barragens cadastradas se enquadram na PNSB, ou seja, apresentam classificação segundo a categoria de risco e dano potencial associado.

A Figura 8 e a Figura 9 apresentam a distribuição destas barragens, de acordo com sua categoria de risco e dano potencial associado, conforme estabelecido na Resolução CNRH n. 143/12.

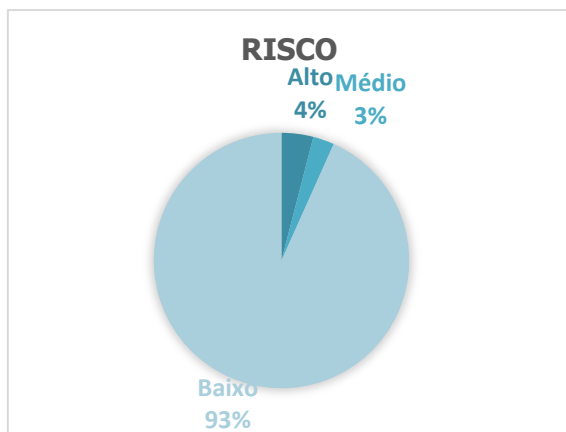


Figura 8 - Distribuição das barragens da PNSB de acordo com a categoria de risco.
 Fonte: DNPM, 2013

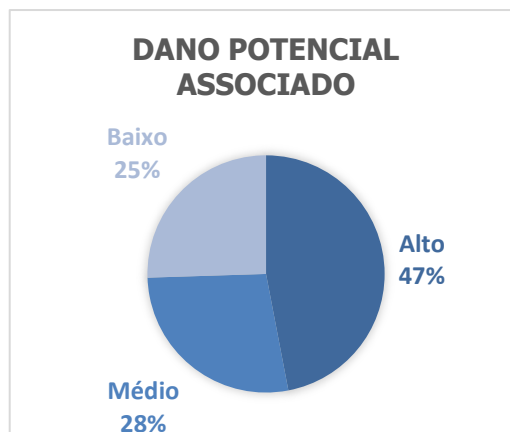


Figura 9 - Distribuição das barragens da PNSB de acordo com a categoria de dano potencial associado.
 Fonte: DNPM, 2013

Os dados cadastrados pelos empreendedores no DNPM apresentam um panorama em que, no que diz respeito às características técnicas e do estado de conservação, uma parcela ínfima, 7%, das barragens inseridas na PNSB apresentam risco alto ou médio. Em contrapartida, pode se perceber que a maioria das barragens que se enquadram na PNSB, 75%, quando considerados potencial de perdas de vidas humanas e impactos econômicos, sociais e ambientais, apresentam alto ou médio dano potencial associado. Neste contexto, diversos podem ser os impactos advindos da disposição final de rejeito em barragens. Um levantamento e avaliação de tais impactos são apresentadas a seguir.

4.2. Avaliação de impactos associados às barragens de rejeito da mineração de ferro

A avaliação de impactos ambientais, apresentada a seguir foi baseada em situações reais e, apesar dos impactos ambientais apresentados ilustrarem as situações observadas nas fases de construção, operação e desativação de uma barragem de rejeito da mineração de ferro, não representam a realidade de todas as barragens de rejeito. A avaliação de impactos ambientais é algo específico de cada empreendimento, entretanto, analisando-se os resultados é

possível conceber uma ideia geral dos impactos de cada fase da vida útil das barragens de rejeito da mineração de ferro.

Os principais impactos, aos meios físico, biológico e ecossistemas naturais e socioeconômico para cada fase da vida útil de uma barragem de rejeito, juntamente com as avaliações e descrições são apresentados a seguir. As tabelas com as avaliações impactados detalhadas podem ser visualizadas no Apêndice 1 (Tabela 20 a Tabela 28).

4.2.1. Avaliação de impactos ambientais da fase de construção de uma barragem de rejeitos

4.2.1.1. Impactos ao Meio Físico

Os principais impactos ao meio físico, relacionados à construção de uma barragem de rejeito da mineração de ferro, são: alteração da paisagem, a alteração das propriedades do solo, erosão, assoreamento de cursos de água, alteração da dinâmica hídrica superficial e subterrânea, alteração da qualidade da água superficial, alteração da qualidade do ar e alteração nos níveis de pressão sonora.

As atividades desenvolvidas nesta fase que acarretarão os principais impactos ambientais na fase de construção da barragem são: limpeza e supressão de vegetação, retirada de solos superficiais, escavação de materiais de construção na área de empréstimo, construção do dique de partida e movimentação de caminhões, máquinas ou equipamentos.

Os impactos ambientais alteração da paisagem e assoreamento de cursos d'água apresentam alta magnitude com natureza negativa e média relevância. Entretanto a alteração da paisagem é considerada um impacto local e irreversível e o assoreamento de cursos d'água é classificado como regional e de reversibilidade a médio e longo prazo. Além disso, podem ser classificado como permanente, direto e de curto prazo de manifestação.

A alteração da qualidade da água superficial está intimamente ligada à geração e aporte de sedimentos para cursos d'água. A geração e aporte de sedimentos podem acarretar em aumento da quantidade de sólidos dissolvidos e sólidos em suspensão na água e, dependendo da característica dos sedimentos, alterar as suas propriedades químicas e físicas. A alteração da qualidade da água superficial na fase de construção da barragem é caracterizada pela natureza negativa, reversibilidade a médio e longo prazo quando cessadas as atividades impactantes, abrangência regional, média relevância, acarretando uma alta magnitude.

A retirada de solos superficiais e a construção do dique de partida irão provocar a alteração da dinâmica hídrica superficial e subterrânea, uma vez que modificam diretamente o regime de escoamento superficial e infiltração de água no solo. Este impacto é de natureza negativa, irreversível e regional e apresenta alta relevância que o classifica como impacto ambiental de alta magnitude e o coloca como um dos principais impactos da construção de uma barragem de rejeito. Tanto a alteração da dinâmica hídrica superficial e subterrânea quanto a alteração da qualidade da água superficial, podem ser descritas ainda como permanentes, diretos e de curto prazo.

A retirada de solos superficiais, juntamente com a limpeza e supressão de vegetação e escavação de materiais de construção de áreas de empréstimo são as principais atividades que alterarão as propriedades do solo, podendo conduzir a processos erosivos no local da construção e em seu entorno. Neste contexto, o impacto de alteração das propriedades do solo é um impacto direto que exhibe natureza negativa, irreversibilidade, abrangência pontual e média relevância. Já o desencadeamento dos processos erosivos é considerado um impacto indireto do revolvimento do solo e aceleração do escoamento superficial de água, também de natureza negativa, irreversível, pontual e de média relevância. No cálculo da magnitude, ambos são considerados de magnitude moderada e são permanentes e de curto prazo.

A movimentação de caminhões, máquinas ou equipamentos movidos a combustíveis fósseis, na fase de construção da barragem, implicará no aumento dos níveis de pressão sonora e das emissões de material particulado e de gases (CO, CO₂, NO, SO, entre outros). Além disso, algumas atividades deverão

promover a retirada de cobertura vegetal e de solo, provendo o aumento da quantidade de poeira e alterando a qualidade do ar. A alteração dos níveis de pressão sonora e da qualidade do ar são impactos classificados como magnitude moderada, reversíveis, de média relevância, permanente, diretos e de curto prazo. Entretanto a alteração da qualidade do ar é de abrangência regional e a alteração dos níveis de pressão sonora é de abrangência local.

4.2.1.2. Impactos ao Meio Biológico e Ecossistemas Naturais

A fase de construção de uma barragem de rejeito apresenta impactos significativos ao meio biológico e ecossistemas naturais. A perda de espécimes da flora, alterações populacionais da fauna, afugentamento com perturbações da fauna, perda de parcelas de áreas de preservação permanente (APP), alteração na dinâmica de ecossistemas aquáticos e alteração do metabolismo vegetal são os principais impactos ao meio biológico e ecossistemas naturais passíveis de ocorrência nesta fase.

A atividades de limpeza e supressão de vegetação e retirada de solos superficiais são as responsáveis pela perda de espécimes de flora, alterações populacionais da fauna e perda de parcelas de APP. Estes impactos são de natureza negativa, reversíveis à médio e longo prazo, pontuais e de alta relevância, caracterizando uma magnitude moderada. São classificados ainda como permanentes, diretos e de curto prazo para manifestação.

Além da limpeza e supressão de vegetação e da retirada de solos superficiais, a escavação de materiais de construção na área de empréstimo contribui para o afugentamento com perturbações da fauna. Devido aos ruídos advindos da movimentação de caminhões, máquinas ou equipamento, na fase de construção da barragem, este impacto ganha abrangência regional, sendo um dos impactos de maior magnitude, considerando o meio biológico e ecossistemas naturais na fase de construção da barragem. Desta forma, o afugentamento com perturbações da fauna pode também ser considerado como impacto indireto da alteração nos níveis de pressão sonora. Este impacto apresenta alta magnitude, sendo reversível a médio e longo prazo, regional, de alta relevância.

A alteração na dinâmica de ecossistemas aquáticos, principal impacto ao meio biológico e ecossistemas naturais na fase de construção de uma barragem, é um impacto indireto e se deve à alteração da qualidade da água, assoreamento dos cursos d'água e alteração da dinâmica hídrica superficial e subterrânea. Este impacto caracteriza-se por ser irreversível, regional, e de média relevância na etapa de construção, caracterizando uma alta magnitude.

A alteração do metabolismo vegetal, devido à deposição de material particulado na superfície das folhas, é um impacto indireto, consequência da alteração da qualidade do ar. Esta alteração é classificada como reversível, regional, de média relevância e moderada magnitude.

Os impactos ambientais ao meio biológico e ecossistemas naturais supracitados podem ser classificados ainda como permanentes, diretos e de curto prazo de manifestação, com exceção dos impactos de alteração de ecossistemas aquáticos e de alteração do metabolismo vegetal que são indiretos.

4.2.1.3. Impactos ao Meio Socioeconômico

Os principais impactos advindos da construção e operação de uma barragem de rejeito são geração de emprego e renda e da geração de riscos e incômodos decorrentes da implantação do empreendimento.

Na fase de construção da barragem o impacto positivo de geração de emprego e renda apresenta magnitude alta, sendo caracterizado pela sua reversibilidade, abrangência regional e alta relevância. Nesta mesma fase, a geração de riscos e incômodos decorrentes da implantação do empreendimento, apresenta-se como impacto negativo, irreversível, de abrangência local e baixa relevância, sendo enquadrado como de baixa magnitude. Ambos os impactos podem ser caracterizados como permanente, direto e de curto prazo.

4.2.2. Avaliação de impactos ambientais da fase de operação de uma barragem de rejeitos

4.2.2.1. Impactos ao Meio Físico

No que diz respeito aos impactos ao meio físico, relacionados à operação de uma barragem de rejeito, os principais impactos são alteração da paisagem, assoreamento de cursos de água, alteração da dinâmica hídrica superficial e subterrânea, alteração da qualidade da água e alteração da qualidade do ar.

A alteração da paisagem está relacionada à disposição do rejeito, propriamente dita, e ao alteamento da barragem. Este se apresenta como um impacto de média relevância, podendo variar de baixa a alta relevância, dependendo de sua localização e impacto visual associado. Desta forma, sua alta magnitude deve-se, principalmente, à irreversibilidade e média relevância, sendo classificado como de natureza negativa, local, permanente, direto e de curto prazo para manifestação.

Os impactos de assoreamento de cursos de água, alteração da dinâmica hídrica superficial e subterrânea e alteração na qualidade da água superficial, também são classificados como de alta magnitude e estão relacionados à disposição dos rejeitos no reservatório. Além disso, o assoreamento de cursos de água é agravado pelo processo de manutenção do sistema de drenagem superficial, que pode gerar grande quantidade de sedimentos.

Tanto o assoreamento de cursos de água como a alteração na qualidade da água superficial são impactos de natureza negativa, de abrangência regional, reversíveis à médio e longo prazo e de média relevância. Já a alteração da dinâmica hídrica superficial e subterrânea é o impacto de maior magnitude no que diz respeito à operação da barragem de rejeito, uma vez que irá alterar o regime de escoamento superficial de água, podendo afetar negativamente a vazão dos cursos d'água a jusante. O fluxo de água subterrânea também poderá ser afetado, pois o barramento ocasiona a elevação do nível de água no reservatório da barragem, aumentando a recarga dos aquíferos superficiais (freáticos). Neste sentido, este impacto é classificado como irreversível, regional, de alta relevância e alta magnitude.

A alteração da qualidade do ar, que se deve, principalmente, à formação das praias de rejeito, apresenta magnitude moderada e é um impacto de natureza negativa, irreversível, regional e de baixa relevância, podendo apresentar uma

maior relevância dependendo da localização do empreendimento. Todos os impactos supracitados podem ser classificados ainda como permanentes, diretos e de curto prazo de manifestação.

4.2.2.2. Impactos ao Meio Biológico e Ecossistemas Naturais

Durante a operação de uma barragem de rejeitos os únicos impactos relevantes são a alteração na dinâmica de ecossistemas aquáticos e a alteração do metabolismo vegetal.

A alteração na dinâmica de ecossistemas aquáticos que pode ser considerado um impacto indireto da alteração da qualidade da água, do assoreamento de cursos de água e da alteração da dinâmica hídrica superficial. Este impacto apresenta natureza negativa, é irreversível, com abrangência regional e alta relevância, caracterizando uma magnitude alta.

A alteração do metabolismo vegetal, devido à deposição de material particulado na superfície das folhas, assim como na fase de construção, é um impacto indireto, consequência da alteração da qualidade do ar. Esta alteração é classificada como reversível, regional e de baixa relevância para esta fase.

Ambos os impactos supracitados podem ser descritos como permanente e de curto prazo. A avaliação detalhada dos impactos ambientais ao meio biológico e ecossistemas naturais advindos da operação de uma barragem de rejeito pode ser observada na Tabela 24.

4.2.2.3. Impactos ao Meio Socioeconômico

Na fase de operação, a magnitude dos impactos relacionados ao meio socioeconômico, citados na fase de construção, se invertem, sendo o impacto de geração de emprego e renda classificado como de baixa magnitude e a geração de riscos e incômodos decorrentes da operação do empreendimento como de alta magnitude. Tal fato se deve à desmobilização de mão de obra após a construção da barragem, permanecendo somente a mão de obra especializada

para operação e manutenção da estrutura. Além disso, conforme os alteamentos vão sendo realizados e o reservatório vai sendo cheio, o risco e o dano potencial associado à barragem aumentam.

Desta forma o impacto de geração de emprego e renda na fase de operação da barragem é classificado como positivo, reversível, regional e de baixa relevância. Já a geração de riscos e incômodos decorrentes da operação do empreendimento é tido como irreversível, regional e de alta relevância. Nesta fase estes impactos podem ser também caracterizados como permanente, direto e de curto prazo.

4.2.3. Possíveis impactos após a desativação de uma barragem de rejeito

4.2.3.1. Impactos ao Meio Físico

Os impactos ambientais ao meio físico existentes devido a presença da barragem inativa são:

- ✓ alteração da paisagem;
- ✓ alteração da dinâmica hídrica superficial e subterrânea;
- ✓ alteração da qualidade do ar, e
- ✓ alteração da qualidade da água;

A alteração da paisagem está relacionada, agora, à presença da barragem desativada, que devido à praia de rejeito e à vegetação com baixa densidade continua causando um impacto visual. Este se apresenta como um impacto de média relevância, podendo variar de baixa a alta relevância, dependendo de sua localização e impacto visual associado. Além disso, por ser um impacto irreversível, de natureza negativa e local, apresenta alta magnitude.

A alteração da dinâmica hídrica superficial e subterrânea é um impacto que persiste desde a construção da barragem, uma vez que altera permanentemente o regime de escoamento superficial de água, podendo afetar negativamente a vazão dos cursos d'água a jusante e a recarga de aquíferos. Neste sentido, este

impacto é classificado como irreversível, regional, de alta relevância e, portanto, de alta magnitude.

