

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

**REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO  
E OURO COM BASE EM UMA CARACTERIZAÇÃO  
TECNOLÓGICA E GEOAMBIENTAL**

**THAÍS GUIMARÃES DOS SANTOS**

**ORIENTADOR: LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, D.Sc**

**COORIENTADORA: EVELIN RODRÍGUEZ SOSA, D.Sc**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.DM-312/18**

**BRASÍLIA/DF: JULHO/2018**

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

**REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO E  
OURO COM BASE EM UMA CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA E  
GEOAMBIENTAL**

**THAÍS GUIMARÃES DOS SANTOS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

**APROVADA POR:**

---

**LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, D.Sc. (UnB)**  
**(ORIENTADOR)**

---

**ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, D.Sc. (UnB)**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**ELISABETH RITTER, D.Sc. (UERJ)**  
**(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 24 de JULHO de 2018**

## FICHA CATALOGRÁFICA

SANTOS, THAÍS GUIMARÃES DOS

Reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro e ouro com base em uma caracterização tecnológica e geoambiental [Distrito Federal] 2018

xix, 91 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2018)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

Palavras chaves:

- |                     |                              |
|---------------------|------------------------------|
| 1. Rejeito de ferro | 2. Rejeito de ouro           |
| 3. Reaproveitamento | 4. Disponibilidade de metais |
| I. ENC/FT/UnB       | II. Mestre                   |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS, T. G (2018). Reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro e ouro com base em uma caracterização tecnológica e geoambiental. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-312/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 91 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Thaís Guimarães dos Santos

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro e ouro com base em uma caracterização tecnológica e geoambiental

GRAU/ANO: Mestre/2018

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



Thaís Guimarães dos Santos

Av. Jk, 220, apartamento 100, Centro. 35500-155. Divinópolis-MG

thaisguimaraess@hotmail.com

## DEDICATÓRIA

“ Sempre na mente hás de ter Ítaca.

    Chegar lá é teu destino.

    Mas nunca apresses a viagem.

    É melhor que ela dure muitos anos

    E que já velho chegues à ilha,

Rico de tudo o que ganhastes pelo caminho,

    Sem esperar que Ítaca te dê riquezas.

    Ítaca te deu a bela viagem.

    Sem ela não terias empreendido o caminho.

    Já não tem outra coisa que te dar.

    E se a encontras pobre, Ítaca não te enganou.

    Sábio como te tornaste, com tantas experiências,

    Terás compreendido o que significam as Ítacas. ”

Konstantínos Kaváfis, “Ítaca”

## AGRADECIMENTOS

Ao Luís Fernando, que antes era meu orientador, hoje um amigo. Exemplo de professor humanizado. Agradeço também pela confiança.

À Evelin pelo aprimoramento da metodologia.

Aos meus queridos professores da graduação, Carolina e Maurício por suas constantes ajudas e ao Ériclis, pelo incentivo nessa caminhada.

Aos grandes amigos que fiz durante o mestrado e que muito me ajudaram, em especial a Ana Luísa, André, Andrea, Humberto, Igor, Isac, Marcone e Rogério. Ao Rafael pela doce companhia.

Ao Fernando Vilela pelo auxílio na execução do CTC, críticas, incentivo e prontidão em sanar minhas dúvidas ao longo do processo de elaboração da dissertação.

Aos professores e aos técnicos responsáveis do Laboratório de Geotecnia, Laboratório da Central Analítica e Multiusuário do Instituto de Química, Laboratório de Geoquímica, Laboratório de Difractometria de Raios X, Laboratório de Preparação de Amostras e Separação de Minerais, Laboratório de Geocronologia, todos da Universidade de Brasília. Em especial, agradeço ao Myller pelo auxílio na execução dos ensaios realizados no Laboratório de Geoquímica, rapidez em me atender e suporte na obtenção dos resultados.

Aos professores do programa de geotecnia pelos ensinamentos. Aos professores Elisabeth Ritter e André Brasil pelas críticas e sugestões que muito contribuíram para a finalização da dissertação.

À CAMPO ANÁLISES pela realização do ensaio de CTC.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Aos meus pais por sempre acreditarem em mim!

# **REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO E OURO COM BASE EM UMA CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA E GEOAMBIENTAL**

## **RESUMO**

A indústria mineral gera um grande volume de rejeitos originários do beneficiamento de minérios. Comumente, os rejeitos são armazenados permanentemente em barragens e pilhas de rejeito caso não sejam destinados a alguma utilização. Entretanto, os rejeitos podem apresentar materiais com usos potenciais em obras civis, o que diminuiria a exploração das jazidas de agregados naturais e atenuaria os danos ao meio ambiente. Por isso, os estudos de reaproveitamento de rejeitos não devem ser realizados avaliando somente critérios mecânicos, mas também e principalmente os aspectos ambientais, já que os rejeitos podem conter metais pesados e causarem contaminação do meio ambiente devido ao seu emprego inadequado. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de reaproveitamento de rejeito de mineração de ferro e ouro em aplicações geotécnicas sob o aspecto ambiental. Os rejeitos foram submetidos a caracterização física, mineralógica, química e geoquímica. Com os resultados, verificou-se a presença de elementos químicos potencialmente tóxicos ao meio ambiente, sendo necessário a realização de estudos geoambientais mais específicos como forma de compreender a mobilidade e disponibilidade dos metais para o meio ambiente. Entretanto, os estudos geoquímicos e geoambientais revelaram a baixa tendência de mobilidade e disponibilidade desses metais. Posteriormente, utilizou-se um solo laterítico de Brasília-DF, o qual também foi caracterizado, em misturas de 5%, 10% e 15% em massa de rejeitos. As misturas foram submetidas a ensaios químicos e mecânicos como forma de simular uma reutilização. Foi verificado o aumento de resistência das misturas em relação ao solo e também a baixa capacidade do solo de retenção de metais. Por fim, verifica-se o potencial de aproveitamento dos rejeitos estudados em obras geotécnicas, especialmente pela baixa tendência destes de contaminar o meio ambiente.

# **REUSE OF IRON AND GOLD ORE TAILINGS BASED ON A TECHNOLOGICAL AND GEOENVIRONMENTAL CHARACTERIZATION**

## **ABSTRACT**

The mineral industry generates a large volume of tailings originating from the beneficiation of the ore. Commonly, tailings are permanently stored in dams and tailings piles if they are not destined for some use. However, tailings can present materials with potential uses in civil construction, which would reduce the exploitation of natural aggregate deposits and reduce environmental damage. However, tailing reuse studies should not only be carried out evaluating mechanically, but also and especially from the environmental point of view, since the tailings can contain heavy metals and cause to environmental contamination due to their inadequate use. With this, the objective of this work was to evaluate the potential of reuse of iron and gold mining tailings in geotechnical applications under the environmental aspect. The tailings were submitted to physical, mineralogical, chemical and geochemical characterization. With the results, it was verified the presence of chemical elements potentially toxic to the environment, being necessary the accomplishment of more specific geoenvironmental studies as a way to understand the mobility and availability of the metals for the environment. However, the geochemical and geoenvironmental studies revealed the low tendency of mobility and availability of these metals. Subsequently, a lateritic soil from Brasília-DF was used, which was also characterized, in mixtures of 5%, 10% and 15% by mass of tailings. The mixtures were submitted to chemical and mechanical tests as a simulation of reuse. It was verified the increase of resistance of the mixtures in relation to the soil and also the low capacity of retention of metals. Finally, the potential of the tailings studied in geotechnical applications is verified, especially due to their low tendency to contaminate the environment.





