

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DA BIODISPONIBILIDADE DE METAIS EM  
REJEITOS DE MINERAÇÃO EMPREGANDO EXTRAÇÕES  
SIMPLES**

**MARINA DE MENDONÇA PEREIRA**

**ORIENTADOR: LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc**

**COORIENTADORA: EVELÍN RODRIGUEZ SOSA, DSc**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL**

**BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO / 2016**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DA BIODISPONIBILIDADE DE METAIS EM  
REJEITOS DE MINERAÇÃO EMPREGANDO EXTRAÇÕES  
SIMPLES**

**MARINA DE MENDONÇA PEREIRA**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.**

**APROVADA POR:**

---

**LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc (UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, DSc (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**CLÁUDIA MÁRCIA COUTINHO GURJÃO, DSc (UnB)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**BRASÍLIA/DF, 13 de dezembro de 2016.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

PEREIRA, MARINA DE MENDONÇA

Avaliação da Biodisponibilidade de Metais em Rejeitos de Mineração  
Empregando Extrações Simples

xii, 59p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2016)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Mobilidade de Metais	2. Rejeitos de Mineração
3. Caracterização de Rejeitos	4. Biodisponibilidade
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PEREIRA, M.M. (2016). Avaliação da Biodisponibilidade de Metais em Rejeitos de Mineração Empregando Extrações Simples. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 59p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Marina de Mendonça Pereira

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Avaliação da Biodisponibilidade de Metais em Rejeitos de Mineração Empregando Extrações Simples. Monografia de Projeto Final.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2016

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Marina de Mendonça Pereira  
Rua 18 Norte, Lote 07, Apt 705, Ed. Riviera, Águas Claras, DF  
CEP: 71910-720

## AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado forças para vencer as batalhas mais difíceis no decorrer do curso.

Aos meus pais Alan e Ivone e a minha irmã Érica por todo amor e incentivo em todas as etapas da minha vida.

A minha avó Maria Abadia por ter me acolhido durante o período que estava longe da minha família e por sempre ter acreditado que eu venceria.

A minha madrinha Jane, ao meu tio Lucas e as minhas primas Sarah e Samara por terem me acolhido na casa deles e me tratado com tanto carinho.

À Universidade de Brasília e ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental pela oportunidade de realizar este curso.

Ao meu orientador Prof. Luís Fernando pela ajuda e as valiosas sugestões a este trabalho e principalmente, pelo carinho e apoio emocional. Por ser orientador, professor e além de tudo um grande amigo.

A minha coorientadora Évelin por toda ajuda, carinho e companheirismo na reta final do curso.

Ao Laboratório de Geotecnia pelos recursos físicos concedidos, especialmente ao Simon, técnico do laboratório, pela ajuda na realização dos ensaios e o pelo aprendizado adquirido.

Ao Laboratório Análises de Águas pelos recursos físicos concedidos e às técnicas (Sarah, Manuela, Carlas e Marcilene) pela paciência e apoio na realização dos ensaios.

Ao Laboratório de Geociências pelos recursos físicos concedidos e ao técnico Rafael pela realização do ensaio de DRX.

Ao Laboratório de Química Analítica, em especial a Gabriela pela realização do ensaio de FRX.

Ao Laboratório de Geoquímica pela realização do ensaio de EAA, principalmente ao Myller pela ajuda, paciência e ensinamentos.

À Banca Avaliadora do Projeto Final 1 pelos conselhos, compreensão e pelo cuidado que tiveram comigo.

A Mariana pela elaboração do mapa de localização das amostras e por todo apoio e conselhos.

Aos meus amigos do curso e pessoas mais próximas pelo carinho, companheirismo, amizade e força: Thainy, Dandara, Eliza, Ana Paula, Pedro Gabriel, Clarice, Tamara, Mariana, Tadeu, Arthur, Wester, sentirei muito a falta da convivência diária com vocês.

Aos meus professores do ENC e meus professores das disciplinas dos outros departamentos da Universidade de Brasília.

E a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento desta monografia meu imenso

Muito obrigada!

Somos todos responsáveis pelo que nos comprometemos fazer. Soluções são necessárias, pedem medidas extremas e é dever do engenheiro propor e executá-las com respeito e eficácia.

Marina de Mendonça Pereira

## RESUMO

A mineração possui grande importância para o desenvolvimento econômico. No entanto, vários são os impactos ambientais causados por esta atividade, como a contaminação de solos e águas. Uma das causas dos impactos é devido a composição dos rejeitos gerados, que podem conter metais pesados. Algumas metodologias utilizadas são incapazes de descrever propriedades ligadas às soluções para esses impactos, tais como a mobilidade, a biodisponibilidade e o comportamento dos metais. Por isso, tem-se buscado formas de determinar essas propriedades. Diante desse contexto, a presente pesquisa visou apresentar um conjunto de análises executadas para a caracterização do rejeito da mina de San Fernando, em Cuba e do rejeito de Paracatu, em Minas Gerais. Foram feitas análises quanto a caracterização física, geoquímica, química e mineralógica dos rejeitos. Na análise granulométrica, os rejeitos apresentaram maior predominância de partículas de tamanho da fração areia fina e silte. Quanto a distribuição de tamanhos de grãos, o rejeito de San Fernando foi caracterizado como graduado e o de Paracatu como mais uniforme. A massa específica dos grãos das amostras foram próximas e o valor é justificado pela presença de ferro, evidenciado na análise de Fluorescência de raios X junto a presença de outros elementos como titânio e silício. Os resultados de pH para as amostras de San Fernando foram ácidos e para amostra de Paracatu ácidos próximos de alcalino. A condutividade elétrica detectada para as duas amostras foram justificadas pela presença dos próprios minerais constituintes, principalmente sulfetos. Essas duas análises junto a Fluorescência de raios X compuseram a caracterização química. Quanto à caracterização mineralógica para o rejeito de San Fernando foi detectada a presença de silicatos e sulfetos, já para a amostra de Paracatu foi detectada a presença de sulfetos, óxidos, carbonatos e silicatos. Com relação a caracterização geoquímica, foi extraído das duas amostras, por meio de extrações simples, os metais cobre e zinco e foram quantificados por Absorção Atômica. O Rejeito de Paracatu não apresentou concentrações significativas dos metais analisados, estando estes valores abaixo do Limite de Quantificação do aparelho. A amostra de San Fernando apresentou valores de zinco em maiores concentrações do que o cobre.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Principais processos envolvidos na atividade de mineração (Sosa, 2016).....	6
Figura 2.2. Método Alteamto de montante (VICK, 1983; IPEA, 2012) .....	8
Figura 2.3. Método Alteamto de jusante (VICK, 1983; IPEA, 2012) .....	9
Figura 2.4. Método alteamto de linha de centro (VICK, 1983; IPEA, 2012).....	9
Figura 2.5. Diferentes graduações de solo observadas por meio da análise granulométrica (MARQUES & SILVA, 2013) .....	14
Figura 2.6. Biodisponibilidade de metais (Modificado - LANEIRO, 2012).....	19
Figura 3.1. Localização da origem das amostras .....	25
Figura 3.2. Porções de área da Mina de San Fernando após o fim da zona de concentração (GALLARDO, 2008) .....	26
Figura 3.3. Área de expansão da Mina de Paracatu (Kinross, 2016) .....	28
Figura 3.4. Instalações da Mina de Paracatu (Kinross, 2016) .....	28
Figura 4.1. Amostras de rejeito estudadas antes da separação .....	29
Figura 4.2. Metodologia aplicada à pesquisa .....	30
Figura 4.3. Granulômetro a laser. Marca MICROTRAC Modelo S3500 (METOGO, 2013) .....	31
Figura 4.4. Pentapicnômetro Modelo PENTAPYC 5200E (METOGO, 2013) .....	32
Figura 4.5. Equipamento para determinação da massa específica dos grãos .....	32
Figura 4.6. Procedimento utilizado para determinação de pH e condutividade elétrica das amostras de rejeito .....	33
Figura 4.7. Caracterização de pH e condutividade elétrica .....	33
Figura 4.8. Equipamento utilizado nas extrações químicas.....	35
Figura 4.9. Ensaio de Espectrofotometria de Absorção Atômica.....	36
Figura 4.10. Equipamento de análise de DRX, Marca RIGAKU (METOGO, 2013).....	36
Figura 5.1. Curvas granulométricas do rejeito de SF a partir do peneiramento e granulômetro a laser .....	37
Figura 5.2. Curva granulométrica do rejeito de Paracatu a partir do peneiramento.....	38
Figura 5.3. Gráfico de Granulometria x Massa específica dos grãos das frações amostra de San Fernando .....	41
Figura 5.4. Análise de DRX do rejeito de San Fernando .....	46
Figura 5.5. Análise de DRX do rejeito de Paracatu.....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Fontes naturais e antrópicas de alguns metais pesados no ambiente (Modificado - MALAVOLTA, 1994 <i>apud</i> DOMINGUES, 2009) .....	4
Tabela 2.2. Produção anual de minérios no Brasil em 2009 (Modificado - DNPM, 2010) ..	7
Tabela 2.3. Limites de frações indicados pela ASTM (Modificado - PINTO, 2006) .....	13
Tabela 2.4. Limites de frações indicados pela ABNT .....	13
Tabela 2.5. Densidades calculadas de alguns minerais (Modificado - MINDAD, 2007 <i>apud</i> D'AGOSTINHO, 2008) .....	16
Tabela 4.1. Condicionantes para o ensaio de extração química para 2,5 g de amostra.....	34
Tabela 5.1. Porcentagem de tamanhos de partículas do rejeitos .....	39
Tabela 5.2. Índices granulométricos de San Fernando e Paracatu .....	40
Tabela 5.3. Massa específica dos grãos dos rejeitos de San Fernando e Paracatu .....	40
Tabela 5.4. Análises de pH e condutividade elétrica dos rejeitos de San Fernando e Paracatu .....	42
Tabela 5.5. Análise de FRX dos rejeitos de San Fernando e Paracatu .....	43
Tabela 5.6. Resultados de EAA da amostra de San Fernando .....	44
Tabela 5.7. Resultados de EAA da amostra de Paracatu .....	44
Tabela 5.8. pH final do extratos químicos .....	45
Tabela 5.9. Características dos minerais presentes na amostra de San Fernando segundo a DRX (Modificado - MACHADO <i>et. al.</i> , 2016) .....	46
Tabela 5.10. Características dos minerais presentes na amostra de Paracatu segundo a DRX (Modificado - MACHADO <i>et al.</i> , 2016) .....	47
Tabela A1. Planilhas das curvas granulométricas da amostra de Paracatu (peneiramento) e da amostra de San Fernando (granulômetro a laser). .....	57
Tabela A2. Teste estatístico aplicado ao resultado de EAA de SF .....	59

## LISTA DE ABREVIACOES, NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

### SÍMBOLO

%	Porcentagem
°	Grau
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação de Normas Técnicas Brasileiras
Ac	Actínio
Al	Alumínio
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
Ba	Bário
C	<i>Celsius</i>
Ca	Cálcio
CC	Coefficiente de curvatura
Cd	Cádmio
CE	Condutividade elétrica
cm	centímetro
CNU	Coefficiente de Não Uniformidade
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
Cr	Cromo
CTC	Capacidade de Troca Catinica
Cu	Cobre
CV	Coefficiente de variação
D <sub>10</sub>	Diâmetro efetivo
DAM	Drenagem ácida de Mina
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	Difratometria de raios X
EAA	Espectrofotometria de Absorção Atômica
EDTA	cido etilenodiamino tetra-acético
ENC	Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
Fe	Ferro
FRX	Fluorescência de raios X
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
IC <sub>50%</sub>	Intervalo de confiança de 50%

IC <sub>90%</sub>	Intervalo de confiança de 90%
IG	Instituto de Geociências
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IQ	Instituto de Química
IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>
K	Potássio
LQ	Limite de Quantificação
Mg	Magnésio
mm	milímetro
Mn	Manganês
n	Número de observações
N <sub>2</sub>	Gás nitrogênio
NBR	Normas Técnicas
ND	Não detectado
Ni	Níquel
P	Fósforo
Pb	Chumbo
pH	Potencial hidrogeniônico
ppm	Parte por milhão
PTARH	Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos
ROM	<i>Run of mine</i>
Ru	Rutênio
S	Enxofre
Si	Silício
Sr	Estrôncio
t	Tonelada
Ti	Titânio
UnB	Universidade de Brasília
USEPA	<i>US Environmental Protection Agency</i>
Zn	Zinco
Zr	Zircônio
µm	micrômetro

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. OBJETIVOS .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1.1. OBJETIVOS GERAIS .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>2</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. DISPONIBILIDADE DE METAIS EM SOLOS.....</b>	<b>3</b>
<b>2.2. REJEITOS DE MINERAÇÃO .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2.1. FORMAS DE DISPOSIÇÃO DOS REJEITOS DE MINERAÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>2.2.2. IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS PELA MINERAÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3. CARACTERIZAÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2.3.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA .....</b>	<b>12</b>
<b>2.3.1.1 GRANULOMETRIA .....</b>	<b>12</b>
<b>2.3.1.2. MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS .....</b>	<b>15</b>
<b>2.4. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E GEOQUÍMICA.....</b>	<b>16</b>
<b>2.4.1 pH E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA.....</b>	<b>16</b>
<b>2.4.2. MOBILIDADE, BIODISPONIBILIDADE E EXTRAÇÕES QUÍMICAS .....</b>	<b>17</b>
<b>2.4.3. COMPOSIÇÃO QUÍMICA .....</b>	<b>22</b>
<b>2.5. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....</b>	<b>23</b>
<b>3. ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1. ORIGEM DAS AMOSTRAS DE REJEITOS .....</b>	<b>25</b>
<b>3.2. MINA DE SAN FERNANDO .....</b>	<b>26</b>
<b>3.3. MINA DE PARACATU .....</b>	<b>27</b>
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>29</b>
<b>4.1. AMOSTRAS DE REJEITOS .....</b>	<b>29</b>
<b>4.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA .....</b>	<b>30</b>
<b>4.2.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....</b>	<b>30</b>

4.2.1.1. GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO .....	30
4.2.1.2. GRANULOMETRIA POR DISPERSÃO A LASER.....	31
4.2.2. MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS .....	31
4.3. CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA E QUÍMICA.....	32
4.3.1. pH E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA.....	33
4.3.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA .....	34
4.3.3. EXTRAÇÕES QUÍMICAS .....	34
4.3.3.1. EXTRAÇÕES SIMPLES COM MgCl <sub>2</sub> E EDTA .....	34
4.3.3.2. ESPECTROFOTOMETRIA DE ABSORÇÃO ATÔMICA .....	35
4.4. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
5.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA .....	37
5.1.1. GRANULOMETRIA .....	37
5.1.2. MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS .....	40
5.2. CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA E QUÍMICA.....	41
5.2.1. pH E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA.....	41
5.2.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA .....	42
5.2.2.1. FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X .....	42
5.2.2.2. EXTRAÇÕES QUÍMICAS E ESPECTROFOTOMETRIA DE ABSORÇÃO ATÔMICA .....	43
5.3. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....	45
5.3.1. DIFRAÇÃO DE RAIOS X .....	45
6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	51
ANEXOS .....	57

# 1. INTRODUÇÃO

A mineração é uma das atividades essenciais para o desenvolvimento econômico, tudo que se relaciona com qualidade de vida, bem-estar e necessidades humanas depende desta atividade. Apesar de ser tão importante, a mineração tem o lado negativo ligado ao potencial de degradar o meio físico local, por gerar grandes quantidades de resíduos e demandar uma área territorial considerável para alocá-los. Estes resíduos são divididos em estéreis que são resultantes da lavra e rejeitos resultantes do beneficiamento dos minérios.

Outra preocupação ocorre devido a composição, desses resíduos, principalmente dos rejeitos, dependendo do tipo de processo envolvido no beneficiamento, além dos elementos oriundos dos próprios minerais, substâncias químicas tóxicas podem estar contidas e gerar efeitos de poluição nos solos e águas superficiais e subterrâneas. Dentre elas, os metais pesados que além dos que se encontram inseridos naturalmente (em equilíbrio com o meio ou não) a depender do tipo de extração e espécie a ser beneficiada. Esses metais em contato com solos e com os corpos hídricos podem trazer danos irreparáveis devido a sua periculosidade e toxicidade.

Muitos métodos têm sido utilizados para a detecção de contaminantes em solos, sedimentos e rejeitos, um deles é determinação de metais empregando como referência os ensaios de lixiviação e solubilização segundo as normas de classificação de resíduos sólidos. Porém, esta forma de análise não estabelece os parâmetros para comparação de poluentes para rejeitos de mineração. Além do mais, a caracterização total dos metais, difundida por esses ensaios não diz sobre a disponibilidade dos metais, muito menos sobre o comportamento desses metais no meio ambiente.

Surge, então, a necessidade de saber o comportamento, a mobilidade, a disponibilidade e a biodisponibilidade desses elementos no ambiente, propriedades geoquímicas que poderão auxiliar em soluções ambientais e preventivas quanto ao risco de acidentes, contaminação de seres vivos e possível reaproveitamento desse material. Faz-se necessário adotar metodologias que descrevam essas características dos metais presentes nos resíduos, com a finalidade de utilizar os resultados para a correção e/ou prevenção dos efeitos negativos deixados por estes elementos.

## **1.1. OBJETIVOS**

### **1.1.1. OBJETIVOS GERAIS**

A pesquisa tem como objetivo principal a determinação da biodisponibilidade de Cu e Zn em rejeitos oriundos de barragens de rejeito da mineração de zinco e cobre de Cuba e de rejeito da mineração de ouro do Brasil.

### **1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Têm-se como objetivos específicos:

- Caracterizar as amostras de rejeitos quanto as características físicas, químicas, geoquímicas e mineralógicas;
- Realizar extrações simples nos rejeitos por meio da extração utilizada na fase trocável do método aplicado por Tessier *et al* (1979);
- Realizar extrações simples nos rejeitos utilizando como reagente o EDTA;
- Recomendar sugestões para pesquisas futuras de modo a orientar o estabelecimento de metodologia de caracterização mais criteriosa de rejeitos de mineração com fins de reaproveitamento.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. DISPONIBILIDADE DE METAIS EM SOLOS**

Kummer (2008) define o solo como um sistema aberto, natural e heterogêneo que permite a troca de energia e material com a atmosfera, biosfera e hidrosfera. Além de suas características variarem no tempo e no espaço devido às constantes transformações químicas, físicas e biológicas, o solo é o local por onde permeiam as águas pluviais que fazem parte do ciclo hidrológico na forma de rios, lagos e aquíferos.