Por fim, têm-se a alteração da qualidade do ar e a alteração da qualidade da água, que também permanecem desde a fase de construção devido à presença das praias de rejeito. Tais impactos são de baixa magnitude, caracterizados pela natureza negativa, reversibilidade a médio e longo prazo, regionalidade e baixa relevância. Dependendo da localização do empreendimento, a relevância do destes impactos podem ser maior e sua magnitude passar a moderada ou alta.

4.2.3.2. Impactos ao Meio Biológico e Ecossistemas Naturais

Os impactos ao meio biológico e ecossistemas naturais pela presença de uma barragem de rejeito inativa, assim como na fase de operação, estão restritos à:

- ✓ alteração do metabolismo vegetal; e
- ✓ alteração na dinâmica de ecossistemas aquáticos.

A alteração do metabolismo vegetal, devido à deposição de material particulado na superfície das folhas, assim como nas demais fases, é um impacto negativo e indireto, consequência da alteração da qualidade do ar. Esta alteração é classificada, ainda, como reversível a médio e longo prazo, regional, de baixa relevância e de baixa magnitude para esta fase.

Já a alteração na dinâmica de ecossistemas aquáticos, que pode ser considerado um impacto indireto da alteração da qualidade da água e da alteração da dinâmica hídrica superficial, apresenta natureza negativa, é reversível a médio e longo prazo, com abrangência regional e baixa relevância, caracterizada também pela baixa magnitude.

4.2.3.3. Impactos ao Meio Socioeconômico

Após a desativação os impactos de geração de emprego e renda e de geração de riscos e incômodos decorrentes da desativação do empreendimento

permanecem classificados como de baixa magnitude e de alta magnitude, respectivamente.

Isto se deve ao fato de se permanecer a mão de obra especializada para monitoramento e manutenção da estrutura e da estrutura ali presente continuar apresentando os mesmos riscos à população. Desta forma o impacto de geração de emprego e renda após a desativação da barragem é classificado como positivo, reversível, regional e de baixa relevância. Já a geração de riscos e incômodos da barragem desativada é tido como irreversível, regional e de alta relevância. Nesta fase estes impactos podem ser também caracterizados como permanente, direto e de curto prazo.

4.3. Caracterização de rejeitos brutos de barragens da mineração de ferro do Quadrilátero Ferrífero com vistas ao reaproveitamento na construção civil

4.3.1. *Análise da composição granulométrica dos rejeitos brutos*

As curvas granulométricas obtidas pelos métodos de peneiramento e de granulometria a *laser* podem ser visualizadas na Figura 10 e na Figura 11, respectivamente. As curvas de granulometria a *laser* foram ajustadas de acordo com o percentual passante na peneira de abertura de 0,3 mm.

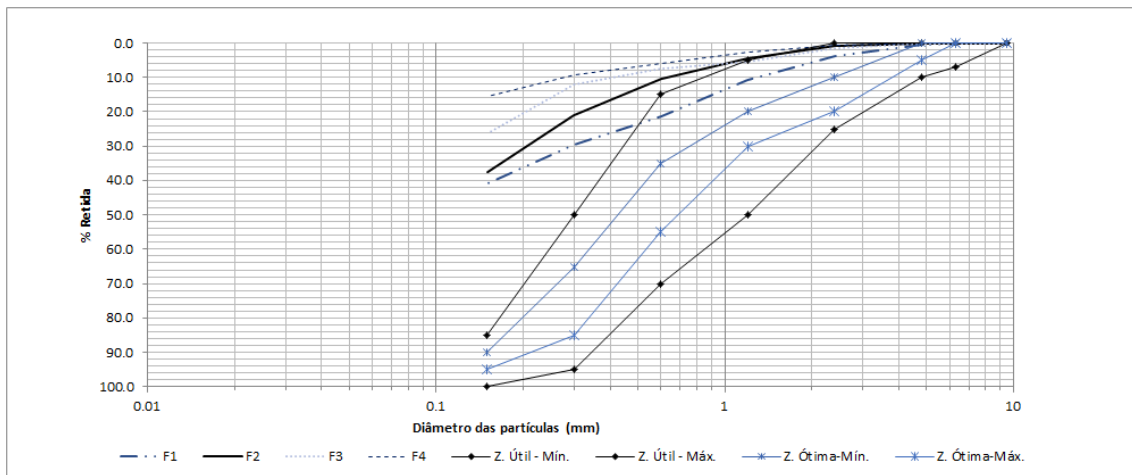


Figura 10 - Curva granulométrica obtida por peneiramento e zonas ótima e utilizável para agregado miúdo de acordo com a norma ABNT NBR 7211/09.

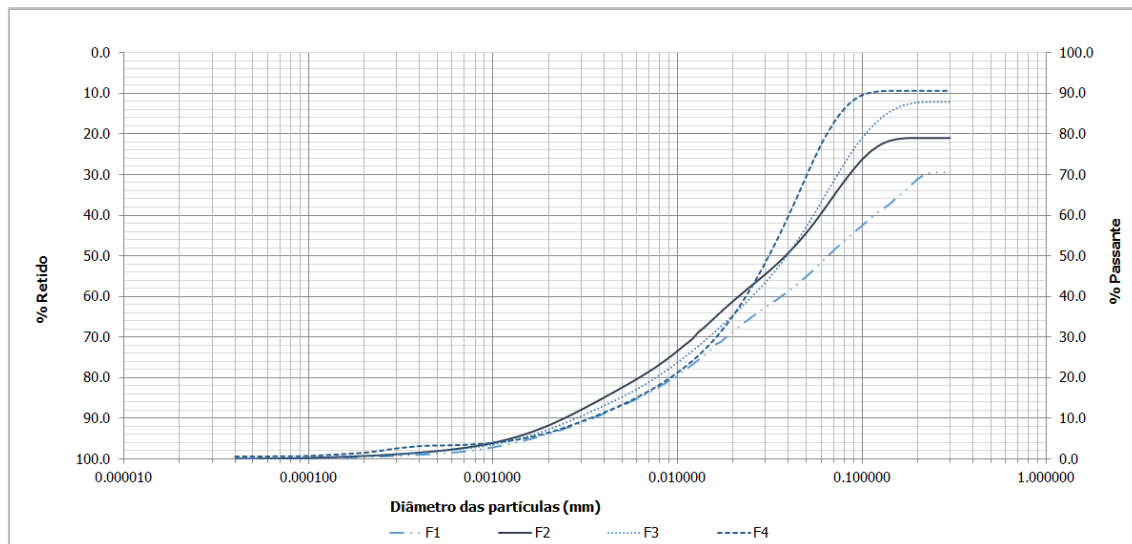


Figura 11 - Curva granulométrica obtida pelo método de granulometria a laser.

As frações pedregulho, areia grossa, areia fina e silte-argila, de acordo com a norma ASTM D 3282/04, podem ser visualizadas em uma análise comparativa entre as barragens, na Figura 12.

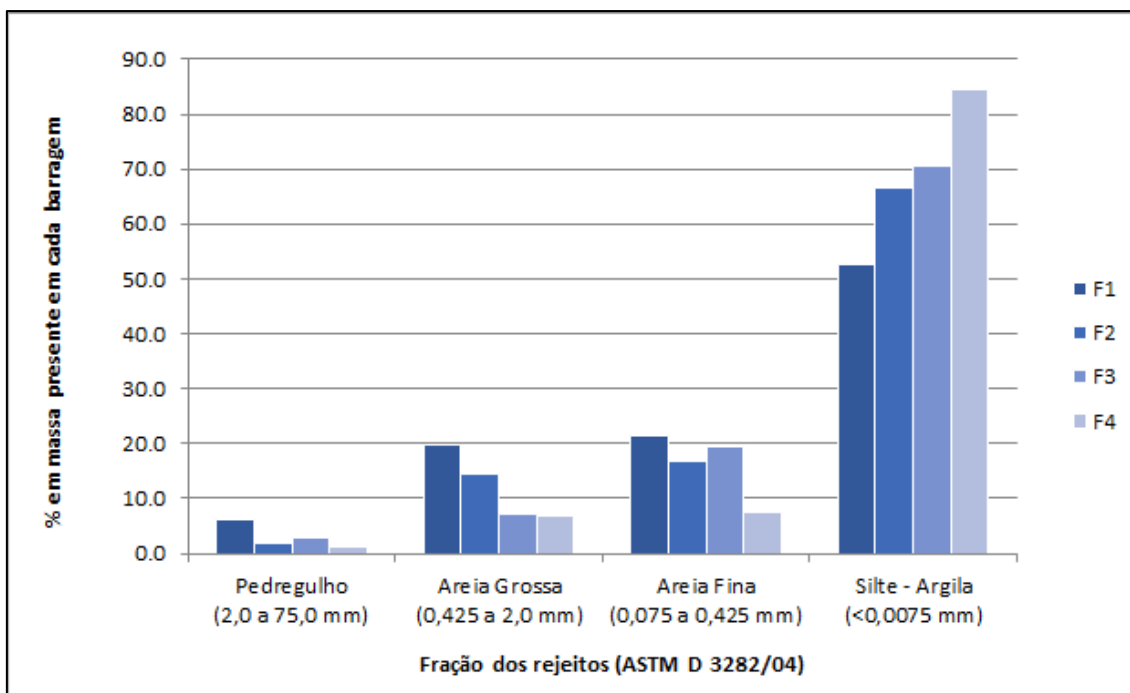


Figura 12 - Análise comparativa entre as frações pedregulho, areia grossa, areia fina e silte-argila dos rejeitos de cada barragem de acordo com norma ASTM D 3282/04.

Além disso, os percentuais de areia grossa, areia média e areia grossa, conforme apresentado por Albuquerque (2012), pode ser observado na Tabela 9.

Tabela 9 - Percentuais de areia grossa, areia média e areia grossa nos rejeitos brutos

	Areia fina (0,15 a 0,6 mm)	Areia média (0,6 a 2,4 mm)	Areia grossa (2,4 a 4,8 mm)
F1	19,40	17,44	3,36
F2	26,98	9,67	0,70
F3	18,94	5,82	1,38
F4	9,43	5,49	0,53

Por meio da análise conjunta da Figura 11, da Figura 12 e da Tabela 9 pode ser observado um comportamento bastante semelhante em relação à distribuição das partículas nos rejeitos das quatro barragens analisadas, com predominância de partículas finas (silte-argila). Isto provavelmente se deve à semelhança no processo de beneficiamento dos minérios, que corresponde, principalmente, a operações de moagem, para diminuição do tamanho das partículas, e separação física e magnética.

A maior quantidade da fração silte-argila nos rejeitos da barragem F4 pode ser explicada pelo fato de se tratar de uma barragem mais recente, ou seja, a maior parte do material fino disposto na barragem ainda se encontra na superfície. Além disso, este comportamento pode ser atribuído também ao fato de a barragem F4 receber maior quantidade de rejeitos de hematita, minério que apresenta granulometria mais fina.

Na Tabela 10 são apresentados os valores de módulo de finura – somatório dos percentuais retidos nas peneiras da série normal, 9,5 mm, 4,8 mm, 2,4 mm, 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm e 0,15 mm, dividido por 100 – e a dimensão máxima característica do material - diâmetro de abertura da peneira da série normal ou intermediária na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% - para cada amostra analisada.

Tabela 10 - Dimensão máxima característica e módulo de finura dos rejeitos analisados

	Dimensão Máxima Característica (mm)	Módulo de finura
F1	2,25	0,68
F2	1,10	0,74
F3	1,25	0,53
F4	0,75	0,34

De acordo com o estabelecido pela norma ABNT NBR 7211/09 os módulo de finura variam entre 2,20 a 2,90 para zona ótima no que diz respeito à utilização de um material como agregado miúdo; entre 1,55 a 2,20 para zona utilizável inferior; e entre de 2,90 a 3,50. Como já mencionado anteriormente, observa-se que este rejeito apresenta dimensões muito inferiores às exigidas pela norma para aplicação do material como agregado miúdo, o que não impede seu uso para este fim. Entretanto, é necessário que se realizem estudos prévios de dosagem que comprovem a aplicabilidade deste material como agregado miúdo para fabricação do concreto.

Se considerado o percentual de finos presentes nos rejeitos, que corresponde ao material que passa pela peneira de 0,075 mm, também chamado de material

pulverulento, tem-se os seguintes resultados: F1 = 52,56%; F2 = 66,58%; F3 = 70,57%; e F4 = 84,59% - valores que podem ser observados na Figura 11.

O elevado teor de finos, também chamados de material pulverulento, é indesejável quando se trata de uso como agregado miúdo para concreto. A especificação da ABNT, NBR 7211/09, estabelece que o material a ser utilizado para este fim deve apresentar um valor máximo de material pulverulento entre 3 a 5%, dependendo da finalidade do concreto. Entretanto, este teor elevado de finos é desejável para utilização como aditivo no concreto conforme preconizado por Bauer *et al.* (2012) e Juenger *et al.* (2011); para fabricação de argamassas, uso testado por Aristimundo & Bertocini (2012) e Fontes *et al.* (2014); incorporação em materiais cerâmicos conforme resultados de Silva (2014), Chen *et al.* (2011), Souza *et al.* (2008), Vieira *et al.* (2006), Chaves (2009) e Notici (2011); e utilização como *filer* para concentrados asfálticos conforme proposto por Bauer (2012) e Silva (2010). Além dos usos apresentados, cabe lembrar que estes materiais na forma bruta podem ter diferentes usos em obras de pavimentação.

Conforme mencionado anteriormente, os resultados encontrados por estes autores foram também para rejeitos brutos. Entretanto, se observa que caso houvesse a segregação destes materiais, viabilizando a separação dos materiais finos e dos materiais arenosos, os usos apresentados poderiam ser potencializados. Isto porque para utilização como agregado de concreto, é melhor que a maior parte das partículas esteja na fração areia, assim como para aplicação para argamassa. Já para os usos como aditivo de cimento e incorporação em materiais cerâmicos é desejável um maior percentual de finos.

As análises apresentadas até agora demonstram rejeitos com características físicas bastante semelhantes, quando comparadas as quatro barragens. Quanto ao potencial para aplicação na construção civil, apesar das características apontarem a possibilidade para alguns tipos de usos, é preciso que se avaliem as alternativas para segregação de suas frações, tendo como objetivo deixar o material mais homogêneo do ponto de vista granulométrico e de sua composição. Além disso, é preciso avaliar a viabilidade de se recuperar o material ferroso presente nas barragens, tendo em vista o seu retorno ao processo produtivo.

De forma não conclusiva, devido ao fato de ainda não se conhecer as demais propriedades do material, é possível afirmar que, de acordo com as características físicas apresentadas, os usos que mais se adequam ao perfil dos rejeitos analisados está relacionado à sua incorporação ao cimento Portland, à produção de argamassas e a utilização em obras de infraestrutura de pavimentos para rodovias.

O interessante de se perceber é que, analisando do ponto de vista granulométrico, algumas utilizações são complementares, isto significa que, considerando os usos de forma sincrônica, pode-se vislumbrar o aproveitamento integral dos rejeitos de uma barragem.

Em todos os casos, contudo, tanto para avaliação da possibilidade de transformação de parte do rejeito em produto da mineração de ferro, quanto para melhor embasar a discussão sobre o reaproveitamento de tais materiais na construção civil, faz-se necessário o conhecimento das características químicas, mineralógicas e morfológicas, que são apresentadas a seguir. Além disso, outras propriedades físicas, além da granulometria, como propriedades mecânicas dos materiais, devem ser testadas.

4.3.2. Análise da composição química e mineralógica dos rejeitos brutos

Os resultados semi-quantitativos dos compostos químicos obtidos por micro fluorescência de raios-X presentes nos rejeitos em análise são apresentados na Tabela 11 e Figura 13.