3.3.5.5	EXTRAÇÃO SEQUENCIAL .....	40
CAPÍTULO 4	.....	43
4.	ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS CARACTERIZAÇÕES DOS REJEITOS.....	43
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS REJEITOS .....	43
4.1.1	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA .....	43
4.1.2	MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS ( $\rho_s$ ).....	45
4.1.3	ANÁLISE MORFOLÓGICA .....	47
4.1.4	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MAGNÉTICO.....	49
4.2	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....	49
4.2.1	DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX) .....	49
4.3	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA .....	51
4.3.1	FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X E ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓPTICA COM PLASMA .....	51
4.4	CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA .....	53
4.4.1	pH, CONDUTIVIDADE ELÉTRICA, POTENCIAL DE OXIRREDUÇÃO... 54	
4.5	CARACTERIZAÇÃO GEOAMBIENTAL .....	55
4.5.1	EXTRAÇÕES SIMPLES.....	55
4.5.1.1	LIXIVIAÇÃO.....	55
4.5.1.2	SOLUBILIZAÇÃO .....	56
4.5.1.3	EXTRAÇÃO COM ÁGUA DESTILADA .....	58
4.5.1.4	EXTRAÇÃO COM EDTA.....	59
4.5.2	EXTRAÇÃO SEQUENCIAL .....	61
CAPÍTULO 5	.....	68
5.	AVALIAÇÃO DAS POSSIBILIDADES DE REAPROVEITAMENTO.....	68
3.4	CONSIDERAÇÕES ADOTADAS .....	68
3.5	METODOLOGIA DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....	68

3.5.5	CAPACIDADE DE TROCA CATIONICA (CTC).....	69
3.6	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....	69
3.7	ESTUDOS DAS MISTURAS DE SOLO COM REJEITOS .....	72
3.7.5	ESTUDOS QUÍMICOS .....	72
3.7.6	ESTUDOS MECÂNICOS .....	75
3.7.6.1	COMPACTAÇÃO.....	76
3.7.6.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL (RCS) .....	79
CAPÍTULO 6.....		82
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS .....	82
6.1	ASPECTOS SOBRE A CARACTERIZAÇÃO DOS REJEITOS .....	82
6.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE REAPROVEITAMENTO DOS REJEITOS DE FERRO E OURO EM APLICAÇÕES GEOTÉCNICAS .....	83
6.3	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		85

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Classificação dos resíduos sólidos (modificado de Sosa, 2016).....	7
Figura 2.2 Fluxograma de classificação de resíduos solos perante a NBR 10.004 (ABNT, 2004a).....	8
Figura 2.3 Classes dos resíduos sólidos gerados no ano de 2016 em Minas Gerais (FEAM, 2017).....	12
Figura 2.4 Destinações de rejeito dentro da mineração no estado de Minas Gerais no ano de 2016 (FEAM, 2017).....	13
Figura 2.5 Destinações de estéril dentro da mineração no estado de Minas Gerais no ano de 2016 (FEAM, 2017).....	13
Figura 2.6 Esquema conceitual do reaproveitamento de rejeitos (Sosa, 2016).....	20
Figura 3.1 a) amostra do rejeito de ferro; b) amostra do rejeito de ouro .....	30
Figura 3.2 Amostras antes do recobrimento com carbono.....	32
Figura 3.3 Materiais utilizados no ensaio de comportamento magnético .....	33
Figura 3.4 a) almofariz de ágata para destorroar amostra; b) amostras preparadas para análise de DRX.....	34
Figura 3.5 a) Preparação da solução de EDTA; b) Extração no rejeito de ferro c) Extração no rejeito de ouro.....	40
Figura 3.6 a) extração da fração trocável b) extração da fração reduzível c) extração da fração oxidável; d) digestão das amostras para ICP.....	42
Figura 4.1 Curva granulométrica do rejeito de ferro.....	43
Figura 4.2 Curva granulométrica do rejeito de ouro .....	44
Figura 4.3 Massas específicas das frações retidas no peneiramento do rejeito de ferro .....	46
Figura 4.4 Massas específicas das frações retidas no peneiramento do rejeito de ouro .....	46
Figura 4.5 Morfologia das partículas do rejeito de ferro; a) aumento de cerca de 100 vezes b) aumento de cerca de 300 vezes c) aumento de cerca de 400 vezes d) aumento de cerca de 400 vezes .....	48
Figura 4.6 Morfologia das partículas do rejeito de ouro; a) aumento de cerca de 100 vezes b) aumento de cerca de 300 vezes c) aumento de cerca de 400 vezes d) aumento de cerca de 800 vezes .....	48
Figura 4.7 susceptibilidade magnética a) amostra de rejeito de ferro b) amostra de rejeito de ouro.....	49
Figura 4.8 Distribuição dos metais entre as formas químicas para o rejeito de ferro .....	63

Figura 4.9 Distribuição dos metais entre as formas químicas para o rejeito de ouro.....	65
Figura 4.10 Distribuição de As, Mn e Pb nos diferentes grupos químicos; a) rejeito de ferro; b) rejeito de ouro .....	66
Figura 5.1 Distribuição granulométrica do solo.....	70
Figura 5.2 Curva de compactação do solo e das misturas com rejeito de ferro .....	76
Figura 5.3 Curvas de índice de vazios e umidade do solo e misturas com rejeito de ferro .....	77
Figura 5.4 Curvas de compactação do solo e misturas com rejeito de ouro .....	78
Figura 5.5 Índice de vazios dos pontos compactados .....	78
Figura 5.6 Resultados da RSC.....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 rejeitos gerados e projeção futura para as principais substâncias produzidas no país (IPEA, 2012) .....	14
Tabela 3.1 Procedimento de extração conforme SPLP .....	38
Tabela 3.2 Procedimentos para a execução do ensaio de solubilização.....	39
Tabela 3.3 Procedimento BCR modificado (Rauret <i>et al.</i> , 1999).....	41
Tabela 4.1 Índices granulométricos da amostra de rejeito de ferro .....	44
Tabela 4.2 Índices granulométricos da amostra de rejeito de ouro .....	45
Tabela 4.3 Massa específica dos grãos.....	45
Tabela 4.4 DRX da amostra de rejeito de ferro.....	50
Tabela 4.5 DRX da amostra de rejeito de ouro .....	50
Tabela 4.6 Composição química dos rejeitos pelos métodos de FRX e ICP-OES .....	52
Tabela 4.7 Parâmetros geoquímicos dos rejeitos .....	54
Tabela 4.8 Resultados da lixiviação .....	56
Tabela 4.9 Resultados do ensaio de solubilização .....	57
Tabela 4.10 Extração simples com água destilada .....	58
Tabela 4.11 Resultado dos extratos de EDTA .....	60
Tabela 4.12 Ordem de disponibilidade dos metais .....	61
Tabela 4.13 Resultados do BCR modificado (Rauret, <i>et al.</i> ,1999) para a amostra de rejeito de ferro .....	62
Tabela 4.14 Resultados do BCR modificado (Rauret, <i>et al.</i> ,1999) para a amostra de rejeito de ouro.....	64
Tabela 4.15 Disponibilidade dos metais nas amostras dos rejeitos por fração .....	67
Tabela 5.1 Limites de consistência do solo.....	70
Tabela 5.2 Resultado da DRX para o solo .....	71
Tabela 5.3 Composição química do solo .....	71
Tabela 5.4 CTC do solo.....	72
Tabela 5.5 CTC das misturas de rejeito com solo.....	73
Tabela 5.6 Resultados de pH em água, KCl e $\Delta$ pH .....	73
Tabela 5.7 Resultados da RCS .....	79

## NOMENCLATURA, SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

AAS	Espectrometria de Absorção Atômica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AES	Espectrometria de Emissão Atômica
Al	Alumínio
As	Arsênio
ASTM	<i>American Society for testing and materials</i>
Ba	Bário
BCR	<i>European Communities Bureau of Reference</i>
C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	Acetato de amônio
Ca	Cálcio
CaCl <sub>2</sub>	Cloreto de cálcio
CBR	Índice de Suporte Califórnia
CC	Coefficiente de Curvatura
Cd	Cádmio
CE	Condutividade Elétrica
CH <sub>3</sub> COOH	Ácido Acético
C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	Acetato de Amônio
CL-ML	Argila siltosa de baixa compressibilidade
cm	Centímetro
CNU	Coefficiente de Não Uniformidade
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
Co	Cobalto
Cr	Cromo
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
Cu	Cobre
D <sub>10</sub>	Diâmetro efetivo
D <sub>30</sub>	Diâmetro das peneiras que permitem passar 30% do solo em massa
D <sub>60</sub>	Diâmetro das peneiras que permitem passar 60% do solo em massa

DAM	Drenagem ácida de mina
DE	Destino Externo
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DM	Dentro da Mineração
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
DTPA	Ácido dietilenotriamina penta acético
DRX	Difração de Raio X
e	Índice de vazios
EDTA	Ácido etilenodiamino tetra-acético
EDX	Energia Dispersiva
EGTA	Ácido etilenoglicol tetracético
Eh	Potencial de oxirredução
EPI	Equipamento de Proteção Individual
Fe	Ferro
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
FRX	Fluorescência de Raios X
FTIR	Espectroscopia de Infravermelhos
g	Grama
h	Hora
H	Hidrogênio
HCl	Ácido clorídrico
$HClO_4$	Ácido perclórico
HEDTA	Ácido Hidroxietilenodiamino-triacético
HF	Ácido fluorídrico
Hg	Merúrio
$HNO_3$	Ácido nítrico
$H_2O_2$	Peróxido de hidrogênio
$HONH_2 \cdot HCl$	Cloreto de hidroxilamônio
$H_2SO_4$	Ácido sulfúrico
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração

