



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

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DE REJEITO DE MINÉRIO  
DE FERRO PROVENIENTE DO ROMPIMENTO DA BARAGEM DO FUNDÃO  
EM MARIANA - MG**

VINICIUS DE CARVALHO SILVA

BELO HORIZONTE

2016

VINICIUS DE CARVALHO SILVA

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DE REJEITO DE MINÉRIO  
DE FERRO PROVENIENTE DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DO FUNDÃO  
EM MARIANA - MG**

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

Orientador: Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva.

Coorientadora: Profa. Dra. Ângela de Mello Ferreira

BELO HORIZONTE

2016



Serviço Público Federal – Ministério da Educação  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENGENHARIA  
AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**ATA DE DEFESA FINAL  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II**


No dia 02 do mês de Dezembro de 2016, no *campus* I do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, reuniram-se os professores Paulo Renato Perdigão de Paiva, Ângela de Mello Ferreira, Andréa Rodrigues Marques Guimarães e Evandro Carrusca de Oliveira, para participarem da banca de avaliação do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado “Caracterização química e mineralógica de rejeito de minério de ferro proveniente do rompimento da barragem do Fundão em Mariana – MG” de autoria do aluno Vinicius de Carvalho Silva, do curso de Engenharia de Ambiental e Sanitária. Uma vez avaliado, o trabalho foi declarado:

- Aprovado.  
 Reprovado.


Belo Horizonte, 02 de Dezembro de 2016.

Banca Examinadora:

  
Prof. Orientador: Paulo Renato Perdigão de Paiva

  
Profa. Coordenadora: Ângela de Mello Ferreira

  
Profa. Andréa Rodrigues Marques Guimarães

  
Prof. Evandro Carrusca de Oliveira

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, pela força em momentos difíceis e pelas oportunidades que me surgiram.

Aos meus pais, Iara Inês e Hélio Paiva, pelo apoio que me ofereceram durante a execução deste trabalho, além de ter me proporcionado boas condições para que eu pudesse estudar em uma instituição de excelência, como é o CEFET-MG.

Ao meu orientador, Paulo Renato, por ter me aceitado como seu orientando e pela dedicação e paciência ao sanar minhas dúvidas, além de criar uma amizade na realização deste estudo.

A minha coorientadora, Ângela Mello, pela dedicação e confiança na realização deste trabalho.

À professora Andréa Rodrigues, pela confiança depositada em mim na elaboração deste trabalho e pela divulgação de oportunidades que esta pesquisa veio a me proporcionar, além de ter aceitado participar da minha banca examinadora.

Ao professor Evandro Carrusca, por ter aceitado participar da minha banca examinadora.

À minha amiga Fernanda Resende, pela disposição de auxílio na execução dos ensaios laboratoriais e pesquisas científicas.

Aos meus familiares e amigos, que sempre me deram apoio e moral.

Ao CEFET-MG, Pela disponibilidade de laboratórios e infraestrutura adequada.

## RESUMO

A atividade mineradora de ferro no Brasil vem em crescente aumento nos últimos anos e, em consequência desse aumento, o problema de como e onde descartar os rejeitos advindos do processo de beneficiamento. Muitas vezes esses rejeitos são descartados de forma inadequada prejudicando a saúde humana e impactando de forma direta e indireta a fauna e a flora local. Em novembro de 2015, aconteceu um dos maiores desastres ambientais do Brasil, que foi o rompimento da barragem do Fundão, em Mariana - MG. Foram derramados 34 milhões de metros cúbicos de rejeito de minério de ferro no meio natural, causando graves impactos no meio físico, químico, biológico e socioeconômico. Tendo em vista essa problemática, o presente trabalho teve como objetivo a caracterização mineralógica de dez amostras do resíduo proveniente do rompimento da Barragem do Fundão, em um dos locais mais afetados pelo desastre. A caracterização foi feita, principalmente, por difração de raios X, por microscopia eletrônica de varredura e por fluorescência de raios X. Os resultados indicaram que as principais fases presentes nas amostras foram a hematita, goethita, quartzo e caulinita, além de mostrar a diferença na microestrutura e na granulometria das partículas entre as amostras mais próximas e as mais distantes do rio.

**Palavras Chave:** Caracterização, Barragem do Fundão, Minério de ferro, Rejeito.

## ABSTRACT

The iron mining in Brazil is growing in the last years and consequently arise the problem of how and where discard the wastes from iron mining. Many times, these wastes are discarded improperly harming the human healthy and causing direct and indirect impacts in animals and vegetals.. In November of 2015 happened one of the biggest environmental disasters in Brazil, it was the disruption of Barragem do Fundão, located in Mariana-MG. Were spilled 34 millions of cubic meters of iron mining waste in environment, causing physical, chemical, biological and socioeconomic impacts. In view of this problem, this study aims the mineralogical characterization of ten samples of waste from the disruption of Barragem do Fundão, in a local very affected for this disaster. The characterization was made mainly for X-ray diffraction, X-ray fluorescence and scanning electron microscopy. The results showed that the main phases presents on samples were quartz, hematite, goethite and kaolinite, besides it showed the difference between the particle size and microstructure of the samples located near of the river and those located far from the river.

**Key words:** Characterization, Barragem do Fundão, Iron mining, Waste

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Minas em atividade no Brasil.....	12
Figura 2: Evolução da Produção Mineral Brasileira (PMB) .....	13
Figura 3: Divisão da produção nacional de minério de ferro.....	18
Figura 4: Maiores mineradoras produtoras de minério de ferro do Brasil.....	18
Figura 5: Gráfico de exportações brasileiras de minério de ferro (Ano x peso em t).....	19
Figura 6: Gráfico de exportações brasileiras de minério de ferro (Ano x preço médio em FOB).....	20
Figura 7: Principais importadores do minério de ferro brasileiro. ....	20
Figura 8- Contribuição percentual média de cada substância na geração de rejeitos na atividade mineradora no ano de 2005 .....	21
Figura 9: Método construtivo de montante.....	26
Figura 10: Método construtivo de jusante.....	26
Figura 11: Método construtivo de linha de centro.....	27
Figura 12 - Esquema ilustrativo de um cicloclassificador (Cyclosizer).....	32
Figura 13: Esquema de um Cilas.....	34
Figura 14 - Esquema de estrutura de um MEV.....	36
Figura 15 - Ilustração da técnica de DRX .....	37
Figura 16 - Difratoograma de uma amostra de esmectita.....	38
Figura 17: Pontos de coleta das amostras.....	39
Figura 18: Difratoograma do Ponto 0.....	45
Figura 19: Difratoograma do Ponto 5.....	45
Figura 20: Difratoograma do Ponto 10.....	46
Figura 21: Difratoograma do Ponto 15.....	46
Figura 22: Difratoograma do Ponto 20.....	47
Figura 23: Difratoograma do Ponto 25.....	47
Figura 24 Difratoograma do Ponto 30.....	48
Figura 25: Difratoograma do Ponto 35.....	48
Figura 26: Difratoograma do Ponto 40.....	49
Figura 27: Imagem obtida no MEV para os pontos 0, 5, 10 e 15, respectivamente, com aumento de 100x.....	51

Figura 28: Imagem obtida no MEV para os pontos 20, 25, 30, 35 e 40, respectivamente, com aumento de 100x.....	<b>52</b>
Figura 29: Imagem do corpo de prova contendo 50% de rejeito + 50% de argila.....	<b>53</b>



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1- Produção beneficiada de alguns minerais no ano de 2014.....	<b>21</b>
Tabela 2- Projeção da produção de rejeito de minério de ferro até 2030.....	<b>22</b>
Tabela 3- Escalas granulométricas. ....	<b>31</b>
Tabela 4 – Resultados da análise granulométrica à laser.....	<b>42</b>
Tabela 5 – Resultado da Fluorescência de Raios X. ....	<b>44</b>

## Sumário

<b>1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>16</b>
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 Mineração de Ferro e os Impactos Ambientais Relacionados aos Rejeitos Provenientes do seu beneficiamento .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2 Reaproveitamento de Rejeitos de Minério de Ferro .....</b>	<b>22</b>
<b>3.3 Barragens .....</b>	<b>24</b>
3.3.1 Métodos utilizados na construção de barragens .....	25
3.3.2 Barragem do Fundão .....	27
<b>3.4 Caracterização Mineralógica.....</b>	<b>28</b>
<b>3.5 Amostragem .....</b>	<b>29</b>
<b>3.6 Análise granulométrica .....</b>	<b>30</b>
3.6.1 Peneiramento .....	30
3.6.2 Cyclosizer .....	32
3.6.3 Granulômetro à laser .....	33
<b>3.7 Métodos de Caracterização.....</b>	<b>34</b>
3.7.1 Fluorescência de raios X (FRX) .....	34
3.7.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	35
3.7.3 Difração de raios X (DRX).....	36
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>39</b>
<b>4.1 Amostragem .....</b>	<b>39</b>
<b>4.2 Análise granulométrica .....</b>	<b>39</b>

<b>4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</b> .....	<b>40</b>
<b>4.4 Fluorescência de Raios X (FRX)</b> .....	<b>40</b>
<b>4.5 Difração de Raios X</b> .....	<b>40</b>
<b>4.6 Confeção dos Corpos de Prova</b> .....	<b>40</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>42</b>
<b>5.1 Análises Granulométricas</b> .....	<b>42</b>
<b>5.2 Fluorescência de Raios X (FRX)</b> .....	<b>43</b>
<b>5.3 Difração de Raios X (DRX)</b> .....	<b>44</b>
<b>5.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</b> .....	<b>50</b>
<b>5.5 Confeção dos Corpos de Prova e Ensaio de Compressão</b> .....	<b>53</b>
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	<b>55</b>
<b>7 REFERÊNCIAS</b> .....	<b>56</b>
<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>61</b>

## 1 – INTRODUÇÃO

A atividade de mineração no Brasil vem crescendo ao longo dos últimos anos e, com esse crescimento, aumenta a preocupação ambiental, uma vez que esta atividade é muito danosa ao meio ambiente, podendo causar prejuízos à saúde humana e danos irreversíveis à fauna e flora local (PEREIRA, 2005).

Os recursos minerais no Brasil são expressivos e abrangem uma produção de 72 substâncias minerais, das quais 23 são metálicas, 45 não metálicas e 4 energéticas. O complexo mineral está dividido em 1.820 lavras garimpeiras, 830 complexos minerais e 13.250 licenciamentos, dados de 2015, como mostrado na Figura 1 (IBRAM, 2015).



Figura 1: Minas em atividade no Brasil. Fonte: (IBRAM, 2015)

A Produção Mineral Brasileira vem sofrendo uma queda no valor arrecadado nos últimos anos, isto ocorre provavelmente devido à crise econômica dos últimos anos por que o país atravessa. Pode-se observar na Figura 2, que em 2014 foram gerados lucros de US\$ 40 bilhões enquanto que em 2015 foi estimada uma geração de lucro de US\$ 38 bilhões. (IBRAM, 2015).

Apesar de gerar lucros, a atividade mineradora traz consequências graves ao meio ambiente, pois produz muitos resíduos devido à extração de um grande volume de material rochoso, que causa impacto para o meio físico e biótico e, conseqüentemente, altera o equilíbrio ambiental, uma vez que a disposição final dos mesmos, na maior parte das vezes, é inadequada (FARIAS, 2002). Esses impactos causados pela mineração são agravados, principalmente devido à proximidade entre as áreas mineradas e as áreas urbanas (DIAS,

2001). Dentre os impactos gerados pela extração de minério, destaca-se a geração de rejeitos originários dos processos de beneficiamento (PEREIRA, 2005).

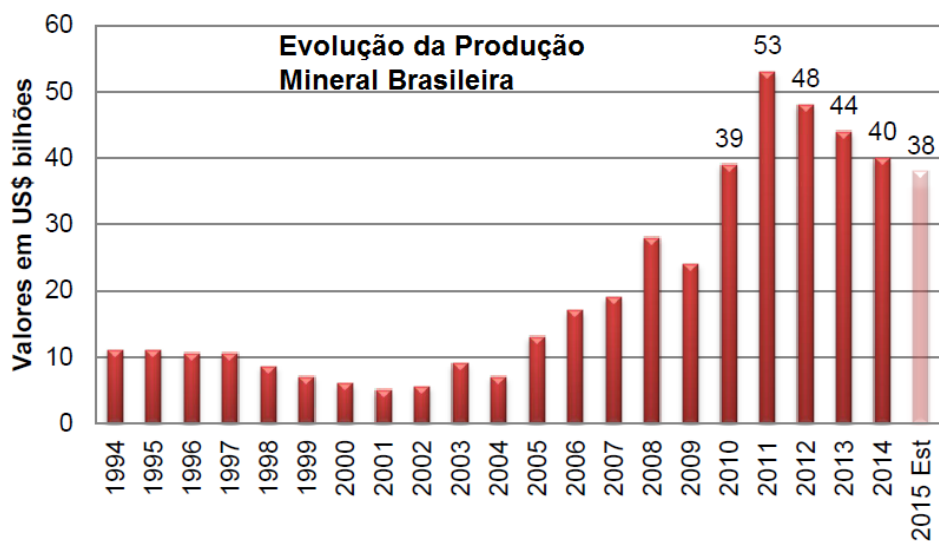


Figura 2: Evolução da Produção Mineral Brasileira (PMB). Fonte: (IBRAM, 2015)

Dentre esses impactos provenientes da geração de rejeitos há o aumento de casos de doenças respiratórias em cidades vizinhas às áreas mineradas, poluição dos rios e solos de regiões próximas às minas, desmatamento de áreas para disposição dos rejeitos e alteração do ecossistema da região (IBRAM, 2015).

Todo projeto de atividade mineradora deve conter medidas a fim de mitigar e monitorar a poluição atmosférica, dos solos e dos cursos d'água e de recuperação de áreas degradadas, e no caso específico do minério de ferro medidas como a reciclagem do aço e a otimização dos processos produtivos visando um consumo menor de minérios virgens (CHAVES, 2009).

A região do Quadrilátero Ferrífero, localizada no centro de Minas Gerais, abrange 22% da população do estado em 34 cidades. Por ano, são extraídos nela quase 300 milhões de toneladas de minério de ferro e, portanto é uma região de grande concentração de rejeitos advindos dos processos de beneficiamento (IBRAM, 2015).

Os rejeitos oriundos da extração de minério de ferro, geralmente, são descartados em barragens ou em pilhas dentro ou ao redor das mineradoras, podendo ocasionar uma série de agressões à fauna e flora local (MENEZES *et al.*, 2002). Como exemplo pode-se

citar o rompimento da barragem do Fundão em Mariana-MG, que era uma barragem de rejeitos de minério de ferro, este desastre tomou proporções enormes na mídia nacional e mundial. O grande volume de rejeitos que se despreendeu da barragem (cerca de 34 milhões de m<sup>3</sup>) atingiu o Rio Doce chegando até ao litoral do Espírito Santo, causando danos irreparáveis ao meio ambiente. Pode-se citar como danos, o assoreamento dos rios da bacia do Rio Doce, contaminação das águas superficiais, mortandade de peixes, perda de habitats, alterações paisagísticas, dentre outros. Além de impactos ao meio natural, este desastre também promoveu impactos socioeconômicos como perda de vidas humanas, perdas materiais e queda na economia da região (IBAMA, 2015).

A complexidade física e química dos rejeitos tem exigido cada vez mais estudos de caracterização. Além disso, a caracterização química e mineralógica do rejeito é fundamental para identificar seus componentes e assim estudar uma solução adequada para sua reutilização. Por exemplo, a caracterização de um rejeito de minério determina e quantifica as fases presentes e conseqüentemente definem quais são os minerais contidos nos mesmos com interesse econômico (NEUMANN *et al.*, 2004).

A maneira de se caracterizar uma amostra, seja ela sintética ou natural, é variável. A caracterização depende de vários fatores como, por exemplo, os objetivos, abrangência da caracterização, disponibilidade de tempo, capacidade analítica e recursos financeiros. As técnicas de caracterização de materiais são inúmeras e elas variam desde as mais avançadas, com o uso de microscópios eletrônicos e tomógrafos computadorizados, até uma simples análise granulométrica em peneiras ou análise química por via úmida (HACHA, 2010).

Uma caracterização abrange a determinação da estrutura cristalina, composição química, quantidade, tamanho, forma e distribuição das fases, determinação da natureza e distribuição dos defeitos cristalinos. Além disso, a orientação preferencial das fases e a diferença de orientação entre elas também têm relação com o comportamento dos materiais. As espécies presentes apresentam características distintas e exigem pelo menos dois métodos para a sua caracterização. Estes métodos permitem a identificação de elementos e fases presentes no material, permite avaliar a distribuição granulométrica e também avaliar a microestrutura das partículas do material. (PADILHA, 2004).

A partir de toda essa problemática sobre disposição dos rejeitos gerados na produção de minério de ferro, este estudo objetiva, com a caracterização, avaliar uma forma adequada para sua reutilização ou descarte e com isto diminuir o impacto ambiental causado pela disposição inadequada. A caracterização química e mineralógica dos materiais coletados será realizada a partir da difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a fluorescência de raios X (FRX).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral é realizar a caracterização química e mineralógica de amostras de resíduo de minério de ferro proveniente do rompimento da barragem do Fundão (Mariana, MG).

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Coletar as amostras na margem do Rio do Carmo.
- Caracterizar as amostras coletadas em relação à composição química e comparar a composição das diferentes amostras coletadas;
- Determinar as fases minerais presentes, utilizando a Difração de raios X
- Realizar a construção de corpos de prova com o resíduo coletado e argila a fim de exemplificar uma possível aplicação deste material.



### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1 Mineração de Ferro e os Impactos Ambientais Relacionados aos Rejeitos Provenientes do seu beneficiamento**

A produção de minério de ferro do Brasil foi a terceira maior do mundo no ano de 2014 produzindo cerca de 411 milhões de toneladas, sendo o estado de Minas Gerais, no qual a região do Quadrilátero Ferrífero está inserida, o principal estado produtor (JESUS, 2015). E as projeções indicam que a tendência é que a produção aumente em alguns anos, conseqüentemente, a geração de rejeitos de minério de ferro também tende a aumentar, exigindo o desenvolvimento de estudos sobre o reaproveitamento deste material (CAMPANHA, 2011).