Tabela 11 - Resultados semi-quantitativos da fluorescência de raios-X (% em peso)

	Teor de Fe₂O₃ (%)	Teor de SiO₂ (%)	Teor de Al₂O₃ (%)	Outros Óxidos (%)
F1	49,4869	44,4764	5,4921	0,5446
F2	33,9238	59,9638	5,6312	0,4812
F3	36,2726	58,1332	5,0096	0,5846
F4	59,0450	36,1018	3,4458	1,4074

Por meio da microfluorescência de raios-X pode-se verificar que a constituição básica dos rejeitos analisados é de óxidos de ferro, sílica e alumínio. Nota-se uma distribuição bastante semelhante destes óxidos nas barragens F1, F2 e F3, que se deve ao fato destes rejeitos serem provenientes de minérios de ferro da mesma região, beneficiados por meio de processos semelhantes e, ainda, por estarem a mesma profundidade de coleta.

A maior quantidade de óxidos de ferro na barragem F4 pode ser explicada tanto pela qualidade do minério extraída na região, que apresenta maiores teores de ferro, quanto pelo fato desta barragem ser mais recente. Além disso, é possível afirmar, com base neste dado, que ainda cabem melhorias no método de beneficiamento utilizado, algo de grande importância no processo produtivo do minério de ferro.

A presença de óxidos de alumínio nos rejeitos analisados é explicada pela geologia da região, rica em filitos com aluminossilicatos em sua composição, e pela possibilidade de haver a substituição isomórfica do ferro pelo alumínio nos óxidos de ferro. Segundo Gomes (2009), de uma forma geral, os óxidos de alumínio aumentam de teor nas frações mais finas dos rejeitos, o que significa que provavelmente estão associados, em sua maior parte, à fração silte-argila.

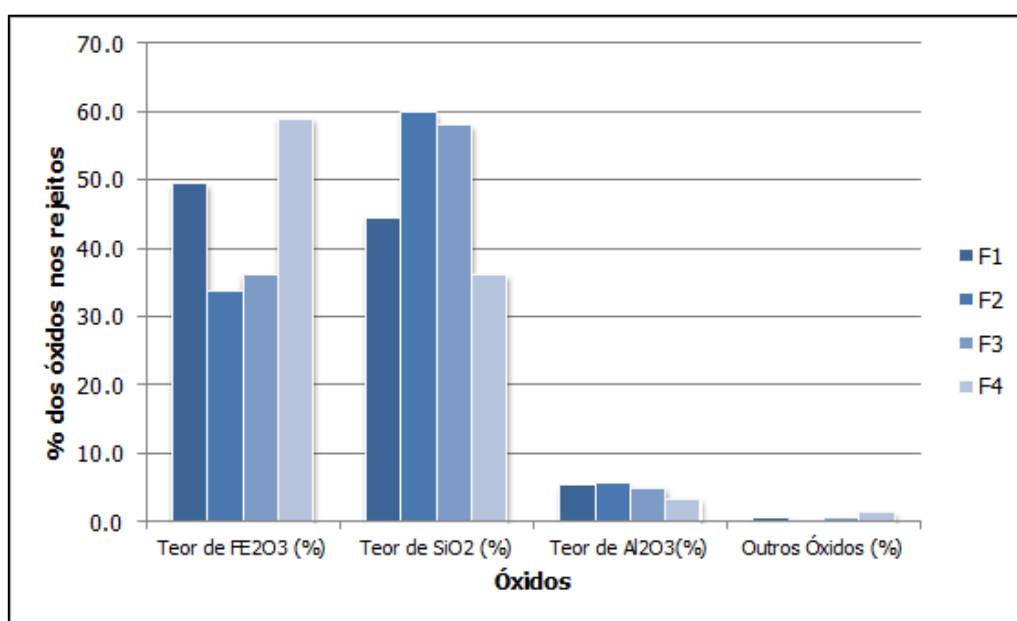


Figura 13 - Análise comparativa dos óxidos presentes nos rejeitos analisados das barragens F1, F2, F3 e F4.

No que diz respeito à mineralogia, por meio do programa computacional X Powder 12, foi possível obter a composição mineral básica dos rejeitos em avaliação. Os difratogramas dos rejeitos com a identificação das fases minerais de cada uma das barragens podem ser observados na Figura 14.

De acordo com os difratogramas apresentados, é possível constatar que as amostras de rejeito são compostas, praticamente, por quartzo e hematita. Todas as amostras analisadas apresentam a caulinita, em menor quantidade, e goethita, quartzo e hematita em maiores quantidades. Esta composição bastante semelhante está relacionada à origem do rejeito, conforme já explicado anteriormente. Entretanto, pode-se observar que, apesar dos difratogramas serem semelhantes em relação aos minerais presentes, os picos de intensidade indicam variações nas concentrações de cada mineral.

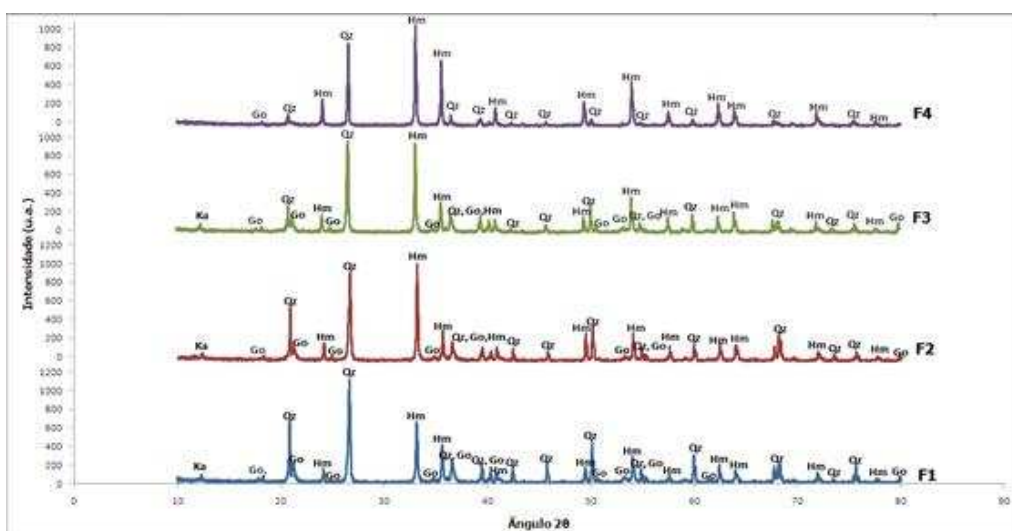


Figura 14 - Difratogramas dos rejeitos das barragens F1, F2, F3 e F4.
(Ka=caulinita; Go=goethita; Hm=hematita; Qz=quartzo)

Por meio da análise realizada no software Fullprof (2008), utilizando-se o método de Rietveld, foi obtida a quantificação das fases minerais para os rejeitos analisados de cada barragem (Tabela 12).

Tabela 12 - Composição mineral em percentual de peso dos rejeitos analisados

	Caulinita (%)	Goethita (%)	Hematita (%)	Quartzo (%)
F1	6,10	19,50	29,60	44,80
F2	2,80	13,50	35,50	48,20
F3	4,80	21,40	46,40	27,40
F4	5,50	18,80	40,25	35,45

Os resultados obtidos na difração de raios-X para a mineralogia apontam o mesmo perfil de óxidos encontrados na microfluorescência de raios-X, variando somente pela presença de moléculas de água na estrutura dos minerais, como pode ser observado na Tabela 1. Ambientes com drenagem deficiente, como pode ser o caso de uma barragem de rejeito, atua na hidratação da hematita, transformando-a em goethita, tal como observado por diferentes autores como Barbosa *et al.* (2009), Martins (2000) e Motta *et al.* (2002). Desta forma, somando-se os percentuais de hematita e goethita se encontram valores bastante próximos aos de óxido de ferro encontrados na microfluorescência de raios-X.

No que diz respeito ao reaproveitamento dos rejeitos, as características químicas e mineralógicas das amostras analisadas demonstram grande potencial, tanto para o retorno de parte do material como produto da mineração de ferro, devido ao alto percentual de óxidos de ferro encontrado, quanto para a aplicação na construção civil. Entretanto, é de fundamental importância que a composição química e mineralógica estejam associadas à granulometria, ou seja, é necessário saber a composição química e mineralógica dentro de cada fração do rejeito, para que se possa melhor avaliar a aplicação destes materiais na construção civil, bem como indicar melhor rota para o reprocessamento destes rejeitos.

A utilização dos rejeitos como agregado miúdo para concreto está limitada mais pelo tamanho das partículas do que pela composição química. Isto por que as impurezas orgânicas, materiais carbonosos, cloretos e sulfatos, compostos químicos que são prejudiciais à estes usos, não são característicos dos rejeitos da mineração de ferro.

A presença de grande quantidade de óxidos de ferro pode inviabilizar a substituição, em grande escala, das argilas dos materiais cerâmicos. Entretanto,

os rejeitos, ricos em óxidos de ferro, quando incorporados em pequenas quantidades nestes materiais cerâmicos, podem contribuir de maneira significativa com a queima destes materiais e manutenção da temperatura durante o resfriamento evitando problemas e defeitos nas peças, e, ainda economizando energia nos fornos.

Já nos agregados para concreto e argamassas a presença de óxidos de ferro dá coloração avermelhada a estes materiais, o que é indesejável do ponto de vista estético. Além disso, em grande quantidade, pelo efeito da dilatação, podem influenciar no aparecimento de trincas e rachaduras. Entretanto, em pequenas porcentagens podem ser úteis devido ao papel fundente e melhorar as propriedades dos materiais (BAUER, 2012).

A presença de óxidos de ferro em agregados miúdos, mais especificamente a hematita, dá origem a concretos de alta densidade e resistência, também chamados de concretos pesados. Tais concretos são destinados à absorção de radiação em usinas nucleares como escudos biológicos ou blindagens (ZHAO *et al.*, 2014).

4.3.3. *Análise morfológica dos rejeitos brutos*

A análise das imagens apresentadas a seguir indica padrões bastante semelhantes, os quais podem ser confirmados pelo aspecto das curvas granulométricas obtidas para os materiais das barragens F1, F2, F3 e F4. Do ponto de vista morfológico, pode-se observar presença de partículas maiores, subarredondadas a angulosas, provavelmente de quartzo; e partículas menores, algumas prolatas, também de quartzo e outras tabulares, provavelmente de hematita. Além disso, pode-se observar aderidas às partículas maiores um material bastante fino e pulverulento que é característico dos argilominerais. Em relação à esfericidade, predominam partículas com baixa esfericidade.

O material presente nas amostras coletadas de F1 (Figura 15) apresenta maior quantidade de partículas com dimensão superior a 0,1 mm e também maior dispersão granulométrica, exibindo uma melhor distribuição do tamanho dos grãos.

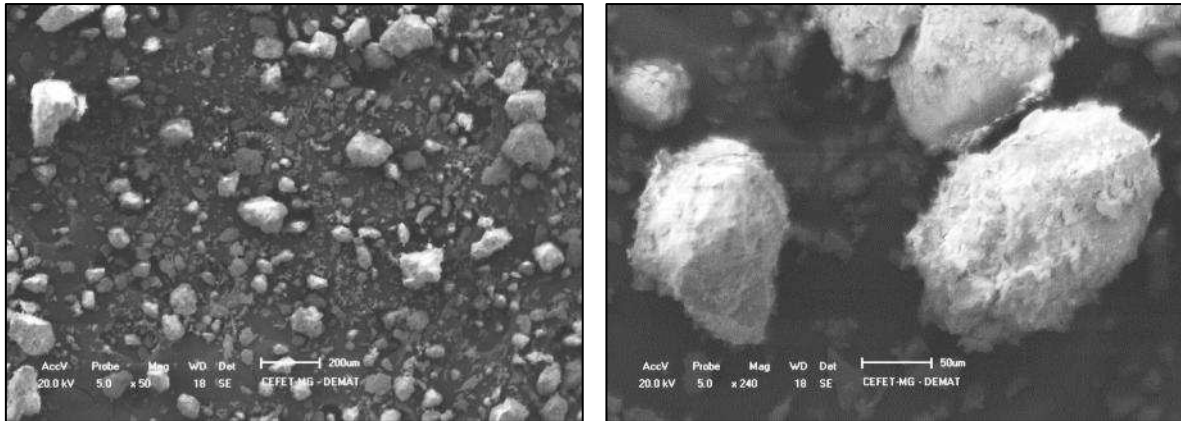


Figura 15 - Microscopia eletrônica de varredura dos rejeitos brutos da barragem F1.

O material presente nas amostras coletadas de F2 (Figura 16) apresenta maior quantidade de partículas finas ($<0,1$ mm), e ocorrência discreta de partículas de maior dimensão, exibindo ainda assim, uma boa distribuição do tamanho dos grãos.

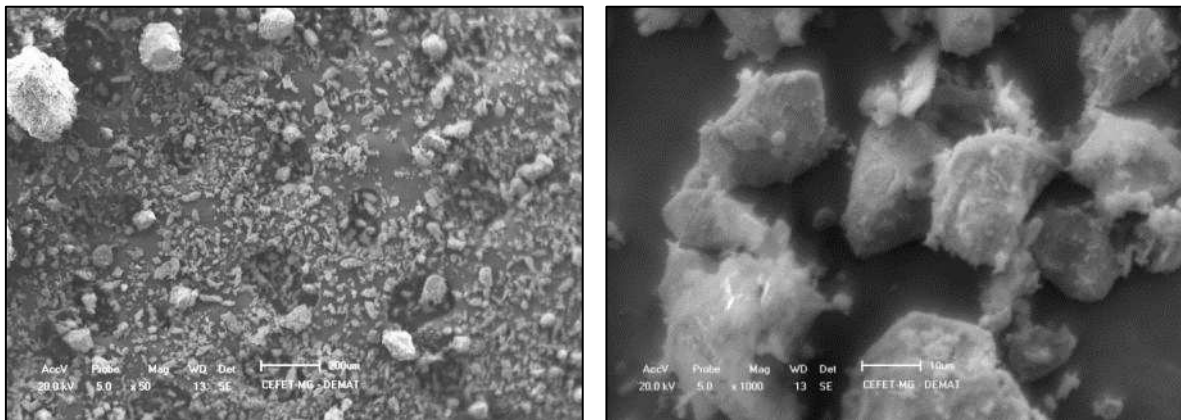


Figura 16 - Microscopia eletrônica de varredura dos rejeitos brutos da barragem F2.

O material observado em F3 (Figura 17) apresenta características semelhantes àqueles analisados na Figura 16, em que são mostradas imagens das amostras coletadas em F2.

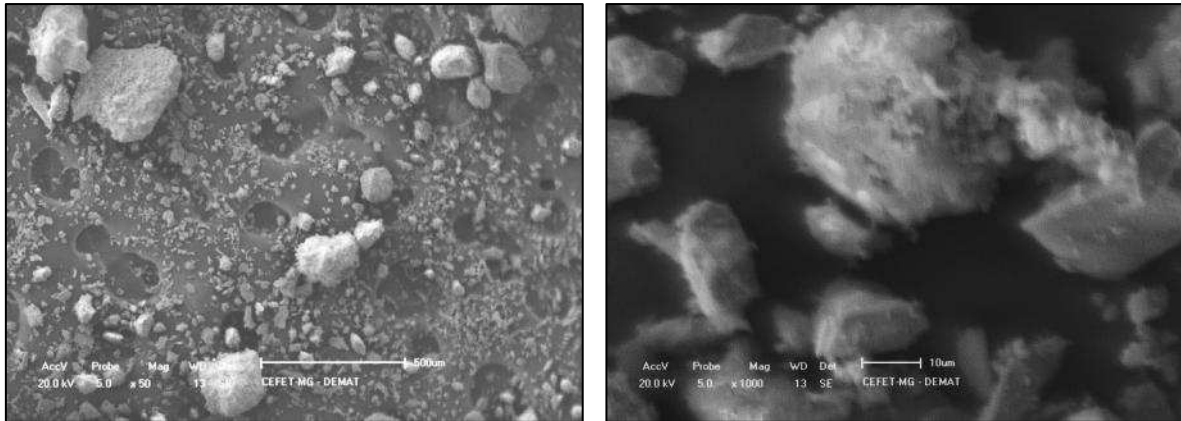


Figura 17 - Microscopia eletrônica de varredura dos rejeitos brutos da barragem F3.