ICP-OES	Espectrometria de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente
IP	Índice de Plasticidade
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
K	Potássio
K	Kelvin
KCl	Cloreto de potássio
Kg	Quilograma
kN	Quilonewton
kPa	Quilopascal
kV	Quilovolt
L	Litro
Li	Lítio
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
M	Molar
m	Metro
mA	Miliampère
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
mg	Miligrama
Mg	Magnésio
MG	Minas Gerais
min	Minuto
ml	Mililitro
mm	Milímetro
mmol <sub>c</sub>	milimol de carga
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio

Mt	Milhões de toneladas
mV	Microvolts
N	Newton
Na	Sódio
NBR	Normas Brasileiras
ND	Não é possível ser detectado pelo método
NI	Não identificado
Ni	Níquel
O	Oxigênio
P	Fósforo
PA	Pará
pE	Potencial redox em termo de atividade na solução
Pb	Chumbo
pH	Potencial hidrogeniônico
PIB	Produto Interno Bruto
PPG	Programa de pós graduação em geotecnia
PVC	Policloreto de vinila
RCD	Resíduos de construção e demolição
RCS	Resistência à compressão simples
REM	Relação Estéril/Minério
Rh	Ródio
ROM	<i>Run of mine</i>
S	Enxofre
Se	Selênio
SP	São Paulo
SDD	Sem Destino Definido
Si	Silício
SINFERBASE	Sindicato Nacional da Indústria da Extração do Ferro e Metais Básicos
SPLP	<i>Synthetic Precipitate Leaching Procedure</i>
Sr	Estrôncio

SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
TCLP	<i>Toxicity Characteristic Leaching Procedure</i>
Ti	Titânio
U	Urânio
UnB	Universidade de Brasília
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
V	Vanádio
Zn	Zinco
Zr	Zircônio
Mm	Micrômetro
$\mu\text{S}$	Microsiemens
$^{\circ}\text{C}$	Grau célsius
%	Porcentagem
$\gamma_d$	Peso específico aparente seco ( $\text{N}/\text{m}^3$ )
$\theta$	Ângulo de contato
$\Delta\text{pH}$	Variação do pH ( $\text{pH}_{\text{kcl}} - \text{pH}_{\text{água}}$ )
$\rho_s$	Massa específica dos grãos ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

## CAPÍTULO 1

### 1. INTRODUÇÃO

A mineração complementada pela siderurgia constitui uma das atividades essenciais no desenvolvimento do mundo moderno. Nesse contexto, o Brasil, por sua diversidade mineral e extensão territorial detém posição de destaque no cenário mundial quando se trata de reservas e produção de bens minerais. Destacam-se os bens minerais metálicos que correspondem a mais de 91% das exportações de bens minerais do país, sendo o ferro e o ouro os mais importantes em termos econômicos (Salomão, 2015).

Apesar da grande importância econômica do setor industrial minerário, este representa um agente potencialmente degradante do meio físico no qual está inserido devido a geração de resíduos de suas atividades, sendo eles, predominantemente, estéreis e rejeitos. Com a produção de ferro e ouro, não é diferente, sendo um dos maiores impactos ambientais advindos dessas produções o grande volume de rejeito gerado no processo de beneficiamento (Andrade, 2014).

Os rejeitos, resíduos do beneficiamento mineral, comumente, seguem para o armazenamento a céu aberto, onde irão compor permanentemente barragens e pilhas de rejeito caso não sejam destinados a alguma utilização. Essas estruturas de armazenamento dão origem a impactos ambientais negativos desde a sua construção, operação e podem perdurar inclusive até mesmo após a sua desativação.

Os rejeitos, contudo, podem ainda conter expressivos teores metálicos e serem passíveis de retornarem ao processo produtivo. Além disso, os rejeitos podem apresentar materiais com usos potenciais em obras civis. Suas reutilizações atenuam os danos ao meio ambiente e contribuem com o papel socioambiental das mineradoras perante a opinião pública e órgãos ambientais.

Entretanto, a avaliação de reaproveitamento de rejeitos de mineração é complexa. Os rejeitos apresentam grande variabilidade de características decorrentes da própria heterogeneidade geológica e especificações dos tratamentos de minérios para que atendam ao mercado consumidor. Com isto, cada rejeito possui importantes particularidades e os estudos de

caracterizações se tornam complexos.

Os estudos de reaproveitamento de rejeitos de mineração não devem somente avaliar o comportamento mecânico dos novos materiais perante as possíveis solicitações a que esses poderão ser submetidos. Mas também investigar a interação dos rejeitos com o meio ambiente, já que os rejeitos podem conter substâncias potencialmente contaminantes e indutoras de mecanismos de geração de drenagem ácida. Neste sentido, podem ser empregadas técnicas que simulam a interação do rejeito com o meio ambiente e procedimentos mais complexos como as especiações químicas. Isto porque a contaminação do meio ambiente não está exclusivamente relacionada a concentração elementar dos metais, mas a processos químicos e bioquímicos (Bosco, 1997). Desta forma, é necessário o conhecimento de parâmetros geoquímicos e as formas químicas dos rejeitos, a fim de prever a sua mobilização e disponibilidade no meio ambiente, além de parâmetros do meio em que o rejeito passará a interagir.

Nesse contexto, a presente pesquisa visa avaliar, sob o aspecto ambiental, o potencial de reaproveitamento de rejeitos oriundos da mineração de ferro e ouro em obras geotécnicas por meio de misturas de solo com os rejeitos.

## **1.1 MOTIVAÇÃO**

A preocupação pela conservação ambiental tem impulsionado cada vez mais estudos relacionados ao reaproveitamento de rejeitos. No âmbito da mineração, essa preocupação reforça-se ainda mais pela necessidade da produção dos bens minerais e pelos teores cada vez menores de minérios que vem sendo encontrados. O que resulta em um volume maior de material a ser processado para conseguir suprir a demanda do mercado e a consequente geração de um maior volume de resíduos.

Mesmo com o emprego de novas tecnologias para as etapas de lavra e beneficiamento, no sentido de maximizar o aproveitamento mineral, este ainda não elimina a geração dos resíduos e não diminuem os impactos ambientais causados pelos depósitos de armazenamento de rejeitos já formados.

Além dos impactos ambientais causados pelo armazenamento de rejeitos, que vão desde a fase de construção e perduram até a desativação, o consumo desses tende a mitigar a produção de novos materiais e conseqüentemente a geração de outros resíduos.

Entretanto, a avaliação das potencialidades de reaproveitamento dos rejeitos, principalmente os metálicos, não deve se basear apenas nas especificações mecânicas da finalidade a qual se estuda o reaproveitamento. Os estudos de reaproveitamento de rejeitos devem ser analisados sob o aspecto ambiental, já que esse tipo de resíduo pode conter metais pesados. Tais metais podem ser decorrentes da própria mineralogia da mina, compostos químicos adicionados nos processos de seleção do bem mineral de interesse, bem como apresentar outras características decorrentes de catalizações ocorridas durante o armazenamento deste material. Com isso, os estudos de reaproveitamento de rejeitos devem, principalmente, abranger estudos geoambientais como forma de compreender a mobilidade e disponibilidade dos metais para o meio ambiente.

## **1.2 OBJETIVO GERAL**

O objetivo principal desta pesquisa consiste em analisar o potencial de reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro e ouro para aplicações geotécnicas sob o aspecto ambiental. Por meio, principalmente, da caracterização dos rejeitos e avaliação da potencialidade de contaminação desses nas interações com solo e meio ambiente.

### **1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

A fim de alcançar o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar a caracterização física, química, geoquímica, mineralógica e geoambiental dos rejeitos de mineração de ouro e ferro.
- Adaptar a metodologia de caracterização de rejeitos de mineração com fins de reaproveitamento, proposta por Sosa (2016), para os rejeitos de bens metálicos estudados.
- Avaliar a mobilidade e disponibilidade dos metais contidos nos rejeitos.
- Verificar a influência da adição dos rejeitos de ferro e ouro em misturas com solo, de modo a simular o reaproveitamento em obras geotécnicas.