Os solos possuem particularidades importantes quando comparadas a outros componentes da biosfera, como apresentar-se como dreno na passagem de contaminantes e como tampão natural no controle da transferência de elementos químicos para a atmosfera, hidrosfera e biota. Conforme Scolmeister (1999), por causa destas e outras propriedades, o solo tem sido alvo de descarte de vários materiais, inclusive os que contém metais pesados.

Ao longo das últimas décadas, o termo "metais pesados" tem sido usado em várias publicações e nas legislações relacionadas com os riscos químicos e à utilização segura das substâncias químicas. É frequentemente usado também como grupo de metais e semimetais (metaloides) associados com a contaminação e o potencial de toxicidade ou ecotoxicidade. Muitas vezes, as normas legais ao listar os metais pesados, não especificam quais deles estão sendo avaliados no estudo. Estas listas podem diferir de um conjunto de regras para outros estudos, ou podem ser usadas de forma inconsistente, o que resulta em uma indefinição sobre o significado do termo (IUPAC, 2002).

Existe também uma tendência a assumir que todos os chamados "metais pesados" tem propriedades altamente tóxicas ou ecotóxicas, o que prejudica imediatamente qualquer discussão sobre o uso desses elementos, muitas vezes sem qualquer fundamento real. Para definir metais pesados são levadas em conta propriedades químicas além do potencial de toxicidade e contaminação, como densidade, peso atômico, número atômico e também a concentração do elemento no meio (IUPAC, 2002).

A expressão semimetais refere-se ao grupo dos elementos que apesar de apresentar comportamento e propriedades físicas semelhantes aos metais, não se enquadram nesta classe. Já a expressão metais-traço é referente a metais encontrados em baixa concentração,

em frações de massa de ppm ainda menores, de alguma origem especificada, como por exemplo, solo, planta, tecido ou águas subterrâneas (IUPAC, 2002).

As duas principais fontes de metais no ambiente são a forma natural (geológico, biológico) e a antropogênica. De forma natural, os metais pesados podem ser encontrados nos solos a partir de processos de formação do próprio solo e suas concentrações dependem da origem de formação do solo e das condições físico-químicas do ambiente.

De forma antropogênica, estes elementos são adicionados ao meio ambiente através das diversas atividades humanas. A inserção pode ser pelo descarte de materiais ou até mesmo por vazamentos de substâncias químicas advindas dessas atividades. Papassiopi *et al.*(1999) salienta que a entrada de metais pesados nos solos pode ser definida como contaminação e é resultado de atividades como a mineração, as operações de fundição e tratamento de metais, as emissões dos veículos, a deposição ou vazamento de resíduos industriais. A Tabela 2.1 apresenta formas naturais e antrópicas que alguns metais pesados podem ocorrer no ambiente.

Tabela 2.1. Fontes naturais e antrópicas de alguns metais pesados no ambiente (Modificado - MALAVOLTA, 1994 *apud* DOMINGUES, 2009)

<b>Elemento</b>	<b>Natural</b>	<b>Antropogênica</b>
<b>Cd</b>	Minérios de Zn e Pb, rochas fosfáticas	Resíduos de mineração, galvanoplastia, indústria de pilhas
<b>Cr</b>	Mineral cromita, solos de serpentina	Galvanoplastia, ligas metálicas, esgoto industrial, produtos anticorrosivos
<b>Cu</b>	Sulfetos, óxidos, carbonatos	Galvanoplastia, ligas metálicas, esgoto doméstico e industrial, resíduos de mineração, defensivos agrícolas
<b>Pb</b>	Mineral galena	Indústrias de bateria, encanamento, carvão, gasolina, pigmentos
<b>Ni</b>	Solos de serpentina	Ligas metálicas, indústrias de bateria, resíduo industrial, produção de óleos vegetais
<b>Zn</b>	Minerais (sulfetos, óxidos, silicatos)	Ligas metálicas, pigmentos, galvanoplastia, resíduo industrial, encanamentos

Em termos da geoquímica ambiental, o valor normal dos elementos no meio físico, chamado de *background*, varia conforme o material, os tipos de influências ambientais, entre outros fatores, porém sem a presença da intervenção humana. São chamadas de anomalias geoquímicas os valores acrescidos ao *background*, estas podem ser significativas e não

significativas. As anomalias não significativas são condicionadas a variações por processos naturais, que não apresentem consequências ambientais, salvo algumas exceções. As anomalias significativas são devido a intervenção humana e podem caracterizar a existência de contaminação ambiental (ROHDE, 2000 *apud* TERRELL, 2007).

Oliveira & Costa (2004) ressaltam que nos últimos anos, o estudo dos metais pesados tem abordado a avaliação dos efeitos da acumulação desses elementos nos organismos nos diferentes ecossistemas, a transferência na cadeia alimentar e os meios alternativos de convivência com os problemas gerados pelos excessos ocorridos.

Pelozato (2011) contesta que no Brasil existem muitos trabalhos com a abordagem ao tema metais nos solos, mas poucos são os trabalhos que apresentam a concentração natural ou valores de referência que possam ser utilizados no monitoramento e quantificação da entrada desses elementos nos solos. Por outro lado, Santos (2011) argumenta que devido a crescente demanda social pela melhoria da qualidade ambiental, alguns estudos foram realizados a fim de estabelecer valores orientadores para a presença de metais nos solos. Esses valores são pré-estabelecidos a partir da presença de substâncias químicas que viabilizam a análise de possível contaminação, estabelecendo diretrizes que possam colaborar com o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas a partir de atividades antrópicas.

A contaminação dos solos por metais pesados pela atividade de mineração está ligada principalmente a grande quantidade de resíduos produzidos e a destinação inadequada desses resíduos. Esses são divididos em duas classes que são estéreis, gerados pela lavra ou extração do minério da jazida, e os rejeitos gerados pelo beneficiamento do minério. A periculosidade desses resíduos dependerá dos tipos de processos envolvidos na mineração, sobretudo das substâncias incorporadas nesses processos que serão liberadas junto aos resíduos.

## **2.2. REJEITOS DE MINERAÇÃO**

Segundo Boscov (2008), rejeitos de mineração são resíduos derivados dos processos de beneficiamento a que são submetidos os minérios. Esses processos têm como finalidade a regularização do tamanho dos fragmentos, a remoção de minerais associados sem valor econômico e o aumento da qualidade, pureza ou teor do produto final. A quantidade de procedimentos vai depender do tipo e da qualidade do minério. Os principais são a britagem (fragmentação), a moagem (pulverização), o peneiramento (classificação) e a concentração

(por densidade, separação magnética, separação eletrostática, ciclonagem, aglomeração, flotação, lavagem, secagem, pirólise, calcinação). Esses procedimentos envolvidos no processo de beneficiamento podem presumir a quantidade e tipo de rejeito a ser gerado. Sosa (2016) apresenta um fluxograma com as principais etapas no processo de mineração (Figura 2.1):

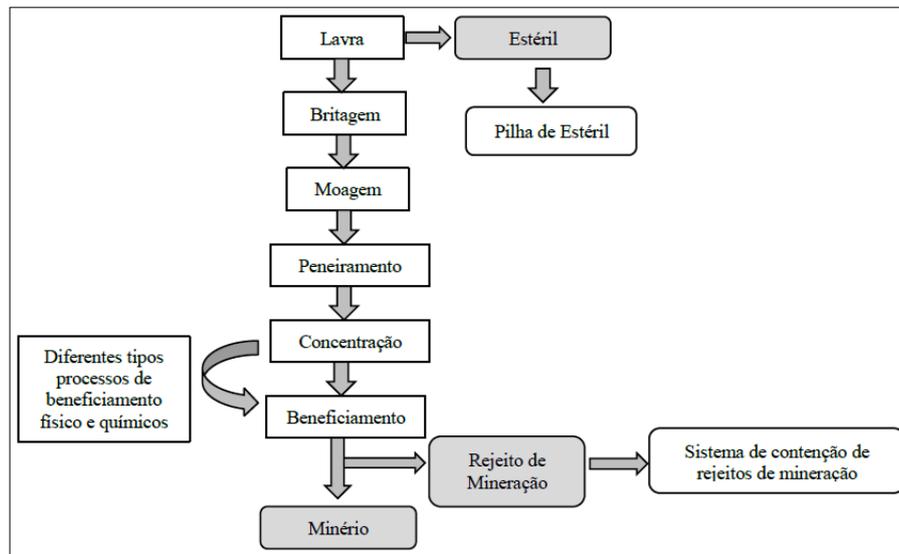


Figura 2.1. Principais processos envolvidos na atividade de mineração (Sosa, 2016)

De acordo com Santos *et al.* (2010), dependendo do tipo de minério e das operações de extração e beneficiamento utilizadas, estes materiais exibem características mineralógicas, geotécnicas e físico-químicas variáveis, podendo se apresentar como rejeitos granulares (com granulometria de areias médias e finas), ou lamas (partículas com a granulometria de siltes e argilas). Na sua composição apresentam partículas de rocha, água e as substâncias químicas envolvidas no processo de beneficiamento. Quanto à distribuição granulométrica, Boscov (2008) apresenta que os rejeitos podem variar desde areias finas a coloides. Existe também as definições de polpa, torta e pasta relacionadas com o teor de água presente no rejeito. Essa percentagem é primordial na escolha da forma de transporte da usina de beneficiamento do metal até a disposição final.

A quantidade de rejeitos gerada depende da espécie de minério extraído, de como este minério se encontra na jazida e a eficiência dos processos na extração e beneficiamento. No Anuário Mineral Brasileiro, segundo DNPM (2010), são apresentadas informações sobre a atividade mineral no Brasil em referência ao ano anterior.

Segundo DNPM (2010), são ainda expressos os conceitos sobre quantidade *ROM*, contido e teor mostrados na Tabela 2.2. *ROM* refere-se à quantidade de minério bruto que foi obtido diretamente da mina, sem passar por qualquer forma de beneficiamento. A expressão "contido" representa a quantidade de metal e/ou mineral de interesse existente na reserva ou nas produções bruta e beneficiada. E "teor" é a razão do contido em relação à massa de minério (*ROM*), esse conceito é utilizado na reserva e na produção bruta ou beneficiada. O conceito destas expressões, principalmente teor, podem orientar para cada espécie de minério, a quantidade média de rejeito gerada, maior que a quantidade média de minério beneficiada.

Tabela 2.2. Produção anual de minérios no Brasil em 2009 (Modificado - DNPM, 2010)

<b>Minério</b>	<b>Quantidade Rom (T)</b>	<b>Contido (T)</b>	<b>Teor Médio (%)</b>
<b>Cobalto</b>	3.196.994	2.076,19	0,06
<b>Cobre</b>	37.657.624	248.055,25	0,66
<b>Ferro</b>	406.933.947	228.737.241,17	56,21
<b>Níquel</b>	4.333.059	41.059,06	0,95
<b>Ouro</b>	187.084.983	232,44	1,24
<b>Zinco</b>	1.787.983	183.589,08	10,27

### **2.2.1. FORMAS DE DISPOSIÇÃO DOS REJEITOS DE MINERAÇÃO**

Os processos de beneficiamento geram grandes quantidades de rejeito. E esses rejeitos podem ser dispostos em superfície, em cavidades subterrâneas ou em ambientes subaquáticos. Os rejeitos são geralmente depositados sobre a superfície do terreno, em bacias de deposição formadas por diques ou barragens, para evitar percolação do material depositado na direção das águas subterrâneas e superficiais, e ou o assoreamento e contaminação nos corpos hídricos pelo material particulado (BOSCOV, 2008).

Na disposição subterrânea de rejeitos, escavações não mais utilizadas na extração do minério são preenchidas com os rejeitos bombeados. A disposição subaquática não é muito utilizada devido a grande incidência de impactos negativos e muitas vezes irreversíveis ao meio ambiente. Outra forma de disposição é a vinculada à extração do minério onde os rejeitos são depositados a céu aberto ou em câmaras subterrâneas para compor camadas de fundação e suporte aos equipamentos de extração (BOSCOV, 2008).

Boscov (2008) ressalta que a forma mais comum para a disposição de rejeitos é a céu aberto, em barragens localizadas em bacias ou vales para a contenção. As características do tipo construtivo dessas barragens vão depender do rejeito a ser armazenado. De acordo com Santos *et al.*(2010), rejeitos sob forma de lama, cuja granulometria se assemelha a das argilas, geralmente são dispostos em barragens semelhantes às barragens de contenção de água. São construídas com solo argiloso ou em enrocamento com núcleo argiloso, onde se faz a deposição subaquática do material. Para a deposição dos rejeitos granulares a forma mais usual de construção é a de barragens por aterro hidráulico, onde o próprio rejeito passa a ser utilizado para a construção dos alteamentos.

Conforme Vick (1983) *apud* Ribeiro (2000), existem três possibilidades de construção de barragens de rejeito por alteamentos, são eles o método de montante, o método de jusante e o método da linha de centro. No método de montante, o rejeito é lançado a montante da crista do barramento por canhões e/ou hidrociclones apenas em um ponto de descarga ou em linha sobre a praia de rejeitos, onde é criada uma superfície que servirá como fundação para o próximo alteamento (Figura 2.2).

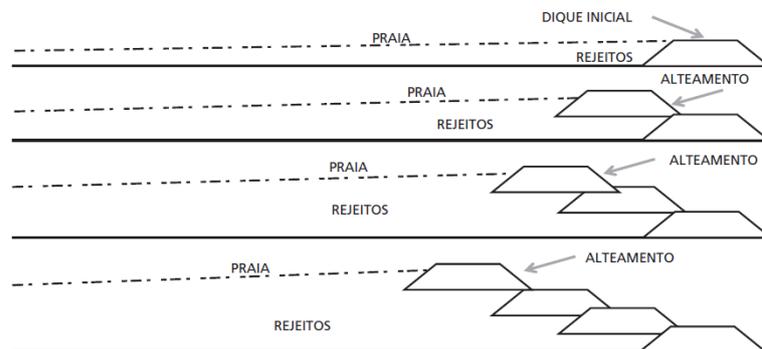


Figura 2.2. Método Alteamento de montante (VICK, 1983; IPEA, 2012)

A maior vantagem do método de montante é a baixa quantidade de material necessária para os alteamentos e conseqüente redução de custos. De acordo com Araujo (2006), embora seja o mais utilizado, esse método apresenta um baixo controle construtivo que pode diminuir a segurança. A principal desvantagem neste caso, está ligado ao fato dos alteamentos serem realizados sobre materiais previamente depositados e não consolidados. Dessa forma, sob condição saturada e estado de compactidade fofo, estes rejeitos tendem a apresentar baixa resistência ao cisalhamento além de serem suscetíveis à liquefação por carregamentos dinâmicos e estáticos.

Segundo Ribeiro (2000), o método de jusante consiste no alteamento da barragem sem que o rejeito previamente depositado seja utilizado como suporte para o próximo dique, garantindo um pouco mais de segurança para as barragens. Nesse método também há controle da percolação devido ao sistema de drenagem instalado ao longo do aterro (Figura 2.3).

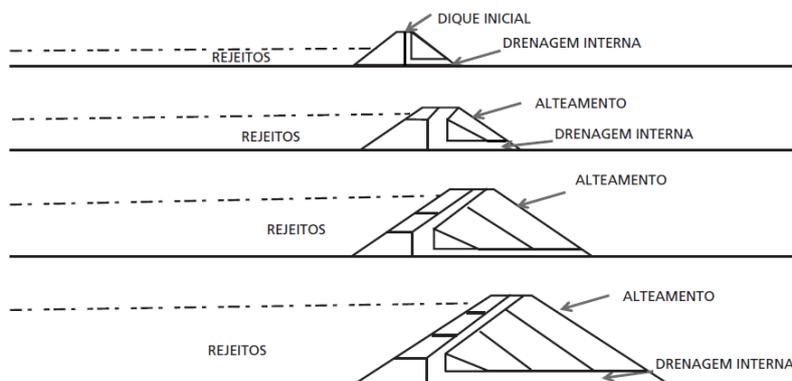


Figura 2.3. Método Alteamento de jusante (VICK, 1983; IPEA, 2012)

O método de linha de centro, de acordo com Araujo (2006), possui semelhanças ao método de jusante por ser uma variação deste. Neste método o alteamento da crista é realizado de forma vertical, de maneira com que o eixo vertical dos alteamentos coincida com o eixo de partida (Figura 2.4). Ainda conforme Araujo (2006), a partir deste método há a possibilidade de utilização de zonas de drenagem internas nas fases de alteamento, aumentando o controle da linha de saturação.

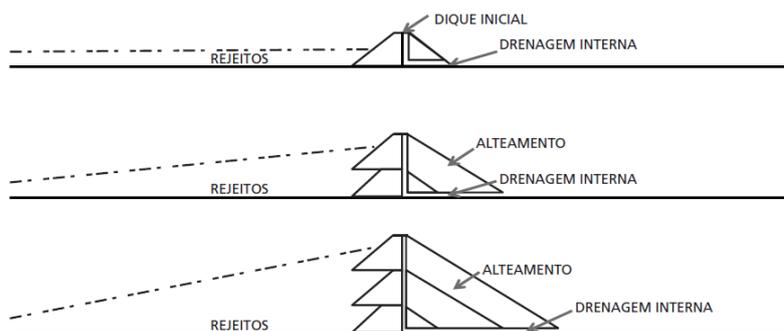


Figura 2.4. Método alteamento de linha de centro (VICK, 1983; IPEA, 2012)

Segundo Boscov (2008), o método de linha de centro é considerado uma solução intermediária entre os métodos de jusante e montante, até mesmo em questão de custos. Porém, as exigências relacionadas ao controle de drenagem, aos sistemas de contenção e aos equipamentos de deposição mecânica podem tornar altos os investimentos globais.

É importante ressaltar que uma barragem de rejeito pode ser composta de mais de um tipo de alteamento, o que resultará em uma maior flexibilidade às obras (IPEA, 2012). Além da eficiência de armazenamento, a barragem precisa ser projetada levando em conta os riscos de acidentes por rupturas que podem gerar grandes impactos ambientais, sociais e econômicos.