Segundo Jesus (2015) as reservas lavráveis do Brasil, com teor médio de 55,5% de ferro, representam 12,8% das reservas de todo o mundo, o que mostra o destaque do país no setor e a importância desta atividade na economia brasileira.

Em 2014 a produção brasileira foi de 411,8 milhões de toneladas, com um teor médio de 63,5%, o que representou um aumento na produção de 6,4% em comparação ao ano anterior. O valor da produção chegou a 54,7 bilhões de reais. O principal produtor foi o estado de Minas Gerais cuja participação representou 68,4% da produção nacional.

Devido a grande concentração de jazidas de minério de ferro no estado de Minas Gerais, as maiores e mais importantes empresas do ramo de mineração estão instaladas nas terras mineiras, como exemplo a Vale S/A, a Samarco Mineração S/A, a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), a Nacional de Minérios S/A (NAMISA) e a Mineração Usiminas (JESUS, 2015).

A Figura 3 mostra a divisão de acordo com às empresas citadas e a Figura 4 mostra as maiores mineradoras produtoras de minério de ferro do Brasil (IBRAM, 2015).

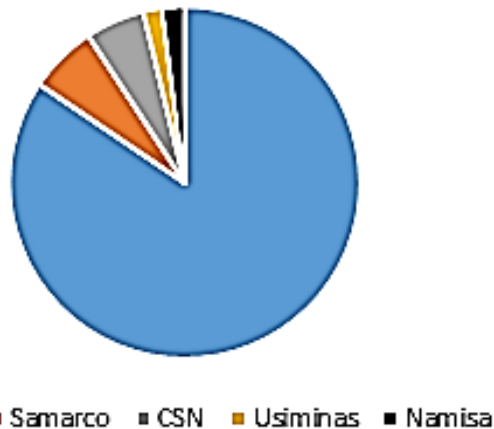


Figura 3: Divisão da produção nacional de minério de ferro. Fonte: (IBRAM, 2015)

Ranking	Empresa / Ano	2011	2012	2015	2016
1	Vale	311.800	360.000	425.000	425.000
2	CSN	20.100	30.000	89.000	89.000
3	Samarco	23.223	24.000	30.500	30.500
4	Ferrous Resources	-	3.000	23.000	40.000
5	Outros	-	-	15.000	20.000
6	MMX	7.500	13.000	42.500	42.500
7	Usiminas	6.300	12.000	29.000	29.000
8	Namisa	-	8.000	-	-
9	Anglo American	-	5.500	35.000	35.000
10	Mineração Corumbaense	-	5.000	10.000	10.000
11	V&M	-	5.000	5.000	5.000
12	Arcelor Mittal	-	4.300	15.000	15.000
13	Mhag	-	1.000	12.000	12.000
14	Bahia Mineração	-	-	20.000	20.000
15	Bemisa	-	-	2.000	5.000
16	Manabi	-	-	-	31.000
<b>TOTAL</b>		<b>368.923</b>	<b>470.800</b>	<b>751.000</b>	<b>809.000</b>

Figura 4: Maiores mineradoras produtoras de minério de ferro do Brasil. Fonte: (IBRAM, 2015)

O alto teor de ferro encontrado nos minérios brasileiros (cerca de 50 à 65%) leva o país à posição de destaque no cenário mundial. Devido a este fator, o mercado externo cada vez mais tende a ser dependente das exportações brasileiras (IBRAM, 2015). A receita bruta advinda das exportações brasileiras de minério de ferro foi de US\$ 25,8 bilhões no

ano de 2014, sendo superior ao alcançado no ano anterior (JESUS, 2015). As Figuras 5, 6 e 7 mostram a evolução das exportações brasileiras ao longo dos últimos anos e os principais países importadores do minério brasileiro.

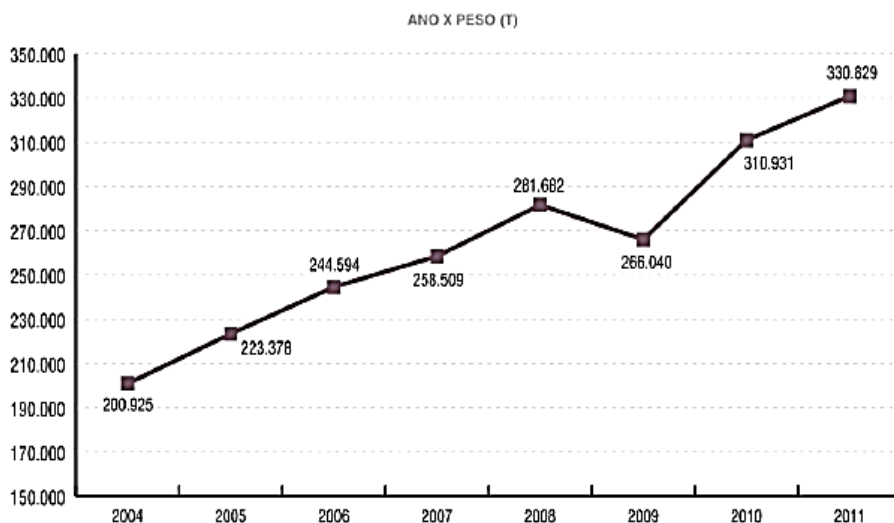


Figura 5: Gráfico de exportações brasileiras de minério de ferro (Ano x peso em t). Fonte: (IBRAM, 2015)

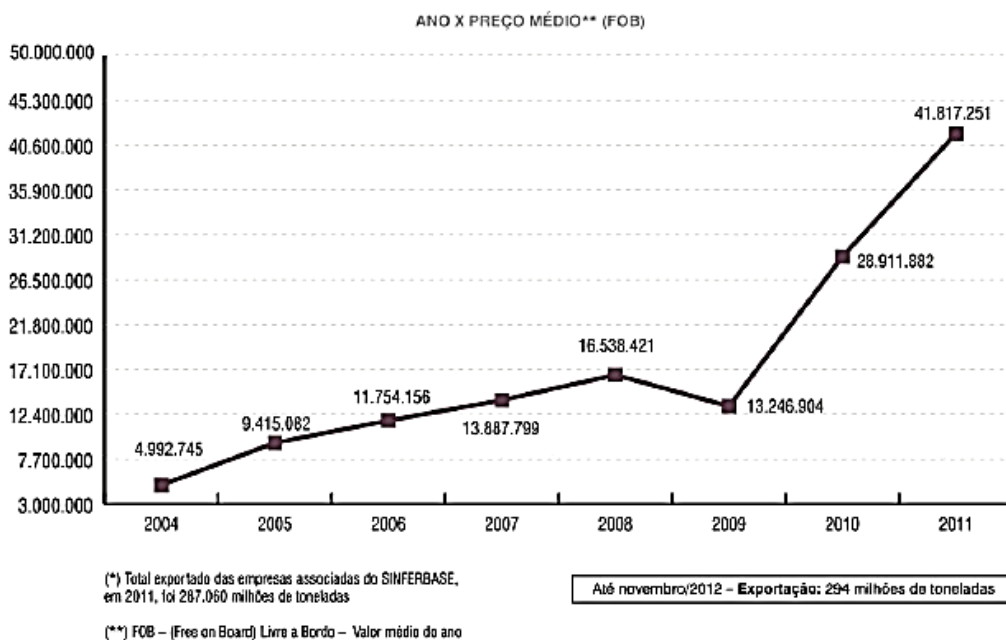


Figura 6: Gráfico de exportações brasileiras de minério de ferro (Ano x preço médio em FOB). Fonte: (IBRAM, 2015)

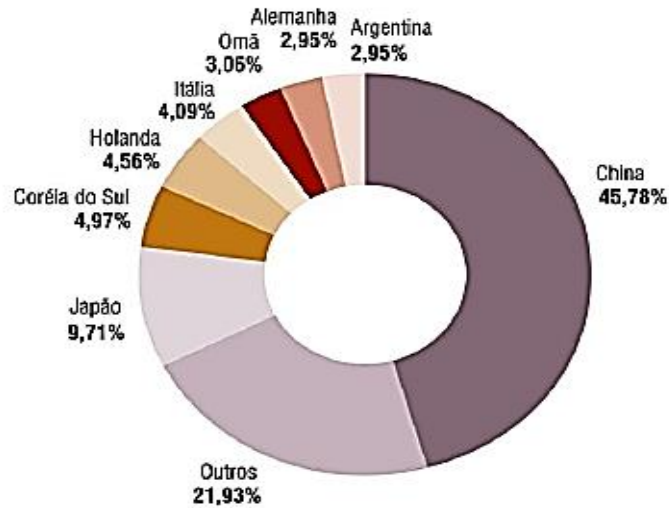


Figura 7: Principais importadores do minério de ferro brasileiro. Fonte: (IBRAM, 2015).

A extração de minério gera elevados volumes de rejeitos, sendo que sua disposição em locais e de forma inadequada pode representar grandes riscos ao meio ambiente. A remediação de áreas degradadas ou contaminadas pela disposição inadequada de rejeitos pode representar um item de passivo ambiental de uma empresa mineradora, que tem a responsabilidade de zelar pela estabilidade e segurança a longo prazo das estruturas de contenção de rejeitos (CHAVES, 2009).

Silva *et al.* (2011) realizou um levantamento estatístico (Figura 8 e Tabelas 1 e 2) sobre as produções beneficiadas dos principais minérios e a projeção da produção de rejeitos de minério de ferro até 2030. Pode-se observar, na Figura 8 e na Tabela 2, que o rejeito de minério de ferro representa cerca de 30% de todos os rejeitos produzidos na atividade mineradora. Esse levantamento realizado por Silva *et al.*, (2011) transparece a importância do estudo de caracterização deste material, visto que seu descarte inadequado traz inúmeras consequências negativas para o meio ambiente.

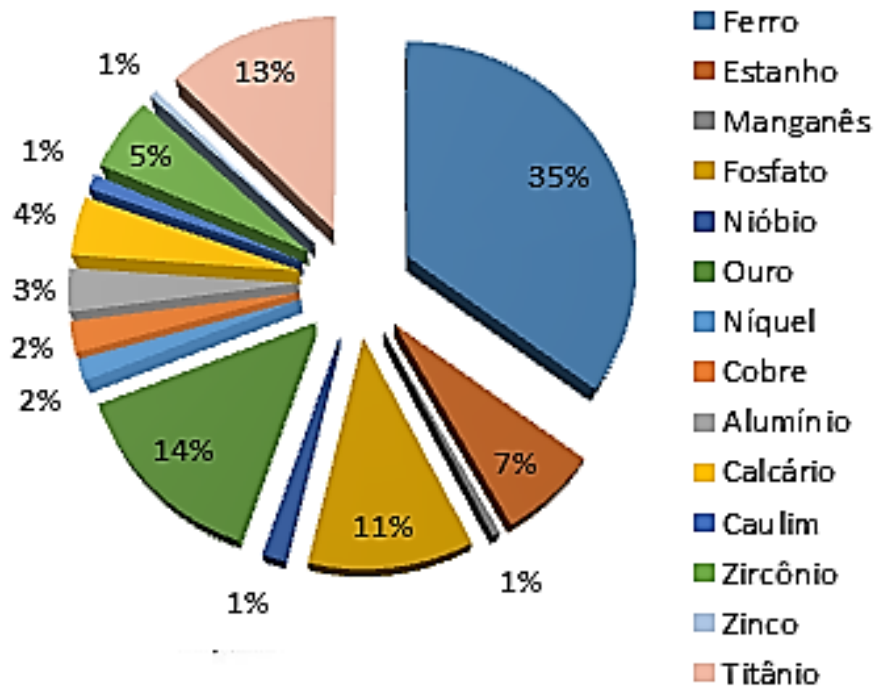


Figura 8- Contribuição percentual média de cada substância na geração de rejeitos na atividade mineradora no ano de 2005. Fonte: (SILVA, *et al*, 2011)

Tabela 1- Produção beneficiada de alguns minerais no ano de 2014.

Substância (t)	Prod. Beneficiada (em milhões de ton.)
Ferro	411,1
Calcário	0,34
Titânio	0,08
Fósforo/Rocha fosfática	6,5
Alumínio/Bauxita	35,4
Ouro	0,08
Estanho	0,02

Fonte: (JESUS, 2015).

Tabela 2- Projeção da produção de rejeito de minério de ferro até 2030.

Ano	Produção de rejeito de minério de ferro (mil ton.)
2016	224,9
2017	229,3
2018	231,5
2019	235,2
2020	237,4
2021	241,9
2022	244,4
2023	246,6
2024	248,9
2025	251,9
2026	254,4
2027	257
2028	260
2029	262,9
2030	265,5
Total	4721,2

Fonte: (SILVA, *et al.*, 2011).

### 3.2 Reaproveitamento de Rejeitos de Minério de Ferro

Os rejeitos de mineração caracterizam-se por serem materiais friáveis, ou seja, materiais que quando adicionados às massas cerâmicas ocasionam a diminuição de sua plasticidade até um valor ótimo para as mesmas e apresenta constituição química e granulométrica que variam em função da origem do material. A porcentagem dos rejeitos incorporados às matrizes cerâmicas pode variar entre 10 e 60% causando ligeiras mudanças nas propriedades mecânicas, retração e absorção de água (MENEZES, *et al.*, 2002). Embora os rejeitos sejam definidos como redutores de plasticidade, não necessariamente atuam apenas reduzindo a plasticidade das massas cerâmicas podendo atuar também como

agentes formadores de fase vítrea. Em muitos casos este é um fator de grande relevância no sucesso do uso desses rejeitos na produção de tijolos, revestimentos, grés e produtos de baixa absorção de água (produtos com grande valor agregado) evidenciando-se que a fase vítrea formada pode atuar na função de preencher os espaços vazios do material, ou como matriz vítrea ligante de grãos cristalinos (MENEZES, *et al.*, 2002).

Chaves (2009) elaborou um estudo sobre a análise da incorporação de rejeitos de minério de ferro proveniente do município de Jucurutu, no estado do Rio Grande do Norte, em argilas com a intenção de avaliar as modificações provocadas nas propriedades físicas e mecânicas das argilas após esta assimilação. Avaliou-se também a porcentagem de rejeitos de minério de ferro que otimiza ou mantém as características e propriedades tecnológicas da argila. Variando as proporções de rejeitos de minério de ferro e de argila, verificou-se que a proporção de rejeito que otimizou as propriedades físicas e mecânicas da argila foi a de 5%, evidenciando assim um bom emprego para esse material que representa um enorme problema para as mineradoras na atualidade.

Campanha (2011) em sua dissertação realizou a caracterização de rejeitos de minério de ferro com o objetivo de verificar a aplicabilidade de seu uso em pavimentação. Nesse estudo foram caracterizados dois tipos de rejeitos: um proveniente do processo de flotação e o outro do processo de separação magnética, conhecida também como jigagem. Foi executada uma série de ensaios como o granulométrico, o de compactação, o de compressão, a difração de raios X, dentre outros. Seus resultados expressaram que a composição granulométrica de ambos os tipos de rejeitos são compatíveis para seu emprego como materiais para sub-base ou base em solos de cimento. Além disso, concluiu-se que os rejeitos de minério de ferro apresentaram enorme potencial para utilização em asfaltos e pavimentos, principalmente quando é adicionado a eles o cimento.

Nociti (2011) avaliou a viabilidade da adição de uma quantidade de rejeito de minério de ferro na massa cerâmica, mantendo suas propriedades e minimizando um problema ambiental. Foram estudados dois tipos de rejeito de minério de ferro, um de granulometria maior (arenoso) e outro de granulometria menor (argiloso). A caracterização foi realizada utilizando técnicas como a fluorescência de raios X, difração de raios X, análise granulométrica e algumas análises térmicas. Para determinar o teor de rejeito incorporado à massa cerâmica fez-se necessário os ensaios de liquidez e de plasticidade, e

observou-se que os teores de rejeito que apresentaram resultados mais próximos aos de uma massa cerâmica convencional foi de 7,5% de rejeito arenoso e 5% de rejeito de lama. Após análise dos resultados de todos os ensaios, a autora pôde concluir que a adição de rejeitos nas quantidades adequadas permite a fabricação de blocos cerâmicos para vedação, ou seja, sem função estrutural.

### **3.3 Barragens**

Um dos problemas a serem resolvidos na atividade mineradora atualmente é como dispor adequadamente os materiais que não serão mais aproveitados nelas, no caso, os rejeitos de minério de ferro.

Segundo Lozano (2006) existem várias formas de disposição de rejeitos, entre elas estão: a disposição a céu aberto, a de forma subterrânea ou a subaquática. As disposições subaquáticas são pouco utilizadas devido ao grande dano ambiental que elas podem provocar aos ecossistemas, que possuem pouca resiliência, ou seja, são pouco resistentes. As subterrâneas são realizadas câmaras que restam após a extração do minério, os rejeitos são bombeados e depositados, preenchendo essas câmaras. O método de disposição mais utilizado é a céu aberto, que pode ser feito em pilhas controladas ou em estruturas de contenção localizadas em bacias ou em vales. Estas estruturas são as barragens (MOTTA, 2008).

O comportamento geotécnico das barragens de rejeito é distinto em relação ao comportamento das barragens de terra, o que leva a uma diferença nos métodos de disposição de cada uma. Este fato se deve à grande variabilidade no controle do processo de descarga dos rejeitos, bem como a diferença das características granulométricas, mineralógicas e estruturais das regiões (MOTTA, 2008).

Segundo Assis (1995), barragens de rejeitos são estruturas de contenção que possuem a função de reter principalmente lamas e líquidos e devem compor uma estrutura estável e segura, juntamente com sua fundação. O rejeito deve ser contido em sua totalidade em seu reservatório e o controle da água percolada deve ser bem executado, a fim de garantir a segurança, a economia e a não ultrapassagem da capacidade limite do reservatório.