O material presente nas amostras coletadas de F4 (Figura 18), apresenta menor quantidade de material com dimensão superior a 0,1 mm e também boa dispersão granulométrica, exibindo razoável distribuição do tamanho dos grãos.

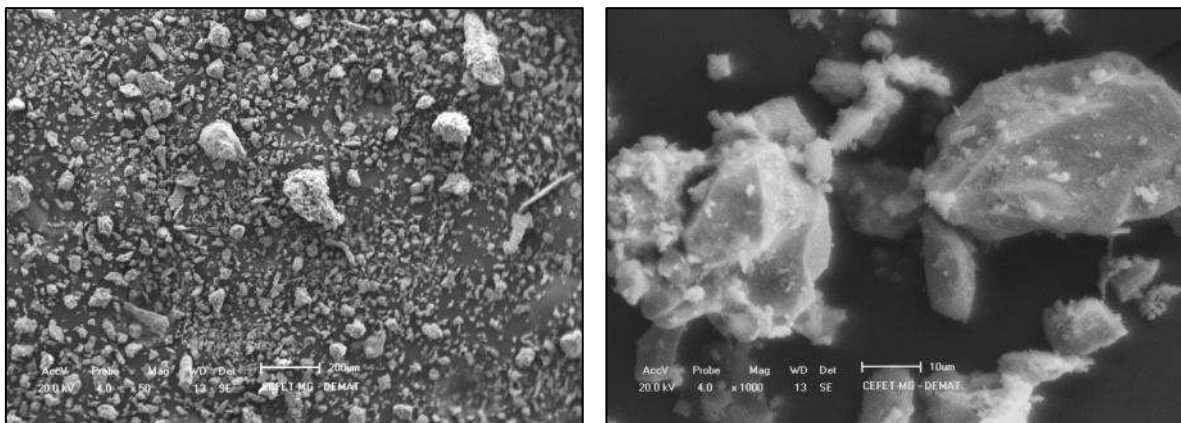


Figura 18 -Microscopia eletrônica de varredura dos rejeitos da barragem F4.

4.4. Análise comparativa dos concentrados de minério de ferro, sílica e argila obtidos do processamento de rejeitos da mineração de ferro do Quadrilátero Ferrífero

4.4.1. Análise comparativa da composição granulométrica

A Figura 19 apresenta as curvas granulométricas obtidas para concentrados obtidos do processo de segregação dos rejeitos de cada barragem. As curvas

granulométricas para os rejeitos brutos podem ser observadas na Figura 10 e Figura 11.

Com base na observação das curvas granulométricas pode-se afirmar que o processo de segregação possibilitou a concentração das partículas de menor tamanho no concentrado de argila e também a concentração das partículas de maior tamanho no concentrado de sílica. Com o objetivo de melhor fundamentar esta afirmação, a Figura 20 apresenta uma comparação do diâmetro a 50 % (D_{50}) das amostras analisadas, que corresponde ao diâmetro o qual 50% das partículas contidas no rejeito é menor ou igual.

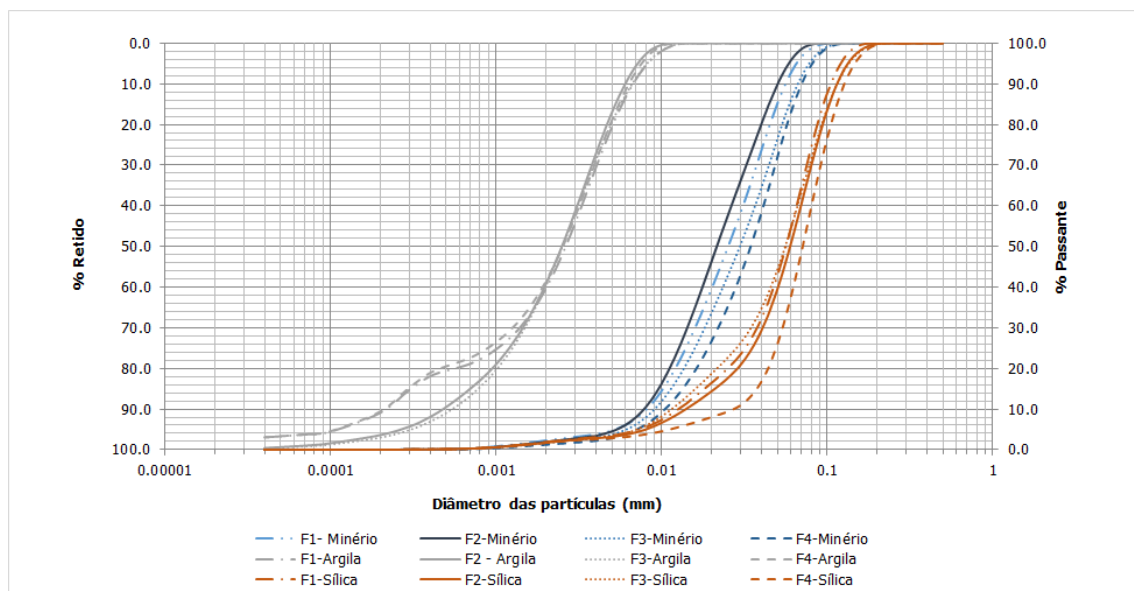


Figura 19 - Curva granulométrica obtida pela granulometria a laser dos concentrados de minério, sílica e argila das barragens F1, F2, F3 e F4.

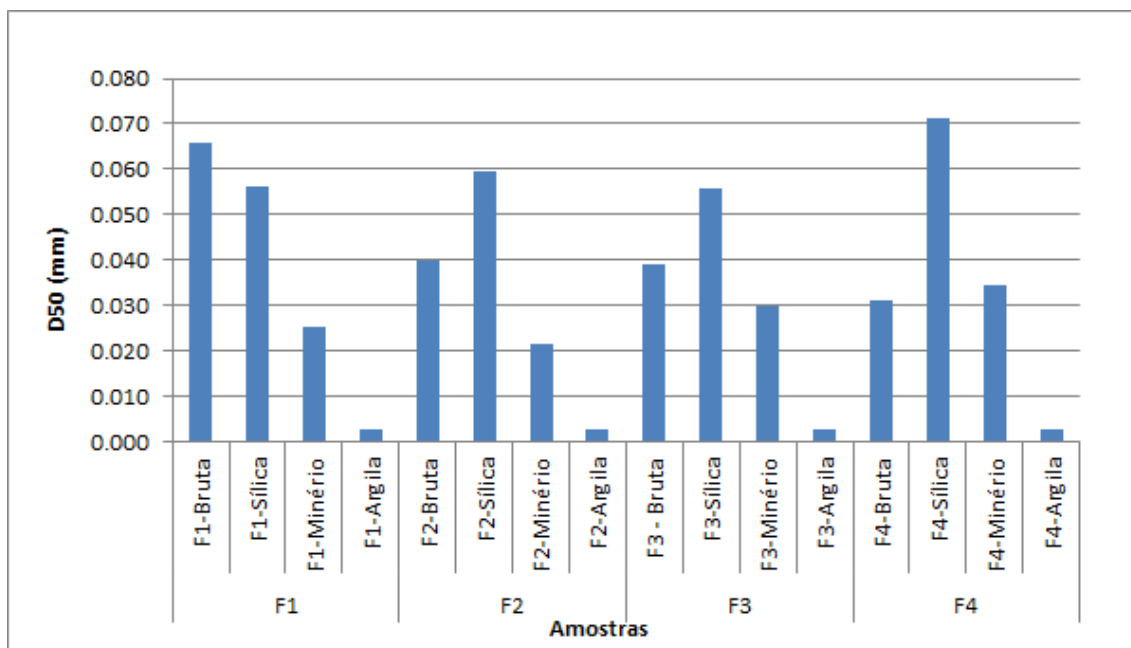


Figura 20 - Comparação entre os D₅₀ das amostras analisadas.

Pela interpretação da Figura 20 percebe-se a tendência da diminuição do diâmetro das partículas no sentido dos concentrados sílica, minério e argila. Observa-se também que as partículas contidas no concentrado de argila são bastante finas, com valores de D₅₀ da ordem de 0,0026 mm; 0,0025 mm; 0,0025 mm e 0,0025 mm para as barragens F1, F2, F3 e F4, respectivamente. Além disso, observa-se que o método possibilitou a uniformização da granulometria dos concentrados, que é uma característica de grande importância para a utilização futura.

A obtenção de granulometrias menores nos materiais processados se deve ao próprio processo de segregação utilizado, que prevê a cominuição das partículas e passagem por diversas séries de moinhos de impacto. Por este motivo é que pode-se observar um D₅₀ superior aos dos concentrados na amostra bruta da barragem F1.

4.4.2. *Análise comparativa da composição química e mineralógica*

No que diz respeito à composição química e mineralógica também se pode observar semelhança entre as amostras de rejeito bruto e nas amostras dos concentrados de minério, sílica e argila. Na Tabela 13 são apresentadas as proporções de óxidos e a Figura 21, a Figura 22, a Figura 23 e a Figura 24 apresentam uma comparação entre a concentração destes óxidos, ambos para cada categoria de amostra analisada.

Tabela 13 - Proporção de óxidos, determinados por microfluorescência de raios-X, presentes nas amostras de rejeito bruto e concentrados de minério, sílica e argila

Amostas		Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Demais Óxidos (%)
F1	Bruta	49,4869	44,4764	5,4921	0,54460
	Minério	69,2048	20,0749	9,8588	0,8615
	Sílica	7,2909	90,3449	2,1632	0,2010
	Argila	65,3583	16,9907	15,2847	2,3663
F2	Bruta	33,9238	59,9638	5,6312	0,4812
	Minério	50,2269	42,1174	6,6758	0,3825
	Sílica	8,3847	89,0432	2,1433	0,4288
	Argila	58,8167	20,4537	17,5838	3,1458
F3	Bruta	36,2726	58,1332	5,0096	0,5846
	Minério	64,0386	28,6779	6,6293	0,6542
	Sílica	16,7905	79,2098	3,1345	0,8652
	Argila	57,3226	20,0408	18,8136	3,823
F4	Bruta	59,045	36,1018	3,4458	1,4074
	Minério	42,7564	52,0867	4,1978	0,9591
	Sílica	7,9223	89,5987	2,0713	0,4077
	Argila	67,4404	15,7816	13,1942	3,5838

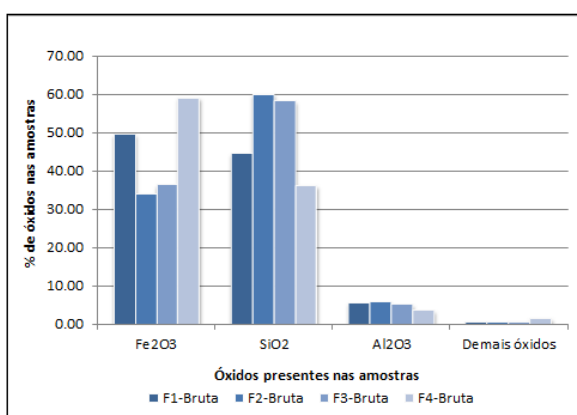


Figura 21 - Comparação entre os percentuais de óxidos na amostra de rejeito bruto.

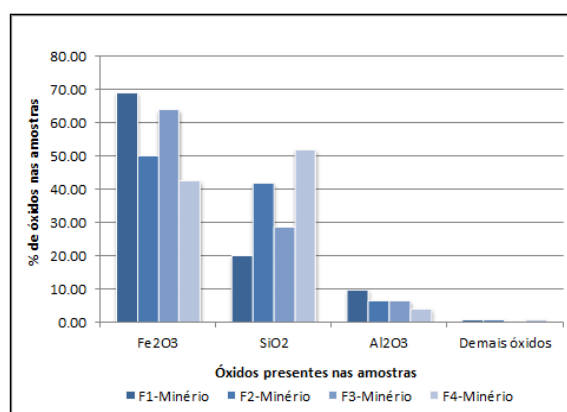


Figura 22 - Comparação entre os percentuais de óxidos nos concentrados de minério.

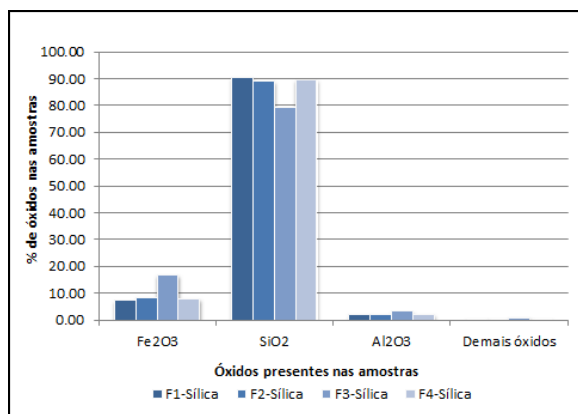


Figura 23 - Comparação entre os percentuais de óxidos nos concentrados de sílica.

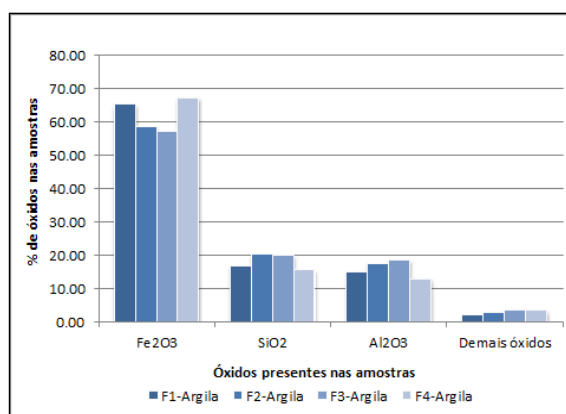


Figura 24 - Comparação entre os percentuais de óxidos nos concentrados de argila.

Observa-se uma tendência dos teores de Fe_2O_3 aumentarem no concentrado de minério em relação à amostra bruta, com exceção da barragem F4. Este fato pode ser explicado devido aos rejeitos desta barragem apresentarem, em geral, uma granulometria mais fina, como pode ser constatado pelo valor do D_{50} , igual a 0,0310 mm, que é o menor valor encontrado dentre todas as amostras brutas analisadas.

A elevada concentração de óxidos de ferro no concentrado de argila sugere que a maior parte dos óxidos de ferro presentes neste rejeito se encontravam, originalmente, finamente divididos e que, devido às operações de segregação por tamanho e densidade, que davam origem aos concentrados de argila, este material acabou sendo direcionado para esta fração. Neste sentido, pode ser observado, também, um grande percentual de óxidos de ferro nos concentrados de argila de todas as barragens, assim como os maiores teores de óxidos de alumínio.

Por fim, verifica-se elevados valores de óxidos de silício, variando entre 80 a 90%, nos concentrados de sílica. Este fato demonstra que os diferentes processos para retirada da fração argila e a separação magnética ao final do processo foram eficazes em produzir um concentrado cuja composição química é, quase em sua totalidade, de óxidos de silício.

Por meio da análise mineralógica foram encontrados os minerais caulinita, goethita, hematita e quartzo em todas as amostras. Cabe salientar que todos

estes minerais identificados nos difratogramas são compostos, basicamente, de óxidos e óxidos hidratados de silício, ferro e silício, conforme pode ser visualizado na Tabela 1.

A Tabela 14 apresenta a distribuição percentual destes minerais no rejeito bruto e nos concentrados de minério, sílica e argila e a Figura 25, a Figura 26, a Figura 27, e a Figura 28 apresentam uma comparação entre a concentração dos minerais em cada categoria de amostra analisada.