### **2.2.2. IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS PELA MINERAÇÃO**

A mineração causa impactos ambientais notáveis. Além de alterar a área minerada e as áreas vizinhas com os despejos de estéreis e rejeitos, ela disponibiliza no ambiente substâncias químicas e nocivas na fase de beneficiamento dos minérios (SILVA, 2007).

Conforme Salomons (1995) e Silva *et al.* (2004) os rejeitos e pilhas de estéril, decorrentes de atividades de mineração, podem ser fontes de contaminação ambiental devido à presença de metais pesados e arsênio, principalmente quando esses materiais contêm minerais sulfetados e teores elevados de metais.

A atividade de uma mineradora, quando comparada a outras fontes de degradação do ambiente, como a agricultura e a pecuária, afeta diretamente pequenas áreas. Contudo, os elementos solubilizados de rejeitos, se atingirem os cursos d'água, podem impactar negativamente áreas localizadas a centenas de quilômetros da mineração.

Segundo Silva (2007), as principais consequências geradas pela mineração no ambiente são ruídos, vibrações, degradação da paisagem natural, produção de grandes quantidades de resíduos, presença de poeira e gases, a contaminação das águas e solos, entre outros. Dentre essas consequências, estão relacionadas com rejeitos a contaminação de solos e das águas pela própria deposição do rejeito. A depender do local escolhido para a barragem de rejeito, o impacto será a degradação da área. Geralmente, as barragens são alocadas em áreas já degradadas e inutilizadas da mina.

Pastore & Mito (2000) abordaram em sua pesquisa os principais tipos de impactos causados pelas atividades de mineração no meio ambiente físico e agruparam em imediatos e de médio a longo prazo. Segundo esses autores, dentre os impactos imediatos estão a degradação do maciço, alterações dos corpos d'água de superfície e subsuperfície e instabilidade de obras de contenção de rejeitos e acidentes ecológicos. Nos impactos de médio e longo prazo encontra-se a erosão na área minerada, assoreamento dos cursos e

corpos d'água, instabilidade de pilhas de estéril e rejeitos, instabilidade de taludes a longo prazo, subsidências e contaminação dos corpos d'água de superfície e subsuperfície.

Ainda conforme Pastore & Miotto (2000), com relação a contaminação dos corpos d'água de superfície e subsuperfície destaca-se a drenagem ácida de mina (DAM), que segundo os autores é conceituada como o resultado da oxidação de sulfetos residuais de uma exploração mineira pelo oxigênio atmosférico, formando-se, portanto, em áreas de deposição de rejeitos de mineração contendo sulfetos. O produto da lixiviação dos rejeitos modifica o pH da água devido à formação do ácido sulfídrico.

O processo da drenagem ácida de mina pode ser resumido em duas etapas: 1) Deposição de rejeitos de mineração contendo sulfetos, como os das minas de carvão impuros ou da mineração de ouro, cobre, zinco, chumbo e níquel, em cuja paragénese podem ser encontrados materiais primários como a pirita, calcopirita, pirotita, esfalerita, arsenopirita calcocita, entre outros; 2) Ação intensa e prolongada do oxigênio atmosférico e da água sobre os sulfetos residuais da pilha de rejeitos não saturada, através de reações de hidrólise e de oxidação (PASTORE & MIOTTO, 2000).

Existem formas de minimizar os impactos causados pelos rejeitos, uma delas é o reaproveitamento, onde se diminui a quantidade de rejeitos a serem dispostos, reduzindo a quantidade de áreas necessárias para esse armazenamento, e substitui materiais que são extraídos da natureza, poupando, de certa forma, os recursos naturais.

No setor de mineração de rochas, por exemplo, materiais que no passado eram resíduos na produção de britas, atualmente, devido ao pequeno investimento e estabelecimento de mais uma fase de beneficiamento das frações finas da britagem, constituem, com crescente aceitação pelo mercado, as areias artificiais (COSTA *et al.*, 2012).

Sosa (2016) apresentou em seu trabalho soluções de reaproveitamento de rejeitos da mineração de níquel e cobalto com a introdução dos rejeitos em pavimentos asfálticos e no melhoramento da resistência em cerâmicas.

O reaproveitamento de rejeitos pode ser uma das alternativas que contribuem para o meio ambiente, contanto que seja feito de forma correta. O rejeito de mineração, apesar de ser composto em sua maior parte de solo nativo da região da mina, também é constituído por substâncias envolvidas nos processos de beneficiamento do minério, ou seja não é matéria completamente inerte. Para bem reaproveitá-lo sem que haja agressão ao local de

recebimento desse rejeito, análises e avaliações testes devem ser feitas e as concentrações de metais pesados devem ser conhecidas.

## **2.3. CARATERIZAÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO**

Devido à complexidade da natureza dos rejeitos de mineração, tem-se associado várias técnicas para sua caracterização. Essas podem ser enquadradas em quatro grupos principais (RODRÍGUEZ & GARCÍA, 2006):

- físicos (tamanho e morfologia das partículas, densidade, porosidade);
- mineralógicos (identificação das fases minerais, comportamento das fases);
- químico-geoquímicos (composição química elementar, pH, potencial redox, especiação, condutividade elétrica, potencial de drenagem ácido de minas, ensaios hidrogeológicos);
- geotécnicos (hidromecânicos, estabilidade de taludes das barragens).

Estes ensaios devem ser combinados de forma coerente com os tipos de estudos que se propõem realizar, determinando as características e propriedades dos rejeitos que possam ser empregados. Conseqüentemente, diversas são as técnicas empregadas na caracterização física, mineralógica e químico-geoquímica de rejeitos. A escolha da composição de métodos dependerá principalmente dos objetivos e dos custos associados aos ensaios.

### **2.3.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA**

#### **2.3.1.1 GRANULOMETRIA**

A granulometria dos rejeitos está ligada ao tamanho dos grãos, estes podem variar entre areias médias e finas em rejeitos granulares, e siltes e argilas em rejeitos finos. Pinto (2006) apresenta que o tamanho dos grãos dos solos é determinado pela análise granulométrica que consiste nas duas fases de peneiramento e sedimentação. A Tabela 4.1 e 4.2 indicam os valores adotados pela ASTM e pela NBR 6502 (ABNT, 1995) para os limites das frações de solo pelo tamanho dos grãos.

Tabela 2.3. Limites de frações indicados pela ASTM (Modificado - PINTO, 2006)

<b>FRAÇÃO</b>	<b>LIMITES DEFINIDOS PELA ASTM</b>
<b>Matacão</b>	De 25 cm a 1 m
<b>Pedra</b>	De 7,6 cm a 25 cm
<b>Pedregulho</b>	De 4,8 mm a 7,6 cm
<b>Areia grossa</b>	De 2 mm a 4,8 mm
<b>Areia média</b>	De 0,42 mm a 2 mm
<b>Areia fina</b>	De 0,05 mm a 0,42 mm
<b>Silte</b>	De 0,005 mm a 0,05 mm
<b>Argila</b>	Inferior a 0,005 mm

Tabela 2.4. Limites de frações indicados pela ABNT

<b>FRAÇÃO</b>	<b>LIMITES DEFINIDOS PELA ABNT</b>
<b>Pedregulho Grosso</b>	De 20 mm a 60 mm
<b>Pedregulho Médio</b>	De 6,0 mm a 20 mm
<b>Pedregulho Fino</b>	De 2,0 mm a 6,0 mm
<b>Areia grossa</b>	De 0,6 mm a 2,0 mm
<b>Areia média</b>	De 0,20 mm a 0,6 mm
<b>Areia fina</b>	De 0,06 mm a 0,20 mm
<b>Silte</b>	De 0,002 mm a 0,06 mm
<b>Argila</b>	Inferior a 0,002 mm

D'Agostinho (2008) argumenta que a análise granulométrica visa determinar a relação entre as dimensões das partículas e os seus percentuais, bem como a graduação destas no solo. Segundo o autor, com a análise da curva granulométrica é possível observar as diferentes composições como apresentado na Figura 2.5.

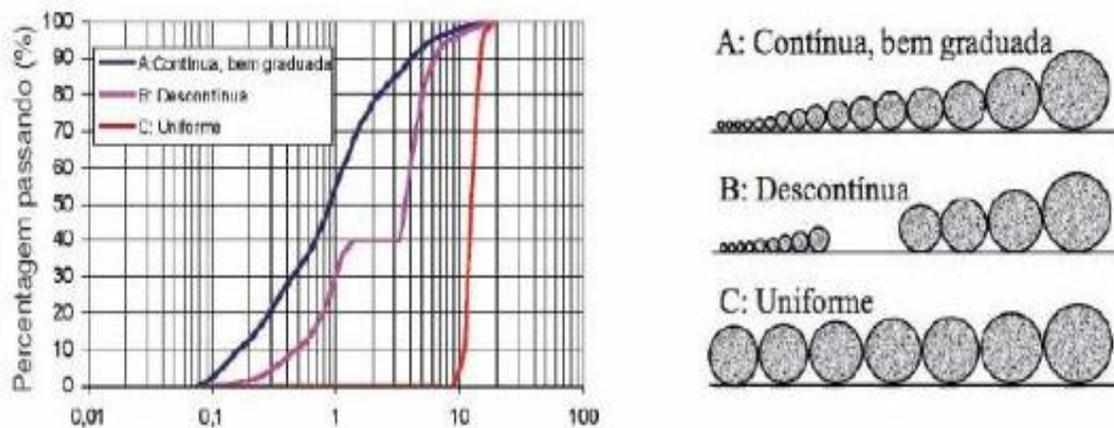


Figura 2.5. Diferentes graduações de solo observadas por meio da análise granulométrica (MARQUES & SILVA, 2013)

Segundo Milonas (2006), o conhecimento das características granulométricas de um material é de grande relevância para a realização de qualquer trabalho de engenharia, de tal modo que o tamanho e a distribuição das partículas condicionam um grande número de propriedades geotécnicas como a resistência, a permeabilidade e as características de compactação. Dentre essas características, a granulometria poderá influenciar diretamente no tipo de reaproveitamento dos rejeitos.

Conforme exposto por Sosa (2016), a análise granulométrica é um processo que objetiva definir a porcentagem em peso que cada fração possui em relação à massa total da amostra em análise e pode ser realizada:

- a) por peneiramento (quando as amostras se apresentam em tamanhos granulares, como as areias e os pedregulhos);
- b) por sedimentação (quando as amostras possuem tamanhos ou são compostas por partículas argilosas);
- c) por combinação de peneiramentos e sedimentação;
- d) por difração de laser.

Ainda de acordo com Sosa (2016), o processo de peneiramento é muito comum e permite obter um grupo de frações granulométricas cujo intervalo está limitado à seleção do número de peneiras. Além disso, apresenta a vantagem de obter fisicamente as classes granulométricas para análises futuras. No caso da granulometria a laser é possível obter maior número de frações, embora não seja possível obter fisicamente amostras de cada classe granulométrica.

Conforme Farias (2010), a técnica instrumental da determinação do tamanho das partículas por meio do granulômetro a laser tem sido muito utilizada quando comparada com métodos manuais convencionais. Segundo Farias (2012), a técnica utiliza o espalhamento ou difração da luz que incide na suspensão coloidal sendo correlacionável com o tamanho de partícula. Assim, para a determinação do tamanho da partícula, o equipamento utiliza duas teorias com efeitos diferenciados entre o tamanho das partículas, a teoria de Mie aplicada e a teoria de Fraunhofer (Farias, 2010).

A teoria de Mie apresenta uma solução matemática para o espalhamento de luz incidente sobre as partículas esféricas e pode ser aplicada com diferentes formatos e razão de aspecto. Para a sua aplicação é necessário o conhecimento prévio dos índices de refração do material analisado e do meio em que este se encontra. (PAPINI, 2003)

Para partículas maiores que o comprimento de onda da luz e opacas, a técnica pode é aproximada a teoria de Fraunhofer, onde o tamanho da partícula altera a intensidade e o ângulo do feixe de luz espalhado. Com a utilização de luz monocromática (coerente), ou seja, a laser o ângulo de espalhamento é inversamente proporcional ao diâmetro da partícula, assumindo a forma esférica. Nesse caso, o menor tamanho de partícula passível de detecção deve ser pelo menos duas vezes o comprimento de onda do laser . A limitação do tamanho máximo surge do fato de que o ângulo do feixe difratado se toma muito próximo daquele de um feixe de que o ângulo do feixe não espalhado (PAPINI, 2003). A teoria é utilizada para tamanhos mínimos de diâmetro de partícula de 1 a 2  $\mu\text{m}$  (FARIAS, 2010).

Jardim (2013) em seus resultados da análise granulométrica para o rejeito da mineração de chumbo na região de Adrianópolis, Vale da Ribeira-PR, observou que a fração predominante era areia fina a muito fina e a porcentagem de areia muito grossa, areia grossa e argila era inferior a 5%. Também foi detectado faixa granulométrica de silte. As classes granulométricas variaram no decorrer da profundidade de onde foi retirada a amostra, em amostras superficiais o predomínio era de areia fina, média e muito fina. Em análises de amostra da mesma região Kummer (2008) identificou que algumas amostras tinham predominância da fração areia e baixo teor de argila.

#### **2.3.1.2. MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS**

A massa específica dos grãos é definida numericamente como a massa de sólidos dividida pelo seu volume Essa grandeza varia de acordo com a mineralogia do composto analisado,

principalmente da rocha matriz que deu origem a este composto. No Brasil o ensaio de determinação da massa específica dos grãos ( $G_s$ ) é padronizado pela NBR 6508/84 (ABNT, 1984). O método preconizado pela norma baseia-se no princípio de Arquimedes (deslocamento de fluido).

D'Agostinho (2008) em seus estudos tomou como referência as possíveis contribuições das densidades dos minerais constituintes na massa específica dos grãos das amostras estudadas. Conforme o autor os valores da densidade das amostras de rejeitos estudados eram próximas das densidades dos minerais que estavam em suas composições. A Tabela 2.5 apresenta a densidade calculada para alguns minerais presentes nas amostras estudadas pelo autor.

Tabela 2.5. Densidades calculadas de alguns minerais (Modificado - MINDAD, 2007 *apud* D'AGOSTINHO, 2008)

Mineral	Densidade calculada ( $\text{g/cm}^3$ )
Quartzo	2,66
Hematita	5,26
Magnetita	5,20
Grupo clorita	2,6 - 3,3
Anatásio	3,89

## 2.4. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E GEOQUÍMICA

### 2.4.1 pH E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Várias propriedades afetam a forma em que o metal pode se mover, sendo o pH a mais importante. O pH exerce também uma forte influência na dinâmica dos metais nos solos e no meio aquoso (DOMINGUES, 2009).

Em geral, ambientes ácidos determinam uma maior mobilidade do metal, enquanto condições de pH acima de seis favorecem a processo de retenção em solos. Isso ocorre, pois segundo Impellitteri et al. (2001) *apud* Domingues (2009), com a redução do pH o íon  $\text{H}^+$  compete com os metais pelos sítios de troca. Ainda segundo os mesmos autores, o aumento do pH normalmente reduz sua disponibilidade, pois as cargas negativas originadas pela desprotonação dos componentes do solo tendem a ser balanceadas pelos metais.

Gaivizzo (2001) em seus estudos de mobilidade de metais em solos contaminados por descarte industrial notou que em pH mais baixos a mobilidade era mais expressiva do que em pH mais altos.

A condutividade elétrica é uma propriedade iônica que se refere à capacidade da água em conduzir a corrente elétrica. Esta propriedade está diretamente ligada com o teor de sais dissolvidos sob a forma de íons. Portanto, quanto maior a quantidade de íons dissolvidos, maior a condutividade elétrica (TERRELL, 2007).

Em sua pesquisa, Jardim (2013) constatou que as maiores variações de condutividade elétrica se deram em faixas de pH mais baixas. Em condições mais ácidas há uma tendência maior de ocorrer a dissolução.

#### **2.4.2. MOBILIDADE, BIODISPONIBILIDADE E EXTRAÇÕES QUÍMICAS**

Uma forma de determinar o potencial de contaminação dos rejeitos é por ensaios de lixiviação e solubilização previstos nas normas de classificação de resíduos sólidos. São essas normas a NBR 10005 (ABNT, 2004), a NBR 10006 (ABNT, 2004) e a NBR 10004 (ABNT, 2004). As duas primeiras dão diretrizes sobre os procedimentos de obtenção dos extratos de lixiviação e solubilização, analisando substâncias químicas a partir da atividade de origem e a NBR 10004 (2004) classifica o resíduo analisado quanto à periculosidade e à toxicidade e apresenta valores de referência para a classificação dos resíduos sólidos.

Desta forma, a periculosidade dos rejeitos seria determinada por meio da análise química dos extratos resultantes dos ensaios previstos na NBR 10005 (ABNT, 2004) e NBR 10006 (ABNT, 2004), e posteriormente comparados com a concentração máxima dos poluentes estabelecida pelas NBR 10004 (ABNT, 2004).

Porém, apesar dos rejeitos apresentarem substâncias químicas, a depender da atividade, equivalentes em composição e toxicidade aos de resíduos sólidos, nestes ensaios não são considerados parâmetros que considerem a natureza e origem dos rejeitos de mineração. Além do mais esses ensaios fazem uma análise química total de metais nos rejeitos, não considerando a mobilidade dos metais e o que potencializam a sua transferência para o meio ambiente.

Domingues (2009) afirma que o teor total de um metal no solo, podendo ser aplicado a rejeito, é um importante indicativo de sua qualidade, porém, não reflete a disponibilidade

desses elementos, assim, é necessário conhecer a forma em que eles se encontram e o comportamento deles no ambiente.

Segundo Costa (2005), o impacto da contaminação e/ou poluição do solo por metais pesados deve ser avaliado não somente pela concentração total dos metais, mas sobretudo pela sua biodisponibilidade, sendo esta uma propriedade relacionada com a mobilidade destes elementos no solo e absorção pelos organismos. Assim, é necessário aprofundar o conhecimento sobre as formas químicas que estes metais podem manifestar no solo. Tão importante quanto monitorar as quantidades e formas que os metais se encontram no ambiente, é estudar a sua biodisponibilidade e seus efeitos sobre o ecossistema, dentro de uma abordagem mais complexa e abrangente, que não classifique o solo como um simples meio para descarte.