A estrutura de barragens é constituída inicialmente por um dique de partida, o qual deve ter uma vida útil de retenção de rejeitos de dois a três anos. Os alteamentos podem ser construídos com estéreis por deposição hidráulica de rejeitos ou por ciclonagem dos mesmos. Esta ciclonagem é realizada por um ciclone, que separa, por granulometria, as partículas finas e menos densas das partículas grossas e mais densas (VICK, 1983). Os alteamentos podem ter configurações diferentes, mas os principais métodos de alteamento são o método de montante, o método de jusante e o método de linha de centro (ABRAÃO, 1987).

Victorino (2007), em seu estudo diz que as barragens de rejeito podem ser construídas com terra ou até com o próprio rejeito proveniente do beneficiamento. Esse método construtivo é atraente e viável, pois os custos envolvidos são bem distribuídos ao longo do tempo e flexibiliza a operação mineradora.

Segundo Passos (2009), a análise de risco dos critérios econômicos e da segurança das barragens deve ser feita com muito cuidado e transparência pela mineradora. A segurança deve ser obrigatoriamente um critério prioritário quando da construção de uma barragem. É ilógico priorizar a redução de custos em detrimento da segurança das barragens, pois, caso ocorra um acidente o prejuízo econômico seria muito maior. A ruptura de barragens de rejeito pode causar uma série de impactos negativos à população ao redor, ao meio ambiente e à economia da região. A intensidade de um desastre varia de acordo com a interação entre a magnitude do evento e o grau de vulnerabilidade do ecossistema afetado. Por exemplo, o desastre do rompimento da Barragem do Fundão foi de grande intensidade, pois ele teve uma alta magnitude em um ambiente relativamente vulnerável.

### **3.3.1 Métodos utilizados na construção de barragens**

#### *3.3.1.1 Método de montante*

É o método mais tradicional e utilizado, aproveita o próprio rejeito depositado como parte da estrutura. A estrutura é iniciada a partir de um dique piloto e logo em seguida o rejeito é lançado à montante da crista, ao longo do seu perímetro, formando uma praia. Devido a esse fator, há a sedimentação das partículas mais grossas do rejeito se armazenando nas zonas mais próximas do dique, enquanto as partículas mais finas são

transportadas para as zonas internas da praia (ABRAÃO, 1985). A Figura 9 mostra este esquema.

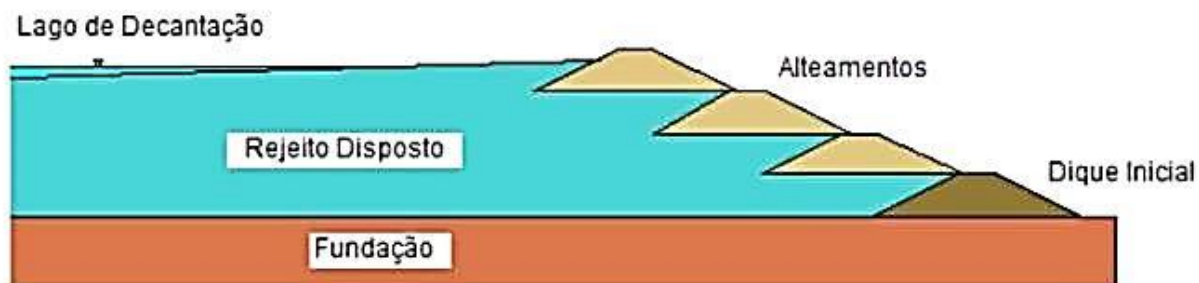


Figura 9: Método construtivo de montante. Fonte: (PASSOS, 2009)

### 3.3.1.2 Método de jusante

Este método consiste no alteamento a partir do dique inicial. O eixo da crista vai se movendo a jusante da crista conforme a construção de novos diques. Sua construção pode ser realizada com material de empréstimo ou com a parte mais grossa do próprio rejeito. O material é lançado no talude de jusante e devidamente compactado. A Figura 10 representa esse método (ABRAÃO, 1985).

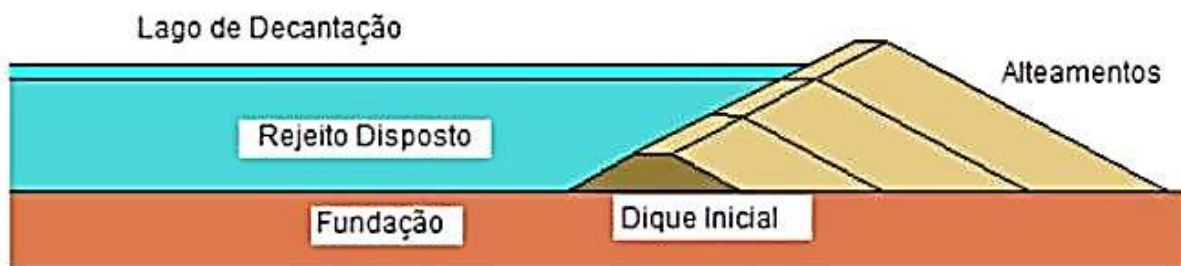


Figura 10: Método construtivo de jusante. Fonte: (PASSOS, 2009)

### 3.3.1.3 Método de linha de centro

O comportamento estrutural deste método se assemelha com o de jusante. Um dique inicial é construído e o rejeito é lançado periféricamente da crista do dique, formando uma praia. Os alteamentos subsequentes são construídos lançando aterro sobre a praia de rejeitos e no talude de rejeitos. O material construtivo pode ser de decape da mina ou estéril.

A Figura 11 mostra o esquema simplificado deste método (ABRAÃO, 1985).



Figura 11: Método construtivo de linha de centro. Fonte: (PASSOS, 2009)

### 3.3.2 Barragem do Fundão

No dia 05/11/2015 ocorreu o rompimento da barragem de Fundão, pertencente ao complexo minerário de Germano, no município de Mariana/MG. A barragem retinha em sua totalidade 50 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos de minério de ferro. Dos 50 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos de minério de ferro contidos na Barragem do Fundão, 34 milhões foram lançados ao meio ambiente e 16 milhões foram carreados em direção ao litoral do estado do Espírito Santo, ao longo do Rio Doce (IBAMA, 2015).

Inicialmente, o rejeito atingiu a Barragem de Santarém, provocando seu galgamento e obrigando a passagem de uma onda de lama por cerca de 55 km ao longo do rio Gualaxo do Norte, até desaguar no rio do Carmo. Após a onda de lama percorrer 22 km no rio do Carmo, ela encontrou o Rio Doce, onde o percorreu em sua totalidade até sua foz, no Oceano Atlântico. Resumindo, a lama percorreu 663,2 km nos corpos hídricos até o oceano.

Segundo o IBAMA (2015), o desastre é o resultado de eventos adversos, naturais ou antrópicos, sobre um ecossistema, provocando danos humanos, materiais e ambientais além de consequentes prejuízos econômicos e sociais.

De acordo com a Defesa Civil os desastres são classificados segundo sua intensidade, evolução e origem. O ocorrido em Mariana/MG foi classificado como de nível IV, que significa Desastre de muito grande porte, este é considerado o nível máximo. Os desastres deste nível se caracterizam pela grande importância e magnitude dos danos provocados e do alto prejuízo, tanto econômico como ambiental (IBAMA, 2015).

Quanto à evolução, o rompimento da barragem de Fundão classifica-se como súbito, ou seja, caracteriza-se pela subitaneidade, pela velocidade com que o processo evolui e pela violência dos eventos adversos causadores dos mesmos (IBAMA, 2015).

De acordo com o IBAMA (2015) foram comprovados os seguintes fatos:

- Mortes de trabalhadores da empresa e moradores das comunidades afetadas;
- Desalojamento de populações;
- Devastação de localidades e a consequente desagregação dos vínculos sociais das comunidades;
- Destruição de estruturas públicas e privadas (edificações, pontes, ruas etc.);
- Destruição de áreas agrícolas e pastos, com perdas de receitas econômicas;
- Interrupção da geração de energia elétrica pelas hidrelétricas atingidas (Candongia, Aimorés e Mascarenhas);
- Destruição de áreas de preservação permanente e vegetação nativa de mata atlântica;
- Mortandade de biodiversidade aquática e fauna terrestre;
- Assoreamento de cursos d'água;
- Interrupção do abastecimento de água;
- Interrupção da pesca por tempo indeterminado;
- Perda de fragmentação de habitats;
- Restrição ou enfraquecimento dos serviços ambientais dos ecossistemas;
- Alteração dos padrões de qualidade da água doce, salobra e salgada;
- Sensação de perigo e desamparo na população.

### **3.4 Caracterização Mineralógica**

A caracterização de minérios é uma etapa essencial para o aproveitamento de um recurso mineral de forma otimizada, pois ela fornece as características mineralógicas e texturais necessárias para sua utilização. A caracterização mineralógica de um minério tem como objetivos a determinação e quantificação de todas as fases presentes, definição e separação dos materiais de interesse e os de ganga e a consequente quantificação dos elementos úteis dos mesmos. (NEUMANN, *et al.*, 2004).

Silva (2006) realizou um estudo sobre a caracterização física, química e mineralógica de um rejeito de mineração advindo de uma mina localizada na região do

Quadrilátero Ferrífero no município de Mariana (MG) a fim de verificar o potencial de revegetação desse material. Foi executada uma análise granulométrica dividindo e separando o material em três frações: areia, argila e silte, onde o resultado obtido foi que a quantidade de areia foi superior a 50% do valor total, o que reduz a capacidade do material de reter água, pois há um grande espaço entre os poros da areia. Outro ensaio realizado foi à difração de raios X que indicou a pequena presença de caulinita nas frações silte e areia e sua ausência na fração argila. Além de verificar a presença de hematita e quartzo em todas as frações.

Wolff (2009), em sua dissertação, coletou nove amostras de rejeitos de minério de ferro de sete minas diferentes com o objetivo de caracterizá-las. Primeiramente foi realizada a análise granulométrica das amostras utilizando peneiramento a úmido. As amostras foram separadas de acordo com sua granulometria ( $<10\ \mu\text{m}$ , entre  $10$  e  $15\ \mu\text{m}$  e  $>15\ \mu\text{m}$ ). Foram realizadas difração de raios X e a microscopia eletrônica de varredura (MEV) acoplada com o Espectrômetro Dispersivo em Energia (EDS) para cada faixa granulométrica. A difração de raios X indicou, além das presenças dos óxidos de ferro (hematita, goethita e magnetita), a presença de caulinita, quartzo, gibbsita, talco e muscovita. Wolff (2009) concluiu que a granulometria das frações e as intensidades dos picos de quartzo são diretamente proporcionais, mas são inversamente proporcionais às intensidades dos picos de goethita e caulinita.

### **3.5 Amostragem**

A caracterização se inicia com o processo de amostragem. O processo de amostragem consiste na retirada de certas quantidades de material de uma amostra global, a fim de representá-la corretamente. Portanto, amostragem é um processo de seleção e inferência por que a partir do conhecimento de uma parte se planeja tirar conclusões precisas de um todo. Essa amostra global foi submetida às etapas de cominuição, homogeneização e quarteamento até a formação de uma amostra final com massa e granulometria adequadas para os ensaios de caracterização (GOES, *et al.*, 2010).

Existem vários tipos de amostragens, as mais usuais e importantes são as aleatórias e as sistemáticas. A amostragem aleatória é utilizada quando a informação sobre o material a ser amostrado é insuficiente ou inexistente, nela os incrementos são escolhidas de maneira

aleatória fazendo com que todas as partes do material sejam englobadas. Na amostragem sistemática, os incrementos são coletados em intervalos definidos, por exemplo, de 5 em 5 metros é coletada uma porção do material. É um tipo de amostragem mais confiável quando já se tem uma informação prévia sobre o material (GOES, *et al*, 2010).

### **3.6 Análise granulométrica**

Um pré-requisito importante para a maioria dos processos de produção em geral, é o conhecimento e o entendimento do diâmetro médio das partículas de um sistema granulométrico. O diâmetro médio das partículas é de suma importância na produção de um material, pois ela interfere significativamente na resistência mecânica, na densidade e nas propriedades termoelétricas. Quando o tamanho e a distribuição das partículas não estão adequadamente controlados podem ocorrer perdas de produção significativas. (MEND, 2009).

Existem vários métodos e equipamentos utilizados para realizar análise granulométrica, cada método mais eficiente para um tipo de material ou um diâmetro médio específico. Dentre eles podem-se citar o peneiramento, o cyclosizer e o granulômetro à laser..

#### **3.6.1 Peneiramento**

Peneiramento nada mais é do que a separação de um material em duas ou mais classes. É um método de análise granulométrica, onde se utiliza uma série de peneiras em um peneirador mecânico por certa quantidade de tempo, geralmente entre 10 e 15 minutos. O peneiramento é mais eficiente em partículas com diâmetro entre 5 e 8000 micrômetros. E a massa ideal da amostra para esse ensaio é entre 5 e 20 gramas. (CARRISSO & CORREIA, 2004).

As faixas de tamanho das partículas são obtidas através de uma série de peneiras, que contêm o número de malhas e conseqüentemente o diâmetro das aberturas diferentes. Existem várias séries de peneiras, as mais usuais são a Tyler, a Richards e a ISO (CARRISSO & CORREIA, 2004). A diferença entre elas está representada na Tabela 3.

Tabela 3- Escalas granulométricas.

Escala Tyler $r = \sqrt{2} = 1,414$ $a_0 = 74 \mu\text{m}$		Escala Richards $r = \sqrt[3]{2} = 1,19$ $a_0 =$ 1,0 mm = 18 malhas			Escala ISO
Malhas	mm	Malhas	mm	polegadas	Malhas
3	6,680	3	6,35	0,250	
		3 ½	5,66	0,223	3 ½
4	4,699	4	4,77	0,187	
		5	4,00	0,157	5
6	3,327	6	3,36	0,132	
		7	2,83	0,111	7
8	2,362	8	2,38	0,0937	
		10	2,00	0,0787	10
10	1,651	12	1,68	0,0661	
		14	1,41	0,0555	14
14	1,168	16	1,19	0,0469	
		18	1,00	0,0394	18 (Base)
20	0,833	20	0,841	0,0331	
		25	0,707	0,0278	25
28	0,589	30	0,595	0,0234	
		35	0,500	0,0197	35
35	0,417	40	0,420	0,0165	
		45	0,354	0,0139	45
48	0,295	50	0,297	0,0117	
		60	0,250	0,0098	60
65	0,208	70	0,210	0,0083	
		80	0,177	0,0070	80
100	0,147	100	0,149	0,0059	
		120	0,125	0,0049	120
150	0,104	140	0,105	0,0041	
		170	0,088	0,0035	170
200 (Base)	0,074	200	0,074	0,0029	
		230	0,063	0,0025	230
270	0,053	270	0,053	0,0021	
		325	0,044	0,0017	325
400	0,038	400	0,037	0,0015	

Fonte: (CARRISSO & CORREIA, 2004)

Os equipamentos utilizados no peneiramento são divididos em três tipos. São eles: as grelhas que são constituídas por barras dispostas paralelamente, mantendo um espaçamento regular entre si; os crivos que são formados por chapas metálicas planas e as telas que são constituídas por fios metálicos trançados de forma a deixarem malhas ou aberturas de dimensões determinadas. Os mais usuais são: as grelhas e peneiras fixas, as peneiras rotativas (Trommers), as grelhas rotativas e as peneiras recíprocas (CARRISSO & CORREIA, 2004).

Existem dois tipos de peneiramento, o peneiramento a úmido, onde a amostra é previamente lavada antes de ir para o peneirador; e o peneiramento a seco, onde não é necessária a lavagem prévia (WOLFF, 2009).

### 3.6.2 Cyclosizer

A análise granulométrica de um minério ou seu rejeito pode ser feita também através de elutriação centrífuga utilizando um conjunto de hidro ciclones associados em série (BRAGA & COUTO, 2007)

O *cyclosizer* (Figura 12) é constituído por um conjunto de hidrociclones em série. A geometria de cada hidrociclone favorece a classificação devido aos diâmetros decrescentes na alimentação do equipamento e na saída do mesmo na direção do fluxo. A redução dos diâmetros resulta em altas velocidades de suspensão e forças centrífugas com maior intensidade no interior dos hidrociclones, causando uma redução do tamanho limite de separação das partículas (WILLS, 1988).

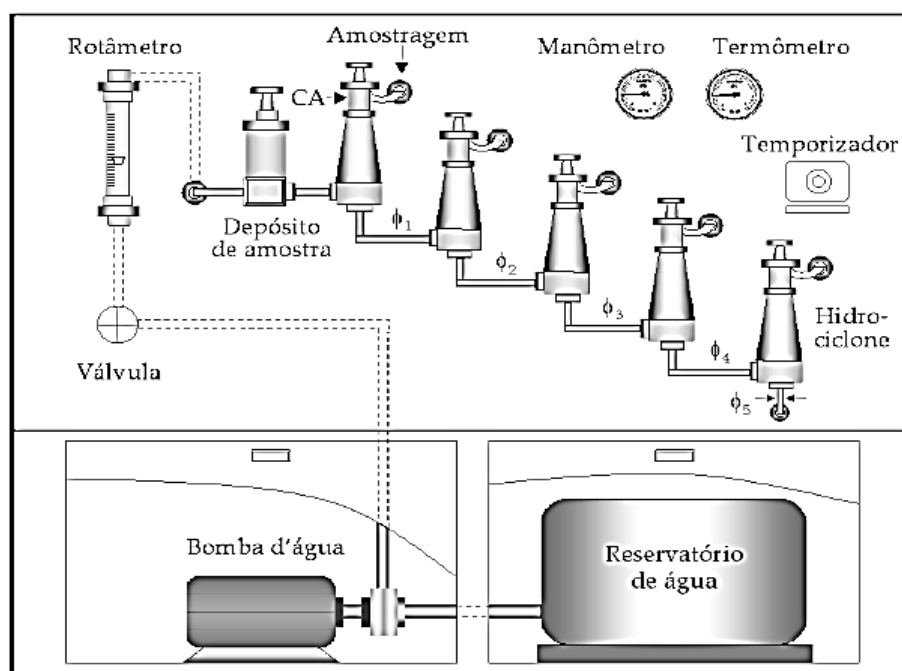


Figura 12 - Esquema ilustrativo de um cicloclassificador (Cyclosizer). Fonte: (BRAGA & COUTO, 2007)

Este método de distribuição granulométrica é ideal para partículas com diâmetro médio entre 10 e 50 micrômetros. Esse equipamento é muito empregado na classificação



granulométrica, nas áreas de processamento de minérios finos, fabricação de massas cerâmicas, pigmentos, abrasivos e fertilizantes, metalurgia do pó, dentre outras. Uma das vantagens deste método é o fato dele ser simples e rápido, um ensaio dura em torno de 10 a 15 minutos (COUTO, 2007).