Tabela 14 - Distribuição percentual dos minerais encontrados nas amostras de rejeito bruto e nos concentrados de minério, sílica e argila

Amostras		Caulinita	Goethita	Hematita	Quartzo
F1	Bruta	6,10	19,50	29,60	44,80
	Minério	0,00	0,00	67,00	33,00
	Sílica	0,00	0,00	8,90	91,10
	Argila	12,80	44,20	40,00	3,00
F2	Bruta	2,80	13,50	35,50	48,20
	Minério	0,00	0,00	65,80	34,20
	Sílica	0,00	0,00	12,80	87,20
	Argila	7,60	44,20	48,20	0,00
F3	Bruta	4,80	21,40	46,40	27,40
	Minério	0,00	0,00	50,50	49,50
	Sílica	0,00	0,00	20,80	79,20
	Argila	12,80	35,50	51,70	0,00
F4	Bruta	5,50	18,80	40,25	35,45
	Minério	0,00	0,00	57,50	42,50
	Sílica	0,00	0,00	13,10	86,90
	Argila	8,90	39,20	47,30	4,60

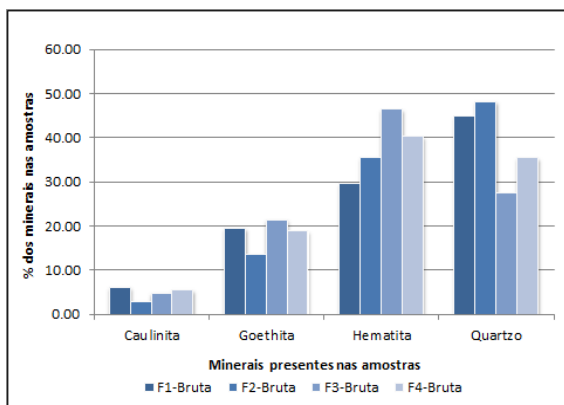


Figura 25 - Comparação entre os percentuais de minerais nas amostras de rejeito bruto.

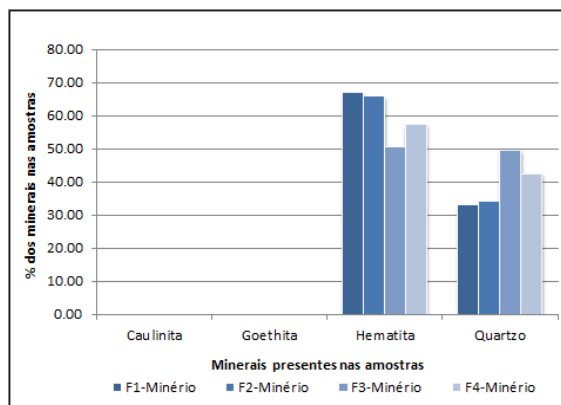


Figura 26 - Comparação entre os percentuais de minerais nos concentrados de minério.

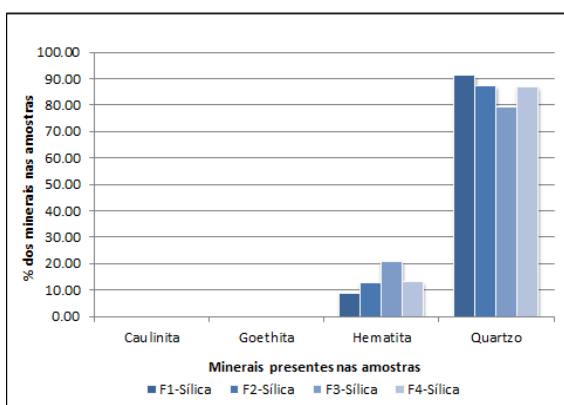


Figura 27 - Comparação entre os percentuais de minerais nos concentrados de sílica.

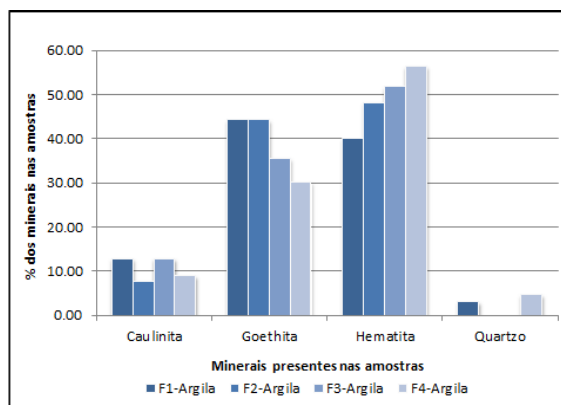


Figura 28 - Comparação entre os percentuais de minerais nos concentrados de argila.

Seguindo o comportamento dos óxidos de ferro, observa-se uma tendência do teor de hematita aumentar no concentrado de minério em relação à amostra bruta, apesar deste concentrado ainda apresentar quantidade significativa de quartzo. Além disso, percebe-se maior concentração do quartzo nas amostras de sílica e de caulinita e goethita nas amostras de argila.

Verifica-se que os óxidos de alumínio encontrados nos concentrados de argila estão relacionados à presença de caulinita, um aluminossilicato de fórmula $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. É possível observar também que os óxidos de ferro presentes nos concentrados de argila dividem-se na forma de goethita e hematita.

Com base nos dados apresentados, pode se observar que o método de segregação utilizado foi eficaz em produzir:

- ✓ concentrados de minérios, constituídos dos tamanhos de partículas médios dentre os concentrados obtidos, que apresentam, com exceção da barragem F4, teores de óxidos de ferro superiores aos dos rejeitos brutos.
- ✓ concentrados de sílica, constituídos dos maiores tamanhos de partículas dentre os concentrados obtidos, ricos em óxidos de silício, na forma de quartzo; e
- ✓ concentrados de argila, constituídos dos menores tamanhos de partículas dentre os concentrados obtidos, ricos em óxidos de ferro, na forma de goethita e hematita.

4.5. Perspectivas para aplicação de concentrados de sílica e argila obtidos do processamento de rejeitos da mineração de ferro do Quadrilátero Ferrífero na construção civil

4.5.1. Caracterização de concentrados de sílica obtidos da segregação de rejeitos da mineração de ferro

4.5.1.1. Análise da composição granulométrica

As curvas granulométricas para os concentrados de sílica das barragens F1, F2, F3 e F4 são apresentadas na Figura 29.

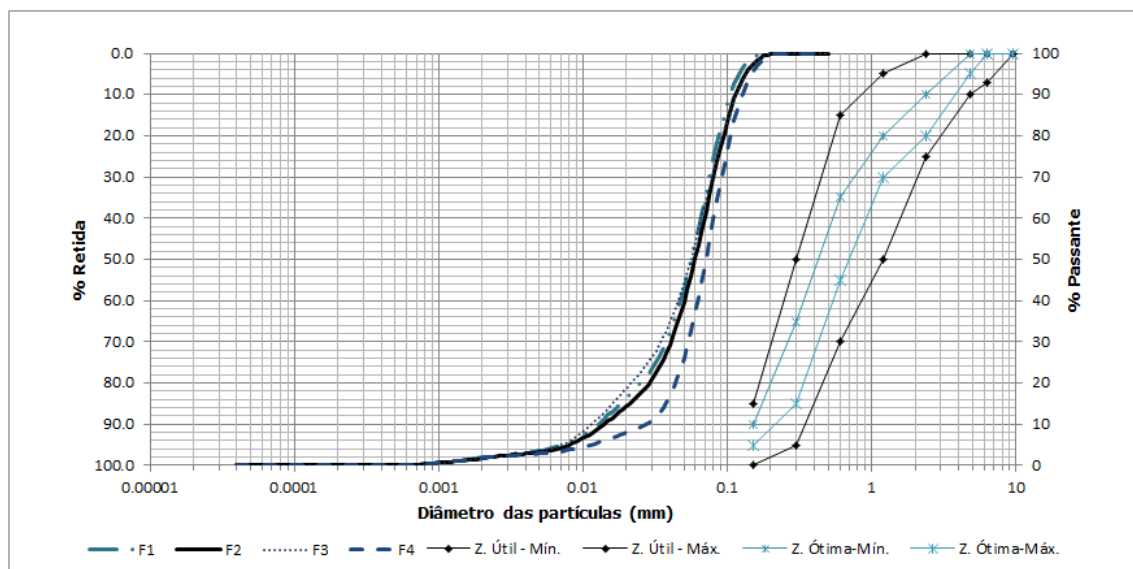


Figura 29 - Curva Granulométrica dos concentrados de sílica das barragens F1, F2, F3 e F4.

Todo material presente no concentrado de sílica encontra-se nas frações areia fina e silte-argila, de acordo com a classificação proposta na norma ASTM 3282/04, como pode ser observado na Tabela 15

Tabela 15 - Percentual em peso de areia fina e silte-argila em concentrados de sílica das barragens F1, F2, F3 e F4

Fração (ASTM D 3282/04)	% em peso presente em cada barragem			
	F1	F2	F3	F4
Areia Fina (0,075 a 0,425 mm)	30,2	34,6	32,3	45,6
Silte – Argila (<0,0075 mm)	69,8	65,4	67,7	54,4

Além disso, de acordo com classificação apresentada por Albuquerque (2012) para agregados miúdos – areia fina (0,15 a 0,6 mm), areia média (0,6 a 2,4 mm) e areia grossa (2,4 a 4,8 mm) – uma parcela ínfima da sílica encontra-se na fração areia fina: 0,86% para barragem F1; 2,53% para a barragem F2; 2,80% para barragem F3 e 4,4 % para barragem F4, sendo o restante do material analisado inferior a 0,15 mm.

4.5.1.2. Análise da composição química e mineralógica

Pode-se observar, por meio da análise dos dados obtidos na microfluorescência de raios-X (Tabela 16) que os concentrados de sílica são compostos basicamente por óxidos de silício, em maior proporção, e óxidos de ferro e de alumínio, em menores proporções.

Tabela 16 - Percentual em peso de óxidos em concentrados de sílica das barragens F1, F2, F3 e F4

	Óxidos presentes nas amostras			
	Fe₂O₃ (%)	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Demais óxidos (%)
F1	7,29	90,34	2,16	0,20
F2	8,38	89,04	2,14	0,43

F3	16,79	79,21	3,13	0,87
F4	7,92	89,60	2,07	0,41

Os dados de difração de raios-x, previamente identificados, utilizando-se o programa Xpowder 12, foram analisados posteriormente no programa Fullprof (2008), que utiliza como base o método de Rietveld, tendo sido encontrada uma mineralogia básica para os concentrados de sílica das quatro barragens composta por hematita e quartzo. Desta forma, pode-se afirmar que os óxidos de ferro estão presentes nas amostras analisadas na forma de hematita e os óxidos de silício na forma de quartzo. O percentual em peso dos minerais encontrados é mostrado na Tabela 17.

Tabela 17 - Percentual em peso de minerais em concentrados de sílica das barragens F1, F2, F3 e F4

	Minerais presentes nas amostras	
	Hematita (%)	Quartzo (%)
F1	8,90	91,10
F2	12,80	87,20
F3	20,80	79,20
F4	13,10	86,90

4.5.1.3. Análise morfológica

As imagens obtidas pela microscopia eletrônica de varredura dos concentrados de sílica são bastante semelhantes para todas as barragens. Do ponto de vista morfológico, pode-se observar amostras com tamanhos e formatos de partícula bastante homogêneos. Podem ser identificadas grande quantidade de partículas subarredondadas a angulosas, provavelmente de quartzo; partículas menores, algumas prolatas, também de quartzo; e outras poucas partículas tabulares, provavelmente de hematita. Em relação à esfericidade, predominam partículas com baixa esfericidade. Estas imagens podem ser observadas nas Figura 30, Figura 31, Figura 32 e Figura 33 apresentadas a seguir.

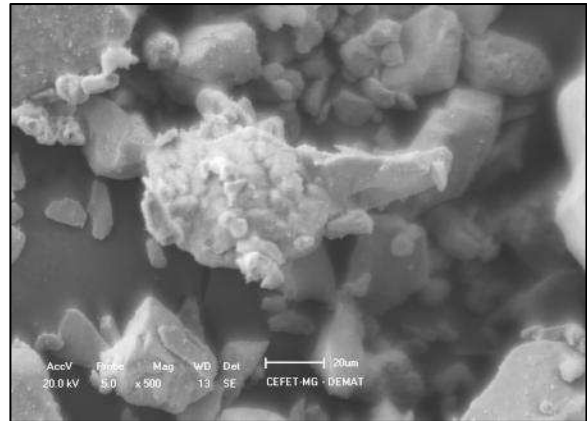
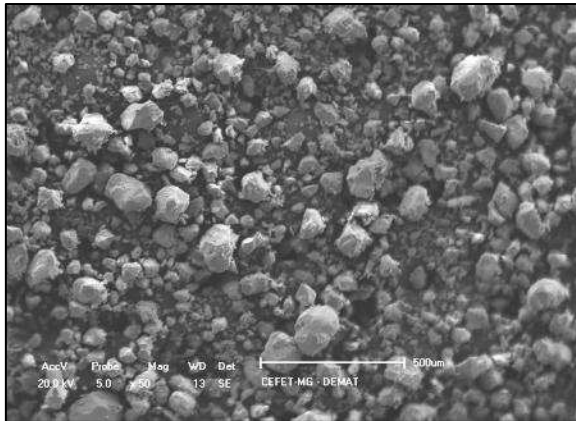


Figura 30 - Microscopia eletrônica de varredura do concentrado de sílica da barragem F1.

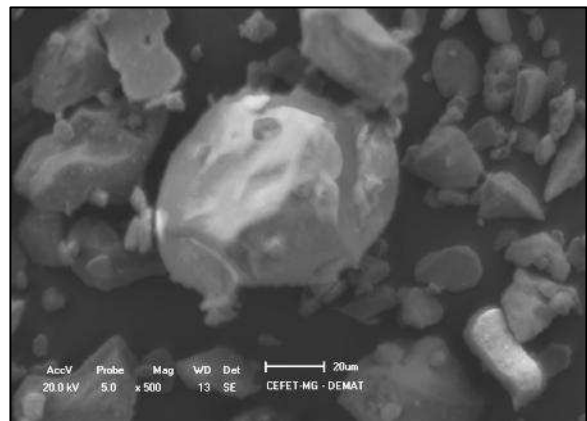
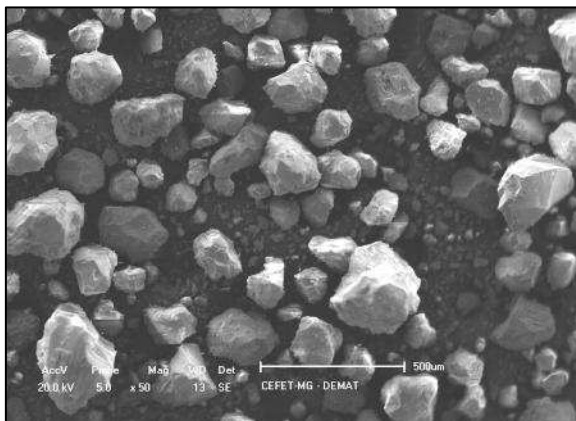


Figura 31 - Microscopia eletrônica de varredura do concentrado de sílica da barragem F2.

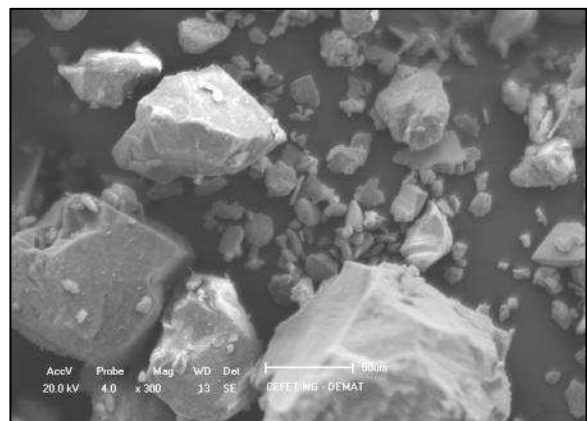
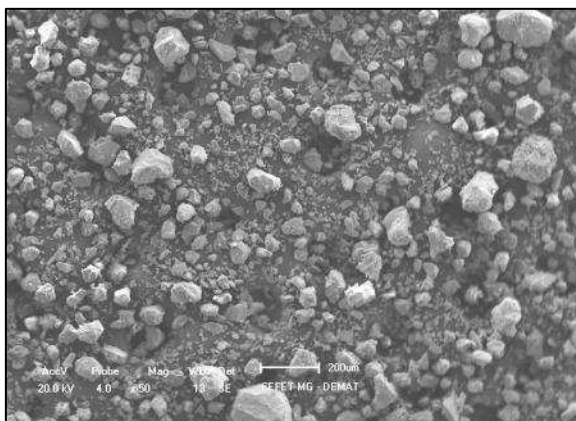


Figura 32 - Microscopia eletrônica de varredura do concentrado de sílica da barragem F3.