### **1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A estrutura desta dissertação está composta por 6 capítulos que estão resumidos a seguir:

O Capítulo 1 é uma breve introdução sobre a importância da mineração para a sociedade e, entretanto, como a mesma acaba por acarretar problemas ambientais advindos da geração de resíduos e suas consequências de armazenamento. O capítulo também apresenta os objetivos da pesquisa.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o cenário da produção atual de minério de ferro e ouro e a consequência desses grandes volumes na geração de rejeitos, apontando a grande necessidade de reaproveitamento destes resíduos. O capítulo discorre ainda sobre aspectos relacionados a caracterização de rejeitos para reaproveitamento e questões relacionados a contaminação do meio ambiente por metais.

No Capítulo 3 estão apresentados os rejeitos estudados, além de procedimentos de coleta e preparação das amostras. São apresentados também os métodos e técnicas utilizadas para as caracterizações físicas, químicas, mineralógica, geoquímicas e geoambientais das amostras de rejeitos de mineração de ferro e ouro.

O Capítulo 4 discorre sobre os resultados e análises das caracterizações das amostras de rejeitos. Desta forma foi possível avaliar o potencial de contaminação dos rejeitos no meio ambiente para ps muitos cenários possíveis de interação dos rejeitos com o meio ambiente, servindo de subsídio para as várias formas de reaproveitamento em obras civis.

O Capítulo 5 foi dedicado ao estudo dos rejeitos em misturas com solo como formas de aproveitamento geral em obras geotécnicas. Para isso, foi necessário um estudo breve do solo utilizado nas misturas com os rejeitos de ferro e ouro. Posteriormente, como forma de avaliação da interação do solo com o rejeito foi realizado um breve estudo químico e mecânico.

No Capítulo 6 estão as principais conclusões obtidas sobre a caracterização tecnológica dos rejeitos de mineração, potencialidades de reaproveitamento e contaminação para o meio ambiente. Foram apresentadas também as sugestões para pesquisas futuras.

## **CAPÍTULO 2**

### **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo contempla os estudos que foram utilizados para embasamento da pesquisa. Descobre sobre a situação da produção mineral brasileira de ferro e ouro e a geração de grandes volumes de resíduos decorrentes desta atividade de extração mineral. São abordados também aspectos sobre a classificação e reutilização de rejeitos de mineração, estudos sobre mobilidade e disponibilidade de metais no meio ambiente.

#### **2.1 PRODUÇÃO MINERAL DE FERRO E OURO NO BRASIL**

Por sua extensão territorial e diversificada geologia, o Brasil é um país com enorme vocação mineral e um grande produtor de insumos básicos provenientes da mineração, fazendo com que o país ocupe posição de destaque no cenário global, tanto em reservas quanto em produção mineral (MME 2018). Estima-se que no país haja 830 complexos de água mineral e 8.400 minas em operação, tanto em Regime de Concessão de Lavra quanto em Regime de Licenciamento, abrangendo a produção de cerca de 80 substâncias minerais (IBRAM, 2015).

Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2015), o Brasil em 2014 bateu recorde na produção beneficiada de alguns bens minerais. Pode-se destacar o minério de ferro que atingiu 411,8 milhões de toneladas, fazendo com que o Brasil ocupasse neste ano o terceiro lugar como produtor mundial, apesar dos baixos preços no mercado internacional, e ouro, com uma produção de cerca de 81 toneladas, posicionando-se como 11º maior produtor mundial.

De acordo com IBRAM (2015), em 2014 o crescimento econômico do setor foi elevado em 8,7%, ante a desaceleração ocorrida de menos 2,5% no ano anterior. Impulsionado pelo aumento da produção de petróleo e minério de ferro, a mineração foi o único segmento da indústria que apresentou expansão em 2014.

Em 2015 a produção do setor mineral aumentou 10,9% em relação ao ano anterior, impulsionados novamente pela produção de ferro e petróleo. De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria da Extração do Ferro e Metais Básicos (2016) produção do minério de ferro em 2015 bateu novo recorde e atingiu 430,836 milhões de toneladas, enquanto a

produção de ouro se manteve estável, com 80 toneladas (IBRAM, 2015).

Segundo MME (2018), o ritmo de expansão da atividade da indústria extrativa mineral tem apresentado crescimento e atualmente é responsável por cerca de 4% do produto interno bruto (PIB) nacional. Neste sentido, o setor minerário vem desenvolvendo papel fundamental na dinamização da economia do Brasil

Mesmo com a atual instabilidade dos preços dos metais no mercado internacional, as perspectivas de produção são boas e se reforçam pelo fato do Brasil possuir reversas minerais metálicas que estão entre as maiores do mundo. Destaca-se o Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais (MG), onde são lavrados cerca de 60% do minério de ferro e 40% do ouro extraídos no Brasil, além de haver também extração de outros bens minerais relevantes, como o manganês. Outra região com elevado potencial minerário é a Província Mineral de Carajás, no estado do Pará (PA), onde são lavrados minérios de ferro, ouro, prata, níquel, cromo, manganês, cobre, alumínio, zinco, estanho e tungstênio (Melfi *et al.*, 2016).

## **2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS**

Resíduos sólidos são materiais gerados como consequência não desejada de atividades humanas em estado sólido, semissólido, incluindo também lodos provenientes de sistemas de tratamento de água ou líquidos não passíveis de tratamento convencional (ABNT, 2004a).

Dentre os tipos de resíduos sólidos destacam-se os urbanos, os de construção e demolição (RCD), industriais, os de transporte aéreo e aquaviário, de portos, de transporte rodoviário e ferroviário, os de serviços de saúde, de mineração e agrosilvopastoril (BRASIL, 2010).

Os resíduos podem ser classificados quanto à natureza física, a composição química, aos riscos potenciais ao meio ambiente e quanto à origem, conforme Figura 2.1. No caso dos rejeitos de minérios, estes se classificam como resíduos sólidos de mineração segundo a origem da fonte de geração. Mas para esse tipo de material, a classificação de danos potenciais ao meio ambiente é a mais relevante.