A maior vantagem do *cyclosizer* é poder separar as partículas em frações distintas, assim como no peneiramento. Essas análises são de suma importância para determinar os teores dos minérios em cada fração granulométrica, algo que equipamentos modernos não são capazes de executar (BRAGA & COUTO, 2007).

O circuito completo do *cyclosizer* consiste basicamente de cinco hidrociclones associados em série. O equipamento também é composto por um rotâmetro com escala L/h, uma bomba d'água monobloco, reservatório de água para alimentação do sistema, um manômetro montado na tubulação de descarga da bomba, um termômetro com função de determinar a temperatura da água do reservatório e um dispositivo de controle de tempo e um temporizador com alarme (BRAGA & COUTO, 2007).

### 3.6.3 Granulômetro à laser

A medição da distribuição de tamanho das partículas por esse equipamento é realizada a partir da variação do ângulo da intensidade da luz dispersada quando um feixe de laser passa através de uma amostra de partículas (Figura 13). As grandes partículas tendem a dispersar a luz em pequenos ângulos, já as pequenas partículas dispersam a luz em grandes ângulos. A análise dos dados de intensidade de espalhamento angular é importante para o cálculo dos tamanhos das partículas responsáveis para criar o padrão de dispersão (MALVERN, 2012).

Existem várias teorias de espalhamento, uma delas é a de Mie que é uma solução matemática abrangente para dispersão da luz incidente por partículas de diferentes formas e proporções.

Outra teoria é a de Rayleigh e Rayleigh-Gans que são baseadas no modelo de espalhamento de Rayleigh que se aplica quando o tamanho da partícula é muito menor do que o comprimento de onda da luz incidente. Já a teoria de Rayleigh-Gans se aplica quando o diâmetro da partícula não é necessariamente menor do que o comprimento de luz incidente.

Geralmente esse equipamento é utilizado para a análise granulométrica de partículas mais finas, ou seja, partículas com o diâmetro menor que 500 micrômetros.

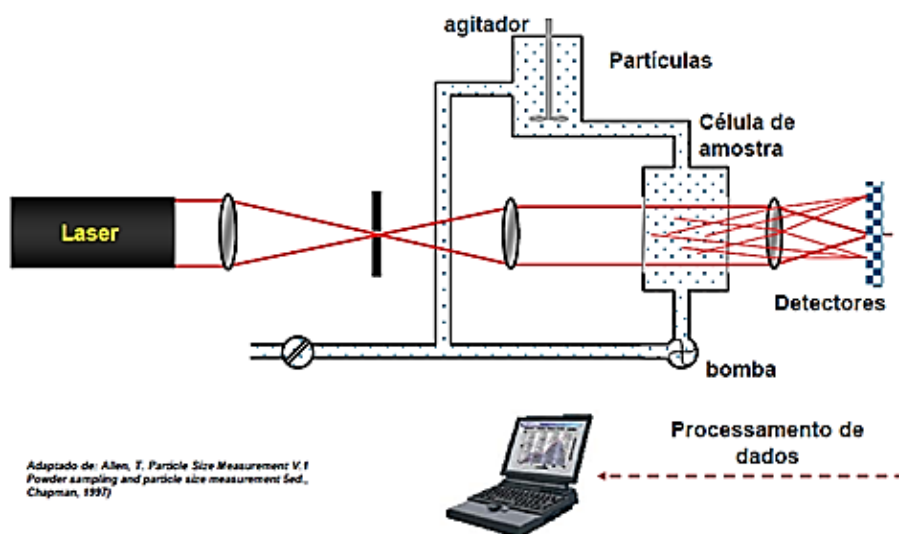


Figura 13: Esquema de um Granulômetro à laser

### 3.7 Métodos de Caracterização

#### 3.7.1 Fluorescência de raios X (FRX)

A fluorescência de raios X é uma técnica que analisa qualitativamente e quantitativamente e identifica todos os elementos com um número atômico maior que 11 ( $Z > 11$ ) de uma amostra. Esse método determina as concentrações dos elementos a partir das intensidades dos raios X característicos dos elementos emitidos pelos mesmos após serem bombardeados por raios X com energia suficiente (JENKINS, 1989).

O princípio da fluorescência de raios X consiste na utilização de uma fonte de radiação X a fim de ionizar os níveis internos dos átomos que fazem parte da amostra. No regresso dos átomos ao seu estado fundamental, eles liberam a energia excedente através da emissão de um fóton X de energia similar à diferença de energia de ligação dos níveis entre os quais se deu a transição. Cada elemento tem sua radiação específica emitida. Através da análise do espectro, os elementos constituintes da amostra são identificados e quantificados (JENKINS, 1989).

A partir de cristais e detectores específicos é possível analisar qualitativamente e quantitativamente todos os elementos que compõem a amostra. Os detectores coletam a

radiação fluorescente específica do átomo que a transmitiu e como consequência disso consegue identificar diferentes radiações características pelas suas energias (ANTONIASSI, 2010).

A técnica de FRX possui vantagens e desvantagens, uma das vantagens é a facilidade de preparação da amostra e com o limite de defectibilidade dentro do exigido pelas amostras. A principal desvantagem dessa técnica é a absorção das radiações primárias o que dificulta a realização da análise quantitativa (NASCIMENTO, 1999).

### 3.7.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um equipamento utilizado para análise de microestruturas de materiais sólidos. A sua grande vantagem em relação ao microscópio óptico é sua alta resolução, na ordem de 2 a 5 nm (20 a 50 Angstroms) (STEFANAKI, 2008). Uma distinção essencial entre os dois microscópios é o tipo de luz branca emitida, no MEV se utiliza um feixe de elétrons ao invés de fótons, o que potencializa a resolução óptica.

O desempenho do MEV é baseado na interação de um feixe de elétrons finamente colimado com a amostra. O MEV propicia imagens de níveis de cinza devido a algum sinal gerado da interação do feixe com a superfície da amostra. Estas imagens são constantemente utilizadas em topografia e principalmente na tecnologia mineral, onde sua maior aplicabilidade é verificar a morfologia de minerais, podendo atingir resoluções elevadas na ordem de poucos nanômetros (NEUMANN, *et al*, 2004).

A técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) proporciona a obtenção de uma imagem ampliada (até 300000 vezes) e tridimensional da amostra a partir da interação de um feixe de elétrons secundários com a amostra (MANSUR, 2013).

As estruturas de um Microscópio eletrônico de varredura são: a coluna de elétron, o sistema de varredura, detectores, display, sistema de vácuo e os controles eletrônicos, como mostra a Figura 14.

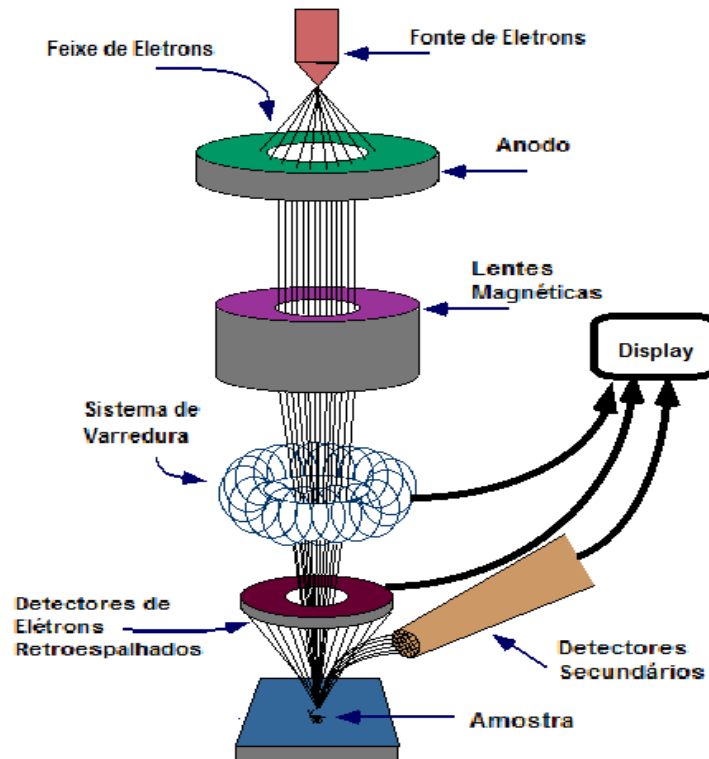


Figura 14 - Esquema de estrutura de um MEV. Fonte: (STEFANAKI, 2008)

### 3.7.3 Difração de raios X (DRX)

Os estudos sobre a difração de raios X deram início a partir da descoberta de que o cristal possuía uma estrutura periódica de algumas unidades de Angstrom ( $\text{\AA}$ ). Difração nada mais é que um fenômeno de dispersão (CULLITY, 1978).

A primeira lei da DRX foi dada por Bragg, essa lei deduz que o feixe incidente normal ao plano de difração produz um feixe difratado que é sempre coplanar e que o ângulo entre o feixe difratado e o transmitido é sempre duas vezes o ângulo incidente normal à superfície (CULLITY & STOCK, 2001). A equação da Lei de Bragg é:  $n\lambda = 2d.\text{sen}\theta$ , onde  $\lambda$  corresponde ao comprimento de onda da radiação incidente, “ $n$ ” ao número inteiro relacionado com comprimentos de onda (ordem de difração), “ $d$ ” à distância interplanar e “ $\theta$ ” ao ângulo de incidência dos Raios X (medido entre o feixe incidente e os planos cristalinos) (BLEICHER, 2000). A Figura 15 ilustra bem essa relação.

Os raios dispersos por todos os átomos dos planos estão em fase e eles sofrem interferência construtiva para formar um feixe difratado em certa direção. Em todas as

outras direções, fora do plano, os feixes dispersos não estarão em fase, e eles se anularão um ao outro, ou seja, irão sofrer interferência destrutiva (CULLITY & STOCK, 2001).

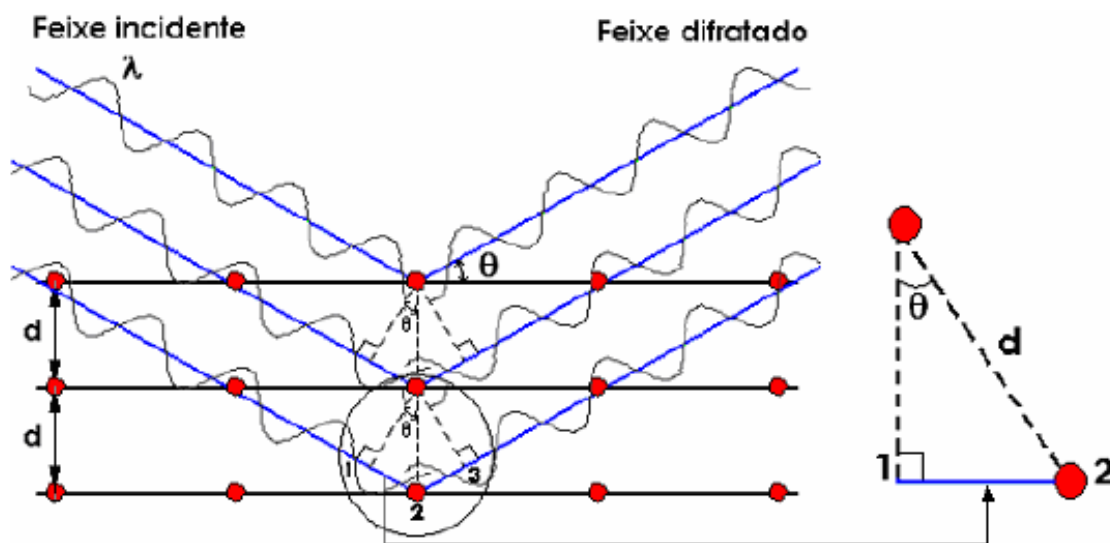


Figura 15 - Ilustração da técnica de DRX. Fonte: (CULLITY & STOCK, 2001).

O feixe difratado é expresso normalmente através de picos que se destacam da linha de base inscrita num gráfico de intensidade versus o ângulo  $2\theta$ , é o chamado difratograma. A Figura 16 mostra o exemplo de um difratograma de uma amostra de esmectita, onde o eixo X corresponde ao ângulo  $2\theta$  e o eixo Y corresponde à intensidade.

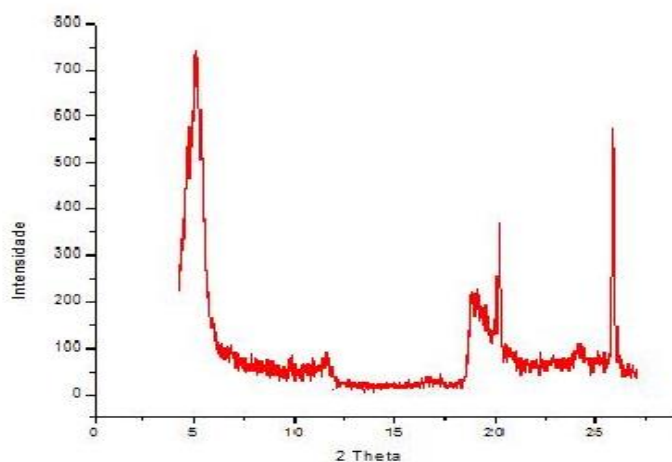


Figura 16 - Difratograma de uma amostra de esmectita. Fonte: (CARVALHO, *et al*, 2009)

O método DRX identifica os minerais que compõem a amostra a partir da determinação das distâncias interplanares ou da posição angular das células cristalinas, que são compostas por planos diretamente relacionados com o raio atômico e os tipos de ligação de cada um dos átomos. No difratograma, onde são mostrados os resultados, os picos estão relacionados com a posição, intensidade e forma da estrutura cristalina, permitindo assim a caracterização da composição mineralógica dos minerais (JENKINS, 1989).

A identificação das fases constituintes da amostra se dá pela comparação do difratograma gerado com um difratograma padrão coletado e mantido por um banco de dados cristalográficos ICDD (International Center for Diffraction Data). Esse método também dá a oportunidade de determinar os parâmetros de rede, avaliar o grau de cristalinidade e quantificar as fases presentes na amostra (JENKINS, 1989).

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Amostragem

As amostras foram coletadas às margens do Rio do Carmo, município de Barra Longa – MG. A escolha do ponto de coleta foi definida neste local porque Barra Longa foi uma das cidades mais afetadas pelo rompimento da barragem.

Foi feita uma malha de amostragem com 40m de comprimento e 30m de largura, totalizando uma área de coleta de 1200 m<sup>2</sup>. As amostras foram coletadas a cada 5 m (Figura 17) com profundidade de 20 cm. Deste modo, retiram-se três amostras referentes a cada ponto e foram identificadas da seguinte forma: ponto 0, ponto 5, ponto 10, ponto 15, ponto 20, ponto 25, ponto 30, ponto 35 e ponto 40.

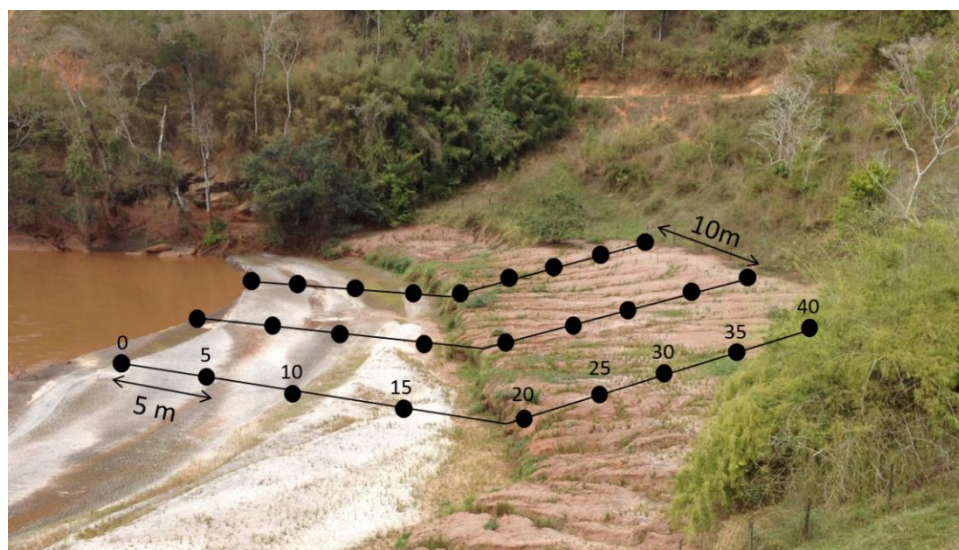


Figura 17: Pontos de coleta das amostras. Fonte: Reprodução Própria

Após a coleta, as três amostras referentes a cada ponto foram secadas em estufa a 100 °C por 24 horas. Depois de secas elas foram desagregadas, homogeneizadas e quarteadas em alíquotas de 200 g para sequência do trabalho.

### 4.2 Análise granulométrica

Primeiramente uma alíquota de 200 g foi peneirada a seco utilizando peneiras de 2,38 mm; 2 mm; 1,16 mm; 0,6 mm; 0,425 mm e 0,075 com auxílio de um peneirador

mecânico, seguindo a NBR 7181(ABNT, 1984). Posteriormente a massa passante na peneira de 0,075 mm foi submetida a uma nova análise granulométrica utilizando o Analisador de Partículas a Laser (CILAS modelo 1090).