De acordo com Alvarenga (2010) *apud* Laneiro (2012), a biodisponibilidade é um processo dinâmico, que pode ser descrito através das seguintes etapas detalhadas na da Figura 2.6:

- Disponibilidade do contaminante no solo – Disponibilidade ambiental;
- Acumulação e/ou efeito do contaminante no organismo – Biodisponibilidade toxicológica.
- Assimilação do contaminante pelo organismo – Biodisponibilidade ambiental;

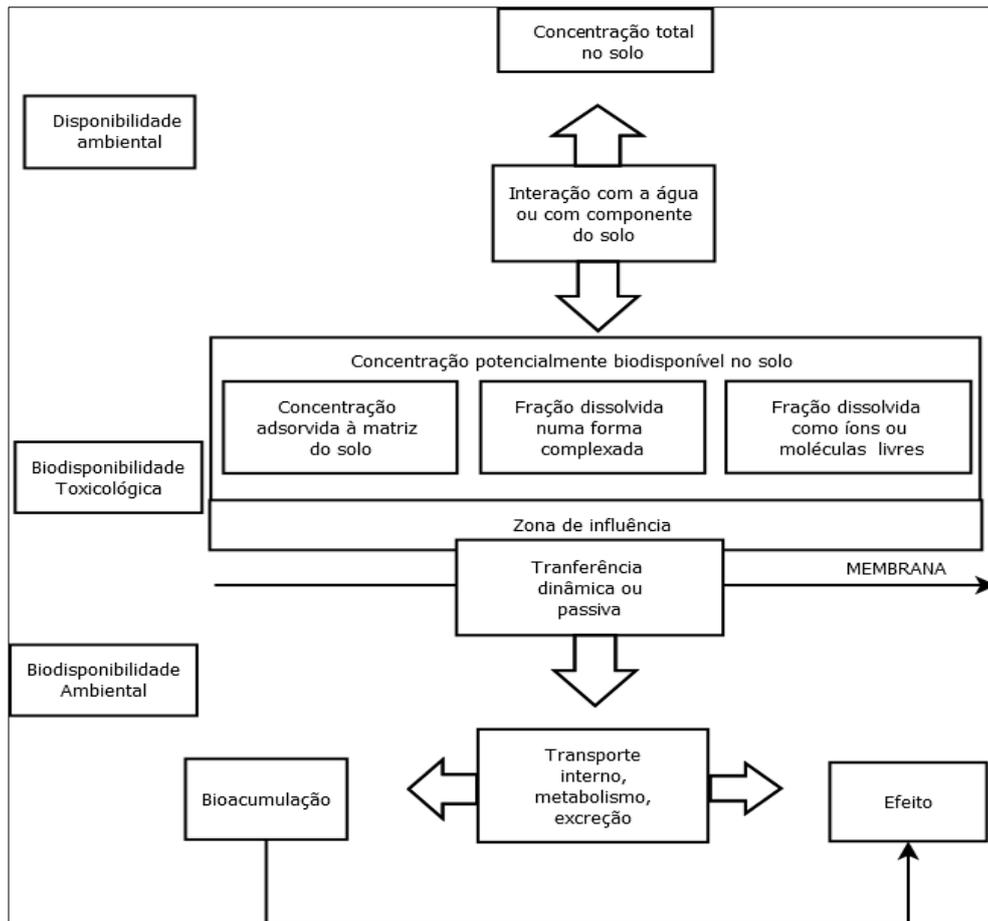


Figura 2.6. Biodisponibilidade de metais (Modificado - LANEIRO, 2012)

Oliveira & Costa (2004) e Souza *et al.*(2012) ressaltam que a mobilidade, atividade e biodisponibilidade dos metais pesados dependem de vários fatores, tais como o pH, a temperatura, o potencial redox, CTC, competição com outros metais, ligação com ânions e composição e força iônica da solução do solo. A mobilidade dos metais pesados no solo pode ainda ser definida pela superfície específica, textura, densidade aparente, teor de matéria orgânica, tipo e concentração de minerais de argila, além do tipo e do teor de metais.

Ribeiro-Filho *et al.* (2001) argumenta que alguns métodos, como extrações químicas simples e sequenciais (métodos de fracionamento), permitem fazer inferências sobre a biodisponibilidade dos metais no solo e no caso especial das extrações sequenciais é possível verificar o equilíbrio das formas em que eles se encontram. Esses métodos foram utilizados por inúmeros autores inclusive Papassiopi *et al.* (1999); Oliveira & Costa (2004); Costa (2005); Kummer (2008) para a análise da biodisponibilidade de metais em solos, sedimentos e rejeitos de mineração.

Além dos métodos de fracionamento, que fornecem informações sobre as formas que o metal possa ser encontrado no solo (solúvel, trocável, ligado à matéria orgânica, óxidos e filossilicatos), os modelos de especiação também são importantes ferramentas de pesquisa. Entretanto, é de extrema relevância que os resultados desses modelos sejam consistentes com as concentrações das espécies em solução e na fase sólida (adsorvidas e/ou precipitadas) e que possam ser relacionados com as quantidades absorvidas pelos organismos (COSTA, 2005).

Nos métodos de fracionamento os primeiros extratores são fracos e retiram da amostra analisada metais mais facilmente disponíveis ao ambiente ou fracamente associados. Sucessivamente, reagentes e condições de extração mais fortes vão sendo utilizados a fim de retirar metais associados especificamente, em princípio menos disponíveis ao ambiente. Por último, é feito um ataque forte para extrair metais inclusos em argilas, indisponíveis ao ambiente (SILVA, 2012).

A especiação química é um processo de identificação e quantificação das diferentes espécies, formas ou fases de um elemento presentes em uma amostra. Para determinar a especiação em metais são apresentados na literatura diferentes protocolos que podem ser por extrações simples ou sequenciais. A extração simples fornece informações sobre as diferentes formas químicas do elemento, o procedimento consiste em uma sucessão de etapas a partir de um único tipo de extrator (reagente). Na extração sequencial, as formas extraíveis dos elementos são determinadas com uma sucessão de reagentes extratores, com a intenção específica de dissolver suas diferentes fases e assim, determinar os metais associados (FERREIRA *et al.*, 2003; DE OLIVEIRA & MARINS, 2011).

Os procedimentos de fracionamento químico ou extração sequencial são desenvolvidos com o intuito de avaliar a disponibilidade e mobilidade de um ou mais metais nas frações geoquímicas de solos e sedimentos (SILVA, 2012). Segundo Gomes *et al.* (1997), esses métodos também fornecem informações da proporção do metal que é solubilizado por um reagente específico.

Na literatura são apresentados vários esquemas para o fracionamento químico, dentre eles o mais citado é o método de Tessier e colaboradores (SILVA, 2012). Este método divide os metais nas seguintes frações: trocável ( $MgCl_2$  a pH 7,0); ligados ao carbonato ( $NaOAc/HOAc$  a pH 5,0); ligados aos óxidos de Fe e de Mn ( $NH_2OH.HCl$  em  $250\text{ g L}^{-1}$  de

ácido acético a pH 2,0); ligados à matéria orgânica ( $\text{H}_2\text{O}_2/\text{HNO}_3$  a pH 2,0 e, em seguida,  $\text{NH}_4\text{OAc}$ ) e residual ( $\text{HF}/\text{HClO}_4$ ) (GOMES *et al.*, 1997).

Vários métodos de extratores têm sido utilizados com diversas soluções extratoras como soluções salinas, soluções ácidas, soluções complexantes e combinadas. Dentre as soluções salinas se destacam o acetato de amônio, nitrato de amônio, nitrato de cálcio, cloreto de magnésio, nitrato de magnésio, cloreto de cálcio, cloreto de potássio, cloreto de bário e cloreto de amônio. Essas soluções extraem preferencialmente os metais dos sítios de troca iônica com o solo (DOMINGUES, 2009).

Esta fase, definida como trocável, inclui metais fracamente adsorvidos retidos na superfície sólida por interações eletrostáticas relativamente fracas, metais que podem ser liberados através de processos de troca iônica e metais que podem ser coprecipitados com carbonatos presentes em muitos tipos de sedimentos. Mudanças na composição iônica influenciam reações de adsorção-dessorção, ou a redução de pH pode causar remobilização de metais a partir desta fração (FERREIRA & SANTANA, 2012).

As extrações que utilizam soluções ácidas são baseadas na dissolução dos minerais de argila, são exemplos o ácido clorídrico e Mehlich 1, porém tem sido evitada a utilização desses reagentes por geralmente extraírem metais não lábeis da fase sólida (DOMINGUES, 2009; ABREU *et al.* 2002)

Ainda conforme Abreu *et al.* (2002) e Domingues(2009), outra categoria de extratores são os agentes quelantes que se combinam com o íon metálico em solução e forma assim, complexos solúveis, diminuindo sua atividade iônica na solução. Em consequência, os íons desorvem da superfície do solo ou dissolvem-se da fase sólida para reestabelecer o equilíbrio das formas iônicas na solução.

Por causa dessa capacidade de redução da atividade iônica, os quelantes são utilizados com o objetivo de extrair maiores quantidades dos teores lábeis dos micronutrientes do solo, porém sem dissolver as formas não-lábeis, sendo que a quantidade de metais quelatados que se acumulam na solução do solo é função da atividade do íon livre na solução, da habilidade do solo em reestabelecer atividade da solução, da estabilidade do quelato e da capacidade do quelante em competir com a matéria orgânica pelo íon. Os exemplos principais de agentes quelantes são o EGTA, EDTA, HEDTA e o DPTA (DOMINGUES, 2009; ABREU *et al.* 2002).

### 2.4.3. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Segundo Filho (1999), a técnica analítica nuclear de fluorescência de raios X (FRX) é utilizada para a avaliação qualitativa e quantitativa da composição química em vários tipos de amostras, de interesse agropecuário, agroindustrial, geológico e ambiental. Esta técnica, além de ser não destrutiva e instrumental, permite a análise de vários elementos simultaneamente, de modo rápido e a baixo custo. Também tem um elevado potencial de aplicação em várias áreas, onde faz se necessário correlacionar elementos essenciais e tóxicos.

A FRX oferece algumas vantagens em relação às técnicas espectrométricas de emissão e absorção atômica, principalmente nos casos de análises de amostras de sólidos e de líquidos de alta viscosidade, situações em que as outras técnicas necessitam de várias etapas para abertura e tratamento das amostras. Quando se pretende analisar uma amostra totalmente desconhecida, a técnica de FRX também se mostra mais vantajosa, em função de permitir um resultado rápido dos constituintes da matriz (SANTOS *et al.*, 2013).

Os instrumentos de fluorescência de raios X mais modernos são capazes de produzir análises quantitativas de materiais complexos com precisão que se equipara ou ultrapassa aquela dos métodos clássicos ou outros métodos instrumentais. Para uma precisão adequada das análises, porém, é necessário que a disponibilidade de padrões de calibração se aproximem da composição e características físicas das amostras, caso essa condição não seja considerada, a utilização de métodos matemáticos satisfatórios para lidar com efeitos diversos é primordial (SKOOG *et al.*, 2005).

A espectrometria de absorção atômica é uma das mais utilizadas na determinação de elementos em baixas concentrações, que estão presentes em uma variedade de amostras líquidas, sólidas, em suspensão, ou gasosas, podendo estar associada a sistemas de análise em fluxo e permitir estudos de especiação (AMORIM, 2008).

A determinação de espécies atômicas é realizada através do estado gasoso onde os átomos individuais ou íons elementares se encontram separados uns dos outros. Assim, para a realização da detecção, apresenta-se como primeira etapa dos procedimentos de espectroscopia, um processo onde a amostra é volatilizada e decomposta de forma a produzir uma fase gasosa de átomos e íons (SKOOG *et al.*, 2005).

O comportamento da luz pode ser descrito como um campo elétrico e magnético alternado, podendo interagir com os elétrons dos átomos e, podendo ser absorvida por eles. A condição de absorção é que o fóton possua a mesma energia existente na separação entre os níveis. Nesse processo, o átomo passa do estado fundamental para um estado de maior energia ou “excitado”. Estado atômico que é altamente instável e de curta duração, retorna rápido ao seu estado fundamental. Quando isso ocorre, a energia em excesso é liberada se igualando ou não a energia absorvida no início do processo (SKOOG *et al.*, 2005).

## **2.5. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA**

Dentre as vantagens da técnica de difração de raios X para a caracterização de fases, destacam-se a simplicidade, a rapidez do método, a confiabilidade dos resultados obtidos, a possibilidade de análise de materiais compostos por uma mistura de fases e uma análise quantitativa destas fases (ALBERS *et al.*, 2002).

Farias (2012) ressalta que a difratometria de raios X (DRX) é a técnica mais empregada na identificação, caracterização e quantificação das fases minerais que compõem os solos. O método baseia-se na interação de uma radiação monocromática de raios X com a amostra em diversos ângulos de incidência.

De acordo com Nociti (2011), a DRX é indispensável para a caracterização de materiais e controle de qualidade. As estruturas do reticulado são determinadas por meio de análises por raios X, que também revelam a estrutura cristalina. Quando um feixe de raios X é direcionado através de um material cristalino, esses raios são difratados pelos planos dos átomos ou íons dentro do cristal. O ângulo de difração irá depender do comprimento de onda dos raios X e das distâncias entre os planos adjacentes.

Como a maior parte dos minerais constituintes dos solos em geral ocorre nas frações siltes e argila, sua identificação pode ser feita com o auxílio da difratometria. Em geral os minerais com grãos relativamente grandes (maiores que as argilas), na fração silte, possuem uma estrutura cristalina bem definida, essas estruturas são evidenciadas nos difratogramas por picos bem definidos, estreitos e simétricos (NOCITI, 2011).

Ao contrário dos minerais de frações menores que silte, argilominerais, apresentam no difratograma picos poucos intensos e largos. Em difratogramas de amostras constituídas por diversos tipos de minerais não é possível definir de maneira clara os argilominerais, por isso,

a separação pela sedimentação da fração argila é necessária, facilitando a análise exclusiva desta fase, sem então sofrer a interferência de grãos maiores (NOCITI, 2011).

### 3. ÁREA DE ESTUDO

#### 3.1. ORIGEM DAS AMOSTRAS DE REJEITOS

As amostras estudadas são oriundas de dois rejeitos, um deles da mineração de zinco e cobre proveniente de Cuba e o outro da mineração de ouro da região de Paracatu-MG, no Brasil.

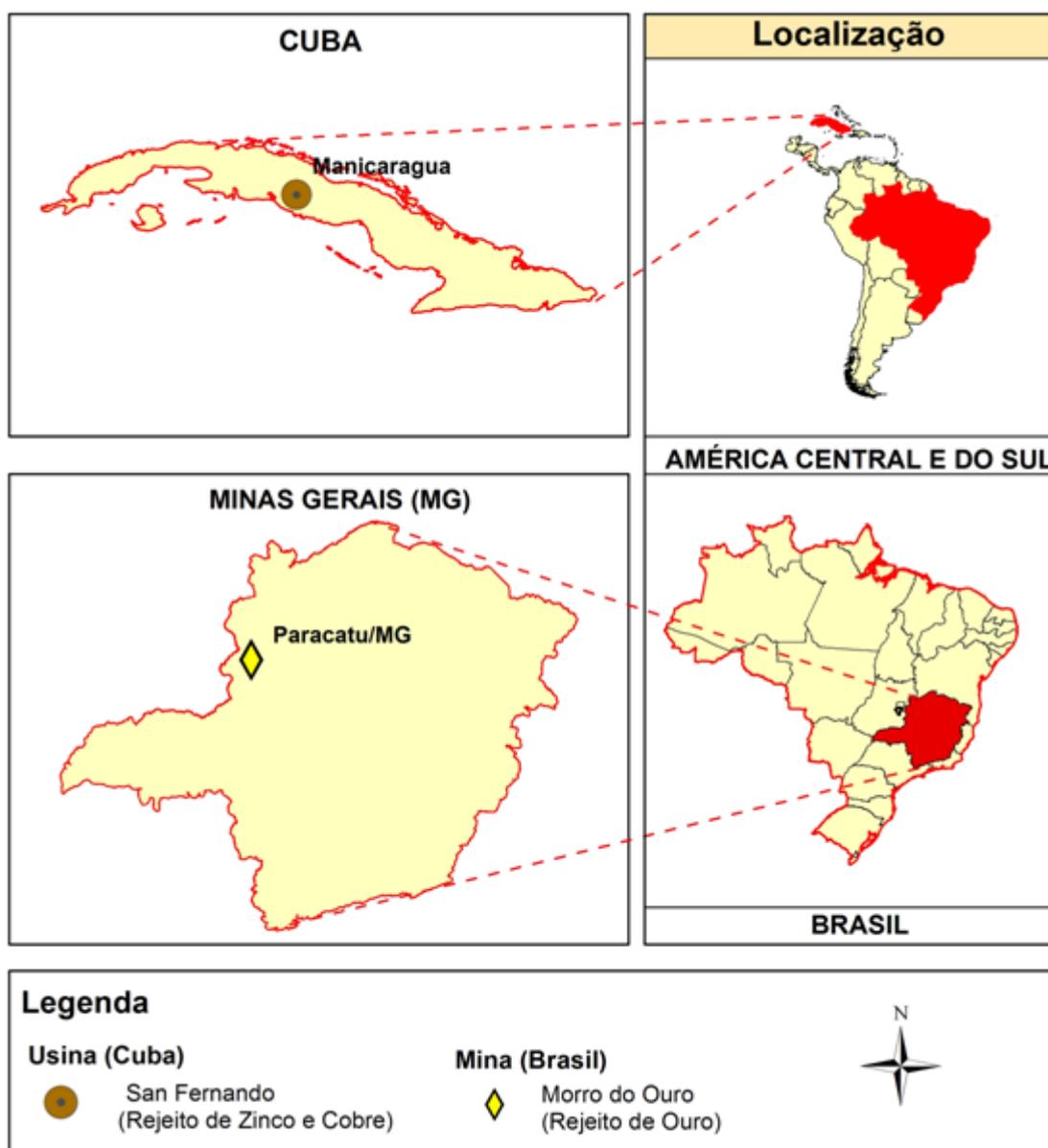


Figura 3.1. Localização da origem das amostras

### 3.2. MINA DE SAN FERNANDO

A mina de San Fernando é localizada no município de Manicaragua, na província de Villa Clara, a 45 km sul da cidade de Santa Clara e 15 km noroeste do povoado de Manicaragua. Possui uma área total de 34 km<sup>2</sup>, próxima a uma zona de montanhas suaves e vegetação densa e impenetrável de marabú. O acesso ao local é pela via pavimentada de Santa Clara - Manicaragua- Cumanayagua, que cruza 7 km ao sul e posteriormente por aterros de El Hoyo, Matagua e El Jicaro. (VASILIEV 1988; ARCIAL 1991).