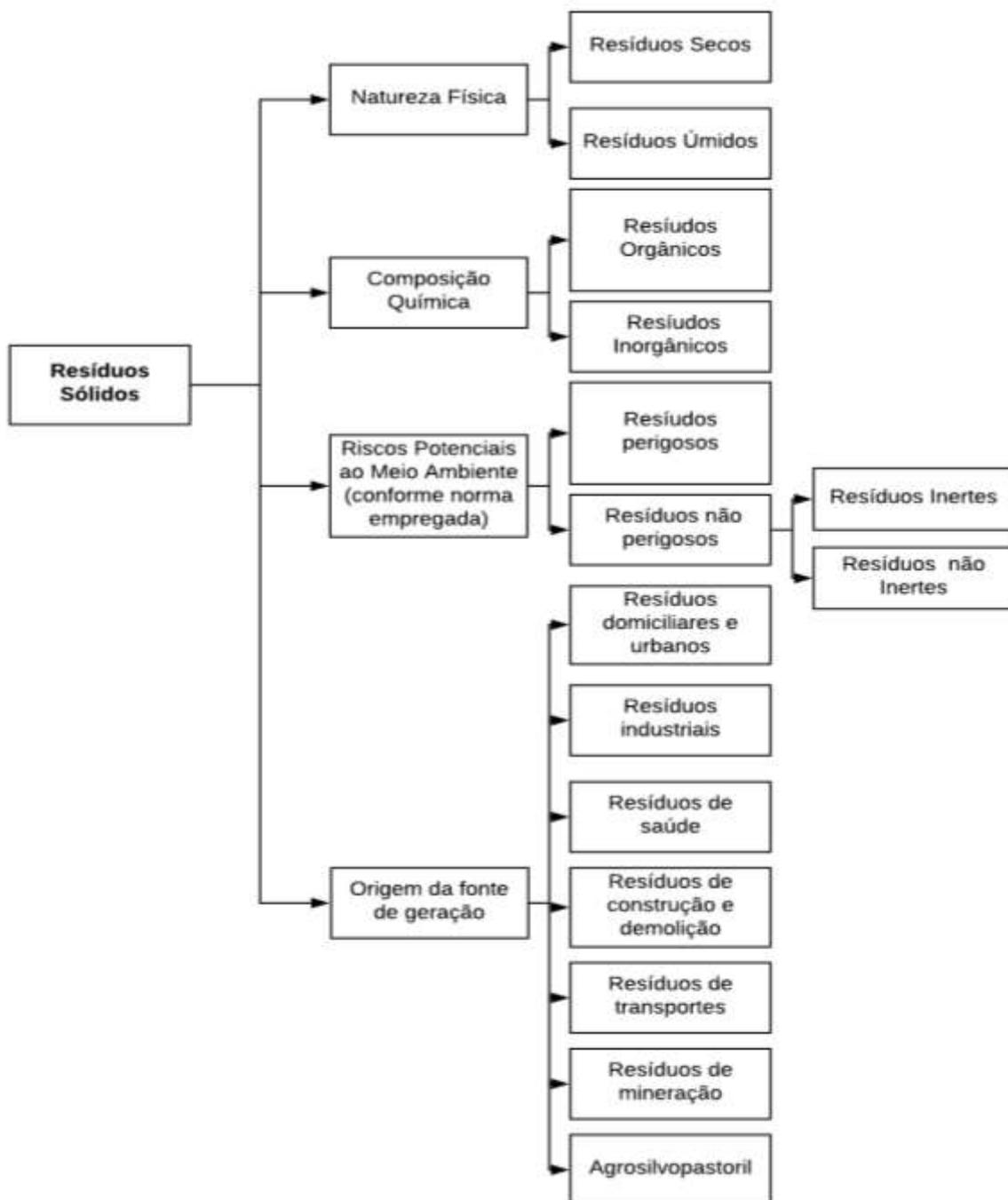


Figura 2.1 Classificação dos resíduos sólidos (modificado de Sosa, 2016)

No Brasil, do ponto de vista ambiental, os resíduos sólidos são classificados conforme a NBR 10.004 (ABNT, 2004a) “Resíduos sólidos – Classificação”, exceto resíduos radioativos e quaisquer resíduos que tenha como origem os serviços de saúde. Conforme essa norma, os resíduos são classificados em perigosos ou não perigosos, sendo estes últimos subdivididos em resíduos inertes ou não inertes. Um fluxograma demonstrando as etapas de classificação definidas pela NBR 10.004 (2004a) está apresentado Figura 2.2.

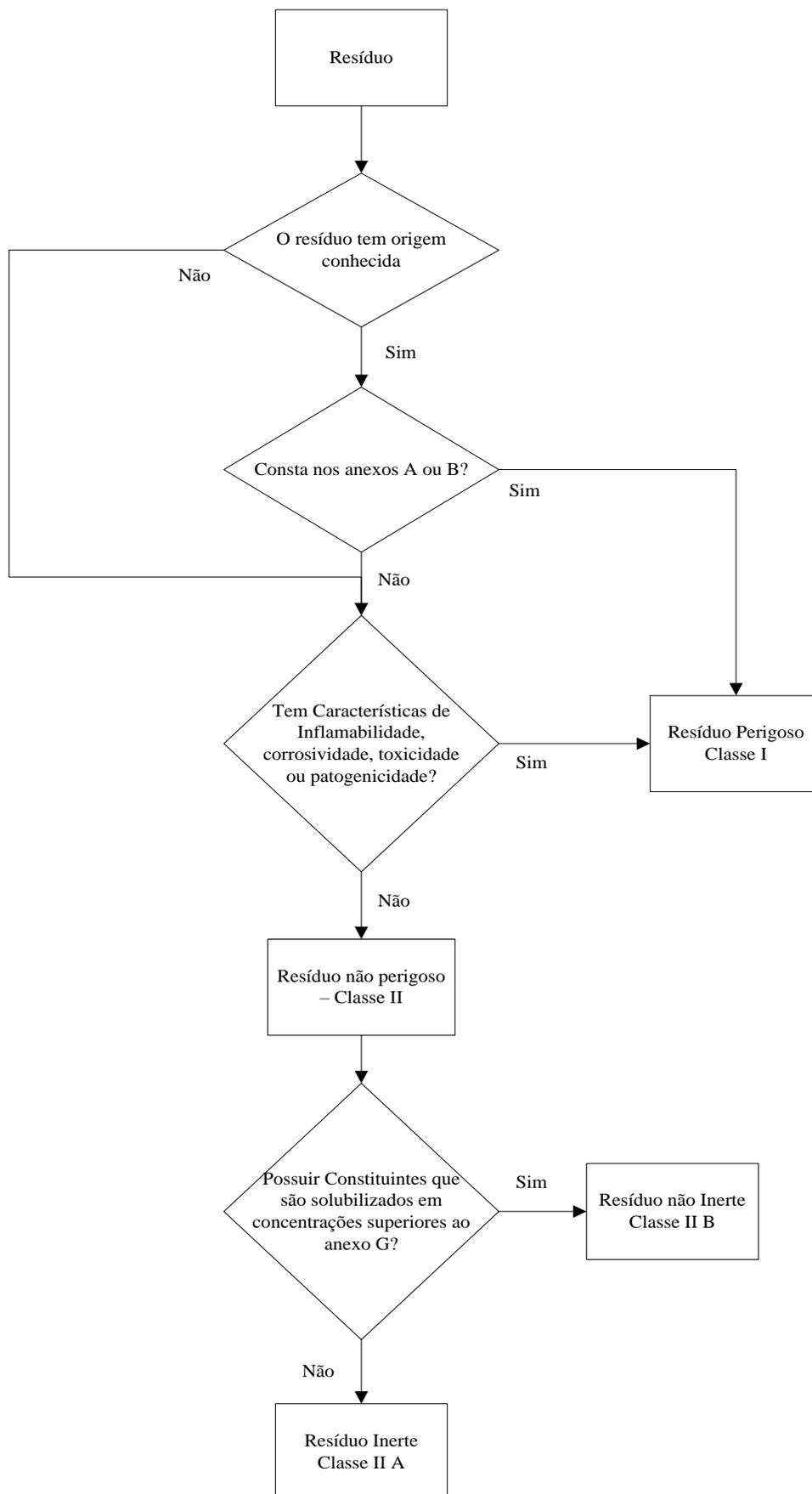


Figura 2.2 Fluxograma de classificação de resíduos solos perante a NBR 10.004 (ABNT, 2004a)

Como pode ser observado na Figura 2.2, de acordo com a norma NBR 10.004 (2004a), os resíduos classificados como perigosos são resíduos que apresentam propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas possíveis de causarem risco à saúde pública e ao meio ambiente. Os resíduos não perigosos, como mencionado anteriormente, podem ser sub-classificados como inertes e não inertes. Os resíduos inertes são aqueles que não interagem como o meio ambiente, pois não sofrem transformações físicas, químicas ou biológicas significativas, isto é, não se degradam de forma rápida. Já os resíduos classificados como não inertes, apesar de não apresentarem periculosidade, apresentam propriedades potencial para solubilização de compostos químicos quando em contato com a água.

A classificação dos resíduos pode ser baseada exclusivamente na identificação do processo produtivo, caso o resíduo se enquadre nas listagens dos anexos da NBR 10.004 (ABNT, 2004a) ou possua características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

Quando os resíduos não se enquadram no descrito, estes devem ser amostrados de acordo com a norma NBR 10.007 “Amostragem dos resíduos sólidos” (ABNT, 2004b), submetidos a ensaio de lixiviação de acordo com a norma NBR 10.005 (ABNT, 2004c), “Procedimentos para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos” e ensaio de dissolução conforme a norma NBR 10.006 “Procedimentos para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos” (ABNT, 2004d). Os resultados das concentrações no extrato lixiviado e dissolvido são comparados aos limites máximos fixados pela norma NBR 10.004 (ABNT, 2004a). Valores superiores aos limites no extrato lixiviado indicam que o resíduo é Classe I (Perigoso) e valores inferiores indicam que o resíduo é Classe II (Não Perigoso). Quando não perigoso, o resíduo deve ser submetido à solubilização. No extrato solubilizado, quando algum dos compostos analisados apresentar valores acima do limite da norma, o resíduo é classificado como Classe IIA (Não Inerte) e concentrações inferiores ao estabelecido por norma classificam os resíduos como Classe IIB (Inerte).

Em síntese, a classificação dos resíduos sólidos perante a norma NBR 10.004 (ABNT, 2004a) abrange a identificação da fonte geradora do resíduo, características de periculosidade ou quantificação dos constituintes, para que seja possível a comparação das concentrações com listagens de substâncias fornecidas na norma, cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido (Motter & Kenttl, 2015).