#### **4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

As análises no MEV foram realizadas no Shimadzu SSX-550, equipado com detector de elétrons secundários, onde foram geradas as imagens da morfologia das amostras dos rejeitos. Para a obtenção das imagens no MEV, as amostras foram recobertas com ouro e as análises foram realizadas com um aumento de 100X.

#### **4.4 Fluorescência de Raios X (FRX)**

A determinação química sem quantitativa das amostras por FRX foram executadas no equipamento Shimadzu EDX-720. As análises foram realizadas em pastilhas e sob vácuo e realizadas em termo de óxido.

#### **4.5 Difração de Raios X**

As análises de DRX, pelo método do pó para identificar as fases presentes nas amostras, foram realizadas no equipamento Shimadzu 7000 nas seguintes condições de operação: Radiação Cu K $\alpha$  (35 KV/ 40 mA), velocidade do goniômetro 0,02° 2 $\theta$  por passo, com tempo de contagem de 0,6 segundo por passo e coletados de 5° a 80° 2 $\theta$ . A interpretação do espectro será efetuada por comparação com padrões contidos no banco de dados PDF 02 (ICDD, 2003).

#### **4.6 Confeção dos Corpos de Prova**

A título de exemplificar a reutilização do material coletado, foram moldados 3 corpos de provas. Para as moldagens dos corpos de prova, as amostras do resíduo e de argila comercial foram umidificadas e homogeneizadas manualmente com a finalidade de obter um teor de umidade de 8% para a conformação na prensagem. O molde utilizado para fabricação dos corpos de prova na prensa possui dimensão de 58,80 por 19,90 mm. A prensa utilizada foi a Prensa Hidráulica com Aquecimento SL-12 da marca Famabras, a carga utilizada para a prensagem foi de 9 Ton. Para o estudo foram conformados 3 corpos



de provas com a seguinte formulação: 50% de resíduo + 50% de argila comercial.

A secagem do material foi realizada em estufa aquecendo-a até 500°C e submetendo os corpos de prova ao resfriamento dentro do forno. Após a secagem, os corpos de prova foram submetidos à sinterização utilizando um forno da marca Grion (modelo: forno elétrico de sinterização de materiais refratários) e rampa de aquecimento empregada iniciou em 0°C, aquecendo até 500°C, temperatura em que permaneceu por 20 minutos. Em seguida a temperatura do forno foi elevada até 1000°C e essa temperatura foi mantida por 20 minutos novamente. Por fim, aqueceu-se o forno até 1100°C e aguardou-se 20 minutos nessa temperatura. Após esse ciclo, deixou-se os corpos de prova resfriar dentro do forno. Após a sinterização os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão, para determinar sua resistência mecânica. Esse ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 7215 utilizando o equipamento Emic DL30000N.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Análises Granulométricas

As amostras foram submetidas ao peneiramento a seco, mas a distribuição mostrou que a última peneira utilizada (74  $\mu\text{m}$ ) não reteve uma quantidade significativa de material. Este resultado já era esperado, pois as granulometrias destes rejeitos são muito finas, como mostram os estudos realizados por Santos (2013). Portanto, para avaliar a granulometria foram utilizados os resultados obtidos no granulômetro a laser, como mostra a Tabela 4. As curvas da distribuição granulométricas estão apresentadas no Apêndice A.

Na Tabela 4, D10 significa que 10% da amostra está abaixo do referido diâmetro, D50 significa que 50% da amostra está abaixo do referido diâmetro, D90 significa que 90% da amostra está abaixo do referido diâmetro e Dmédio é o diâmetro médio das partículas.

Observa-se que o diâmetro médio das partículas das amostras do Ponto 0 até o 15 são maiores que o das amostras do Ponto 20 ao Ponto 40. Essa diferença pode ser explicada pelo fato dos Pontos 0 ao 15 estarem localizados próximos às margens do rio do Carmo, que traz consigo, em épocas de cheia, sedimentos, como a areia, cujas partículas possuem um diâmetro maior. Como o rio não atinge o Ponto 20 em sua cheia, esta deposição de sedimentos não ocorre neste ponto e nos posteriores. É importante ressaltar que a coleta foi realizada após a época de chuva.

Tabela 4 – Resultados da análise granulométrica à laser

Amostra	D10 ( $\mu\text{m}$ )	D50 ( $\mu\text{m}$ )	D90 ( $\mu\text{m}$ )	Dmédio ( $\mu\text{m}$ )
Ponto 0	12,71	46,16	79,89	46,69
Ponto 5	24,11	68,21	92,21	58,45
Ponto 10	18,39	53,08	86,86	53,26
Ponto 15	14,67	47,08	80,75	47,84
Ponto 20	2,52	19,56	56,11	25,26
Ponto 25	2,21	17,36	51,03	22,69
Ponto 30	2,06	15,45	50,91	21,75
Ponto 35	2,17	16,78	50,81	22,34
Ponto 40	2,27	17,82	54,61	24,10

Fonte: Reprodução própria

Além disso, durante a cheia do rio ocorreu a lavagem do resíduo depositado próximo à margem e, durante este processo, provavelmente, o material argiloso (fino) foi removido ficando depositado o material mais grosso. Para corroborar esta afirmação, sabe-se que a existência da fração fina nos rejeitos é gerada de acordo com o processo de deslamagem e, geralmente, é composta por argilas e finos de minério de ferro (LIMA, 2006; FIGUEIREDO, 2007).

Pode-se observar também que os diâmetros médios das partículas de todas as amostras não ultrapassaram 60  $\mu\text{m}$ . Portanto, pode-se afirmar que todas as amostras estão dentro de um padrão aceitável (não necessitando de moagem) para as análises de DRX, já que, segundo as especificações do equipamento, partículas com diâmetro médio superior a 70  $\mu\text{m}$  podem causar alterações nas formas dos perfis das reflexões, dificultando dessa forma a análise precisa das fases (CULLITY, 1978).

## **5.2 Fluorescência de Raios X (FRX)**

A Tabela 5 mostra o resultado da FRX. Observa-se que em todos os pontos os elementos preponderantes são o ferro, o silício e o alumínio. Sendo que os pontos de 0 a 10 apresentam menores concentrações de ferro e relação  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  (em torno de 0,29), o que já era esperado por esses pontos estarem mais próximos da margem do rio e terem passado pelo processo de lavagem e deposição de areia durante o período de cheia.

Pode-se observar também que os materiais dos pontos 20 ao 40 apresentam uma relação  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  (em torno de 0,74) e um teor de alumínio variando de 6,0% a 7,4%. Estes resultados, juntamente com os resultados de granulometria (Tabela 4), são interessantes, pois de acordo com Netto (2006), materiais com granulometria fina e que contêm argilosos apresentam bom potencial para serem reaproveitados em massas cerâmicas. Em condições ambientais adequadas, os óxidos de alumínio e silício reagem com o hidróxido de cálcio, formando compostos com propriedade aglomerante. Essa reação é denominada reação pozolânica e ela acontece devido à vulnerabilidade da sílica e da alumina na presença do hidróxido de cálcio.

Vale ressaltar que a concentração de ferro e sílica está diretamente ligada ao processamento mineral que é utilizado e que a coloração avermelhada do rejeito é devido ao óxido de ferro presente (LIMA, 2006).

Tabela 5 – Resultado da Fluorescência de Raios X.

Óxidos (%)	Pontos								
	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,4	21,9	21,7	41,9	40,0	38,3	39,5	41,6	36,8
SiO <sub>2</sub>	77,4	74,9	74,9	55,2	53,4	53,6	52,9	51,0	55,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,2	2,2	3,2	2,6	6,0	7,4	6,9	6,7	7,3
K <sub>2</sub> O	0,2	--	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3
MnO	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
CaO	0,2	0,1	--	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
TiO <sub>2</sub>	0,4	0,8	--	--	--	--	--	--	--
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	0,25	0,29	0,29	0,75	0,75	0,71	0,75	0,81	0,66

Fonte: Reprodução própria.

### 5.3 Difração de Raios X (DRX)

As Figuras 18 a 26 apresentam os difratogramas das amostras dos pontos 0 ao 40. Pode-se observar nos difratogramas apresentados nas figuras que a fase quartzo e os minerais de ferro (hematita e goethita) estão presentes em todas as amostras. Ressalta-se que a ocorrência de sobreposição dos picos dificulta a diferenciação entre as fases hematita e goethita, com isso, nos difratogramas, estas fases estão identificadas como minerais de ferro. A presença dessas fases está coerente com a análise da composição das amostras (Tabela 5), que são compostas, basicamente, por SiO<sub>2</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Entretanto, pode-se dividir a análise dos difratogramas em 2 partes. A primeira dos pontos 0 ao 15 e a segunda dos pontos 20 ao 40.

Do Ponto 0 ao 15, detectou-se a presença predominante de quartzo, minerais de ferro e materiais amorfos. Este resultado está de acordo com a análise granulométrica e química, pois a presença dessas fases pode ser explicada devido à maior proximidade desses pontos com a margem do rio, como já foi discutido no item 5.1.

A partir do ponto 20, observa-se a presença de goethita (mineral de ferro) e de caulinita (argilomineral). Ressalta-se que no ponto 40 foi detectada a presença de sanidina, provavelmente, proveniente do solo da região. De acordo com Wolff (2009), o rejeito do processamento do minério de ferro contém goethita, caulinita, quartzo e hematita. Portanto, pode-se afirmar que a partir do Ponto 20 até o Ponto 40 existe a presença de rejeitos de minério de ferro nas amostras.

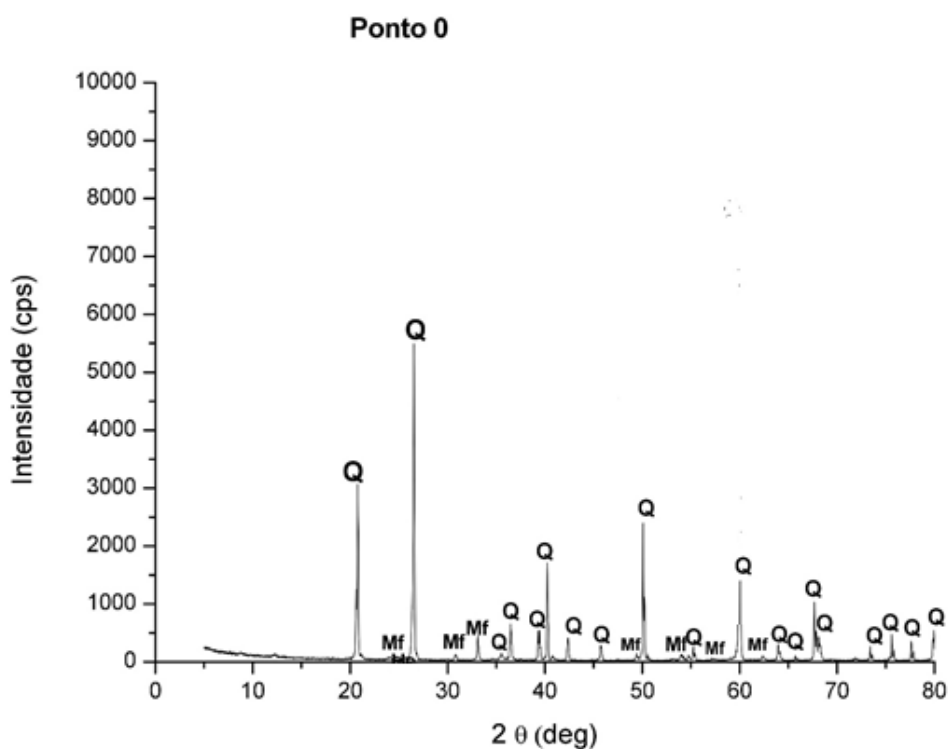


Figura 18: Difratograma do Ponto 0 (Q = quartzo; Mf = minerais de ferro). Fonte: Reprodução própria

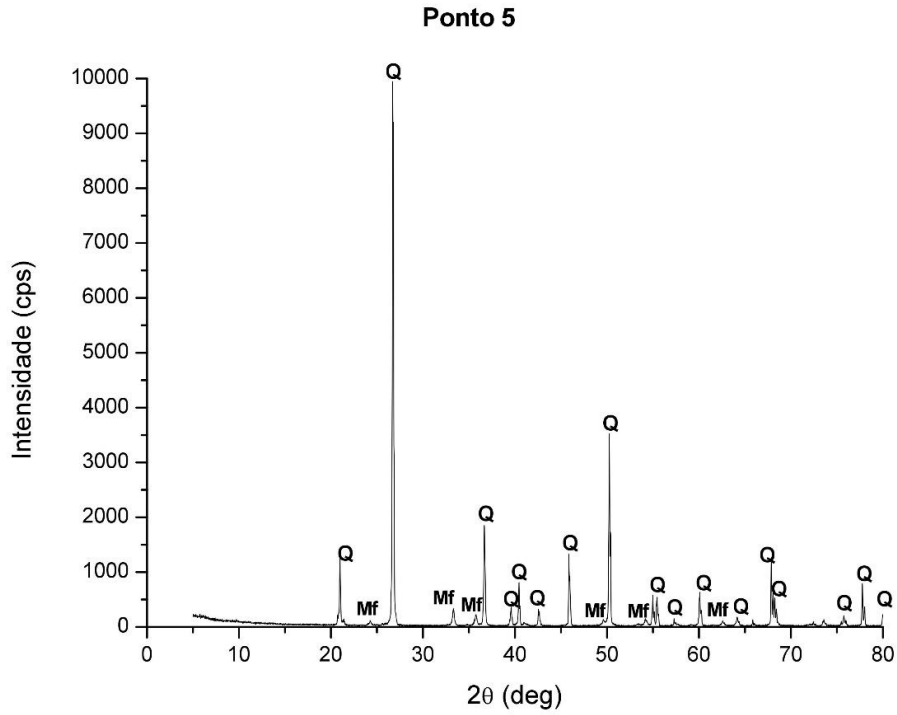


Figura 19: Difratoograma do Ponto 5(Q = quartzo; Mf = minerais de ferro). Fonte: Reprodução própria

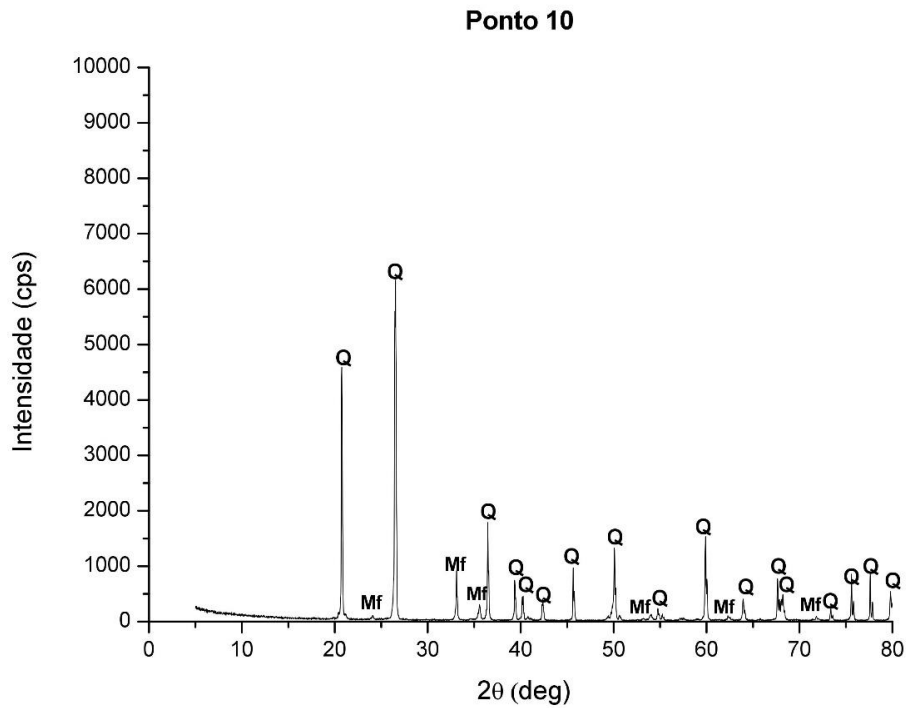


Figura 20: Difratoograma do Ponto 10 (Q = quartzo; Mf = minerais de ferro). Fonte: Reprodução própria

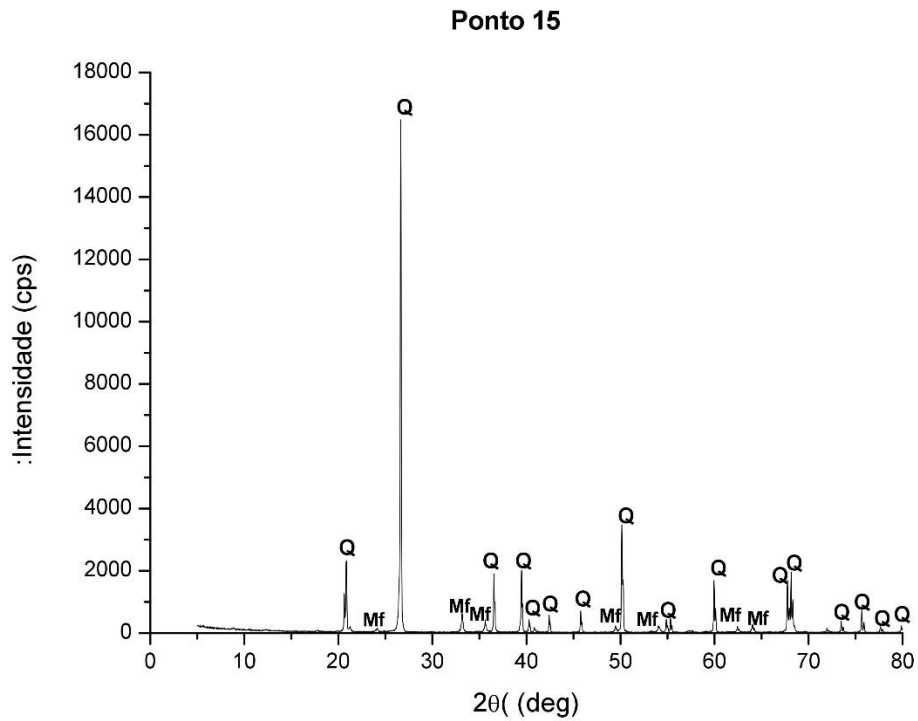


Figura 21: Difratoograma do Ponto 15 (Q = quartzo; Mf = minerais de ferro). Fonte: Reprodução própria