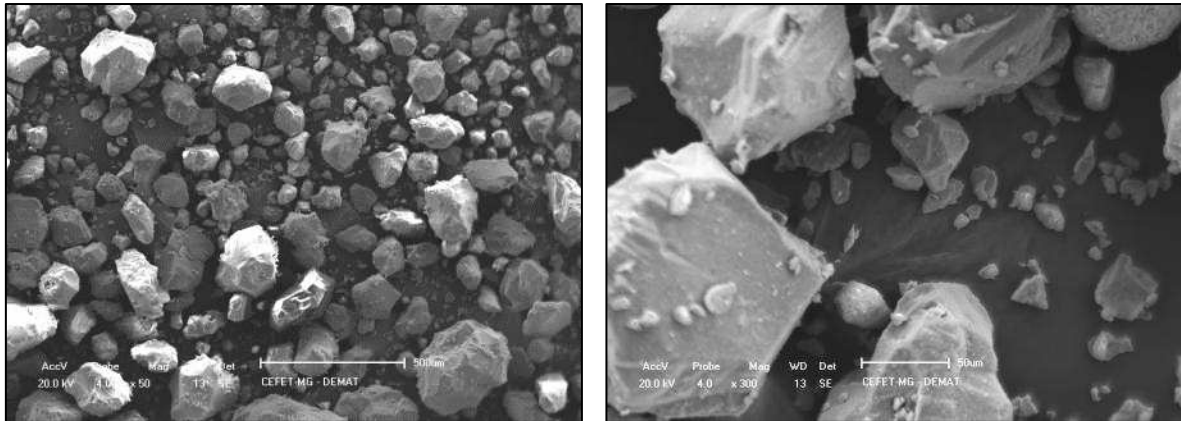


Figura 33 - Microscopia eletrônica de varredura do concentrado de sílica da barragem F4.

4.5.2. Caracterização de concentrados de argila obtidos da segregação de rejeitos da mineração de ferro

4.5.2.1. Análise da composição granulométrica

As curvas granulométricas para os concentrados de argila das barragens F1, F2, F3 e F4 são apresentadas na Figura 34.

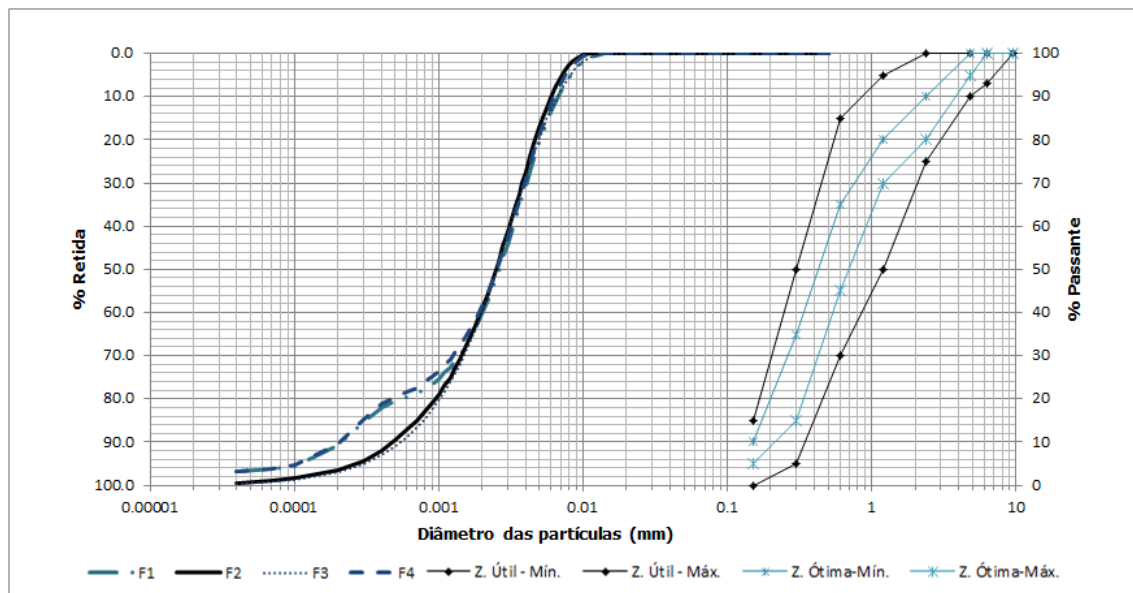


Figura 34 - Curva Granulométrica dos concentrados de argila das barragens F1, F2, F3 e F4.

De acordo com a classificação proposta na norma ASTM D 3282/04, todo material presente no concentrado de argila encontra-se na fração silte-argila (<0,075 mm). No concentrado de argila não existem partículas na fração areia, de acordo com classificação apresentada por Albuquerque (2012). Os tamanhos de partículas neste concentrado são bastante homogêneos e praticamente todo o material contido nestes concentrados apresentam granulometria inferior a 0,015 mm.

4.5.2.2. Análise da composição química e mineralógica

A análise dos dados obtidos na microfluorescência de raios-X permite definir que os concentrados de argila são compostos basicamente por óxidos de ferro, em maior proporção, e por óxidos de silício e óxidos de alumínio, em menores proporções. Os dados da microfluorescência de raios-X podem ser visualizados na Tabela 18.

Tabela 18 - Percentual em peso de óxidos em concentrados de argila das barragens F1, F2, F3 e F4

	Óxidos presentes nas amostras			
	Fe₂O₃ (%)	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Demais óxidos (%)
F1	65,36	16,99	15,28	2,37
F2	58,82	20,45	17,58	3,15
F3	57,32	20,04	18,81	3,82
F4	67,44	15,78	13,19	3,58

A mineralogia básica encontrada para os concentrados de argila das quatro barragens, que é composta por caulinita, goethita, hematita e quartzo. Os percentuais dos minerais em peso são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Percentual em peso de minerais em concentrados de sílica das barragens F1, F2, F3 e F4

Minerais presentes nas amostras				
	Caulinita	Goethita	Hematita	Quartzo
	(%)	(%)	(%)	(%)
F1	12,80	44,20	40,00	3,00
F2	7,60	44,20	48,20	0,00
F3	12,80	35,50	51,70	0,00
F4	8,90	30,10	56,40	4,60

Desta forma, observa-se que os óxidos de ferro presentes nas amostras analisadas estão, proporcionalmente, nas formas de goethita e hematita; os óxidos de silício estão divididos em minerais de quartzo e associados à estrutura da caulinita; e os óxidos de alumínio, essencialmente nas estruturas da caulinita.

4.5.2.3. Análise morfológica

As imagens de microscopia eletrônica de varredura dos concentrados de argila, Figura 35, Figura 36, Figura 37 e Figura 38, também mostraram-se bastante semelhantes para todas as barragens. Do ponto de vista morfológico, pode-se observar amostras com tamanhos e formatos de partícula bastantes homogêneos.

Partículas muito finas podem ser observadas nos concentrados de argila de todas as barragens, corroborando o resultado das curvas granulométricas, de que 100% do material destes concentrados são menores que 0,015 mm. Materiais com aspecto pulverulento observados em todas as imagens são misto de goethita, hematita e quartzo finamente divididos, de difícil identificação. As partículas laminares observadas são, provavelmente, de caulinita.

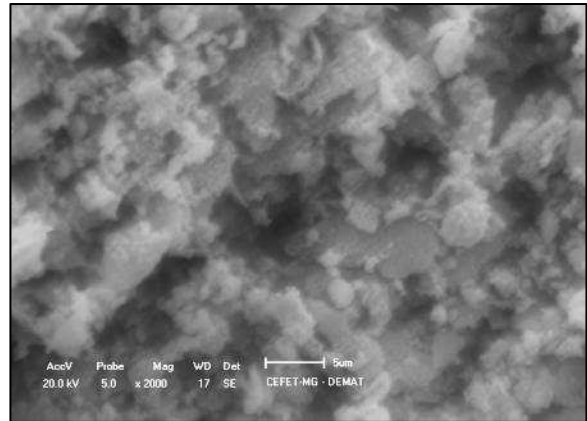
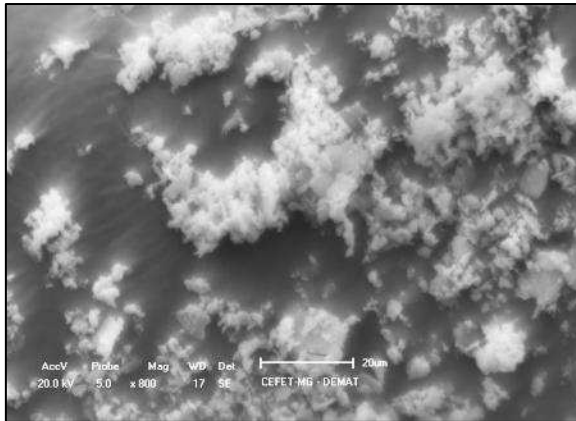


Figura 35 - Microscopia eletrônica de varredura do concentrado de argila da barragem F1.

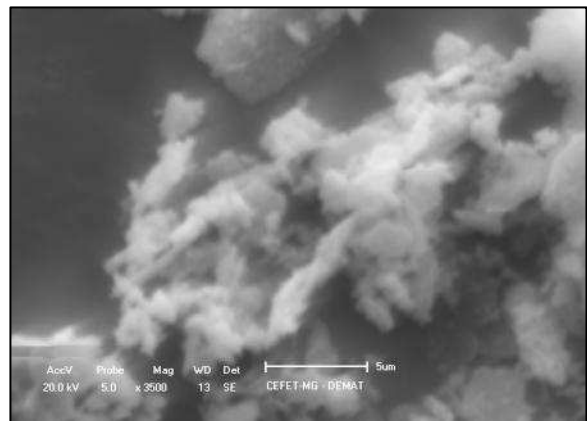
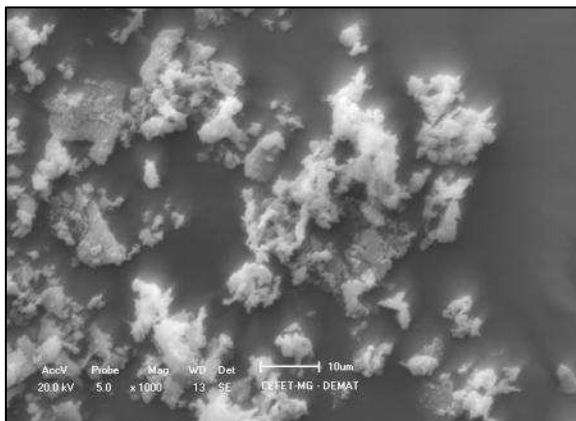


Figura 36 - Microscopia eletrônica de varredura do concentrado de argila da barragem F2.

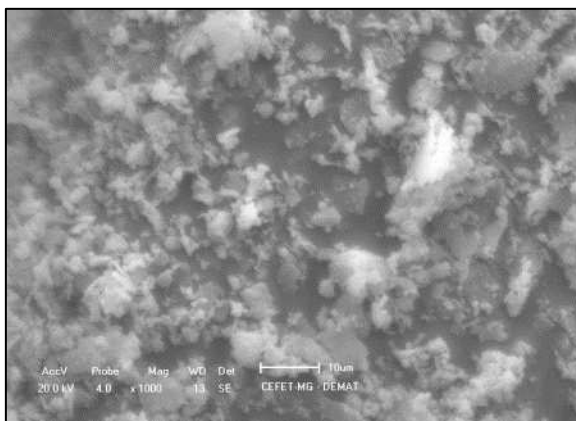


Figura 37 - Microscopia eletrônica de varredura do concentrado de argila da barragem F3.

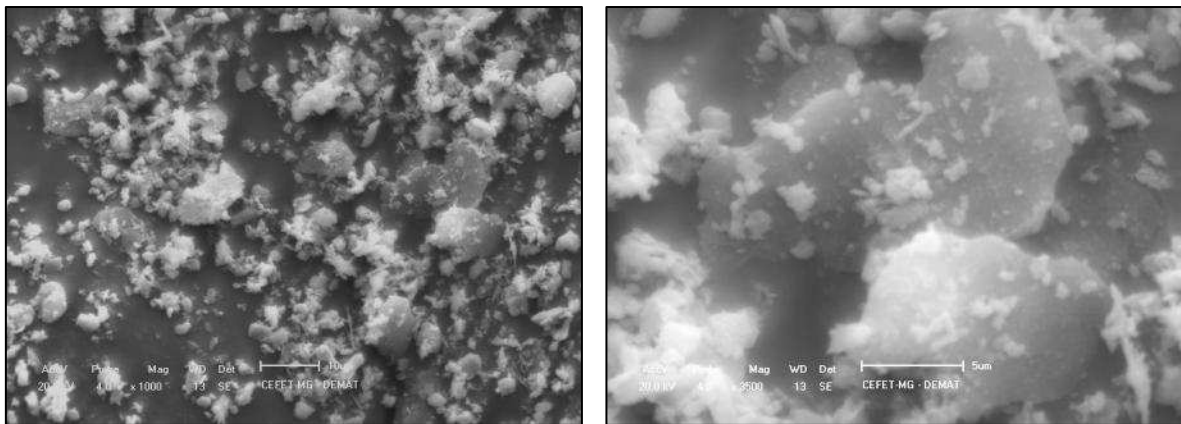


Figura 38 - Microscopia eletrônica de varredura do concentrado de argila da barragem F4.

4.5.3. Utilização de concentrados de sílica e argila obtidos da segregação de rejeitos da mineração de ferro na construção civil

Com base nas informações obtidas pela granulometria a *laser* do concentrado de sílica, observa-se uma grande quantidade de material inferior à 0,075 mm. Os percentuais encontrados para as barragens F1, F2, F3 e F4 são respectivamente iguais a 69,8%, 65,4%, 67,7% e 54,4%. Aliada a esta granulometria, tem-se uma composição química formada, basicamente, por uma mistura com grande quantidade de óxido de silício, na forma de quartzo, variando de 79,21 a 90,34%, e quantidades intermediárias de óxidos de ferro, na forma de hematita, variando de 7,29 a 16,79%.

Neste sentido, os usos em que se pode vislumbrar a aplicação deste concentrado de sílica estão relacionados à:

- ✓ incorporações no cimento ou concreto, na forma de material inerte e, especula-se, caso seja dado um tratamento térmico, como pozolanas;
- ✓ agregado miúdo para argamassa;
- ✓ material para incorporação à cerâmicas; e
- ✓ material de enchimento alternativo (*filer*) para concretos asfálticos.

Com base nas informações obtidas pela granulometria a *laser* do concentrado de argila, observa-se que a totalidade da amostra apresenta dimensão inferior a

0,015 mm. Aliada a esta granulometria, tem-se uma composição química formada, basicamente, por uma mistura com grande quantidade de óxidos de ferro, na forma de goethita e hematita, em quantidades proporcionais, variando de 57,32% a 67,44%; quantidades intermediárias de óxidos de silício, na forma de quartzo e caulinita, variando de 15,78% a 20,45%; e óxidos de alumínio, na forma de caulinita, variando de 13,19% a 20,45%. Neste sentido, os usos em que se pode vislumbrar a aplicação deste concentrado de argila estão relacionados à incorporações no cimento e concretos para produção de materiais de alto desempenho, e, principalmente, à incorporação em materiais cerâmicos para fabricação de tijolos e telhas.

Como não existem estudos na área de materiais de construção utilizando estes concentrados de sílica e argila, a análise acima apresenta apenas perspectivas, que devem ser melhor estudadas e avaliadas. Entretanto, de acordo com o panorama apresentado nos capítulos anteriores para o reaproveitamento de rejeitos brutos de barragens do Quadrilátero Ferrífero, acredita-se que a utilização das frações de sílica e argila separadamente possa ser mais viável e até mesmo apresentar melhor desempenho para utilização na construção civil.