Entretanto, a norma brasileira NBR 10.005 (ABNT, 2004c) tem adotado o procedimento Method 1311 “*Toxicity Characteristic Leaching Procedure – TCLP*” (USEPA, 1992) desenvolvido pela *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) para a obtenção do extrato lixiviado para análise. Esta metodologia foi desenvolvida para simular a lixiviação em um aterro sanitário, analisando o grau de mobilidade de contaminantes inorgânicos e orgânicos específicos que são destinados ao descarte em aterros municipais. A lixiviação pelo *TCLP* é realizada submetendo o resíduo a uma solução lixiviante de ácido acético. Este ácido foi escolhido como o fluido de extração por ser o principal componente típico de lixiviados em aterros municipais (USEPA, 2018). Em suma, esta condição seria válida somente para interações de materiais com resíduos domiciliares, o que não condiz com a disposição de rejeito de mineração.

Desta forma, considerando resíduos sólidos em que o contato com resíduos sólidos urbanos seja pouco provável, o correto é a utilização do procedimento *Method 1312 “ Synthetic Precipitate Leaching Procedure – SPLP*” (USEPA, 1994). O método *SPLP* - 1312 é adequado para avaliar o potencial de lixiviação de resíduos provocada por precipitações levemente ácidas. A solução lixiviante deste procedimento utiliza ácido sulfúrico e ácido nítrico para melhor representar a chuva ácida resultante de óxidos de nitrogênio e enxofre. Desta forma, os ácidos utilizados no ensaio *SPLP* melhor simulam a interação de rejeito de mineração com o meio ambiente.

Em contrapartida, a solubilização conforme NBR 10.006 (ABNT, 2004d) fornece uma estimativa sobre a solubilização em água de alguns constituintes dos resíduos em um curto prazo. Tal procedimento avalia a liberação de metais e de metalóides com base na solubilidade dos compostos em solução por simples dissolução. Desta forma, o procedimento de solubilização da NBR 10.006 (ABNT, 2004d) tem aplicabilidade para rejeitos de mineração de bens metálicos, podendo ser utilizado para avaliar a liberação de metais e metalóides (Bissacot, 2014).

Para fins de compreensão dos termos adotados neste trabalho, foi utilizado o termo metais para designar tanto o grupo de metais como o de semimetais (metaloides) associados com a contaminação e o potencial de toxicidade ou ecotoxicidade.

## 2.2.1 GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO

O setor minerário contribui massivamente para a produção de resíduos sólidos, sendo estes produtos diretos e indiretos das atividades de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios. Os principais resíduos sólidos gerados pelas atividades deste setor em termos de volumes são os estéreis e os rejeitos (FEAM, 2017).

Os estéreis são os materiais sem valor econômico que são necessários remover para expor o corpo mineralizado para a atividade de lavra. Os rejeitos são os resíduos resultantes dos processos de beneficiamento, dado que, não raro, um bem mineral não pode ser aproveitado da forma como é lavrado. Assim, se faz necessário submetê-lo ao processo de beneficiamento, que visa modificar a granulometria, aumentar a concentração relativa das espécies minerais de interesse ou a forma sem que seja alterada a identidade química ou física dos minerais (Luz *et al.*, 2010).

Além dos estéreis e rejeitos, são gerados ainda outros tipos de resíduos das atividades de mineração. Como efluentes de tratamento de esgoto, carcaças de baterias e pneus, provenientes da operação das plantas de extração e beneficiamento das substâncias minerais (IPEA, 2012). A diversidade nos tipos de resíduos, diversificação de operações utilizadas nos processos de extração e beneficiamento e quantidade de substâncias produzidas no país, tornam a quantificação do volume de resíduos gerados a nível nacional complexa. Além disso, as informações estão dispersas entre várias agências governamentais, tanto no âmbito federal quanto nos estados. Porém, sabe-se que o estado de Minas Gerais é responsável por cerca de 70% a 80% da massa de resíduos sólidos gerados pela atividade de mineração no país (IPEA, 2012).

De acordo com o Inventário de Resíduos Sólidos da Mineração do estado de Minas Gerais de 2017 (FEAM, 2017) o total de resíduo sólido gerado no estado em 2016, foi 467 milhões de toneladas. Deste total, 37,02 % são de rejeitos, 62,93 % são de estéreis e 0,05 % são outros tipos de resíduos. Segundo dados da mesma fonte, menos de 1% dos rejeitos e dos estéreis apresentam periculosidade, conforme classificação da NBR 10.004 (ABNT, 2004a). A Figura 2.3 mostra a distribuição de rejeitos e estéreis por classe de resíduo de acordo com Fundação Estadual do Meio Ambiente (2017).

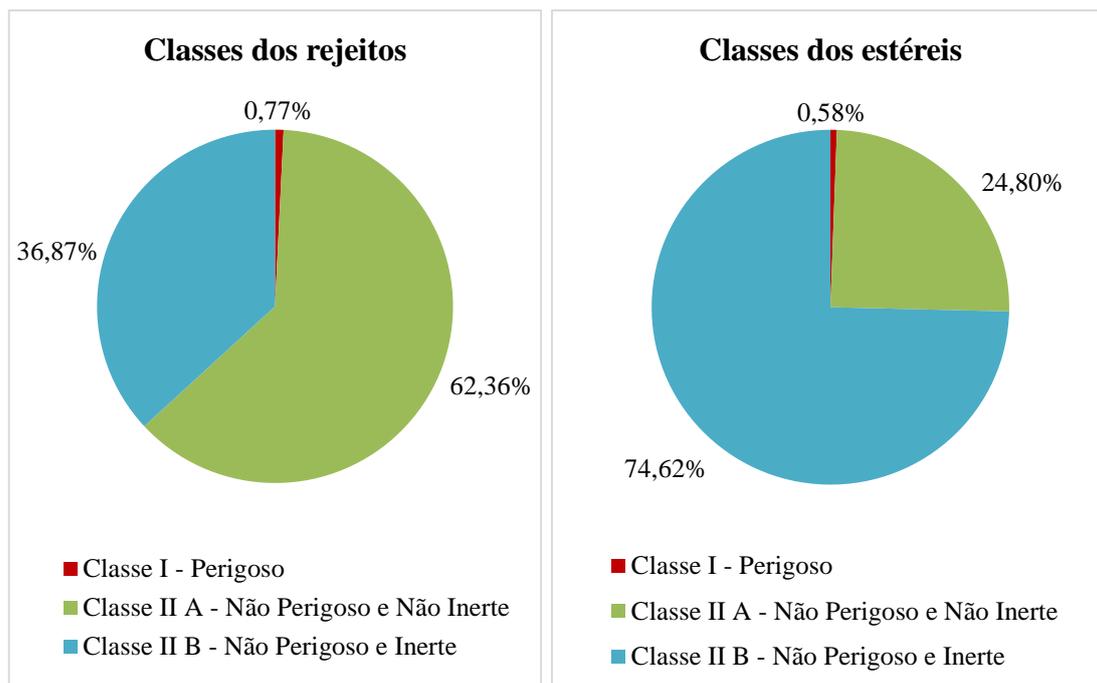


Figura 2.3 Classes dos resíduos sólidos gerados no ano de 2016 em Minas Gerais (FEAM, 2017).

Com relação à destinação dos resíduos, estes são subdivididos em Dentro da Mineração (DM), Destino Externo (DE) e Sem Destino Definido (SDD), quando os resíduos não estão armazenados na destinação final ou não foram tratados no ano inventário (FEAM, 2017).