O local foi descoberto em 1827 e a exploração dos minerais começaram no mesmo ano. Durante décadas foi explorado por diferentes empresas de mineração espanholas, inglesas e americanas. Os principais minerais presentes são pirita, calcopirita, esfalerita e minerais compostos por pirota, arsenopirita e galena. Depois da Revolução Cubana continuaram as explorações até 1961 e como resultado houve depleção completa das reservas minerais, fechando a planta de concentração que havia processado 300 toneladas/dia (GALLARDO, 2008).

Atualmente a mina é formada por duas porções de área, resultado dos últimos anos de exploração por causa da ausência de uma zona de concentração, estas se distanciam entre si em 70 metros e totalizam juntas uma área de 11 493 m<sup>2</sup> e um volume de 62 167 m<sup>3</sup> (Figura 3.2) (GALLARDO, 2008).



Figura 3.2. Porções de área da Mina de San Fernando após o fim da zona de concentração (GALLARDO, 2008)

A preocupação quanto a presença de contaminantes na mina de San Fernando aumentou a consciência ambiental em muitas pessoas e incentivou a realização de pesquisas com o

intuito de reduzir os impactos ambientais devido à dispersão de elementos químicos, que ocupam uma área extensa do local (CASTRO, 1998).

De acordo com Castro (1998), as águas da área da mina de San Fernando são classificadas pela composição química como sulfatadas-ferrosas e muito mineralizadas, pelo pH de altamente ácidas com presença de metais pesados contaminantes. A probabilidade de se quantificar elevados teores de Cu e Zn nos corpos hídricos próximos não é relacionada apenas com a mineração, mas também pela presença da própria zona mineralizada. Há também altas concentrações de chumbo resultantes dos processos de mineração.

### **3.3. MINA DE PARACATU**

De acordo com Santos (2012), a exploração de ouro na região de Paracatu iniciou-se no início do século XVIII, depois de um certo período foi finalizada e o povoado local entrou em certa decadência sob o sistema de escravidão ao qual estava submetida a maioria da população. Anos após esse primeiro período de exploração, ocorreram surtos de garimpo, com introdução de novas tecnologias de produção. Entre as décadas de 1960 e 1980 introduziram-se máquinas e bombas para reprocessar os rejeitos dos surtos anteriores. Nas décadas de 1980 e 1990 introduziu-se a técnica de amalgamação por mercúrio.

Os pontos mais importantes de exploração localizavam-se no Córrego Rico em um trecho distante em alguns quilômetros do Morro do Ouro. Essas atividades resultaram em assoreamento do córrego, destruição da vegetação ribeirinha, assim também a apatia institucional das instituições públicas frente à degradação socioambiental (SANTOS, 2012).

O desenvolvimento tecnológico da indústria mineral possibilitou a exploração de outro tipo de depósito aurífero em Paracatu, o ouro contido em rocha dura. Estudos realizados na década de 1980 levaram à cubagem de uma jazida de baixo teor aurífero no local denominado Morro do Ouro, pela empresa transnacional Rio Tinto através da subsidiária Rio Paracatu Mineração S.A. (SANTOS, 2012).

Em 2003, a empresa *Kinross* adquiriu participação na mina de Paracatu e em 2004 comprou os 51% restantes do capital da empresa Rio Tinto. Em 2006 a *Kinross* iniciou a expansão de sua planta industrial para triplicar a produção, iniciando o processo em 2008 com projeção de funcionamento até 2042 (SANTOS, 2012; KINROSS, 2016).

Atualmente as instalações da *Kinross* em Paracatu compreendem uma mina a céu aberto, uma usina de beneficiamento e uma área para disposição de rejeitos minerais, além da infraestrutura superficial. A mina a céu aberto do Morro do Ouro tem o menor teor aurífero do mundo, com uma média de 0,40 gramas de ouro por tonelada de minério. A empresa investe permanentemente em tecnologias de extração que viabilizam as operações em Paracatu, assegurando níveis médios de produção anual de até 15 toneladas. Todo o processo é monitorado de acordo com os mais altos padrões de segurança, incluindo a utilização de insumos importantes para o processo. Um exemplo é o cianeto, matéria-prima necessária ao processo de beneficiamento (KINROSS, 2016).

As Figuras 3.3 e 3.4 apresentam, respectivamente, a área de expansão da Mina de Paracatu e a visão geral das instalações da mina.



Figura 3.3. Área de expansão da Mina de Paracatu (Kinross, 2016)

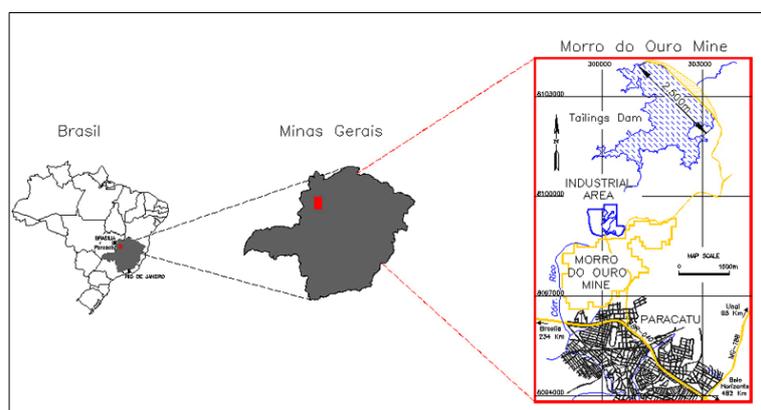


Figura 3.4. Instalações da Mina de Paracatu (Kinross, 2016)

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. AMOSTRAS DE REJEITOS

As amostras analisadas na pesquisa estavam preservadas no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Inicialmente, foram secas ao ar, homogeneizadas e separadas pelo método de quarteamento com folga quanto a quantidade necessária para a realização de todos os ensaios. A nomeação de cada amostra foi feita de acordo com o nome da mina de origem (Figura 4.1).

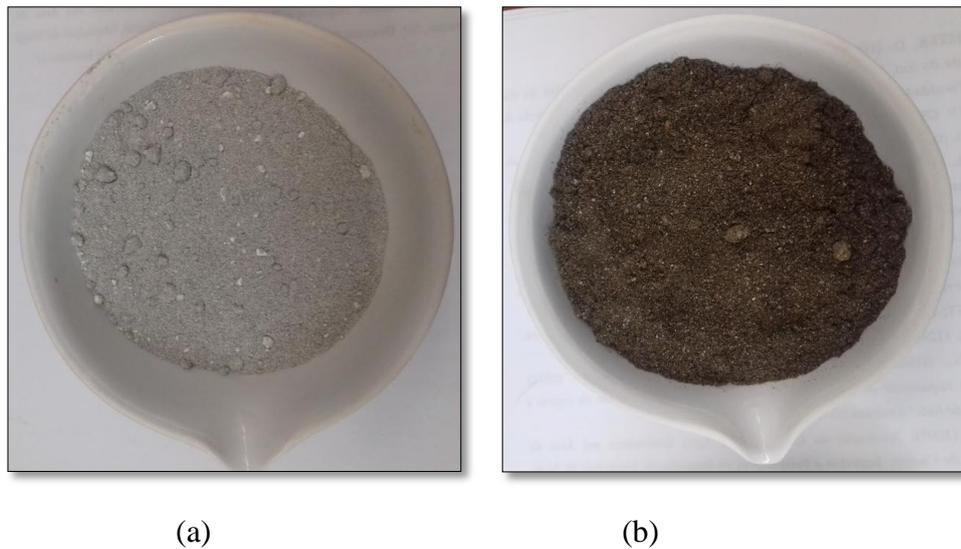


Figura 4.1. Amostras de rejeito estudadas antes da separação

a) Rejeito de San Fernando

b) Rejeito de Paracatu

As amostras foram submetidas as análises de caracterização geoquímica (pH, condutividade elétrica e extrações simples), caracterização física (granulometria e massa específica dos grãos), composição química e caracterização mineralógica (Figura 4.2).

Todos os ensaios de caracterização das amostras dos rejeitos foram realizados de acordo com os procedimentos preconizados pelas normas ABNT, ASTM AASHTO e pelas especificações dos métodos e equipamentos. Também foram levadas em conta as condições operacionais de acordo com as próprias exigências e possibilidades de cada laboratório utilizado. Algumas análises foram feitas em períodos diferentes para as duas amostras o que ocasionou em algumas análises na utilização de métodos distintos para San Fernando e Paracatu.

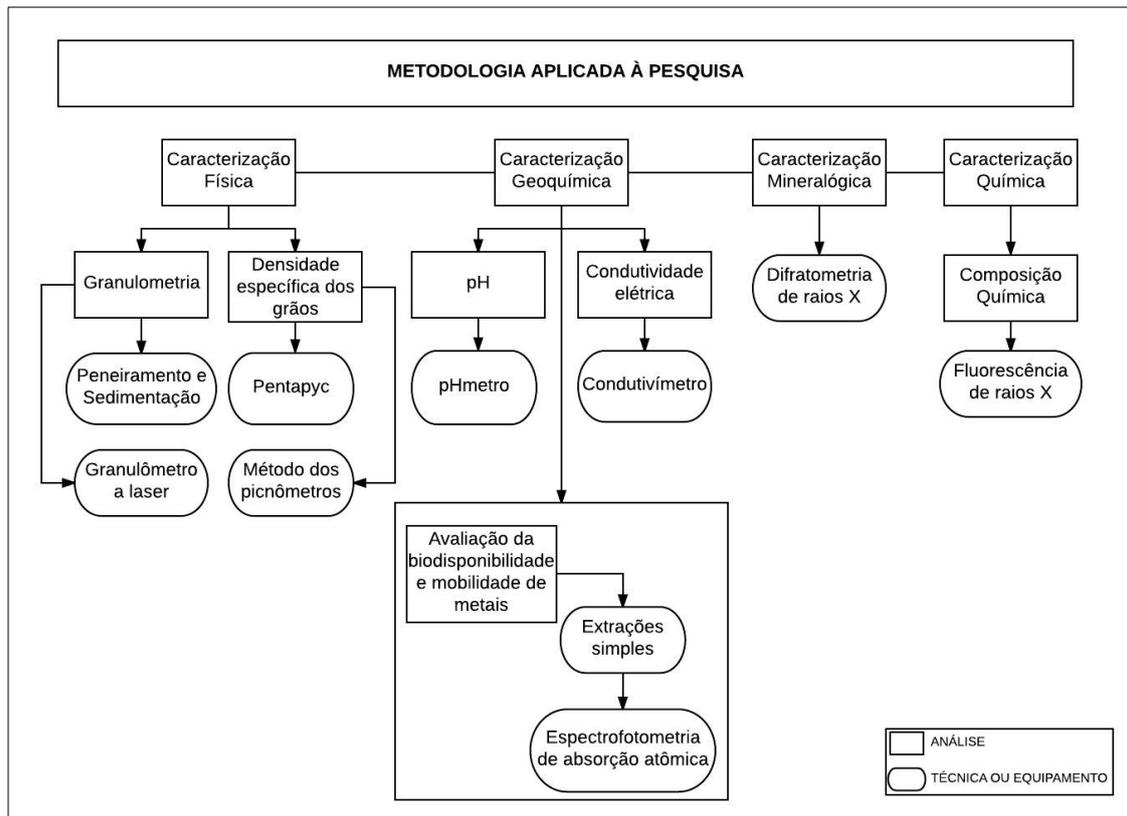


Figura 4.2. Metodologia aplicada à pesquisa

## 4.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A caracterização física das amostras de rejeito de San Fernando e Paracatu foi realizada por meio de ensaios granulométricos e determinação da massa específica dos grãos.

### 4.2.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Para a análise granulométrica foram realizados ensaios de peneiramento para as duas amostras e difração a laser somente para a amostra de San Fernando, conforme os procedimentos descritos por Sosa (2016).

#### 4.2.1.1. GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO

O ensaio de granulometria por peneiramento foi realizado em duas réplicas. Foram utilizadas 500g da amostra com o objetivo da obtenção de frações nas diferentes classes granulométricas. A sequência de peneiras utilizadas conforme a abertura da malha foram 2000, 1180, 850, 600, 425, 300, 250, 180, 150, 106, 75, 63 e 38  $\mu\text{m}$  para a amostra de San Fernando, e 2000, 1180, 850, 425, 250, 180, 150, 75, e 38  $\mu\text{m}$  para a amostra de Paracatu. É

importante ressaltar que o peneiramento das amostras de San Fernando e Paracatu foram realizados em períodos diferentes e por operadores distintos.

#### **4.2.1.2. GRANULOMETRIA POR DISPERSÃO A LASER**

O ensaio de granulometria por dispersão a laser foi realizado com a utilização do granulômetro a laser modelo Microtrac s33500 (Figura 4.3) no laboratório de Geotecnia da UnB para amostra de San Fernando. Não foi possível a realização deste tipo de ensaio para amostra de Paracatu por causa de um defeito no equipamento no período do ensaio. A amostra de San Fernando utilizada foi previamente seca ao ar, destorroada e passada pela peneira número 40 (malha de 420  $\mu\text{m}$ ), para garantir tamanhos de partículas menor que 1 mm, exigência para evitar a danificação das lentes. Uma pequena fração da amostra foi colocada no aparelho, onde foi agitada e ajustada a uma quantidade ideal para análise. A amostra de rejeito foi analisada sem defloculante, sem o uso do ultrassom e utilizou-se água como meio de dispersão.



Figura 4.3. Granulômetro a laser. Marca MICROTRAC Modelo S3500 (METOGO, 2013)

#### **4.2.2. MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS**

A massa específica dos grãos foi determinada com o auxílio de um pentapicnômetro, modelo PENTAPYC 5200e da *Quantachrome Instruments* (Figura 4.4), do laboratório de Geotecnia da UnB para a amostra de San Fernando. O equipamento usa o princípio de Arquimedes (deslocamento de fluido) e a lei de Boyle (expansão de gás) para a determinação da densidade e dos volumes verdadeiros de sólidos. O gás utilizado foi o nitrogênio ( $\text{N}_2$ ). Além de alta precisão, o equipamento é capaz de realizar leituras simultâneas de até cinco amostras. Foram analisadas as massas específicas da amostra composta e das frações obtidas no ensaio de peneiramento.



Figura 4.4. Pentapicnômetro Modelo PENTAPYC 5200E (METOGO, 2013)

Para a amostra de rejeito de Paracatu a determinação da massa específica foi realizada a partir do método dos picnômetros conforme preconizado pela NBR 6508 (ABNT, 1984). O conjunto de equipamento utilizado é apresentado na Figura 4.5. A bomba a vácuo não foi utilizada no ensaio conforme recomenda a norma por conta de problemas técnicos no período do ensaio que inviabilizaram o uso. A ausência de bolhas de ar nos picnômetros foi garantida pela técnica de banho-maria.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.5. Equipamento para determinação da massa específica dos grãos

a) Cápsulas com rejeito e água destilada

b) Picnômetros em banho-maria

c) Conjunto dispersor mais copo dispersor

### 4.3. CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA E QUÍMICA

Na caracterização geoquímica das amostras de rejeito de San Fernando e Paracatu foram empregados ensaios de pH, condutividade elétrica, extrações simples e absorvância de espectrofotometria atômica. Na caracterização química foi feito ensaio de composição química para obtenção dos elementos presentes nas amostras.

### 4.3.1. pH E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Os ensaios de pH e condutividade elétrica foram realizados no Laboratório de Análises de Águas, do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH) da UnB. Os procedimentos utilizados para as análises de pH obedeceram a concentração 1:2,5 (amostra/ água destilada). As mesmas soluções preparadas para a medição do pH foram utilizadas para a determinação da condutividade elétrica. Os procedimentos para a determinação de pH e CE são apresentados na Figura 4.6:

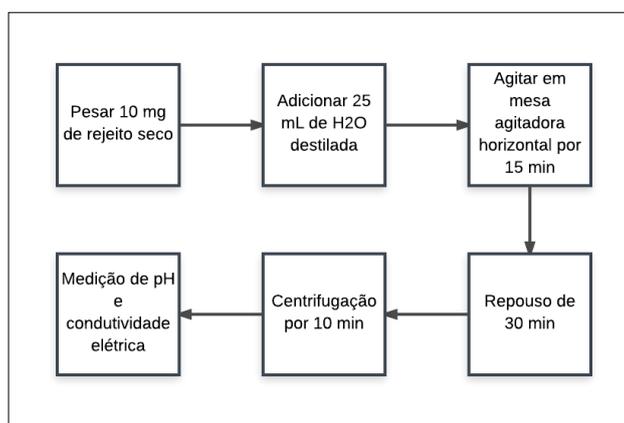


Figura 4.6. Procedimento utilizado para determinação de pH e condutividade elétrica das amostras de rejeito

As análises foram realizadas em triplicata com a utilização do pHmetro - ORION MODEL 210 de eletrodo combinado. Para a condutividade elétrica foi utilizado um condutivímetro-HACK SensION05 (Figura 4.7).



(a)



(b)

Figura 4.7. Caracterização de pH e condutividade elétrica

(a) pHmetro ORION MODEL 210;

(b) Condutivímetro HACK SensION05

### 4.3.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A composição química dos rejeitos foi determinada a partir da técnica de Fluorescência de raios X, esses ensaios foram realizados no Laboratório de Química Analítica do Instituto de Química (IQ) da UnB. A FRX foi utilizada com o objetivo de orientar os procedimentos das extrações químicas quanto a presença e concentração na amostra de elementos químicos. Uma quantidade de 50g de cada amostra foi seca na estufa por 24 horas e levada para análise posteriormente.

### 4.3.3. EXTRAÇÕES QUÍMICAS

A biodisponibilidade e concentração de metais nas amostras de rejeito de San Fernando e Paracatu foram avaliadas através de extrações simples com os reagentes  $MgCl_2$  e EDTA. As soluções resultantes das extrações simples foram encaminhadas para serem analisadas em um equipamento de espectrofotômetro de absorção atômica para a determinação das concentrações.

#### 4.3.3.1. EXTRAÇÕES SIMPLES COM $MgCl_2$ E EDTA

As extrações químicas simples foram realizadas no Laboratório de Análises de Águas, do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH) da UnB. O procedimento utilizado nas extrações com  $MgCl_2$  foi o mesmo para a fase trocável das extrações sequenciais no método proposto por Tessier *et al.* (1979). As extrações de EDTA foram realizadas conforme Wang & Qin (2007). A Tabela 4.1 apresenta os condicionantes utilizados nas extrações. As extrações foram conduzidas em triplicata e foram feitas a partir do composto total de cada amostra.