5. CONCLUSÕES

A importância da extração do minério de ferro para a economia brasileira e para a sociedade moderna é indiscutível. Entretanto, conforme apresentado anteriormente, 75% das barragens de rejeito da mineração de ferro, que se enquadram na PNSB, apresentam dano potencial associado alto ou médio, quando considerados o potencial de perdas de vidas humanas e os impactos econômicos, sociais e ambientais.

No que diz respeito à avaliação de impactos ambientais de barragens de rejeito da mineração de ferro, observou-se impactos de elevada magnitude no meio físico, no meio biológico e ecossistemas naturais e no meio socioeconômico.

Os impactos ambientais de maior magnitude na fase de construção foram: alteração da paisagem; assoreamento de cursos d'água; alteração da qualidade da água superficial; alteração da dinâmica hídrica superficial e subterrânea; afugentamento com perturbações da fauna; alteração na dinâmica de ecossistemas aquáticos; alteração do metabolismo vegetal; e geração de emprego e renda.

Já na fase de operação, os impactos ambientais de maior magnitude foram: alteração da paisagem; assoreamento de cursos d'água; alteração da qualidade da água; alteração da dinâmica hídrica superficial e subterrânea; alteração na dinâmica de ecossistemas aquáticos e geração de riscos e incômodos decorrentes da operação do empreendimento.

Ao se avaliar os impactos ambientais de uma barragem desativada, tem-se como impactos de maior magnitude a alteração da paisagem e a alteração da dinâmica hídrica superficial.

É importante salientar apresentou-se como único impacto positivo da construção, operação e presença da barragem inativa no ambiente a geração de emprego e renda. Este impacto ambiental positivo apresenta de alta magnitude na fase de construção e baixa magnitude nas fases de operação e desativação da estrutura.

Por fim, cabe salientar que a presente análise não teve como intuito julgar se as barragens são as melhores formas de disposição de rejeitos, uma vez que

diversos fatores influenciam nesta avaliação. Contudo, com base no panorama apresentado, é importante se pensar em formas de minimização dos potenciais impactos associados a estas estruturas. Além disso, avaliar alternativas que visem à redução de sua utilização e até mesmo se propor soluções ambientais viáveis para as barragens que se encontram desativadas.

O reaproveitamento de rejeitos da mineração de ferro é, portanto, uma questão de grande relevância, principalmente no que diz respeito à redução de áreas impactadas e reaproveitamento de materiais que irão reduzir a demanda por recursos naturais primários. Neste contexto, o estudo realizado demonstrou a viabilidade, de um ponto de vista geral, do reaproveitamento dos rejeitos de barragens de mineração de ferro em um segmento em amplo crescimento, que é o caso da construção civil.

Do ponto de vista físico, a caracterização dos rejeitos brutos demonstrou amostras com tamanhos de partículas bastante heterogêneos que possuem um grande percentual de partículas na fração silte-argila ($<0,075\text{mm}$). Dados da microfluorescência de raios-x dos rejeitos detectaram, principalmente, óxidos de ferro, silício e alumínio, com porcentuais variando, mas não significativamente, entre as barragens. Os rejeitos da barragem F4 foram os que apresentaram o maior percentual de óxido de ferro, com 59,05%, e os rejeitos da barragem F2 os que apresentaram o maior teor de óxido de silício, com 59,96%.

As análises mineralógicas para os rejeitos brutos demonstraram uma composição básica de quartzo, hematita, goethita, gibbsita e caulinita. Por fim, as análises da microscopia eletrônica de varredura corroboraram todas as análises supracitadas, em que se podem visualizar amostras heterogêneas do ponto de vista de granulometria, mas com composição mineralógica bastante semelhantes.

Os usos detectados para os rejeitos brutos foram: agregados para concreto e argamassa; aditivos do cimento Portland; material para indústria cerâmica; e, como materiais para o setor de pavimentação. Cabe salientar que estes são apontamentos iniciais que indicam alternativas de uso, que devem ser estudadas, testadas e avaliadas, atentando-se às especificações para cada material.

Para melhor se adequar às especificações requeridas pelos materiais de construção civil os rejeitos brutos foram segregados, objetivando a melhoria de suas características granulométricas, químicas e mineralógicas. No presente trabalho procedeu-se a segregação dos materiais em concentrados de minério, sílica e argila por método específico de segregação desenvolvido por Peixoto *et al.* (2013).

Por meio deste método, conseguiu-se um concentrado de minério, cujo D_{50} médio das quatro barragens foi igual a 0,0277 mm, com percentual de óxido de ferro variando entre 42,76 a 69,2%. Foram observadas, também neste concentrado, quantidades de óxidos de silício que variam entre 20,07 a 52,09% e de alumínio que variam de 4,2 a 9,86%. Averiguou-se que os óxidos de ferro deste concentrado estão na forma de hematita e que os óxidos de silício estão, quase em sua totalidade, na forma de quartzo.

No que diz respeito aos concentrados de sílica, que apresentaram D_{50} médio das quatro barragens igual a 0,0607 mm, a presença de óxidos de silício, entre 79,21 a 90,34%, que estão predominantemente na forma de quartzo. Os concentrados de sílica apresentaram, ainda, percentuais de óxidos de ferro, na forma de hematita, que somados variam entre 7,29 e 16,79%, e percentuais de óxidos de alumínio, ligados à presença de caulinita, entre 2,07 e 3,13%.

Por fim, observou-se nos concentrados de argila, cujo D_{50} médio das quatro barragens é igual a 0,0025 mm, altas concentrações de óxido de ferro, que variaram entre 57,32 a 67,44%, na forma de goethita e hematita. Averiguou-se que, em sua maior parte, estes óxidos estão presentes na forma de goethita, com exceção da barragem F4, em que estão predominantemente relacionados à hematita. Além disso, foi possível observar quantidades significativas de óxidos de alumínio, que vão de 13,19 a 18,81%, relacionados sobretudo à caulinita.

Desta forma, pode-se afirmar que, para os rejeitos analisados das barragens F1, F2, F3 e F4, o processo de segregação foi eficaz na produção de:

- ✓ concentrados de minérios, constituídos dos tamanhos de partículas médios dentre os concentrados obtidos, que apresentam, com exceção da barragem F4, teores de óxidos de ferro superiores aos dos rejeitos brutos.

- ✓ concentrados de sílica, constituídos dos maiores tamanhos de partículas dentre os concentrados obtidos, ricos em óxidos de silício, na forma de quartzo;
- ✓ concentrados de argila, constituídos dos menores tamanhos de partículas dentre os concentrados obtidos, ricos em óxidos de ferro, na forma de goethita e hematita;

Os dados obtidos pelas análises de granulometria a *laser*, difração de raios-X, microfluorescência de raios-X e microscopia eletrônica de varredura para os concentrados de sílica e argila de rejeitos de barragens do Quadrilátero Ferrífero, demonstraram que a segregação melhorou a qualidade do material para o seu reaproveitamento na construção civil.

Desta forma, as principais perspectivas de aplicação destes concentrados, foram:

- ✓ incorporações no cimento ou concreto, na forma de material inerte e, especula-se, caso seja dado um tratamento térmico, como pozolanas; agregado miúdo para argamassa; material para incorporação à cerâmicas; e material de enchimento alternativo (*filer*) para concretos asfálticos para os concentrados de sílica; e
- ✓ incorporações no cimento e concretos para produção de materiais de alto desempenho; e incorporação em materiais cerâmicos para fabricação de tijolos e telhas.

Cabe salientar que nenhum dos usos representam formas conclusivas, uma vez que a análise de outras propriedades físicas, além da granulometria, precisam ser realizadas, além de testadas propriedades mecânicas destes materiais tanto para utilização dos rejeitos na forma bruta quanto na forma segregada. Além disso, salienta-se que as características granulométricas, químicas, mineralógicas e morfológicas são específicas de cada barragem. Contudo, estas características podem variar de acordo com o tipo minério explorado e processo de beneficiamento a que foram submetidos.

Espera-se que este trabalho tenha contribuído para a geração de conhecimento para no que diz respeito ao reaproveitamento de rejeitos da mineração de ferro e, indiretamente, para a minimização dos impactos ambientais advindos das barragens de rejeitos.

Como futuras pesquisas sugere-se:

- ✓ estudo da aplicação de rejeitos como aditivos do cimento, testando, principalmente, a pozolanicidade dos concentrados de sílica;
- ✓ estudo da aplicação de concentrados de sílica como agregados para argamassas e concretos;
- ✓ estudo da aplicação de concentrados de sílica como material de enchimento alternativo (*filer*) para fabricação de concretos asfálticos;
- ✓ estudo da aplicação de rejeitos como aditivos de cimentos, avaliando a fabricação de concretos de alta resistência, em que o foco deverá ser os concentrados de argila; e
- ✓ estudo da incorporação de concentrados de argila em materiais cerâmicos.

6. REFERÊNCIAS

AÏTCIN, P. C. **Cements of yesterday and today Concrete of tomorrow.** In: Cement and Concrete Research vol. 30. 2000.

ALBUQUERQUE, A. S. Agregados. In: FALCÃO BAUER, L. A. **Materiais de Construção.** Vol. 1. 5 ed. 63-120 p. 2012.

ALLORE MINERAÇÃO. **Mercado.** 2012. Disponível em: <
http://www.allore.com.br/allore/web/conteudo_pt.asp?idioma=o&conta=28&tipo=27261>. Acessado em: 04/07/2014.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. EB 1763:1992. **Aditivos para cimento Portland.** Rio de Janeiro, 1992. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653:2014. **Materiais pozolânicos — Requisitos,** Rio de Janeiro, 2014. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281:2001. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2001. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-10004:2004 **Resíduos sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro, 2004. 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-10007:2004. **Amostragem de resíduos sólidos: procedimento.** Rio de Janeiro, 2004. 21 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-5732:1991 **Cimento Portland comum.** Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-5736:1991 / EB 758/1991. **Cimento Portland pozolânico.** Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-7211:2009. **Agregados para concretos - especificações.** Rio de Janeiro, 2009. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-7217:1987. **Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 1987. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-NM 248:03. **Agregados – determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003. 6p.

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

BAKER, P. SWEENEY, M. S. MCELROY , J. **Residents calling it an environmental disaster: tailings pond breach at Mount Polley Mine near Likely, BC.** Globo News, Canada, 04 ago. 2014. Disponível em: <<http://globalnews.ca/news/1490361/tailings-pond-breach-at-mount-polley-mine-near-likely-bc/>> Acessado em: 09/11/2014.

BASTOS, L. A. C. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária.** Ouro Preto: UFOP. 98 p. 2013. (Dissertação de Mestrado)

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

BJELKEVIK. A. G. **ICOLD – sustainable design and post-closure performance of tailings dams.** In: Proceedings of the Sixth International Conference on Mine Closure. Vol. 1. Mine Site Reclamation. Australian Centre for Geomechanics: Perth. 353-359 p. 2011.

BORGES, A. A. **Caracterização da parcela magnética de minério fosfático de carbonatito.** Ouro Preto: REM - Revista Escola de Minas, v. 61, n.1, p.29-34, 2008.

BRASIL. Lei Federal n. 6938 de 31 de agosto de 1981. Institui a Política nacional de Meio Ambiente entre outros. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm> Acesso em: 07/08/2014.

BRASIL. Lei n.12.305, de 02 ago. 2012. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.** Disponível em:

<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>

Acesso em: 14 mai. 2012.

BRASIL. Lei n.12.334, de 20 set. 2010. **Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens entre outros assuntos.** Disponível em:

<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>

Acessado em: 14 mai. 2012.

CABRAL JÚNIOR, M. MOTTA, J. F. M. ALMEIDA A. S. **Argila para cerâmica vermelha.** In: Rochas Minerais Industriais: Usos e Especificações. Rio de Janeiro: CETEM. Cap. 33. pág. 747 – 770. 2008.

CAMPANHA, A. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação.** Universidade Federal de Viçosa. 106 p. 2011. (Dissertação Mestrado)

CÁNOVAS, Manuel Fernández. **Patologia e terapia do concreto armado.** Tradução de Maria Celeste Marcondes, Carlos W. F. dos Santos, Beatriz Cannabrava. 1. ed. São Paulo: Pini. 522 p. 1988.

CASTRO, T. A.; NALINI JUNIOR, H. A.; LIMA, H. M. **Entendendo a Mineração no Quadrilátero Ferrífero.** Belo Horizonte: Ecológico. 93 p. 2011.

CHAVES, L. F. M. **Estudo da adição do resíduo proveniente da extração de minério de ferro em argilas do Rio Grande do Norte.** 167 p. 2009. (Tese de Doutorado)

CHEN, Y. ZHANG, Y. CHEN, T. *et al.* **Preparation of eco-friendly construction bricks from hematite tailings.** *Construction and Building Materials.* 2011. v. 25. 2107–2111 p.

COELHO, E. F. F. **Estudo do comportamento mecânico de rejeitos de minério de ferro reforçados com fibras sintéticas.** 83 p. 2008. (Dissertação de Mestrado)

COMMONWEALTH OF AUSTRALIA. **Mine closure and completion.** 2006. 63 p. Disponível em: <http://www.minerals.org.au/file_upload/files/resources/enduring_value/mine_closure.pdf> Acesso em: 07/08/2014.

CONAMA. Resolução CONAMA n. 01 de 23 de janeiro de 1986. **Estabelece as diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente, entre outros.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>> Acesso em: 07/08/2014.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS - CNRH. Resolução CNRH n. 143 de 10 de julho de 2012. **Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume.** Disponível em: <https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7231> Acesso em: 07/08/2014.

COSTA, A. V.; GUMIERI, A. G.; BRANDAO, P. R. G. **Piso intertravado produzido com rejeito de sinter feed.** Rev. IBRACON Estrut. Mater. São Paulo , v. 7, n. 2, Apr. 2014.

CRUZ, L. **Deslizamento de terra em mina deixa vítimas e mobiliza bombeiros em Itabirito.** Estado de Minas, Belo Horizonte, 10 set. 2014. Disponível em: <http://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2014/09/10/interna_gerais,567542/deslizamento-de-terra-em-mina-deixa-vitimas-e-mobiliza-bombeiros-em-itabirito.shtml> Acessado em: 09/11/2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS - DNER. DNER-EM 367 - **Material de enchimento para misturas betuminosas.** 1997. 3p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PESQUISA MINERAL – DNPM. **Informe Mineral – 1º Semestre 2014.** 2014. 22 p. Disponível em: <www.dnpm.gov.br>. Acesso em: 20/10/2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PESQUISA MINERAL – DNPM. Portaria DNPM n. 416 de 03 de setembro de 2012. **Cria o Cadastro Nacional de**

Barragens de Mineração e dispõe sobre o Plano de Segurança, entre outros. Disponível em:

<<http://www.mgamineracao.com.br/pordentro/noticias/barragens.pdf>>

Acesso em: 07/08/2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PESQUISA MINERAL – DNPM. Portaria nº 12 de 22 de janeiro de 2002. **Normas Reguladoras da mineração.** Disponível em: <www.dnpm.gov.br/assets/legislacao/p00310102.rtf>. Acesso em: 07/08/2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PESQUISA MINERAL – DNPM. **Sumário mineral 2013.** 2013. 20 p. Disponível em: <www.dnpm.gov.br>. Acesso em: 07/08/2014.

DONDI, M. MARSIGLI, M. FABBRI, B. **Recycling of industrial and urban wastes in brick production".** *Tile & Brick Int.*, v. 13, pp. 218-225, mar. 1997.

DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco.** UFMG: Belo Horizonte. 2008. (Dissertação de Mestrado)

FONTES, W. C. JANUZZI, R. V. BORGES, R. A. CURY, A. A. PEIXOTO, R. A. F. **Resíduo da mineração de ferro como matéria-prima alternativa no desenvolvimento de argamassas de revestimento e assentamento.** In: Anais do 56º Congresso Brasileiro Do Concreto - CBC2014 – 56CBC. 2014.

FREITAS, V. A. A. LIMA, J. S. V. COUCEIRO, P. R. **Caracterização e análise estrutural da hidroxisodalita sintetizada a partir de amostras de solo amazônico.** *Cerâmica.* Vol 57. 281-287 p. 2011.