Os resíduos destinados a armazenamento DE tratam-se de resíduos sanitários, óleos lubrificantes, equipamentos de proteção individuais (EPIs), entre outros. Entre as formas de disposição dentro da mineração (DM), as mais comuns são em barragens e empilhamentos para o rejeito, com percentuais respectivamente de 90,99% e 5,68% , conforme demonstrado no gráfico da Figura 2.4. Para os estéreis, a forma mais comum de armazenamento são as pilhas, com um percentual de 81,13%, como demonstrado no gráfico da Figura 2.5. Ressalta-se que as barragens possuem grande risco potencial em decorrência de seu rompimento, vazamento ou mau funcionamento. As Figuras 2.4 e 2.5 mostram, respectivamente, outras formas de destinação dos rejeitos e estéreis, segundo as avaliações apresentadas pela FEAM (2017)

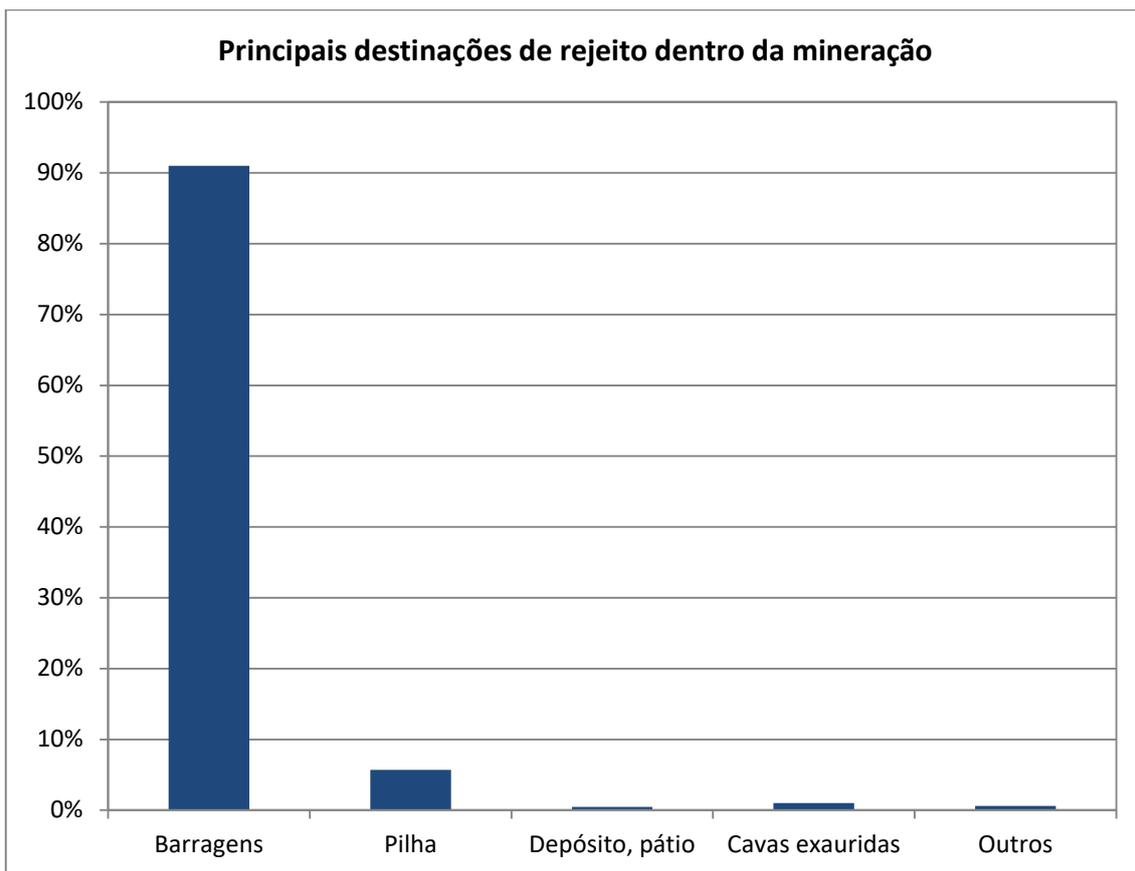


Figura 2.4 Destinações de rejeito dentro da mineração no estado de Minas Gerais no ano de 2016 (FEAM, 2017)

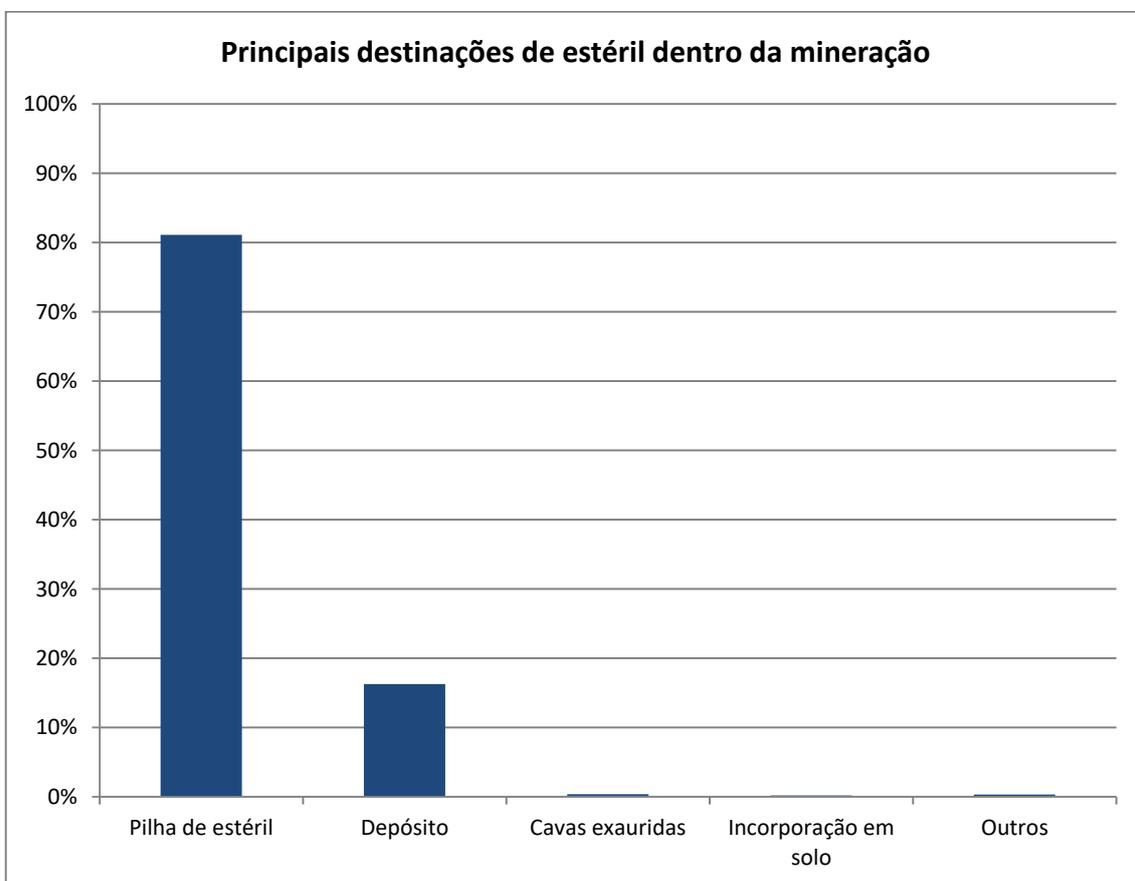


Figura 2.5 Destinações de estéril dentro da mineração no estado de Minas Gerais no ano de 2016 (FEAM, 2017)

### 2.2.1.1 GERAÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE FERRO E OURO

Estima-se que 14 substâncias minerais sejam responsáveis por 90% da produção total bruta em massa de minerais no país. Sendo elas bauxita (alumínio), calcário, caulim, cobre, estanho, ferro, fosfato, manganês, nióbio, níquel, ouro, titânio, zinco e zircônio (IPEA, 2012). Desse modo, a produção desses bens minerais são os que mais geram resíduos.

O Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) juntamente com o Ministério de Minas e Energia (MME) e o Ministério do Meio Ambiente (MMA) elaborou em 2012 um diagnóstico avaliando dois cenários com relação à geração de rejeitos na atividade de mineração. O primeiro, durante o intervalo de 1996 a 2005, que correspondia na ocasião ao período mais recente à publicação com dados do país disponíveis, tendo em vista a data da publicação do diagnóstico de 2012. E o outro um cenário futuro para o período de 2010 a 2030, conforme Tabela 2.1. Os resultados encontrados mostram que a produção de minérios de ferro e ouro são as substâncias minerais que mais contribuem para a geração de rejeitos no país e permanecerão como as principais substâncias na geração de rejeitos entre 2010 e 2030.

Tabela 2.1 rejeitos gerados e projeção futura para as principais substâncias produzidas no país (IPEA, 2012)

Substância Mineral	Quantidade total de rejeitos (1.000 t)		Contribuição % média de cada minério no total de rejeitos	
	1996 – 2005	2010-2030	1996 – 2005	2010-2030
Ferro	765.977	4.721.301	35,08	41,38
Ouro	295.295	1.111.32	13,82	9,74
Titânio	276.224	1.018.668	12,55	8,93
Fosfato	244.456	1.128.198	11,33	9,89
Estanho	149.369	357.952	6,79	3,14
Zircônio	116.236	490.183	5,39	4,30
Calcário	89.398	341.045	4,29	2,99
Bauxita	69.783	493.925	3,16	4,33
Cobre	53.498	819.636	2,25	7,13
Nióbio	35.690	119.372	1,53	1,05
Níquel	35.076	673.380	1,61	5,59
Caulim	24.346	90.729	1,09	0,80
Manganês	12.064	36.071	0,54	0,32
Zinco	12.562	44.097	0,57	0,39
<b>Total</b>	<b>2.179.975</b>	<b>11.409.877</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>

## 2.3 ASPECTOS GERAIS DA CARACTERIZAÇÃO DE REJEITOS

A caracterização tecnológica aplicada a rejeitos de mineração, até bem pouco tempo, era pouco explorada em detrimento a sua baixa serventia. Sendo, os rejeitos, armazenados de forma definitiva sem maiores conhecimentos de suas características físicas, químicas, mineralógicas e de suas respostas aos processos dos quais foram submetidos (Sosa, 2016).