Tabela 4.1. Condicionantes para o ensaio de extração química para 2,5 g de amostra

EXTRAÇÃO	CONDICIONANTES
Fase trocável de Tessier <i>et al.</i> (1979)	20 mL de $MgCl_2$ mol.L <sup>-1</sup> , pH 7, agitação contínua durante 1h
Extração simples com EDTA (WANG & QIN, 2007).	25 mL de EDTA 0,05 mol.L <sup>-1</sup> , pH 7, agitação contínua durante 2h

Os ensaios de extrações simples envolveram nas etapas utilização de uma mesa agitadora para agitação contínua de uma e duas horas de aproximadamente 100 rpm. Além de uma

centrífuga de 3000 rpm. Para a filtragem da amostra foram utilizadas membranas de fibra de vidro de aproximadamente  $1\mu\text{m}$  e bomba a vácuo. A Figura 4.8 apresenta parte do equipamento utilizado nas extrações químicas.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.8. Equipamento utilizado nas extrações químicas

- a) Agitador magnético, pHmetro e bomba a vácuo      b) Reagentes EDTA e  $\text{MgCl}_2$   
c) Filtro a vácuo      d) Membranas de fibra de vidro

#### 4.3.3.2. ESPECTROFOTOMETRIA DE ABSORÇÃO ATÔMICA

Com o líquido residual das extrações químicas foram feitas as leituras no espectrofotômetro de absorção atômica, no Laboratório de Geoquímica, do Instituto de Geociências da UnB. O equipamento utilizado é do modelo AAnalyst 200 da *Perkin Elmer*. Na Figura 4.9 é apresentado o aparelho e as amostras das extrações.

Antes das quantificações dos metais de interesse, o Cu e o Zn, foram analisados os resultados de pH, FRX, DRX, para proteger o aparelho de possíveis danos. Caso haja a leitura de uma amostra muito concentrada na determinação de um metal específico os equipamentos internos constituídos por espelhos podem ser facilmente danificados.

Para cada metal fez-se uma curva de calibração do aparelho com soluções-padrão para cinco diferentes concentrações. Utilizou-se água destilada para a limpeza do sistema conforme a necessidade do equipamento. Após a calibração, para cada metal foram determinadas as concentrações das amostras de rejeitos. Foram utilizadas como amostras de referência as soluções dos dois reagentes sem a amostra. O limite de quantificação (LQ) do aparelho para os metais de Cu e Zn foi de 0,15 ppm.

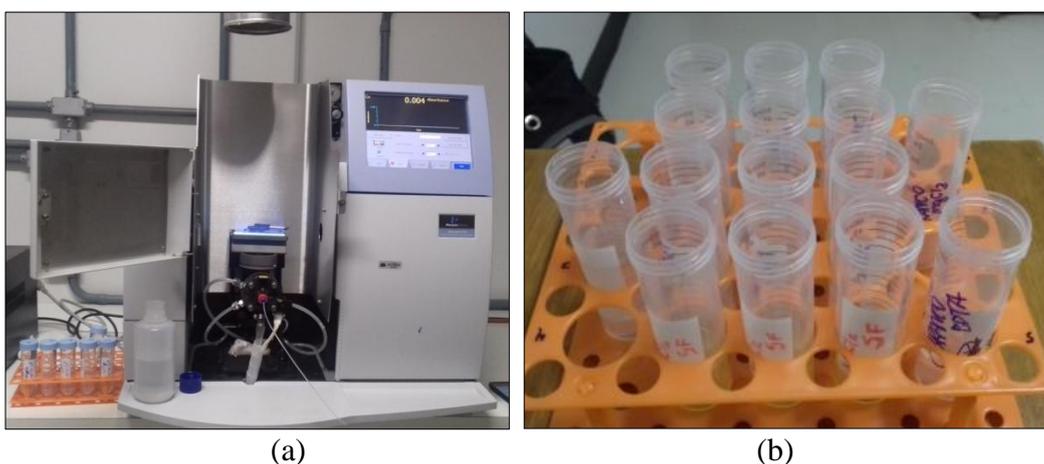


Figura 4.9. Ensaio de Espectrofotometria de Absorção Atômica

a) EAA - Modelo AAnalyst 200 Marca Perkin Elmer

b) Soluções resultantes das extrações para leitura de absorção atômica

#### 4.4. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

Na caracterização mineralógica das amostras de San Fernando e Paracatu foi utilizada a técnica de difração de raios X com a utilização do equipamento do modelo RIGAKU Ultima IV (Figura 4.10), no laboratório de Geociências da UnB. Uma quantidade de 50 g de cada amostra foi seca por 24 horas na estufa (105° C) e encaminhadas à análise para a determinação dos principais minerais presentes nos rejeitos.



Figura 4.10. Equipamento de análise de DRX, Marca RIGAKU (METOGO, 2013)

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados e as discussões dos ensaios e métodos propostos na metodologia de pesquisa, sendo elas a caracterização física, mineralógica, química e geoquímica dos rejeitos de San Fernando e Paracatu.

### 5.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Na caracterização física os resultados apresentados foram relacionados à análise granulométrica e à massa específica dos grãos das amostras estudadas.

#### 5.1.1. GRANULOMETRIA

A Figura 5.1. apresenta as curvas granulométricas para a amostra de San Fernando pela técnica de peneiramento e com a utilização do granulômetro a laser. A curva referente a aos resultados do granulômetro a laser por possuir mais divisões de frações granulométricas apresenta uma distribuição granulométrica melhor e mais discretizada do que a do método do peneiramento.

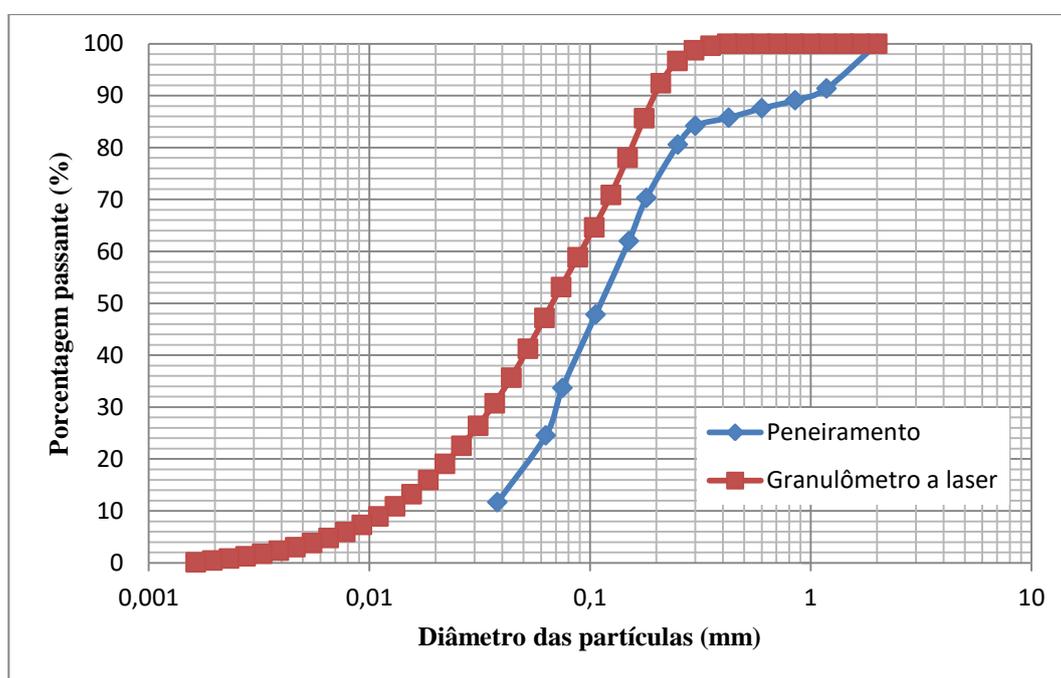


Figura 5.1. Curvas granulométricas do rejeito de SF a partir do peneiramento e granulômetro a laser

Mesmo com o cuidado do tratamento da amostra para destorroá-la por completo, a existência de agregados não desfeitos pode ter influenciado na porcentagem passante e ter

aumentado as porcentagens retidas nas peneiras no método de peneiramento. Comparando as duas curvas, a curva obtida por peneiramento está abaixo da obtida pelo granulômetro a laser, quando deveriam estar sobrepostas. Porém, mesmo com o deslocamento devido às diferenças em porcentagens, as curvas são semelhantes em formato entre as porcentagens passantes de 20 a 80%.

Ainda sobre a comparação dos dois métodos, as frações granulométricas mais finas e mais grossas do método de peneiramento podem ter apresentado porcentagens passantes diferentes do granulômetro a laser devido a quantidade de amostra utilizada no peneiramento, dificultando o rompimento de todos os agregados. A faixa granulométrica mais fina, que passou pela peneira de 0.038 mm (nº de malha 400) e ficou retida no fundo pode ter sido considerada como último tamanho de partícula, mascarando tamanhos inferiores como é detectado no granulômetro a laser. Isso pode ter acontecido também para curva granulométrica da amostra de Paracatu (Figura 5.2.), mas com a diferença de uma menor porcentagem retida, devido aos tamanhos de grãos serem maiores do que a amostra de San Fernando.

A Figura 5.2. apresenta a curva granulométrica do rejeito de Paracatu. Por apresentar poucas faixas granulométricas devido a uma disponibilidade menor de peneiras do que no ensaio realizado para amostra de San Fernando, algumas faixas granulométricas foram aglutinadas.

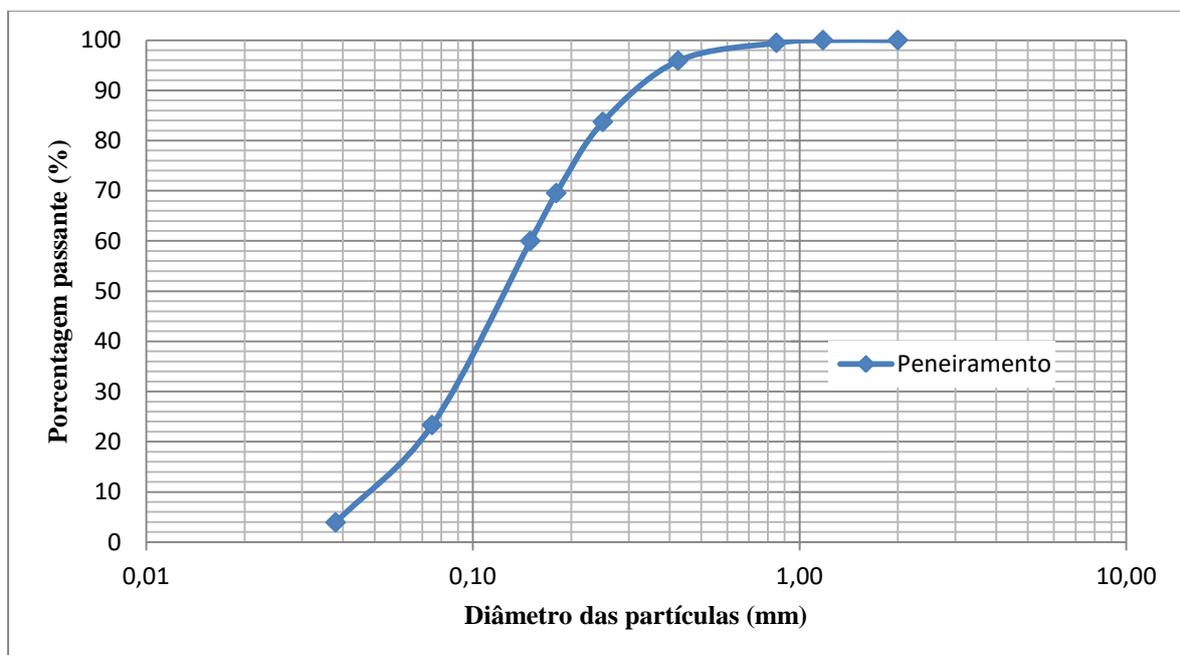


Figura 5.2. Curva granulométrica do rejeito de Paracatu a partir do peneiramento

O objetivo inicial era realizar o ensaio da amostra de Paracatu conforme os procedimentos utilizados para as amostras de San Fernando. Porém, não foi possível utilizar o granulômetro a laser, devido a problemas técnicos no aparelho no período de realização dos ensaios. Portanto, para amostra de Paracatu não foi possível a comparação de mais de um método como foi feito para a amostra de San Fernando.

A partir das curvas granulométricas foi possível observar a composição em porcentagem dos diferentes tamanhos de grãos que compõem os rejeitos e conforme é feito na classificação de solos. Tanto a amostra de San Fernando como a de Paracatu são compostas, em predominância por partículas semelhantes à fração areia fina. Ambos os rejeitos também possuem uma quantidade significativa de partículas finas, frações com tamanhos típicos de siltes e argilas (Tabela 5.1)

Tabela 5.1. Porcentagem de tamanhos de partículas do rejeitos

<b>Amostra</b> <b>Material</b>	<b>San Fernando</b>		<b>Paracatu</b>	
	ASTM (%)	NBR (%)	ASTM (%)	NBR (%)
Pedregulho fino	*	0	*	0
Areia grossa	0	0	0	0,54
Areia média	0	7,61	4,09	15,74
Areia fina	58,76	45,21	72,6	60,41
Silte	37,41	28,11	23,31**	23,31**
Argila	3,83	19,07		

\*Não faz parte da classificação da ASTM

\*\*Valor totaliza porcentagem de finos (Silte +Argila)

A classificação de San Fernando (Tabela 5.1.) foi feita a partir da curva do granulômetro a laser, que mostrou-se mais precisa do que a do método do peneiramento. A mesma curva foi utilizada para encontrar os parâmetros apresentados na Tabela 5.2., que diz respeito ao diâmetro efetivo das partículas ( $d_{10}$ ), ao CNU (Coeficiente de Não-Uniformidade) e CC (Coeficiente de Curvatura). Os dois coeficientes descrevem a graduação do solo, quanto a distribuição do tamanho das partículas.

Tabela 5.2. Índices granulométricos de San Fernando e Paracatu

<b>Amostra</b>	<b>D<sub>10</sub></b>	<b>D<sub>60</sub></b>	<b>D<sub>30</sub></b>	<b>CNU</b>	<b>CC</b>
<b>San Fernando</b>	0,013	0,091	0,037	7,000	1,157
<b>Paracatu</b>	0,048	0,160	0,089	3,333	1,031

Conforme os dados apresentados na Tabela 5.2., San Fernando apresenta  $CNU \geq 6$  (previsto para areias) e CC dentro do limite de 1 a , com essas características, a mostra pode ser classificada com uma distribuição bem graduada, com tamanhos de partículas em toda sua granulometria. Já Paracatu apresentou  $CNU < 6$ , o que caracteriza uma distribuição mais uniforme.

### 5.1.2.MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS

A massa específica dos grãos das amostras totais de San Fernando e Paracatu (Figura 5.3) apresentaram valores próximos. Os valores são justificados pela presença de minerais de ferro, que possuem massas específicas densas e são constituintes em grandes quantidades nos rejeitos estudados.

Tabela 5.3. Massa específica dos grãos dos rejeitos de San Fernando e Paracatu

<b>Amostra</b>	<b>San Fernando</b>	<b>Paracatu</b>
<b>Massa específica dos grãos</b>	2,8946 ± 0,0012	2,937 ± 0,036
<b>CV</b>	0,0412%	1,271%

As massas específicas dos grãos no rejeito de San Fernando variaram de acordo com as faixas granulométricas das frações que compõem esse rejeito. Os valores das massas específicas são mais baixos nas frações de granulometria mais grossa, possuem valores próximos da massa específica da amostra total e aumentam significativamente na granulometria mais fina (Figura 5.3).

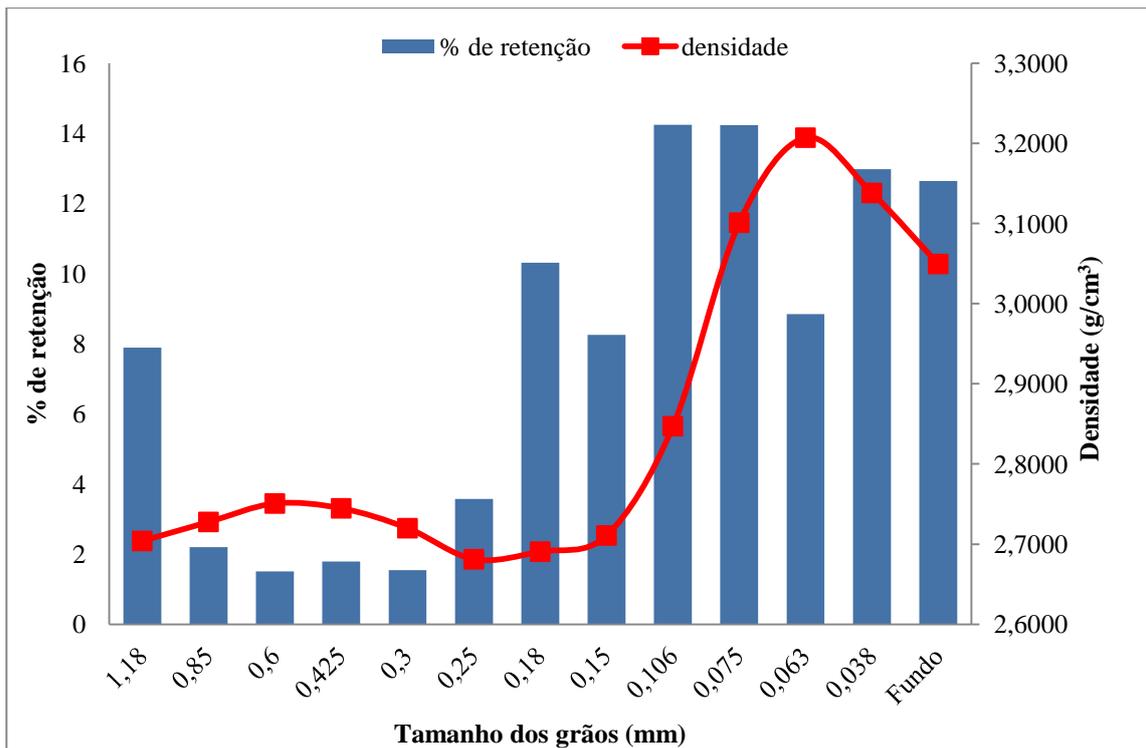


Figura 5.3. Gráfico de Granulometria x Massa específica dos grãos das frações amostra de San Fernando

## 5.2. CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA E QUÍMICA

A caracterização geoquímica e química apresenta os resultados dos ensaios de pH, condutividade elétrica, composição química (FRX) e as extrações químicas.