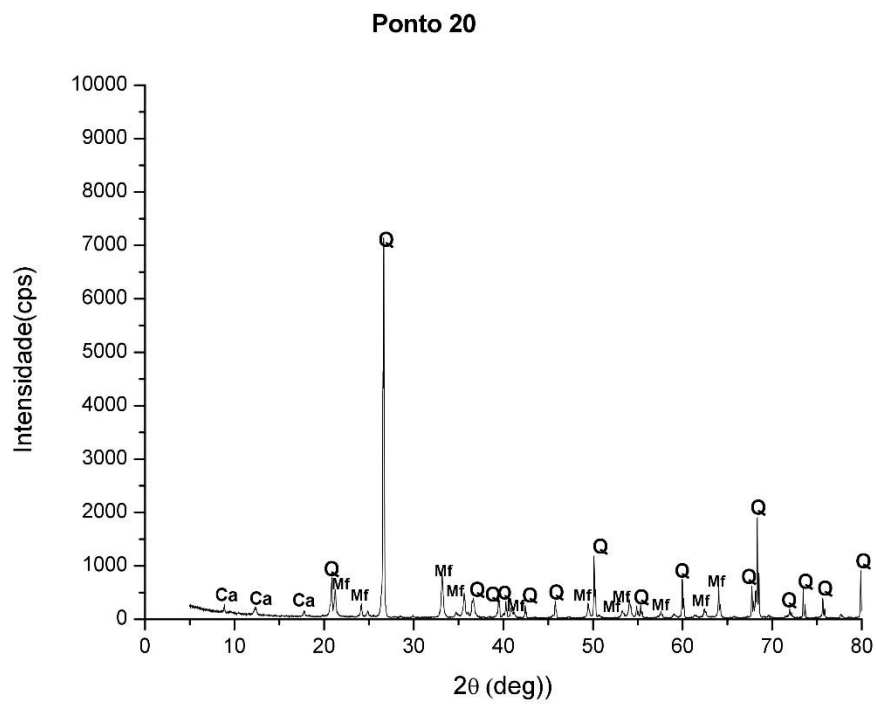


Figura 22: Difratoograma do Ponto 20 (Q = quartzo; Mf = minerais de ferro). Fonte: Reprodução própria

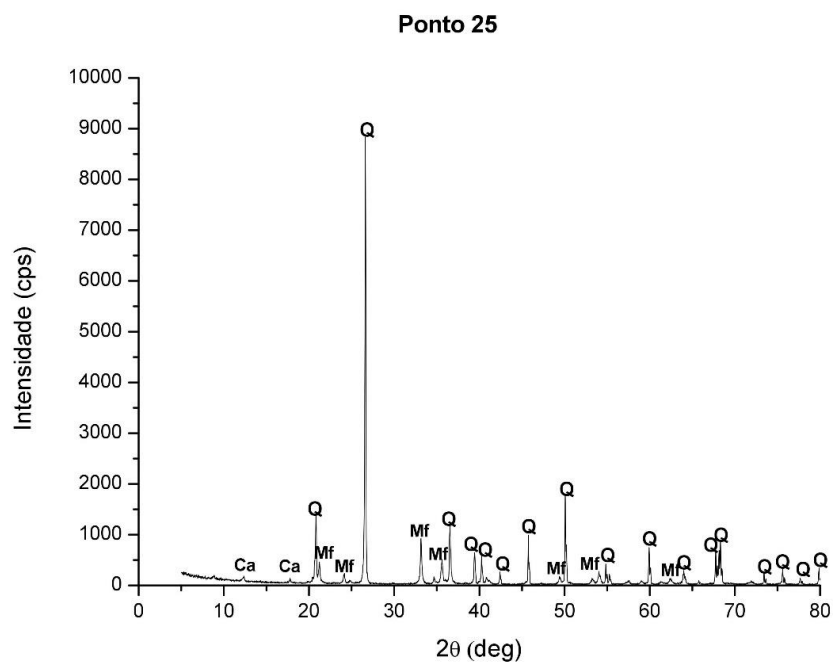


Figura 23: Difratoograma do Ponto 25 (Q = quartzo; Mf = minerais de ferro; Ca = caulinita).  
 Fonte: Reprodução própria

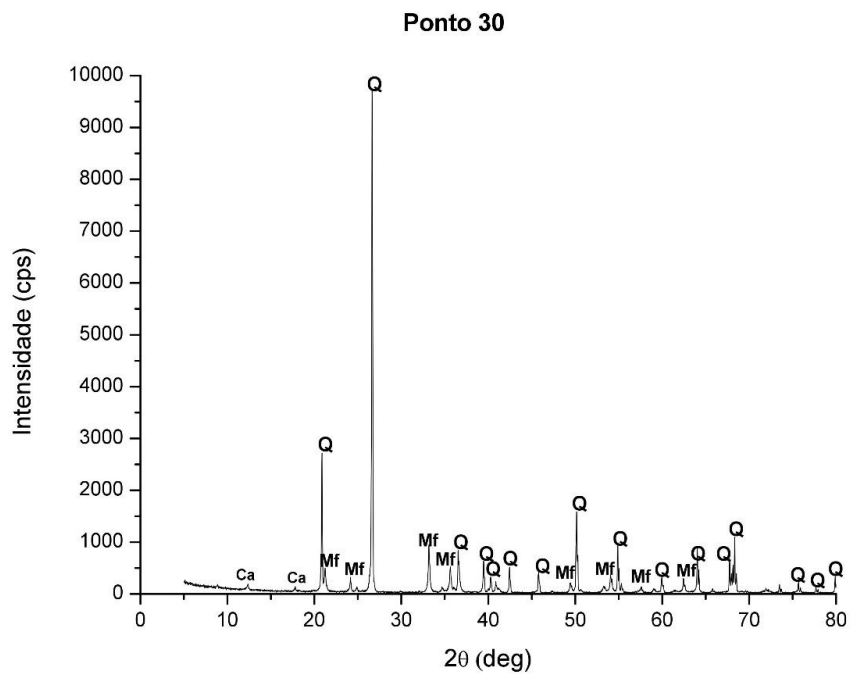


Figura 24: Difratoograma do Ponto 30 (Q = quartzo; Mf = minerais de ferro; Ca = caulinita).  
 Fonte: Reprodução própria



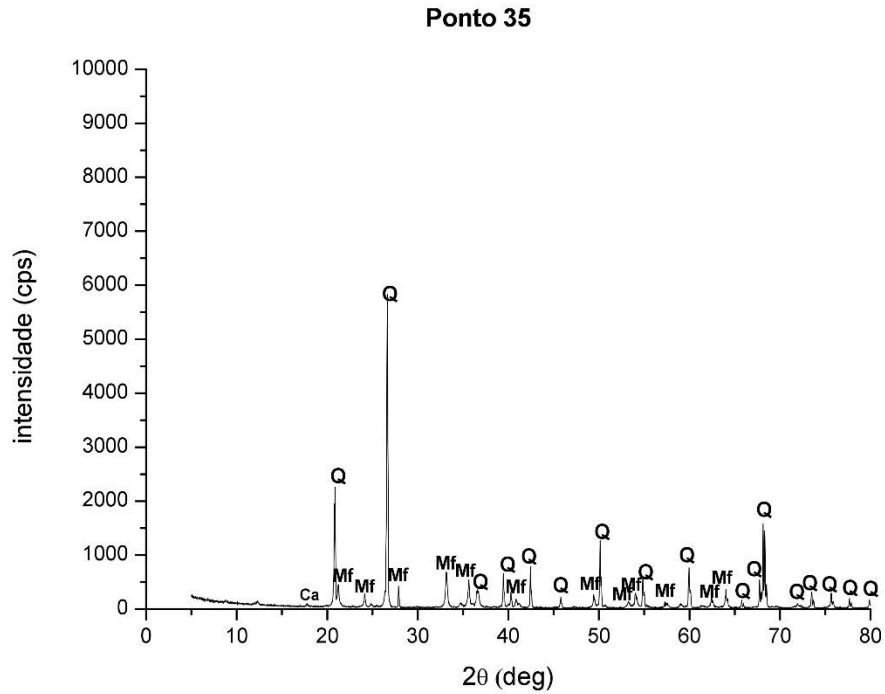


Figura 25: Difratoograma do Ponto 35 (Q = quartzo; Mf = minerais de ferro; Ca = caulinita).  
 Fonte: Reprodução própria

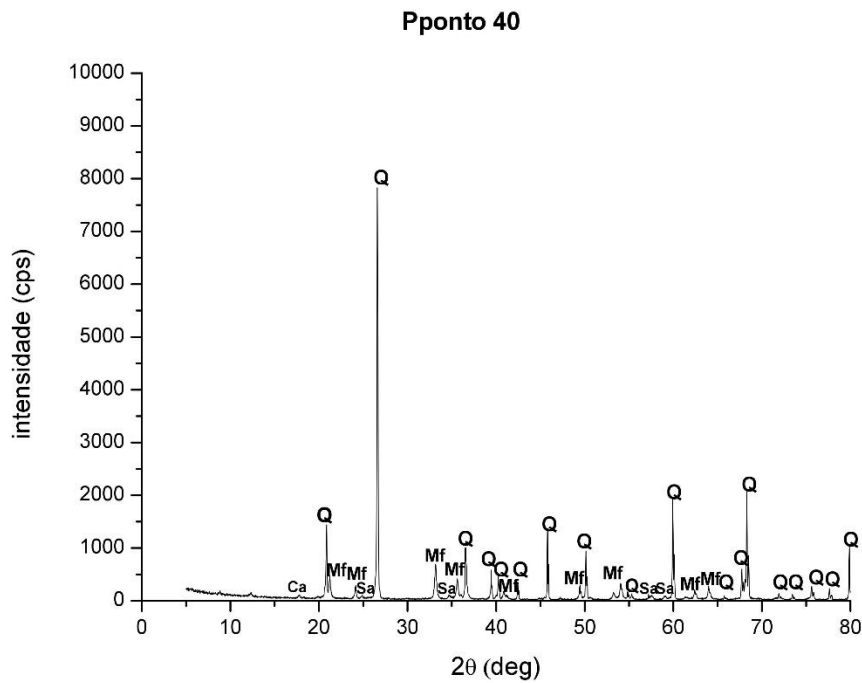


Figura 26: Difratoograma do Ponto 40 (Q = quartzo; Mf = minerais de ferro; Ca = caulinita; Sa = sanidina). Fonte: Reprodução própria

Parte da presença da goethita pode ser explicada pelo fato de que em ambientes com drenagem deficiente, como pode ser o caso de uma barragem de rejeito, pode ocorrer a hidratação da hematita, transformando-a em goethita, como observado por Barbosa *et al.* (2009) e Motta *et al.* (2002).

De acordo com os difratogramas pode se observar que dos Pontos 0 a 15, as fases mineralógicas são muito semelhantes, ou seja, as amostras são compostas por minerais de ferro e quartzo. Este resultado também corrobora a discussão apresentada nos itens 5.1 e 5.2, mostrando que os mesmos não poderiam apresentar fases que seriam correspondentes aos argilominerais, uma vez que, provavelmente, estes foram arrastados durante o período de cheia do rio.

As Figuras 22 a 26 mostram que as fases mineralógicas para os pontos 20 ao 40 são muito semelhantes em relação aos minerais essenciais quanto em relação ao mineral acessório. Essas amostras são compostas predominantemente por minerais de ferro e quartzo, que são os minerais essenciais, e pelo mineral acessório, presente na forma caulinita. Entretanto, foi observada uma diferença entre as composições dessas amostras, ou seja, somente a amostra do Ponto 40 apresentou a fase sanidina, provavelmente, proveniente do solo da região.

#### **5.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

As Figuras 27 e 28 mostram a microestrutura das amostras obtidas pelo MEV. Com estas imagens, pode-se observar que a microestrutura das partículas dos pontos 0 ao 15 são bastante semelhantes. Além disso, pode-se observar também que essas amostras apresentam grãos muito limpos, ou seja, sem a presença de aglomerados. Esse fato pode ser explicado pela localização desses pontos (próximo às margens do rio), que por consequência das chuvas e da deposição de areia a lama foi lavada ou simplesmente coberta pela areia trazida pelas cheias do rio. Este resultado já era esperado uma vez que a difração de raios X mostrou o maior percentual de quartzo nesses pontos.

A partir do ponto 20, nota-se uma maior quantidade de aglomerados devido à presença da lama, compostas pelo argilomineral e minerais de ferro. Este fato também é corroborado pela difração de raios X (que indica presença do argilomineral e dos minerais

de ferro para estes pontos), fluorescência de raios X (mostra o menor percentual de  $\text{SiO}_2$  para estes pontos) e análise granulométrica (presença de grãos menores nessas amostras).

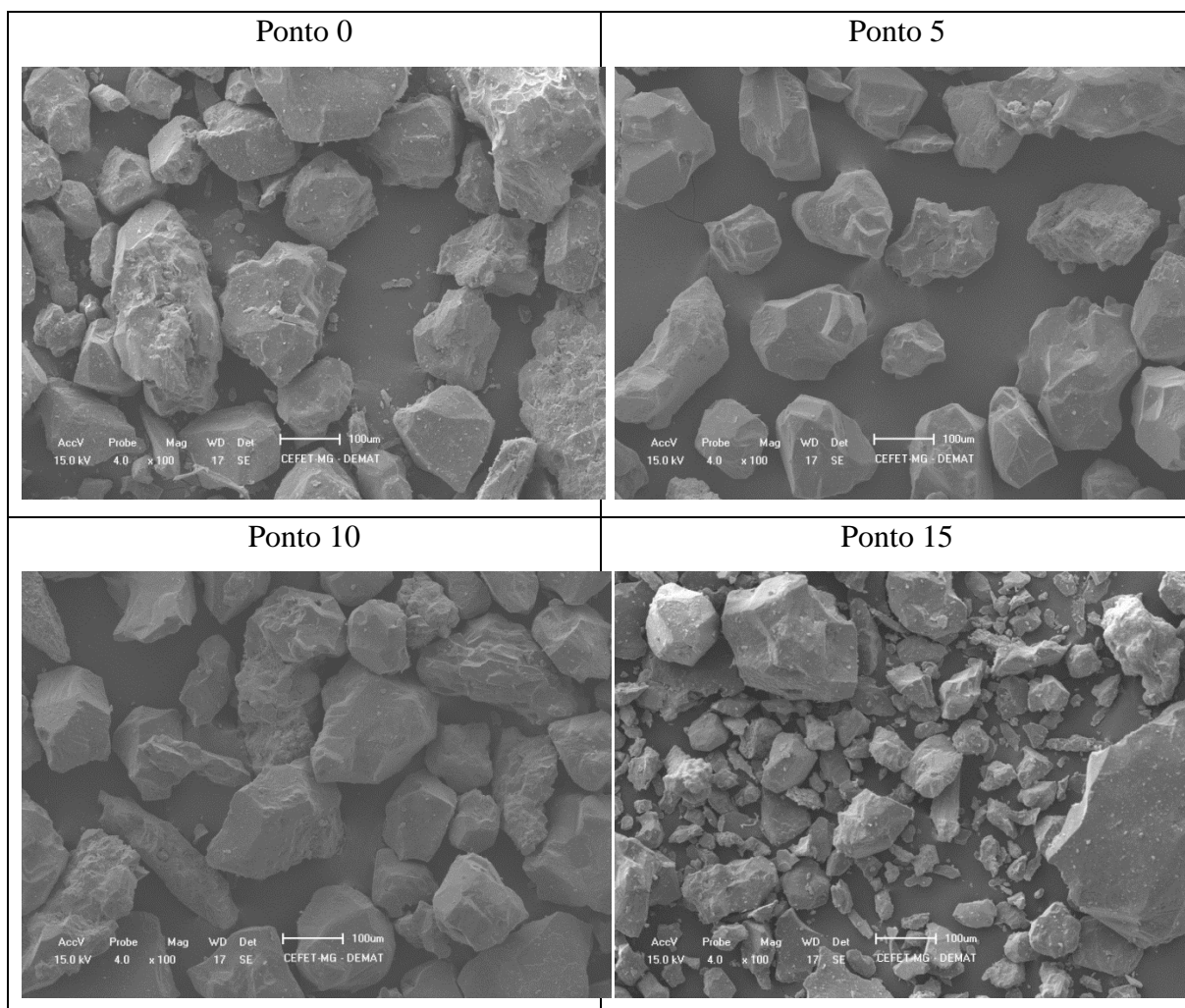


Figura 27: Imagem obtida no MEV para os pontos 0, 5, 10 e 15, respectivamente, com aumento de 100x. Fonte: Reprodução própria