FULLPROF. <http://www.ill.eu/sites/fullprof/>. version december/2008 (2008). Acessado em: 04/07/2014.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – FEAM. **Inventário estadual de barragens do estado de Minas Gerais.** Belo Horizonte: FEAM, 2011. 31 p. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/fean/inventario_de_barragem__2011.pdf> Acesso em: 07/08/2014.

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

GOMES, M. A.; PEREIRA, C. Al. PERES, A. E. C. **Caracterização tecnológica de rejeito de minério de ferro.** Rem: Rev. Esc. Minas [online]. vol. 64. n.2. 233-236 p. 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. **Guia para planejamento do fechamento de mina.** 1ª Edição. 224 p. 2013. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br>> Acessado em: 24/07/2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. **Informações e análises da economia mineral brasileira.** 7ª Edição. 2012. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br>> Acessado em: 04/07/2014.

JOHN, V. M. CINCOTTO, M. A. SILVA, M. G. **Cinzas e Aglomerantes Alternativos.** In: FREIRE, W. J. Tecnologias e materiais alternativos de construção. São Paulo: Editora Unicamp. 145 -191 p. 2003.

JUENGER, M.C.G. WINNEFELD, F. PROVIS, J.L. IDEKER, J.H. **Advances in alternative cementitious binders.** Cement and Concrete Research. Vol. 41. 1232–1243. 2011. Disponível em: <<http://ees.elsevier.com/CEMCON/default.asp>> Acessado em: 04/07/2014.

KOPEZINSKI, I. **Mineração x Meio Ambiente: considerações legais, principais impactos ambientais e seus processos modificadores.** Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS. 103 p. 2000.

LUZ, A. B. , SAMPAIO, J. A. e FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 5ª Ed. 965 p. 2010.

MACHADO, F.B.; MOREIRA, C.A.; ZANARDO, A; ANDRE, A.C.; GODOY, A.M.; FERREIRA, J. A.; GALEMBECK, T.; NARDY, A.J.R.; ARTUR, A.C.; OLIVEIRA, M.A.F.de. **Enciclopédia Multimídia de Minerais.** [on-line]. 2003. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/museudpm>>. Acessado em: 04/07/2014.

MARTINS, E.S. **Petrografia, mineralogia e geomorfologia de regolitos lateríticos no Distrito Federal**. Brasília: Universidade de Brasília. 196p. 2000.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa COPAM nº 87. 17 jun. 2005**. Altera e complementa a Deliberação Normativa COPAM N.º 62, de 17/12/2002, que dispõe sobre critérios de classificação de barragens de contenção de rejeitos, de resíduos e de reservatório de água em empreendimentos industriais e de mineração no Estado de Minas Gerais. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=8251>> Acesso em: 14 mai. 2012.

MOTTA, P.E.F.; CARVALHO FILHO, A.; KER, J.C. & PEREIRA, N.R. **Relações solo-superfície geomórfica e evolução da paisagem em uma área do planalto central brasileiro**. Pesq. Agropec. Bras. Vol: 37:869-878. 2002.

MYRRHA, M. A. L. **Solo-Cimento para fins construtivos**. In: FREIRE, W. J. Tecnologias e materiais alternativos de construção. São Paulo: Editora Unicamp. 95-121 p. 2003.

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

OLIVEIRA, H. M. Cimento Portland. In: FALCÃO BAUER, L. A. **Materiais de Construção**. Vol. 1. 5 ed. 35-63 p. 2012.

OLIVEIRA, P. S. **Rotas para recuperação de ferro fino contido no underflow do espessador de lama da Usina de Conceição**. Belo Horizonte: UFMG. 112 p. 2006. (Dissertação de mestrado)

OLIVEIRA, T. M. **Caracterização de misturas de rejeitos de minério de ferro melhoradas com adição de cimento com vistas à aplicação em estradas e aterros**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. 71 p. 2013.

OZKAN, S. & IPEKOGLU, B. **Investigation of environmental impacts of tailings dams**. In: Environmental Management and Health. Vol. 13. Nº3. 242-248 p. 2002.

PEIXOTO, R. A. F. OLIVEIRA, J. R. BARROS, J. B. **Processo de separação do minério de ferro contido em resíduos provenientes da extração e do beneficiamento de minério de ferro.** Requisição de patente. Instituto Nacional de Propriedade Industrial. 2013.

PRAES, P. E. ALBUQUERQUE, R. O. LUZ, A. F. O. **Recovery of Iron Ore Tailings by Column Flotation.** In: Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. Vol.1. 212-216 p. 2013.

RIETVELD, H.M. **A Profile Refinement Method for Nuclear and Magnetic Structures.** Acta Cryst. Vol. 2. 65-71 p. 1969. Disponível em: <<http://www.ccp14.ac.uk/ccp/web-mirrors/hugorietveld/xtal/paper2/paper2.html>> Acessado em: 04/07/2014.

ROCHA, L. CANÇADO, R.Z.L. PERES, A.E.C. **Iron ore slimes flotation.** In: Minerals Engineering. Vol. 23. 2010. 842–845 p.

ROCHA, L. PERES, A.E.C. **Aproveitamento econômico das lamas de ferro.** In: REM: R. Esc. Minas. Vol 62(3). 291-295 p. 2009.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação da importância dos impactos.** In: SÁNCHEZ, L. E. Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos. São Paulo: Oficina de Textos. 287-313 p. 2008.

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

SILVA, F. L. **Aproveitamento e reciclagem de resíduos de concentração de minério de ferro na produção de paívers e cerâmica.** Ouro Preto: REDMAT. 109 p. 2014. (Dissertação de Mestrado)

SILVA, J. P. S. **Impactos ambientais causados por mineração.** Revista Espaço da Sophia. n.8. 2007.

SILVA, M. R. **O uso do solo-cimento na construção.** In: FALCÃO BAUER, L. A. Materiais de Construção. Vol. 2. 5 ed. 526-570 p. 2013.

SILVA, R. G. O. **Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de mineração de ferro.** 132 p. 2010. (Dissertação de Mestrado)

SOUZA, C. C.; VIEIRA, C.M.F.; MONTEIRO, S.N. **Alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com rejeito de minério de ferro.** Rio de Janeiro:Revista Matéria. v. 13, n. 1, pp. 194 – 202. 2008.

SOUZA, J. P. **Impactos ambientais causados por mineração.** In: Revista Espaço Sophia. n. 08. Ano I. 2007.

THE MINING ASSOCIATION OF CANADA. **A Guide to the Management of Tailings Facilities.** 68 p. 2011. Disponível em: <<http://mining.ca/sites/default/files/documents/GuidetotheManagementofTailingsFacilities2011.pdf>> Acesso em: 07/08/2014.

TOFFOLO, R. V. M. SANT'ANA, F. J. N. BATISTA, J. O. S. SILVA, S. N. CURY, A. A. PEIXOTO, R. A. F.. **Viabilidade técnica de elementos de concreto para pavimentação produzidos com rejeito de barragem de minério de ferro.** In: Anais do 56º Congresso Brasileiro Do Concreto - CBC2014 – 56CBC. 2014.

U.S. Geological Survey - USGS. **Mineral commodity summaries 2014: U.S. Geological Survey.** 196 p. 2014. Disponível em: <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2014/mcs2014.pdf>> Acessado em: 04/07/2014.

VALE. **Projeto Ferro Carajás.** 48 p. 2012. Disponível em: <<http://www.vale.com/PT/aboutvale/initiatives/s11d/Documents/Final-Book-S11D-PORT.pdf>> Acesso em: 07/08/2014.

VERÇOSA, E. J. **Materiais Cerâmicos.** In: FALCÃO BAUER, L. A. Materiais de Construção. Vol. 2. 5 ed. 526-570 p. 2013.

VIEIRA, C.M.F., SOUZA, C.C. MONTEIRO, S.N. **Efeito da incorporação de resíduo de minério de ferro nas propriedades e microestrutura da cerâmica argilosa.** In: *17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, 112-023, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. 2006.

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

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

YELLISHETTY, M. KARPE, V. REDDY. E. **Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: a case study.** Resour Conserv Recycle. Vol. 52:1283–9. 2008.

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

ZHAO, S. FAN, J. SUN, W. **Construction and Building Materials.** Construction and Building Materials. Vol.50. 540–548. 2014. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/conbuildmat> Acessado em 04/07/2014.

APÊNDICE 1

Avaliação dos impactos ambientais ao meio físico, biológico e ecossistemas naturais e socioeconômico, nas fases de construção, operação e desativação de barragens de rejeito da mineração de ferro

- Avaliação de impactos ambientais da fase de construção de uma barragem de rejeitos

Tabela 20 - Avaliação dos possíveis impactos ao meio físico na fase de construção de uma barragem de rejeito.

	Impacto Ambiental	Indicadores de valoração da magnitude								Indicadores completos				
		N		RV		AB		RL		II	MG	D	I	PM
		At.	Vr.	At.	Vr.	At.	Vr.	At.	Vr.					
Construção	Alteração da paisagem	-	-1	I	3	L	2	MR	4	-24	AT	P	D	CP
	Alteração das propriedades do solo	-	-1	I	3	P	1	MR	4	-12	MD	P	D	CP
	Erosão	-	-1	I	3	P	1	MR	4	-12	MD	P	I	CP
	Assoreamento de cursos de água	-	-1	R ^{ML}	2	RG	3	MR	4	-24	AT	P	D	CP
	Alteração da dinâmica hídrica superficial e subterrânea	-	-1	I	3	RG	3	AR	9	-81	AT	P	D	CP
	Alteração da qualidade da água superficial	-	-1	R ^{ML}	2	RG	3	MR	4	-24	AT	P	D	CP
	Alteração da qualidade do ar	-	-1	R	1	RG	3	MR	4	-12	MD	P	D	CP
	Alteração nos níveis de pressão sonora	-	-1	R	1	L	2	MR	4	-8	MD	P	D	CP

Tabela 21 - Avaliação dos possíveis impactos ao meio biológico e ecossistemas naturais na fase de construção de uma barragem de rejeito.

	Impacto Ambiental	Indicadores de valoração da magnitude								Indicadores completos				
		N		RV		AB		RL		II	MG	D	I	PM
		At.	Vr.	At.	Vr.	At.	Vr.	At.	Vr.					
Construção	Perda de espécimes da flora	-	1	R ^{ML}	2	P	1	AR	9	-18	MD	P	D	CP
	Alterações populacionais da fauna	-	1	R ^{ML}	2	P	1	AR	9	-18	MD	P	D	CP
	Afugentamento com perturbações da fauna	-	1	R ^{ML}	2	RG	3	MR	4	-24	AT	P	I	CP
	Perda de parcelas de APP	-	1	R ^{ML}	2	P	1	AR	9	-18	MD	P	D	CP

	Alteração na dinâmica de ecossistemas aquáticos	-	-1	I	3	RG	3	MR	4	-36	AT	P	I	CP
	Alteração do metabolismo vegetal – material particulado	-	-1	R	1	RG	3	MR	4	-12	MD	P	I	CP

Tabela 22 - Avaliação dos possíveis impactos ao meio socioeconômico na fase de construção de uma barragem de rejeito.

	Impacto Ambiental	Indicadores de valoração da magnitude								Indicadores completos				
		N		RV		AB		RL		II	MG	D	I	PM
		At	Vr.	At.	Vr.	At.	Vr.	At.	Vr.					
Construção	Geração de emprego e renda	+	+1	R	1	RG	3	AR	9	+27	AT	P	D	CP
	Geração de riscos e incômodos decorrentes da implantação do empreendimento	-	-1	I	3	L	2	BR	1	-6	BX	P	D	CP

- Avaliação de impactos ambientais da fase de operação de uma barragem de rejeitos

Tabela 23 - Avaliação dos possíveis impactos ao meio físico na fase de operação de uma barragem de rejeito.

	Impacto Ambiental	Indicadores de valoração da magnitude								Indicadores completos				
		N		RV		AB		RL		II	MG	D	I	PM
		At	Vr.	At.	Vr.	At.	Vr.	At.	Vr.					
Operação	Alteração da paisagem	-	-1	I	3	L	2	MR	4	-24	AT	P	D	CP
	Assoreamento de cursos de água	-	-1	R ^{ML}	2	RG	3	MR	4	-24	AT	P	D	CP
	Alteração da dinâmica hídrica superficial e subterrânea	-	-1	I	3	RG	3	AR	9	-81	AT	P	D	CP
	Alteração da qualidade da água superficial	-	-1	R ^{ML}	2	RG	3	MR	4	-24	AT	P	D	CP
	Alteração da qualidade do ar	-	-1	I	3	RG	3	BR	1	-9	MD	P	D	CP

Tabela 24 - Avaliação dos possíveis impactos ao meio biológico e ecossistemas naturais na fase de operação de uma barragem de rejeito.

	Impacto Ambiental	Indicadores de valoração da magnitude								Indicadores completos				
		N		RV		AB		RL		II	MG	D	I	PM
		At	Vr.	At.	Vr.	At.	Vr.	At.	Vr.					
Operação	Alteração na dinâmica de ecossistemas aquáticos	-	-1	I	3	RG	3	AR	9	-81	AT	P	I	CP
	Alteração do metabolismo vegetal – material particulado	-	-1	R	1	RG	3	BR	1	-3	BX	P	I	CP

Tabela 25 - Avaliação dos possíveis impactos ao meio socioeconômico na fase de operação de uma barragem de rejeito.

	Impacto Ambiental	Indicadores de valoração da magnitude								Indicadores completos				
		N		RV		AB		RL		II	MG	D	I	PM
		At	Vr.	At.	Vr.	At.	Vr.	At.	Vr.					
Operação	Geração de emprego e renda	+	+1	R	1	RG	3	MR	4	+3	BX	P	D	CP
	Geração de riscos e incômodos decorrentes da operação do empreendimento	-	-1	I	3	RG	3	AR	9	-81	AT	P	D	CP

- Avaliação de impactos ambientais da fase de uma barragem de rejeitos desativada

Tabela 26 - Avaliação dos possíveis impactos ao meio físico de uma barragem de rejeitos desativada

	Impacto Ambiental	Indicadores de valoração da magnitude								Indicadores completos				
		N		RV		AB		RL		II	MG	D	I	PM
		At	Vr.	At.	Vr.	At.	Vr.	At.	Vr.					
Desativação	Alteração da paisagem	-	-1	I	3	L	2	MR	4	-24	AT	P	D	CP
	Alteração da dinâmica hídrica superficial	-	-1	I	3	RG	3	AR	9	-81	AT	P	D	CP
	Alteração da qualidade do ar	-	-1	R ^{ML}	2	RG	3	BR	1	-6	BX	P	D	CP
	Alteração da qualidade da água superficial	-	-1	R ^{ML}	2	RG	3	BR	1	-6	BX	P	D	M ^{LP}

Tabela 27 - Avaliação dos possíveis impactos ao meio biológico e de ecossistemas naturais de uma barragem de rejeitos desativada

	Impacto Ambiental	Indicadores de valoração da magnitude								Indicadores completos				
		N		RV		AB		RL		II	MG	D	I	PM
		At	Vr.	At.	Vr.	At.	Vr.	At.	Vr.					
Desativação	Alteração na dinâmica de ecossistemas aquáticos	-	-1	R ^{ML}	2	RG	3	AR	9	54	AT	P	I	M ^{LP}
	Alteração do metabolismo vegetal – material particulado	-	-1	R ^{ML}	2	RG	3	BR	1	-6	BX	P	I	CP

Tabela 28 - Avaliação dos possíveis impactos ao socioeconômico de uma barragem de rejeitos desativada

	Impacto Ambiental	Indicadores de valoração da magnitude								Indicadores completos				
		N		RV		AB		RL		II	MG	D	I	PM
		At	Vr.	At.	Vr.	At.	Vr.	At.	Vr.					
Desativação	Geração de emprego e renda	+	+1	R	1	RG	3	BR	1	+3	BX	P	D	CP
	Geração de riscos e incômodos decorrentes da presença do empreendimento	-	-1	I	3	RG	3	AR	9	-81	AT	P	D	CP