### 5.2.1. pH E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

O pH das amostras de San Fernando e Paracatu foram detectados como ácidos, sendo que o pH da amostra de Paracatu há uma proximidade do pH alcalino (Tabela 5.4.), em decorrência dos constituintes originais do rejeito ou dos processos envolvidos no beneficiamento do minério.

Como já apresentado, valores de pH mais baixos podem facilitar a liberação ou transferência de metais pesados para o ambiente e valores de pH mais altos podem reter estas substâncias no rejeito, dificultando sua liberação. O pH, sendo uma das características mais importante na caracterização do rejeito deve ser conhecido, além das demais características, garantindo o mínimo possível de ocorrência de impactos seja no local de disposição desse material ou no local onde vai ser reaproveitado.

A condutividade elétrica encontrada para as duas amostras de rejeito é relativamente alta, sendo detectada em maiores valores para o rejeito de Paracatu. Os resultados de CE podem estar associados a presença de íons (sulfatos, sais, prótons e metais), e principalmente a presença de sulfetos que sofrem dissolução na geração de drenagem ácida de mina. A presença de substâncias residuais dos processos de beneficiamento dos minérios podem aumentar a dissolução e, conseqüentemente, aumentar a CE.

Tabela 5.4. Análises de pH e condutividade elétrica dos rejeitos de San Fernando e Paracatu

ANÁLISE	pH		CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	
	San Fernando	Paracatu	San Fernando	Paracatu
<b>Réplica</b>				
<b>1</b>	2,13	6,70	7,31	75,36
<b>2</b>	2,16	6,72	7,18	76,10
<b>3</b>	2,14	6,73	7,67	78,40
<b>Média</b>	<b>2,14 ± 0,02</b>	<b>6,72 ± 0,02</b>	<b>7,39 ± 0,25</b>	<b>76,62±1,59</b>
<b>CV</b>	0,71%	0,23%	3,44%	2,07%

## 5.2.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

O ensaio de FRX detectou os principais elementos químicos presentes nos rejeitos e suas porcentagens relativas de acordo com a amostra analisada. A técnica de EAA quantificou a concentração de e a liberação de concentrações de Cu e Zn nos rejeitos de San Fernando e Paracatu

### 5.2.2.1. FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

Conforme os resultados da FRX apresentados na Tabela 5.5, a amostra de San Fernando é composta em sua maioria por silício, ferro, enxofre, alumínio, potássio, fósforo e por porcentagens menores de bário, titânio, actínio, zircônio e estrôncio. Na amostra de Paracatu foram detectados em porcentagens maiores ferro, titânio, silício, cálcio, magnésio, alumínio, fósforo, potássio, manganês e em porcentagens menores rutênio, cromo, cobre e zinco.

Tabela 5.5. Análise de FRX dos rejeitos de San Fernando e Paracatu

San Fernando			Paracatu		
Elemento Químico	Resultado (%)	Desvio-padrão	Elemento Químico	Resultado (%)	Desvio-padrão
Si*	33.346	0.064	Fe	42.493	0.044
Fe	29.139	0.028	Ti	18.381	0.037
S*	25.237	0.035	Si*	17.570	0.051
Al	7.304	0.053	Ca	9.180	0.021
K	2.973	0.017	Mg	4.216	0.093
P*	0.936	0.018	Al	3.146	0.044
Ba	0.483	0.022	P*	1.765	0.015
Ti	0.471	0.008	K	1.320	0.011
Ac**	0.057	0.002	Mn	1.088	0.009
Zr	0.030	0.001	Ru	0.613	0.005
Sr	0.023	0.001	Cr	0.113	0.005
			Cu	0.061	0.003
			Zn	0.055	0.002

\*Não-metais    \*\* Radioativos

A presença do ferro nos rejeitos de San Fernando e Paracatu justificam o valor da massa específica dos grãos detectada para as amostras desses rejeitos. Este aparelho de FRX quantificou apenas os elementos, equipamentos mais sofisticados de FRX são capazes de quantificar espécies metálicas de compostos minerais, que auxiliam ainda mais na caracterização do rejeito analisado.

O cobre o zinco foram detectados na amostra de Paracatu, porém em porcentagens muito baixas. No caso de San Fernando, esses metais nem foram detectados, há a possibilidade de estarem ligados a outros elementos, dificultando a detecção neste aparelho. As extrações podem dizer sobre as concentrações desses metais a serem liberados no meio ambiente com a utilização de reações químicas.

#### 5.2.2.2. EXTRAÇÕES QUÍMICAS E ESPECTROFOTOMETRIA DE ABSORÇÃO ATÔMICA

Os resultados das concentrações de Cu e Zn nos rejeitos determinados pelo EAA são apresentados na Tabela 5.6 Na amostra de San Fernando, o EDTA extraiu maiores concentrações dos metais do que o MgCl<sub>2</sub>, tanto para o Zn quanto para o Cu. As concentrações de Zn foram maiores do que as concentrações de Cu nas soluções dos dois extratores, sendo o Zn mais biodisponível do que o cobre na amostra de rejeito.

Tabela 5.6. Resultados de EAA da amostra de San Fernando

Amostra		San Fernando							
Extrator	EDTA		MgCl <sub>2</sub>		EDTA		MgCl <sub>2</sub>		
	mg/L (Cu)	mg/kg (Cu)	mg/L (Cu)	mg/kg (Cu)	mg/L (Zn)	mg/kg (Zn)	mg/L (Zn)	mg/kg (Zn)	
Réplica									
1	0,860	17,200	0,801	16,020	2,563	51,26	2,494	49,88	
2	0,875	17,500	0,812	16,240	2,475	49,500	2,482	49,64	
<b>Média</b>	<b>0,868</b>	<b>17,350</b>	<b>0,807</b>	<b>16,130</b>	<b>2,519</b>	<b>50,380</b>	<b>2,488</b>	<b>49,760</b>	
<b>DP</b>	0,002	0,212	0,008	0,156	0,062	1,245	0,008	0,170	
<b>CV</b>	1,22%	1,22%	0,96%	0,96%	2,47%	2,47%	0,34%	0,34%	
<b>IC 50%</b>	0,001	0,150	0,006	0,110	0,044	0,880	0,006	0,120	
<b>IC 90%</b>	0,009	0,947	0,036	0,696	0,277	5,559	0,036	0,759	

Na amostra de Paracatu os valores de concentrações detectadas para o metal Cu e o Zn foram muito baixos que poderiam ser confundidas com os ruídos do aparelho. Esses valores também foram menores do que o LQ, por isso não puderam ser quantificadas. Diante dessas considerações o Cu e Zn não foram detectados na amostra de Paracatu. (Tabela 5.7). Não quer dizer que esses metais não sejam encontrados no rejeito de Paracatu. Seriam necessárias extrações sequenciais para saber se nas outras fases poderiam ser detectadas concentrações significativas.

Tabela 5.7. Resultados de EAA da amostra de Paracatu

Amostra		Paracatu							
Extrator	EDTA		MgCl <sub>2</sub>		EDTA		MgCl <sub>2</sub>		
	mg/L (Cu)	mg/kg (Cu)	mg/L (Cu)	mg/kg (Cu)	mg/L (Zn)	mg/kg (Zn)	mg/L (Zn)	mg/kg (Zn)	
Réplica									
1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	

\*ND - Não detectado

Como o EDTA é quelante que possui seis ligantes (os quatro átomos de oxigênio e os dois átomos de nitrogênio) este reagente tem a capacidade de formar complexos muito estáveis, reduzindo a atividade dos íons metálicos na solução (HARRIS, 1948). À medida que reduz-

se a atividade dos íons, o equilíbrio que existia entre a amostra e a solução é deslocado e os íons metálicos passam para a solução, permitindo a ação extratora.

As extrações com o  $MgCl_2$ , definida como fase trocável na extração sequencial é a que determina a mobilidade de metais mais disponíveis ou biodisponíveis na amostra. Esses metais em condições ambientes podem ser liberados facilmente, contaminando solos e os corpos hídricos. Entretanto, Tessier e colaboradores (1979) ressaltam em seus estudos que o extrator cloreto de magnésio não retirou todos os metais considerados trocáveis nas extrações realizadas em sedimentos. Uma forma de avaliar a eficiência desse reagente extrator seria através de variações de pH, que influenciam significativamente na mobilidade dos metais.

Os valores de pH das soluções finais das extrações com os dois extratores apresentaram condições ácidas, porém as extrações com o  $MgCl_2$  apresentaram maior acidez (Tabela 5.8).

Tabela 5.8. pH final do extratos químicos

Amostra	San Fernando		Paracatu	
	EDTA	$MgCl_2$	EDTA	$MgCl_2$
Extrator				
Réplica				
1	4,17	1,96	6,67	5,22
2	4,17	1,95	6,62	5,19

As normas brasileiras que possuem referências para metais como o Zn e o Cu, dentre elas a NBR 10004 (ABNT, 2004) para resíduos sólidos e a Resolução CONAMA 420 para solos contaminados, utilizam procedimentos da USEPA próprios para obtenção dos extratos, não sendo possível a comparação dos resultados obtidos com os valores orientadores ou de referência das normas.

### 5.3. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

A caracterização mineralógica foi composta pelos difratogramas gerados pela análise de DRX das amostras de San Fernando e de Paracatu.

#### 5.3.1. DIFRAÇÃO DE RAIOS X

O difratograma de San Fernando (Figura 5.4) possui uma curva mais regular do que a curva do difratograma de Paracatu (Figura 5.5), com incidência de picos expressivos e picos

menos intensos. A curva apresentada pelo difratograma de Paracatu apresenta-se sob forma decrescente e com picos menos definidos que os da amostra de San Fernando.

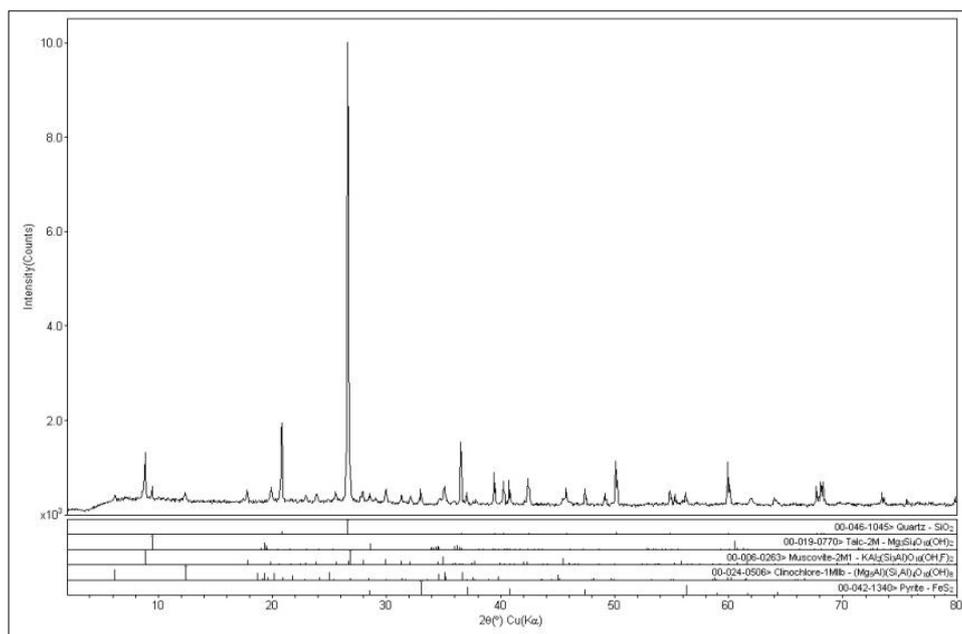


Figura 5.4. Análise de DRX do rejeito de San Fernando

A composição de minerais de San Fernando é basicamente formada por silicatos (quartzo, talco, muscovita, clorita) e sulfetos (pirita) (Tabela 5.9).

Tabela 5.9. Características dos minerais presentes na amostra de San Fernando segundo a DRX (Modificado - MACHADO *et. al.* , 2016)

Mineral	Grupo	Fórmula Química
<b>quartzo</b>	Silicatos	SiO <sub>2</sub>
<b>talco</b>	Silicatos	Mg <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
<b>muscovita</b>	Silicatos	KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub>
<b>clinocllore*</b>	Silicatos	(Mg <sub>5</sub> Al)(Si, Al) <sub>4</sub> (OH) <sub>8</sub>
<b>pirita</b>	Sulfetos	Fe <sub>2</sub> S <sub>2</sub>

\* representante do mineral clorita

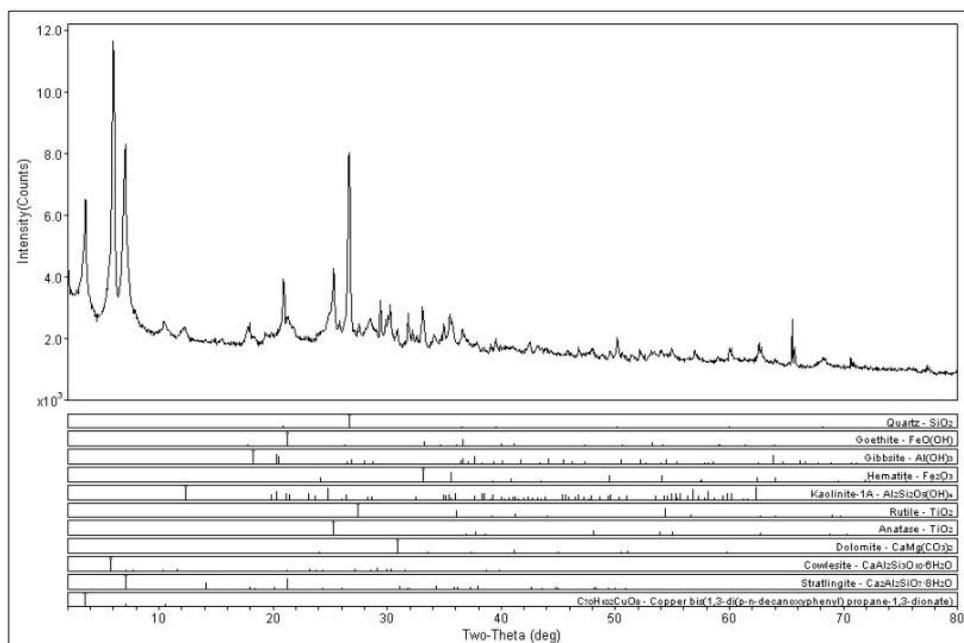


Figura 5.5. Análise de DRX do rejeito de Paracatu

Quando comparado ao resultado de San Fernando, a amostra de Paracatu possui maior número de minerais em composição. Além de serem detectados silicatos (quartzo e cowlesite), apresenta sulfetos (kaolinita), óxidos (goethita, gibbsita, hematita, rutilo e anatase) e carbonatos (dolomita) listados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10. Características dos minerais presentes na amostra de Paracatu segundo a DRX (Modificado - MACHADO *et al.*, 2016).

Mineral	Classificação	Fórmula Química
<b>quartzo</b>	Silicatos	SiO <sub>2</sub>
<b>goethita</b>	Óxidos	FeO (OH)
<b>gibbsita</b>	Óxidos	Al(OH) <sub>3</sub>
<b>hematita</b>	Óxidos	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>kaolinita</b>	Sulfetos	Fe <sub>2</sub> S <sub>2</sub>
<b>rutilo</b>	Óxidos	TiO <sub>2</sub>
<b>anatase</b>	Óxidos	TiO <sub>2</sub>
<b>dolomita</b>	Carbonatos	CaMg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
<b>Cowlesite</b>	Silicatos	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> .6H <sub>2</sub> O

Quanto a presença de sulfetos é importante mencionar sobre a possibilidade de ocorrência de drenagem ácida de mina, no local onde o material é disposto, causando danos maiores. E em termos de reaproveitamento a depender da utilização do rejeito, esse material pode trazer riscos caso não se atente para o controle ou inibição desse risco.

## 6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

A caracterização física das amostras de rejeitos de San Fernando e Paracatu permitiu classificá-los com a predominância de tamanhos de partículas de areia fina, silte e argila. Para a mostra de San Fernando foi possível diferenciar as porcentagens de silte e argila, pois a curva granulométrica obtida por meio do granulômetro a laser possibilitou a separação entre essas duas fases. Na amostra de Paracatu não foi possível visualizar essa separação, por ter sido realizado apenas o ensaio de peneiramento fino, devido ao curto prazo das análises. A amostra de rejeito de San Fernando apresentou granulometria bem graduada, enquanto que amostra de rejeitos de Paracatu apresentou granulometria uniforme. A respeito da massa específica dos grãos, os valores obtidos foram altos justificados pela quantidade de ferro presente nas amostras detectada no ensaio de FRX.

A caracterização mineralógica de San Fernando apresentou a composição predominante de silicatos e a presença de sulfetos, já a amostra de Paracatu tem em sua composição mineralógica óxidos, silicatos, sulfetos e carbonatos. Devido a presença de sulfetos nas duas amostras é considerável a possibilidade da ocorrência drenagem ácida de mina .

Quanto a caracterização química, foi detectado valores de pH ácidos para o rejeito de San Fernando e pH próximos a alcalino para o rejeito de Paracatu. A condutividade elétrica da amostra de Paracatu mostrou-se superior a da amostra San Fernando, mas ambos possuem CE elevadas. Com relação a composição química tanto o rejeito de San Fernando quanto o de Paracatu apresentaram altos teores de ferro e silício. A amostra de San Fernando também possui grande porcentagem de enxofre, enquanto que a de Paracatu possui titânio. Outros elementos foram detectados, porém em porcentagens mais baixas.

Por fim, quanto a caracterização geoquímica, as extrações simples nas amostras de San Fernando com EDTA extraíram maior concentrações de Zn e Cu do que o reagente  $MgCl_2$ . O metal Zn mostrou-se mais biodisponível do que o Cu, por apresentar maiores concentrações. Na amostra de Paracatu não foram detectados valores significativos dos metais Zn e Cu, porém há a possibilidade de serem extraídas concentrações desses metais em outras fases de extrações sequenciais. Os valores de pH dos extratos dos dois tipos de reagentes apresentaram condições ácidas, sendo as extrações com o  $MgCl_2$  as amostras com maior acidez.