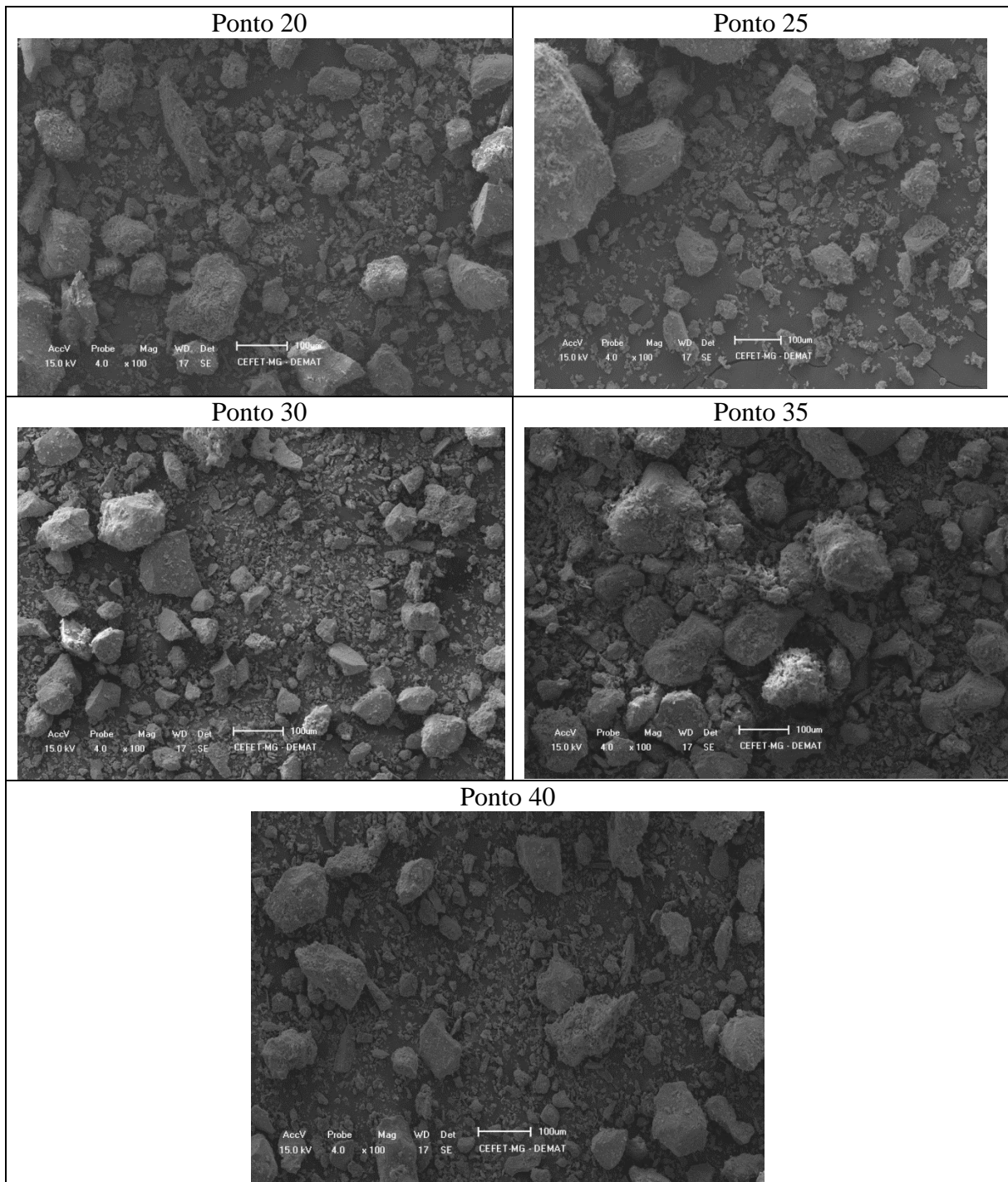


Figura 28: Imagem obtida no MEV para os pontos 20, 25, 30, 35 e 40, respectivamente, com aumento de 100x Fonte: Reprodução própria

## 5.5 Confeção dos Corpos de Prova e Ensaio de Compressão

A escolha da amostra para a confecção dos corpos de prova foi realizada de acordo com os resultados de caracterização mineralógica e química. Portanto, analisando esses resultados optou-se pela amostra coletada no Ponto 20, uma vez este ponto foi o primeiro a apresentar composição e granulometria distintas aos pontos anteriores. Foi necessária a adição da argila comercial na composição para conferir plasticidade à mistura, desse modo a compactação foi bem sucedida, como mostra a Figura 29.



Figura 29: Imagem do corpo de prova contendo 50% de resíduo + 50% de argila comercial. Fonte: Reprodução própria

Ressalta-se que o teste foi realizado com apenas um dos pontos e com uma formulação, pois o intuito foi exemplificar que esse resíduo pode ser utilizado como matéria prima para confecção de tijolos cerâmicos prensados.

O resultado do ensaio de compressão mostrou que esse produto tem uma resistência à compressão de  $24,5(+/-1)$  MPa e módulo de elasticidade de  $0,72 (+/-0,10)$  GPa. Quando comparado ao resultado deste trabalho com o de Pinheiro (2012), é possível afirmar que a adição do resíduo possui uma resistência mecânica aproximada a que foi encontrada pelo autor ( $28,29(\pm 0,58)$  Mpa), quando o mesmo utilizou o argilito para a confecção dos corpos de prova. Portanto, este resultado é um indicativo de que a produção de tijolos prensados utilizando esse material na sua formulação pode ser viável. Entretanto é necessário um estudo mais aprofundado, ou seja, avaliar outras formulações, carga de prensagem e temperatura de sinterização.

Vale ressaltar que, a aplicação desse resíduo na indústria cerâmica pode ser limitada pela grande quantidade de óxidos de ferro. Entretanto, quando incorporados em pequenas quantidades, podem contribuir de maneira significativa com a queima destes materiais e manutenção da temperatura durante o resfriamento evitando defeitos nas peças.

No que diz respeito ao reaproveitamento desses resíduos na construção civil, as características químicas e mineralógicas das amostras analisadas demonstram grande potencial para a aplicação. Mas, é necessário que a composição química e mineralógica esteja associada à granulometria, para que se possa melhor avaliar a aplicação.

Na construção civil a sua utilização como agregado miúdo para concreto está limitada pelo tamanho das partículas, ou seja, o resíduo é muito fino para ser utilizado para este fim. A presença de óxidos de ferro (hematita) em agregados miúdos dá origem a concretos de alta densidade e resistência, que podem ser empregados em usinas nucleares como escudos biológicos ou blindagens (ZHAO et al., 2014).

Para aplicação em argamassas à presença de óxidos de ferro, dá coloração avermelhada a estes materiais, o que não é desejável do ponto de vista estético. Além disso, quando utilizados em grande quantidade podem influenciar no aparecimento de trincas e rachaduras, por causa da sua dilatação (BAUER, 2012).

## 6 CONCLUSÕES

A importância da extração do minério de ferro para a economia brasileira e para a sociedade moderna é indiscutível. Entretanto, no que diz respeito à avaliação dos impactos ambientais causados pelo rompimento da barragem do Fundão em Mariana, observaram-se impactos de elevada magnitude no meio físico, no meio biológico e no meio socioeconômico. Os impactos ambientais foram a alteração da paisagem, assoreamento dos rios com conseqüente alteração da qualidade da água, alteração nos ecossistemas aquáticos e terrestres e, principalmente, afetou profundamente a população local e as que ficam às margens dos rios afetados.

Avaliar alternativas que visem a utilização de rejeitos e até mesmo propor soluções ambientais viáveis para esse problema é, portanto, uma questão de grande relevância, principalmente no que diz respeito ao reaproveitamento. Neste contexto, o estudo realizado demonstrou através da caracterização mineralógica e da composição química que esses rejeitos podem ser reaproveitados.

A análise granulométrica nos permitiu afirmar que as partículas do material coletado podem ser utilizadas sem a necessidade de moagem. A granulometria adequada é um dos fatores predominantes, pois propicia maior vantagem a massas cerâmicas diminuindo a ocorrência de espaços vazios entre as partículas.

De acordo com os resultados de caracterização mineralógica foi possível verificar que o material coletado proveniente da barragem do Fundão é composto predominantemente por minerais de ferro e quartzo. Portanto, o estudo mineralógico do material coletado mostra a possibilidade de reutilização, como por exemplo, em massas cerâmicas, isso ocorre devido à grande presença de  $\text{SiO}_2$  nas amostras, os quais, quando associados à cal, resulta na formação de silicatos de cálcio que possuem propriedades cimentantes.

Portanto, o possível emprego deste material em massas cerâmicas favorece muito à mitigação dos impactos ambientais provenientes da atividade mineradora, já que reduziria o volume de rejeitos dispostos em barragens, facilitando o controle e o monitoramento destas estruturas, diminuindo assim, o risco de novos desastres ambientais como o ocorrido na Barragem do Fundão.

## 7 REFERÊNCIAS

- ABNT - NBR 7181. Solo – **Análise granulométrica**, 1984.
- ABNT - NBR 10004. **Resíduos Sólidos - Classificação**, 2004.
- ABRAÃO, P. C. **Sobre a deposição de rejeitos de mineração no Brasil**. p. 1-9. Simpósio sobre barragens de rejeito e disposição de resíduos industriais e de mineração, Rio de Janeiro, 1987.
- ASSIS, A. **Construção de barragens de rejeito sob uma visão geotécnica**. p. 259-273. III Simpósio sobre barragens de rejeito e disposição de resíduos, Ouro Preto - MG, 1995.
- BARBOSA, I. O.; LACERDA, M. P. C.; BILICH, M. R. **Relações pedomorfogeológicas nas chapadas elevadas do Distrito Federal**. Revista Brasileira Ciência do Solo. v.33, n.5, p.1373 - 1383, 2009.
- BAUER, L. A. F. NORONHA, M. A. A. FALCÃO BAUER, R. J. **Uso de aditivos no concreto**. Materiais de Construção. Vol. 1. 5 ed.35-63 p. 2012.
- BRAGA, P. F. A.; COUTO, H. J. B. **Ensaio de classificação granulométrica por meio de cicloclassificadores**. Tratamento de Minérios: Práticas laboratoriais, p. 75-100, 2007.
- CAMPANHA, A. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Viçosa. 106 f. Viçosa. 2011.
- CARRISSO, R. C. C.; CORREIA, J. C. **Classificação e peneiramento**. Tratamento de Minérios, v. 4, p. 197-238, 2004.
- CARVALHO, M.A.; MELLO, I.S.; SILVA, R.A.R. ; FERREIRA, J.N. ; COGO, J.M. ; GUERRA, D.J.L. **Caracterização geoquímica de argila do grupo serra da mesa estado de Tocantins**. Universidade Federal do Mato Grosso. 2009.
- CHAVES, L. F. M. **Estudo da adição de resíduo proveniente da extração de minério de ferro em argilas do Rio Grande do Norte**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 170 f. Natal. 2009.
- CHUNG, F. H. **Quantitative interpretation of X-ray diffraction patterns of mixtures. I. Matrix flushing method for quantitative multicomponent analysis**. Journal of Applied Crystallographic. v.7, p.519-525. 1974.
- CULLITY, B. D. Elements of X-ray diffraction. 1978.



CULLITY, B.D.; STOCK, S.R. **Elements of X-Ray Diffraction**. 3ª ed., Foxboro, Prentice Hall, 664 p. 2001.

DIAS, E. G. C. S. **Avaliação de impacto ambiental de projetos de mineração no estado de São Paulo: a etapa de acompanhamento**. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) Universidade de São Paulo, 2001.

DUARTE, L. C.; JUCHEM, P. L.; PULZ, G. M.; BRUM, T. M. M.; CHODUR, N.; LICCARDO, A. FISCHER, A. C.; ACAUAN, R. B. I. **Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no Estudo de Gemas: exemplos brasileiros**. Pesquisas em Geociências ISSN 1518-2398. 30(2), pp. 3 - 15. 2003.

FARIAS, C. E. G. **Mineração e meio ambiente no Brasil. Relatório para o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE)**. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), 2002.

FIGUEIREDO, M.M. (2007). **Estudo de metodologias alternativas de disposição de rejeitos para a mineração Casa de Pedra – Congonhas/MG**. Dissertação de Mestrado. Escola de Minas, Núcleo de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 100 p. 2007.

FONTES, W. C.; PEREIRA, A. C. P; CHIBLI, P. A; BASTOS, L. A. C; BRIGOLINI, G. J; PEIXOTO, R. A. F. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como agregado reciclado para argamassa**. X simpósio brasileiro das tecnologias das argamassas. Fortaleza. 2013.

GOBBO, L. A. **Aplicação da difração de raios X e método de Rietveld no estudo de cimento Portland**. 273f. Dissertação (Doutorado) - Recursos Minerais e Hidrogeologia, USP, São Paulo, 2009.

GOES, M. A. C.; LUZ, A. B.; POSSA, M. V. C. **Amostragem**. Tratamento de Minérios, v. 5, p. 23-56, 2010.

HACHA, R. R. **Caracterização mineralógica do minério de ouro do Rio Paracatu Mineração (RPM), visando a determinação de minerais portadores de titânio**. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 118 f. Rio

de Janeiro. 2010. Disponível em:< [http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/16974/16974\\_1.PDF](http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/16974/16974_1.PDF)> Acesso em: 11 de julho de 2013.

**IBAMA Laudo técnico preliminar.** p. 1-25, Brasília. 2015.

**IBRAM In**Informações sobre a economia brasileira 2015. p. 1-38, Mariana/MG. 2015.

**ICDD International Center for Diffraction Data, Powder Diffraction File,** Alphabetical Indexes. p. 1-52, Pensilvânia. 2003.

JENKINS, R. **Instrumentation.** In: **Modern Powder Diffraction. Mineralogical Society of America.** Washington, D.C., Cap.2, p.19-43. (Reviews in Mineralogy, v.20). 1989.

JESUS, C. A. G. **Ferro. Departamento Nacional de Produção Mineral – MG, 2015.**

KAHN, H. **Difração de raios-x.** 2006.

LIMA, L.M.K..**Retroanálise da formação de um depósito de rejeitos finos de mineração construído pelo método subaéreo.** Dissertação de Mestrado, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 125 p.; 2006.

LOZANO, F. A. E. **Seleção de locais para barragens de rejeitos usando método de análise hierárquica.** Dissertação de Mestrado, Universidade do São Paulo, São Paulo, 2006.

MALVERN, Instruments Limited, A Basic Guide to Particle Characterization. 2012,

MANSUR, H. S. **Técnicas de Caracterização de Materiais.** 2013. Disponível em: <<http://www.biomaterial.com.br/capitulo7part01.pdf>>. Acesso em: 29 maio de 2013.

MEND. **Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials.** MEND Report 1.20.1, ver 0. 2009.

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

MOTTA, H. P. **Comportamento de um rejeito de traansiçãoem centrífuga geotécnica. .** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do , Rio de Janeiro, 2008.

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

NASCIMENTO, V. F. **Técnicas analíticas nucleares de fluorescência de raios X por dispersão de energia (ED-XRF) e por reflexão total (TXRF)**. Dept<sup>o</sup> de Ciências Exatas; 1999.

NEUMANN, R.; SCHNEIDER, C. L.; ALCOVER-NETO, A. **Caracterização Tecnológica de Minérios**. Tratamento de Minérios, v. 4, p. 55-112, 2004.

NOCITI, D. M. **Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabricação de cerâmicas vermelhas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica, Guaratinguetá, SP, Universidade Estadual Paulista, 111p, 2011.

PADILHA, A, F., AMBRÓSIO, F, F. **Técnicas de análise microestrutural**. p. 45-46. 2004.

PAIVA-SANTOS, C. O. **Aplicações do Método de Rietveld**. 2009. Disponível em: <http://labcacc.iq.unesp.br/publicações>. Maio/2009.

PASCOAL, C.; MACHADO R.; PANDOLFELLI, V.C. **Determinação de fase vítrea em bauxitas refratárias**. Universidade Federal de S. Carlos, Pennsylvania: Harrisburg, Department of Environmental Protection, p. 1-1 to 1-22. 2002.

PASSOS, N. C. S. T. **Barragem de rejeito: Avaliação dos parâmetros geotécnicos de rejeitos de minério de ferro utilizando ensaios de campo – Um estudo de caso**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

PEREIRA, E, L. **Estudo do Potencial de liquefação de resíduos de minério de ferro sob carregamento estático**. Dissertação. Ouro Preto. 2005.

PINHEIRO, R. M.. **Desenvolvimento de pavimento argiloso extrudado: adoquim cerâmico**. 148p. Tese (Doutorado), Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, Campos dos Goytacazes/RJ. 2012.

PIPAL, A.S., KULSHRESTHA A., TANEJA, A. **Characterization and morphological analysis of airborne PM2.5 and PM10**. Agra located in north central India. Atmospheric Environment. V. 45, p. 3621-3630, 2011.

SANTOS. C. M. F. **Quantificação de fases argilominerais ebm matérias primas cerâmicas pelo método de rietveld**. Tese de pós graduação. Florianópolis. 2013.

SANTOS, I. J.. **Estudo da produção de concentrados de minério de ferro a partir dos rejeitos da barragem de Germano**. Dissertação de Mestrado, UFOP, Ouro Preto, MG. 2003.

SILVA, A. P. M.; VIANA, J. P.; CAVALCANTE, A. L. B. C. **Resíduos sólidos da atividade de mineração. Caderno de Diagnostico.** 41p, 2011

SILVA, G. P.; FONTES, M. P. F.; COSTA, L. M.; BARROS, N. F. **Caracterização química, física e mineralógica de estéreis e rejeito da mineração de ferro da Mina da Alegria, Mariana-MG.** Revista Pesquisa Agropecuária Tropical p 45-52. 2006.

STEFANAKI. **Eleni-Chrysanthi. Electron Microscopy: The Basics.** Physics of Advanced Materials Winter School . 2008.

VARELA, M. L.; NASCIMENTO, R. M. DO; MARTINELLI, A. E.; HOTZA, D.; MELO, D. M. A.; MELO, M. A. F. **Otimization of rational mineralogical analysis of ceramics.** *Cerâmica*,v.51, n.320, p. 388- 392, 2005

VICK, S. G. **Planning, design and analysois of tailings dams.** pJohn Wiley & Sons, 1983.

VICTORINO, M. M. **Barragem de rejeito: Caracterização de parâmetros geotécnicos visando análises de estabilidade – Um estudo de caso.** Projeto de graduação, Universidade Federal do Paraná, 2007.

WILLS, B. A. **Mineral Processing Technology.** An Introduction of the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. 4ª Ed. Pergamon Press. Oxford, 785p. 1988.