A partir da pesquisa foi possível visualizar a complexidade dos rejeitos de mineração e a importância de se determinar características para bem disponibilizá-los no ambiente ou fazer o reaproveitamento de forma correta.

A biodisponibilidade de metais nos rejeitos ou qualquer material contaminado é relacionada com a capacidade de absorção dessas substâncias metálicas pelos organismos. Para melhor avaliá-la são necessários, por exemplo, ensaios para medir essa capacidade de absorção com uma espécie de planta nativa do local onde se encontra o material contaminado. E devem também ser feitas observações em uma escala temporal em que se possa observar essa retenção e os seus efeitos a partir de variações nas concentrações de metais.

A escolha pela avaliação dos metais analisados (Zn e Cu) foi feita de acordo com a disponibilidade operacional dos laboratórios . Outros metais poderiam ter sido analisados, mas não houve a possibilidade de realização devido a falta de tempo para as análises e recursos financeiros para os equipamentos.

Extrações simples são eficientes e podem fornecer informações sobre a biodisponibilidade de metais pesados no ambiente, porém realizar extrações sequenciais gera um aprofundamento maior dos conhecimentos sobre a mobilidade dos metais e permite a quantificação das espécies metálicas em cada fase do fracionamento químico.

O rejeito de Paracatu não apresentou Cu e Zn biodisponíveis, mas poderá conter estas substâncias e outros contaminantes envolvidas no processo de beneficiamento do ouro, não abordadas neste estudo, mas passíveis de serem quantificadas por meio de extrações sequenciais e a aplicação de outras metodologias. O rejeito de San Fernando além do cobre e do zinco pode apresentar outras substâncias nocivas ao meio ambiente e faz se necessário proceder sua identificação e as respectivas concentrações.

Devem ser feitas caracterizações minuciosas para conhecer e avaliar o comportamento de qualquer tipo de rejeitos seja para finalidade de reaproveitamento e/ou disposição. Essa análise completa do rejeito poderá reduzir futuros danos e orientar sobre o tratamento desse material antes de deixá-lo no ambiente sem que haja qualquer controle ou conhecimento dos efeitos que possam causar.

## **SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

- Realizar extrações sequenciais para as amostras compostas de rejeitos e para as frações granulométricas a fim de avaliar a influência do tamanho das partículas na mobilidade de metais;
- Analisar os efeitos dos dois métodos de obtenção da granulometria dos rejeitos usando o peneiramento convencional e o granulômetro a laser
- Avaliar o potencial de reaproveitamento desses rejeitos e os efeitos que podem causar ao ambiente;
- Realizar testes de toxicidade com espécies de plantas nativas dos locais de depósito desses rejeitos e avaliar a capacidade de absorção de metais por estes organismos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1984). Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica (método de ensaio) – NBR 6508/84. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 8 p.
- ABNT (1984). Solo - Análise granulométrica - NBR 7181/84. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 13p.
- ABNT (1995). Rochas e Solos - NBR 6502/95. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 18p.
- ABNT (2004). Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos - NBR 10005/04. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 16p.
- ABNT (2004). Procedimento para obtenção de extrato solubilizado e resíduos sólidos - NBR 10006/04. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 3p.
- ABNT (2004). Resíduos Sólidos - Classificação - NBR 10004/04. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 71p.
- ABREU, C. A.; ABREU, M. F.; BERTON, R.S. (2002). Análise química de solo para metais pesados. Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, **2**, p. 645 – 692.
- ALBERS, A.P.F.; MELCHIADES, F.G; MACHADO, R.; BALDO, J.B. & BOSCHI, A.O. (2002). "Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios x." *Cerâmica*, **48** (305), 34-37p.
- AMORIM, F.A.C.; LOBO I.P.; SANTOS V.L.C.S.; FERREIRA, S.L.C.; (2008) "Espectrometria de absorção atômica: o caminho para determinações multi-elementares." *Química Nova*, Bahia, BA. (31) 7, 1784-1790.
- ARAÚJO, C.B. (2006). Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro RJ, 143p.
- ARCIAL, F. (1991). Prospección Detallada del depósito mineral San Fernando. Inventario ONRM #4091, Santa Clara, Cuba.
- BOSCOV, M.E.G. (2008). *Geotecnia Ambiental*. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 13-20p. e 185-207p.
- CASTRO, I. G. (1998). "Environmental implications due to the dispersion of heavy metals (As, Cd, Zn, Cu, Pb) in abandoned mining works (San Fernando mine), Central Cuba".

- COSTA, A.V.; GUMIERI, A.G. & BRANDÃO, P.R.G. (2012). "*Estudo de caracterização e viabilidade do emprego do rejeito de sinter feed com alternativa de substituição das areias naturais como agregado na produção do concreto.*" *Construindo*, **5** (2), 42-52p.
- COSTA, C.N. (2005). Biodisponibilidade de Metais Pesados em Solos do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 126p.
- D'AGOSTINHO, L.F. (2008). Praias de Barragens de Rejeitos de Mineração: Características e Análise de Sedimentação. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 374 p.
- DE OLIVEIRA, R.C.B.; MARINS, R.V. (2011). "*Dinâmica de metais-traço em solo e ambiente sedimentar estuarino com um fator determinante no aporte desses contaminantes para o ambiente aquático: Revisão.*" *Revista Virtual de Química*, **3** (2), 88-102p.
- DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. Anuário mineral brasileiro. Brasília: DNPM, 2010. Disponível em: <[http://www.dnpm.gov.br/dnpm/paginas/anuario-ineral/arquivos/ANUARIO\\_MINERAL\\_2010.pdf](http://www.dnpm.gov.br/dnpm/paginas/anuario-ineral/arquivos/ANUARIO_MINERAL_2010.pdf)>
- DOMINGUES, T.G. (2009). Teor de Metais Pesados em Solo Contaminado com Resíduo de Sucata Metálica, em Função da sua Acidificação. Dissertação de Mestrado. Instituto Agrônomo, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 75p.
- FARIAS, W.M. (2012). Processos Evolutivos de Intemperismo Químico e Sua Ação no Comportamento Hidromecânico de Solos do Planalto Central. Tese de Doutorado. , Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 263 p.
- FARIAS, W.M., ROLIM, J.A., CAMAPUM de Carvalho, J., BOAVENTURA, G.R., MURRIETA, P. (2010). "*Proposição de metodologia para granulômetro a laser em solos tropicais*". *COMBRASEG*, Gramado, RS, 6p.
- FERREIRA, F.N.; MONTEIRO, M.I.C.; SILVA, L.I.D. (2003). "*Especiação de cromo em amostras de rocha petrolífera. Parte 2. Método de extração sequencial BCR*". Iniciação Científica, 12p.
- FERREIRA, P.R. & SANTANA, G.P. (2012). "*Tratamento químico seletivo: Uma especiação operacional*". *Scientia Amazonia*, **1**(3), 40-48.
- FILHO, V.F.N. (1999). "*Técnicas analíticas nucleares de fluorescência de raios x por dispersão de energia (ED-XRX) e por reflexão total (TXRF)*". *Fundamentos teóricos*, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo Piracicaba, SP, 63p.

- GAIVIZZO, L.H.B. (2001). Fracionamento e Mobilidade de Metais Pesados em Solo com Descarte de Lodo Industrial. Tese de Doutorado, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 136p.
- GALLARDO, E.E.A. (2008). Proyecto: Exploración y prospección Cobre-Zinc San Fernando. EGMC. Santa Clara, Cuba.
- GOMES, P.C.; FONTES, M.P.F.; COSTA, L.M. e MENDONÇA E.S. (1997). "Extração fracionada de metais pesados em latossolo vermelho-amarelo." *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, **21**, 543-551.
- HARRIS, D. C. (1948). Análise Química Quantitativa, Editora LTC, 7a edição (2001), Rio de Janeiro, RJ, 45-68p e 254-256p
- IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas. Relatório de Pesquisa, Brasília, 2012. Disponível em: <[http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatorio\\_pesquisa/120814\\_relatorio\\_atividade\\_mineracao.pdf](http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatorio_pesquisa/120814_relatorio_atividade_mineracao.pdf)>
- IUPAC - International Union of Pure and Applied Chemistry. IUPAC Technical Report. "Heavy Metals - A Meaningless Term?". Scotland, United Kingdom, 2002.
- JARDIM, A.B. (2013). Avaliação da Liberação e Toxicidade de Metais Potencialmente Tóxicos em Mineração (Perfil RP-7): O Caso de Andrianópolis (PR). Monografia de Graduação. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 91p.
- KINROSS. Site oficial da Kinross Gold Corporation. 2016. Disponível em: <<http://www.kinross.com.br/>> Acesso em: 19/10/2016.
- KUMMER, L. (2008). *Mineralogia e Fracionamento de Metais Pesados em Solos de Área de Mineração e Processamento de Chumbo, Andrianópolis-PR*. Dissertação de Mestrado. Setor de Ciências Agrárias, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 78p.
- LANEIRO, C.F.M. (2012). Avaliação da Biodisponibilidade de Metais em Solos Contaminados por Atividades Mineira: Métodos Químicos, Bioquímicos e Ecotoxicológicos. Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Beja, Escola Superior Agrária, Beja, Portugal, 129p.
- 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].ISBN: 85-89082-11-3. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/museudpm>> Acesso em: 11/11/2016.
- MARQUES, M. L & SILVA, E. J. Apostila de Materiais de Construção Civil. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia. Disponível em:<<http://www.ebah.com.br/>> Acesso em 30/11/2016.

- METOGO, D.A.N. (2015). Estudos Laboratoriais e Avaliação Estrutural de um Pavimento Asfáltico Construído com Misturas de Solo Tropical, Fosfogesso e Cal. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 207p.
- MILONAS, J.G. (2006). Análise do Processo de Reconstituição de Amostras para Caracterização do Comportamento de Barragens de Rejeitos de Minério de Ferro em Aterro Hidráulico. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 146p.
- NOCITI, D.M. (2011). Aproveitamento de Rejeitos Oriundos da Extração de Minério de Ferro na Fabricação de Cerâmicas Vermelhas. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP, 110p.
- OLIVEIRA, T.S. e COSTA, L.M. (2004). "Metals pesados em solos de uma topolitossequência do Triângulo Mineiro." *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, **28**, 785-796.
- PAPASSIOPI, N.; TAMBOURIS, S. e KONTOPOULOS, A. (1999). "Removal of heavy metals from calcareous contaminated soils by EDTA leaching." *Water Air and Soil Pollution*, **109**, 1-15p.
- PAPINI, C.J. (2003). Estudo Comparativo de Métodos de Determinação do Tamanho de Partícula. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia Associada a Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 130p.
- PASTORE, E. L. & MIOTO, J. A. (2000). "Impactos ambientais em mineração com ênfase à Drenagem Mineira Ácida e transporte de contaminantes". *Solos e Rochas*, São Paulo, **23**(1), p. 33-56.
- PELOZATO, M.; HUGEN, C.; CAMPOS, M.L.; ALMEIDA, J.A.; SILVEIRA, B.; MIQUELLUTI, D.J. e SOUZA, M.C. (2011) "Comparação entre métodos de extração de cádmio, cobre e zinco de solos catarinenses derivados de basalto e granito- migmatito." *Revista de Ciências Agroveterinárias*, **10** (1), 54-61p.
- PINTO, C.S. (2006). *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas, 3.ed.* Oficina de Textos, São Paulo, SP, 367p.
- RIBEIRO, L.F.M. (2000). Simulação Física do Processo de Formação dos Aterros Hidráulicos Aplicado a Barragens de Rejeitos. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 235p.
- RIBEIRO-FILHO, M.R.; SIQUEIRA, J.O.; CURI, N. e SIMÃO, J.B. (2001). "Fracionamento e biodisponibilidade de metais pesados em solo contaminado, incubado com materiais orgânicos e inorgânicos." *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, **25**, 495-507.
- RODRÍGUEZ, R.P; GARCÍA, A.C. (2006). Los residuos minero-metalúrgicos en el medio ambiente. Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Madrid 758p.

- SALOMONS, W. (1995). " *Environmental impact of metals derived from mining activities: processes, predictions, prevention.*" *J. Geochem. Explor.*, **52**, 5-23.
- SANTOS, D.A.M.; CURTI, A. e SILVA, J.M. (2010) " *Técnicas para a disposição de rejeitos de minério de ferro.*" *Trabalho Técnico do VI Congresso de Mina a Céu Aberto e Mina Subterrânea*, Belo Horizonte, MG.
- SANTOS, E.S.; GAMA, E.M.; FRANÇA, R.S.; SOUZA, A.S. MATOS, R.P. (2013). " *Espectrofotometria de fluorescência de raios X na determinação de espécies químicas.*" *Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhece*, **9** (17), 20p.
- SANTOS, M.J. (2012). *O Ouro e a Dialética Territorial em Paracatu: Opulência e Resistência.* Dissertação de Mestrado. Programa de Planejamento e Gestão Ambiental, Universidade Católica de Brasília, Brasília, DF, 194p.
- SANTOS, S.N.(2011). *Valores de Referência de Metais Pesados em Solos de Mato Grosso e Rondônia.* Dissertação de Mestrado. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 104p.
- SCOLMEISTER, D. (1999). *Biodisponibilidade de Metais Pesados em Solos do Rio Grande do Sul.* Dissertação de Mestrado. Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 89p.
- SILVA, J.P.S. (2007). " *Impactos ambientais causados por mineração.*" *Revista Espaço de Sophia*, (08), 1981-318x.
- SILVA, M.L. (2012). *Fracionamento de Metais Traço (Cr, Cu, Ni e Zn) em Solos e Sedimentos do Município de Madre de Deus, Bahia.* Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 90p.
- SILVA, S.R.; PROCÓPIO, S.O.; QUEIROZ, T.F.N. e DIAS, L.E.(2004). " *Caracterização de rejeito de mineração de ouro para avaliação de solubilização de metais pesados e arsênio e revegetação local.*" *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, **28**, 189-196.
- SKOOG; WEST; HOLLER; CROUCH. (2005) *Fundamentos de química analítica.* 8.ed., Thomson, 1124p.
- SOSA, E.R. (2016). *Caracterização e Aproveitamento dos Rejeitos Oriundos de Processos Hidrometalúrgicos do Níquel e Cobalto com um Enfoque Geoambiental.* Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 169p.
- SOUZA, R.A.S.; BISSANI, C.A.; TEDESCO, M.J. e FONTOURA, R.C. (2012). " *Extração sequencial de zinco e cobre em solos tratados com lodo de esgoto e composto de lixo.*" *Química Nova*, **35**(2), 308-314.
- TERRELL, D. (2007). *Avaliação da Qualidade da Água Subterrânea em Área de Mineração de Caulim: Impactos e Perspectivas de Remediação*, Município de Mogi das Cruzes, SP. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 127p.

VASILIEV, E. (1988). Informe del Levantamiento Geológico y Búsqueda 1:50 000 Parte Norte de Las Villas. Jíbaro-Baez, Villa Clara, Cuba.

VICK, S. G. (1983). Planning, design and analysis of tailings dams. New York: Wiley International.

WANG, X.S. & QIN, Y. (2007). "*Leaching Characteristics of Heavy Metals and As from Two Urban Roadside Soils*". *Environ Monit Assess*, **132**: 83-92.

## ANEXOS

Tabela A1. Planilhas das curvas granulométricas da amostra de Paracatu (peneiramento) e da amostra de San Fernando (granulômetro a laser).

### PARACATU

MESH	% PASSANTE	% RETIDA	ASTM	%	NBR	%
10	100,00	0	AREIA G	0%	PEDREGULHO FINO	0%
16	100,00	0	AREIA M	4,09%	AREIA GROSSA	0,54%
20	99,46	0,539952846			AREIA MÉDIA	15,74%
40	95,91	4,091181177			AREIA FINA	60,41%
60	83,72	16,28043343	AREIA F	72,60%	AREIA FINA	60,41%
80	69,52	30,4804603				
100	59,97	40,02858574				
200	23,31	76,69162829				
400	3,91	96,09328235	SILTE	23,31%	SILTE	23,31%
FUNDO	0	100	ARGILA		ARGILA	

**SAN FERNANDO**

d (mm)	% PASSANTE	% RETIDA	ASTM	%	NBR	%
2	100,00	0,00	AREIA G	0%	PEDREGULHO FINO	0%
1,674	100,00	0,00	AREIA MÉDIA	0%	AREIA GROSSA	0%
1,408	100,00	0,00				
1,184	100,00	0,00				
0,9955	100,00	0,00				
0,8371	100,00	0,00				
0,7039	100,00	0,00				
0,5919	100,00	0,00				
0,4978	100,00	0,00				
0,4186	100,00	0,39	AREIA FINA	58,76%	AREIA MÉDIA	7,61%
0,352	99,61	0,87				
0,296	98,74	2,06				
0,2489	96,68	4,29				
0,2093	92,39	6,74			AREIA FINA	45,21%
0,176	85,65	7,60				
0,148	78,05	7,18				
0,1244	70,87	6,25				
0,1046	64,62	5,75				
0,08799	58,87	5,75				
0,07399	53,12	5,94				
0,06222	47,18	5,94				
0,05232	41,24	5,57	SILTE	37,41%	SILTE	28,11%
0,044	35,67	4,94				
0,037	30,73	4,33				
0,03111	26,40	3,85				
0,02616	22,55	3,48			ARGILA	19,07%
0,022	19,07	3,12				
0,0185	15,95	2,73				
0,01555	13,22	2,33				
0,01308	10,89	1,95				
0,011	8,94	1,63				
0,00925	7,31	1,37				
0,00778	5,94	1,15				
0,00654	4,79	0,96	ARGILA	3,83%		
0,0055	3,83	0,81				
0,00462	3,02	0,68				
0,00389	2,34	0,58				
0,00327	1,76	0,50				
0,00275	1,26	0,43				
0,002312	0,83	0,38				
0,001944	0,45	0,34				
0,001635	0,11	0,11				
0,001375	0,00	0,00				

Tabela A2. Teste estatístico aplicado ao resultado de EAA de SF

<b>INTERVALO DE CONFIANÇA</b>	
t 50%	1,000
t 90%	6,314
n	2
graus de liberdade	1