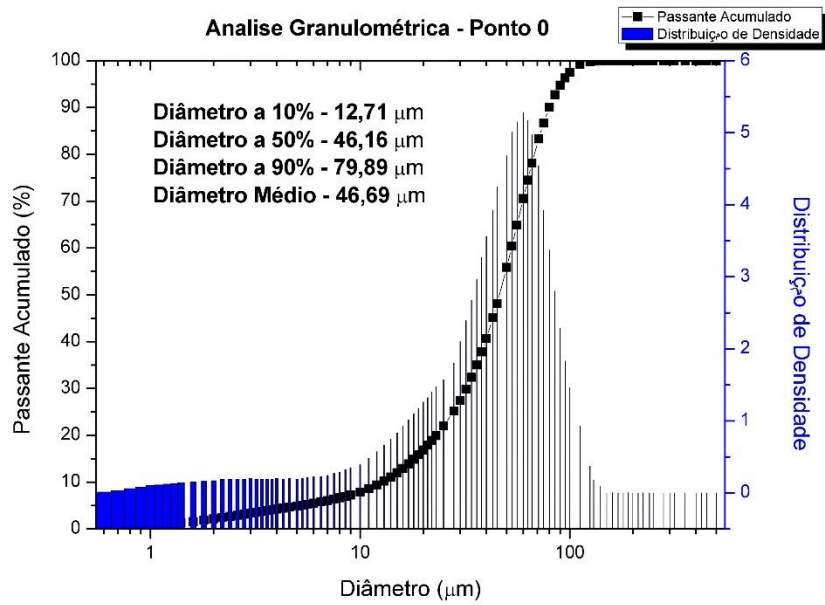
WOLFF, A. P. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale.** Dissertação. (Mestrado em Engenharia Mineral). Universidade Federal de Ouro Preto. 107 f. Ouro Preto. 2009.

ZHAO, S. FAN, J. SUN, W. **Construction and Building Materials.**

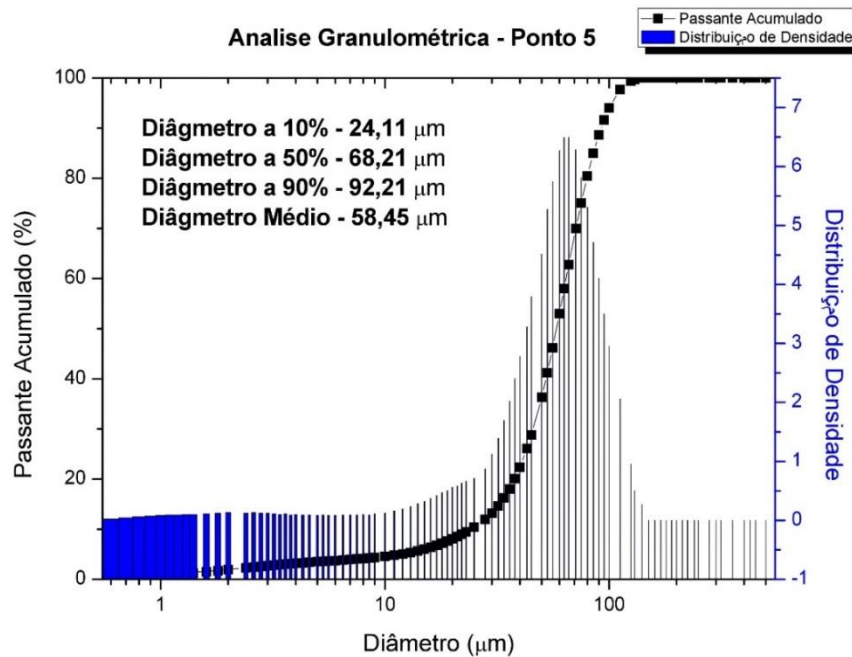
**Construction and Building Materials.** Vol.50. 540–548. 2014. Disponível em:

<[www.elsevier.com/locate/conbuildmat](http://www.elsevier.com/locate/conbuildmat)> Acessado em 04/072014.

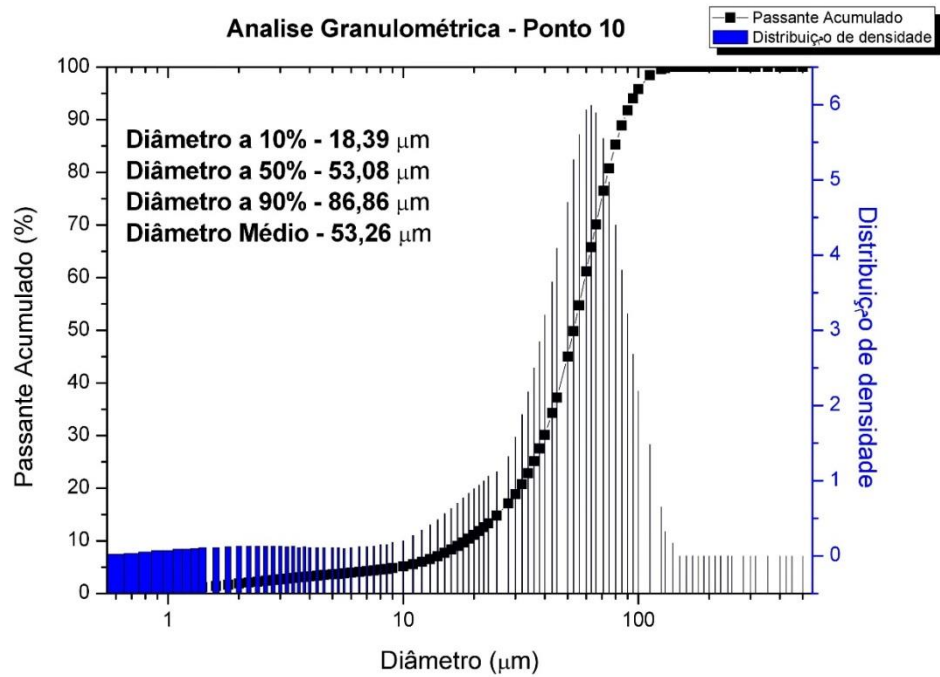
APÊNDICE A – Curvas granulométricas obtidas pelo granulômetro à laser do Ponto 0 ao 40



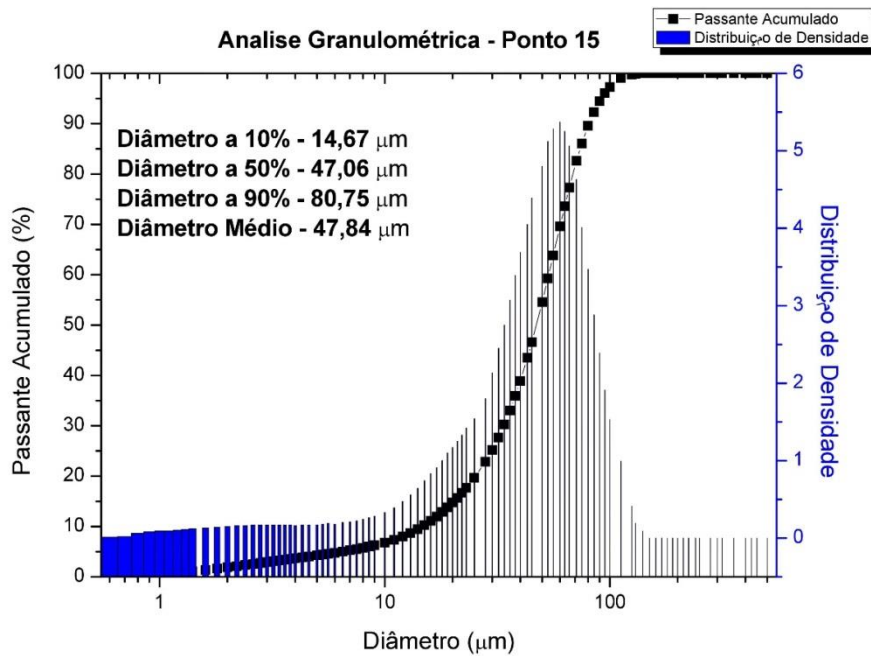
Curva granulométrica do Ponto 0



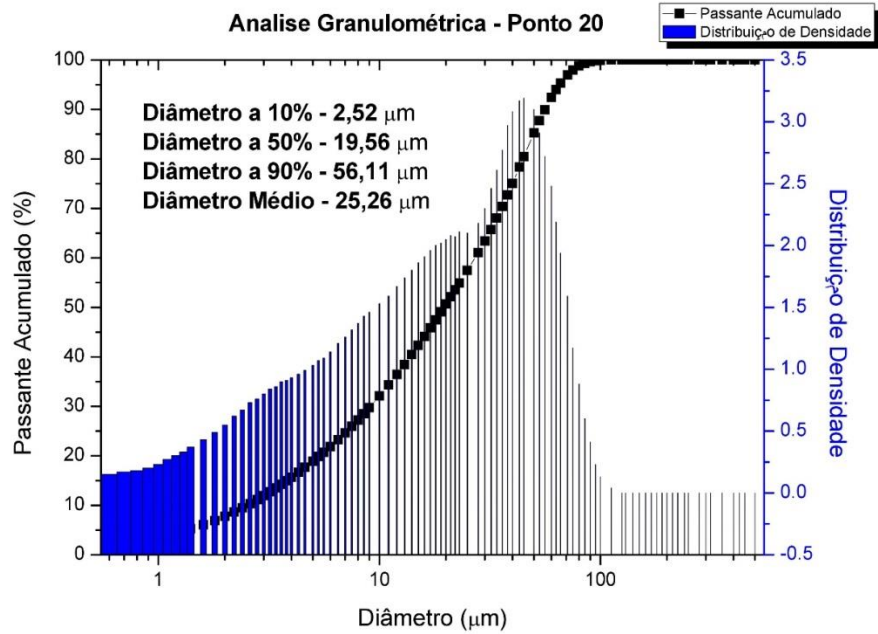
Curva granulométrica do Ponto 5



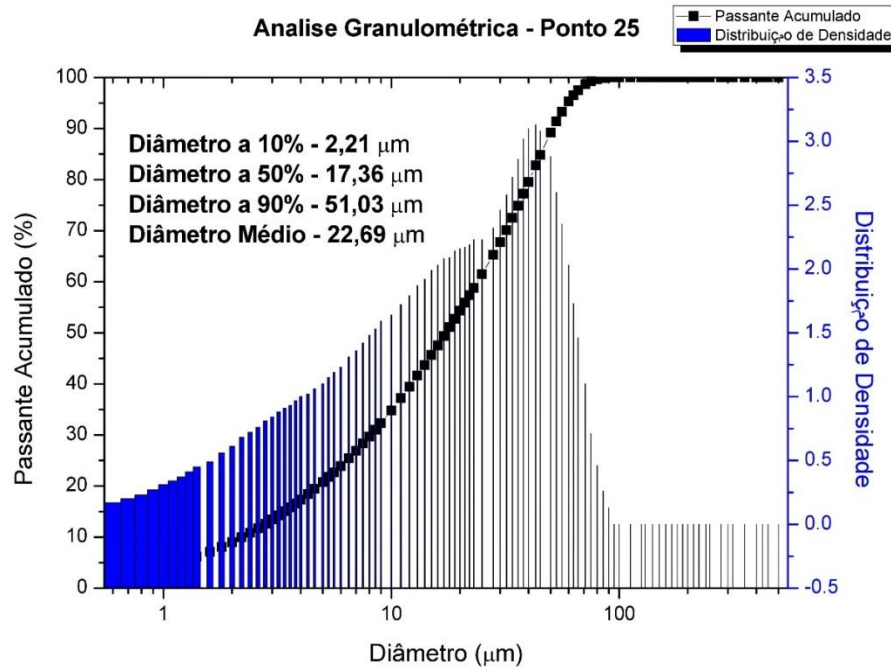
Curva granulométrica do Ponto 10



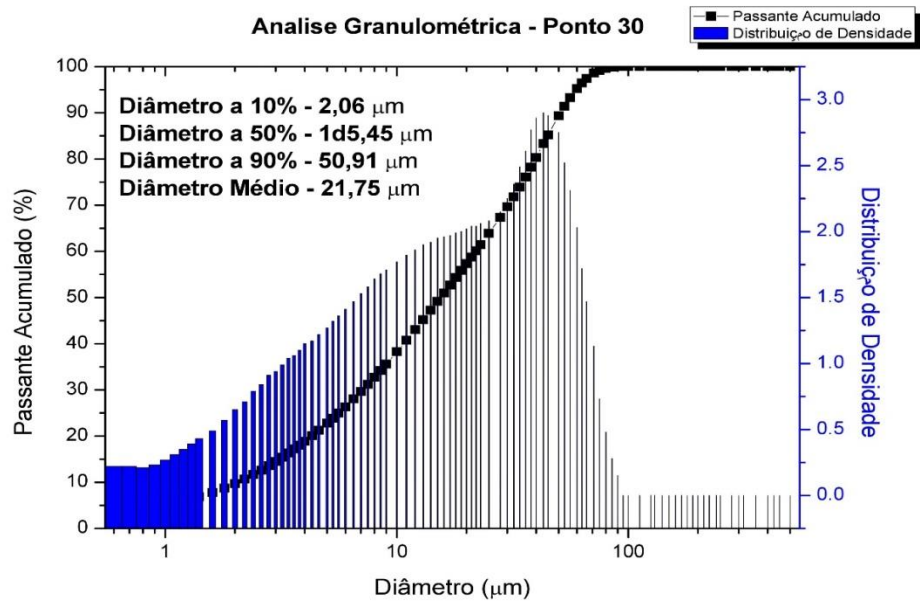
Curva granulométrica do Ponto 15



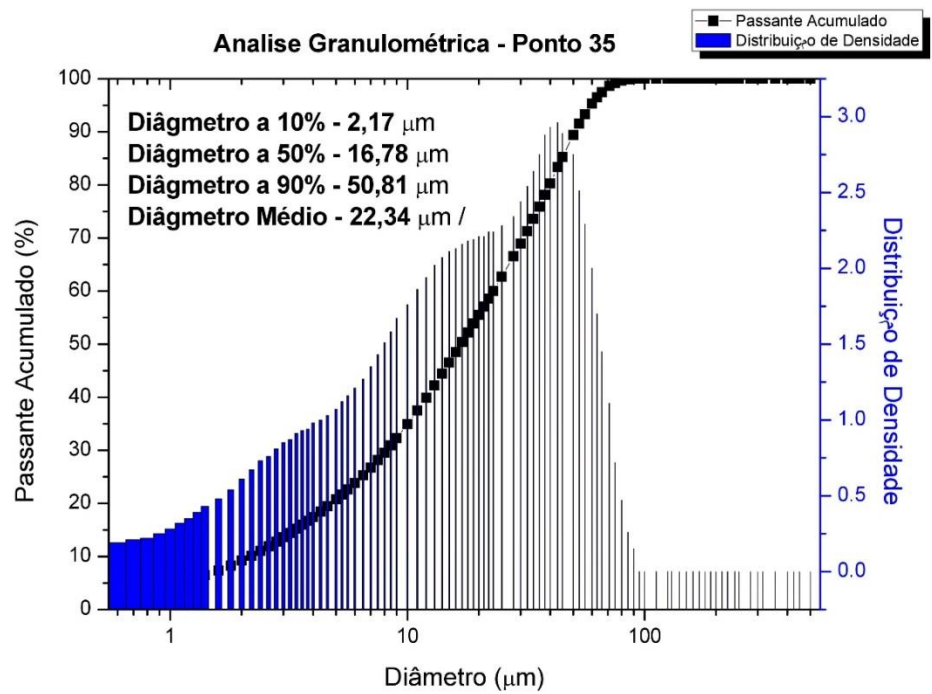
Curva granulométrica do Ponto 20



Curva granulométrica do Ponto 25

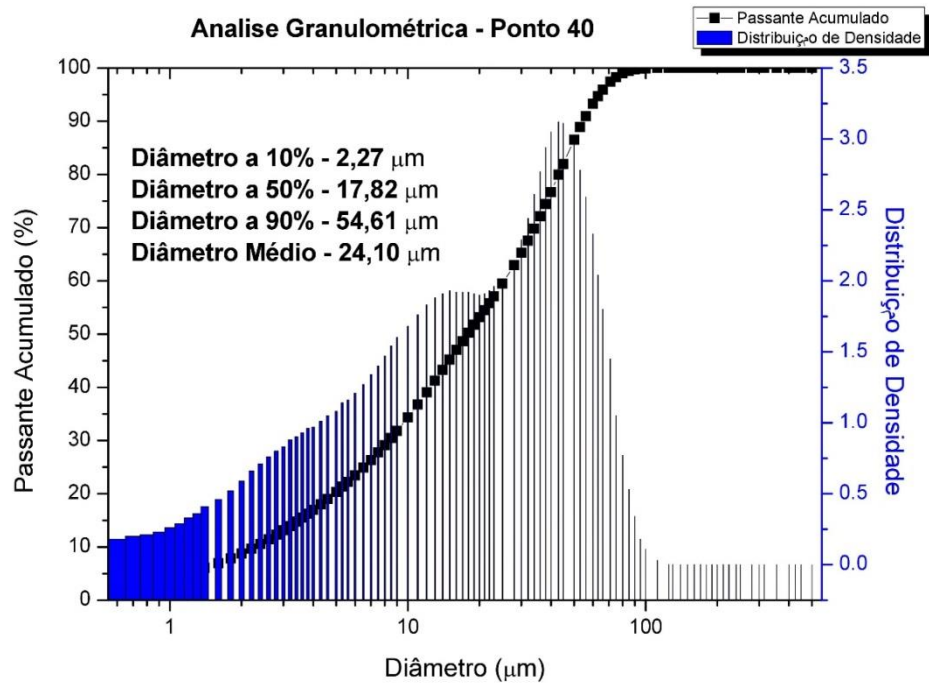


Curva granulométrica do Ponto 30



Curva granulométrica do Ponto 35





Curva granulométrica do Ponto 40