Nos últimos anos, impulsionado não só pela maior preocupação ambiental, mas também pela escassez de jazidas, diminuição dos teores de minério e consequente aumento do volume de rejeitos a ser descartado tem-se buscado maior conhecimento das propriedades dos rejeitos. O que favorece a viabilização de seu aproveitamento como subproduto na própria usina ou em outro segmento industrial. Estimulando-se seu reuso, minimiza-se o impacto ambiental e cria-se receita, onde antes havia despesas (Borges, 2008).

Seja qual for sua utilização, é imprescindível que se estabeleça uma metodologia de caracterização do material para a verificação das potencialidades de aproveitamento, que, devido à complexidade desses materiais tem-se associado um vasto conjunto de técnicas para a sua caracterização (Sosa, 2016).

A variabilidade das propriedades dos rejeitos está relacionada à heterogeneidade geológica natural dos bens minerais e aos vários processos que os minérios podem ser submetidos, que vão deste um simples peneiramento até processos de alteração da físico-química da superfície das partículas.

As diversas técnicas que podem ser utilizadas, a depender do objetivo, podem ser englobadas em quatro grupos de caracterizações (Rodríguez & García, 2006):

- Físicas (tamanho e morfologia das partículas, densidade, porosidade, etc.);
- Mineralógicas (identificação das fases minerais, comportamento das fases, etc.);
- Químicas-geoquímicas (composição química elementar, pH, potencial redox, especiação, potencial de drenagem ácido de minas, hidrogeológicos, etc.);
- Geotécnicas (ensaios mecânicos, hidromecânicos, etc.);

Sosa (2016) afirma que as técnicas utilizadas nas caracterizações dos rejeitos precisam estar associadas e combinadas entre elas para os diferentes tipos de estudos que se desejar realizar. Do mesmo modo devem ser realizadas as interpretações dos resultados. Assim, poderão ser melhor interpretadas as características e propriedades dos rejeitos para que possam ser avaliadas as alternativas de aproveitamento para os rejeitos de mineração.

Ressalta-se ainda que para melhor compreender as características e propriedades dos rejeitos, deve-se analisar os resultados das caracterizações obtidas juntamente com o conhecimento da natureza do minério bruto, técnicas usadas na lavra, beneficiamento ao qual foi submetido e o método de deposição do rejeito. Já que estes fatores fazem com que os rejeitos tenham propriedades mineralógicas, físico-químicas e geotécnicas bastante variáveis (Zandarín *et al.*, 2009). Além disso, conforme Salomons (1995), as condições de intemperismo são também de grande relevância nas propriedades dos rejeitos já que elas podem catalisar mudanças nas características originais desses materiais.

## **2.4 REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO**

Devido à grande variabilidade das propriedades que se pode encontrar nos rejeitos, tem-se verificado potencialidades do reaproveitamento desses materiais para a indústria metalúrgica, de materiais ou em aplicações diversas na engenharia. Os estudos de caracterizações tecnológicas têm aumentado a eficiência dessas aplicações e com importantes contribuições às questões ambientais (Sosa, 2016). Com base nestes estudos tem-se proporcionado o aproveitamento de rejeitos desde o seu reprocessamento por emprego de novas tecnologias de processamento mineral e também na utilização como matéria-prima em outras aplicações (Reis, 2005).

Com base da literatura científica, constatou-se a existência de pesquisas referentes à caracterização de rejeitos de mineração visando seu reaproveitamento. Entre os possíveis usos dos rejeitos de ferro encontrados estão:

- substituição da areia artificial para reboco, massa corrida, pisos misturando-se em brita (Colturato *et al.*, 2003);
- substituição de areia artificial em filtro de barragem (Echeverri, 2012);
- como filler em misturas asfálticas (Andrade, 2014);

- pavimentação, em camadas de reforço e sub base (Colturato *et al.*, 2003);
- como material alternativo para a infraestrutura rodoviária na camada de base de pavimentos (Bastos, 2013);
- incorporados ao cimento para utilização em camadas de base e sub-base de rodovias (Xu, 2013);
- na produção de elementos de concreto para pavimentação (Toffolo *et al.*, 2014);
- como material estabilizador misturado a um solo laterítico da região nordeste do Brasil na utilização em camadas de base e sub-base de rodovias (Dantas, 2015);
- incorporação no cimento, fabricação de concretos, argamassas e cerâmicas e utilização em obras de pavimentação (Andrade, 2014);
- substituição de agregados finos e grossos de blocos intertravados de concreto (Pavers) e obtenção de cerâmica com adição dos rejeitos na proporção de 0% e 5% em substituição à argila (Silva, 2014)

Para o rejeito de ouro, estudos comprovam seu potencial de uso para a produção de ácido sulfúrico visando à fabricação de fertilizantes (Oliveira Júnior, 2011).

Além dos estudos citados, há ainda empresas que já fazem reaproveitamento de seus resíduos, destacando:

- a mineradora estatal Mikhailovsky Gok, na Rússia utiliza seus rejeitos e estéreis do processo de mineração de minério de ferro para a fabricação de cerâmicas e tijolos. Esta aplicação já ocorre por mais de 50 anos (Colturato *et al.*, 2003);
- conforme Bédard *et al.* (2001), uma argamassa obtida com uma mistura de cimento e rejeitos de ferro de classificação de espirais foi utilizada para a selagem de um canal subterrâneo de drenagem de uma barragem de rejeitos da Quebec Cartier Mining, no Canadá;
- em São Tomé das Letras - MG, segundo Alecrim (2009), os resíduos de quartzito britados e misturados a solos locais mostraram-se aptos e com potencial para serem utilizados em bases e sub-bases de estruturas de pavimentação;
- em uma pedreira de Borborema - SP, a viabilidade técnica do emprego de finos de basalto em concreto compactado a rolo, se deu após realizados ensaios normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Instituto de Pesquisas

Tecnológicas (IPT) e Departamento de Estradas de Rodagem (DER) e não normatizados, conforme necessidades específicas para o material (Mendes, 1999);

- em uma pedreira de granito em Matias Barbosa - MG funciona desde 2002 uma usina piloto para produção de areia artificial a partir dos finos de brita, de capacidade de produção é de 4 toneladas por hora (Bispo & Almeida, 2003).

Observou-se que os estudos desenvolvidos foram realizados avaliando um tipo específico de rejeito de mineração associado a um particular tipo de reaproveitamento, fazendo com que a caracterização seja realizada de forma direcionada a verificar se o material atende ou não a um determinado uso.

É notório que os rejeitos de beneficiamento de ferro apresentam um maior número de estudos de reaproveitamento, fato justificado pelo bem mineral ser o mais abundante e o mais extraído mundialmente. Sendo de grande importância econômica mundial por ser a principal matéria-prima na constituição do aço. Sob o aspecto do reaproveitamento, os rejeitos de ferro apresentam um importante potencial de uso em obras de pavimentação, baseados principalmente nas suas características granulométricas. Assim, estes rejeitos são usados, majoritariamente, para aportar propriedades mecânicas e substituir os agregados convencionais como material alternativo (Sosa, 2016).

Os rejeitos de mineração podem ser reutilizados ou reciclados. Apesar de próximos, os termos se diferem quanto à necessidade de submeter o material ao um novo processamento. A reciclagem de um resíduo é a transformação dele em um novo produto. Para tal, o material é inserido em um novo ciclo de produção. O que subentende o reprocessamento de um item com a finalidade de produzir outro produto útil. Já a reutilização de um resíduo isenta o reprocessamento dele. A reutilização consiste em aproveitar o resíduo ao máximo, sem, contudo, que ele seja transformado em um novo produto. A reutilização do resíduo pode ser feita aplicando-o novamente na mesma função ou não, mas de forma a combater o desperdício.

Mesmo com a diferença de significado entre os termos, tanto a reciclagem quanto a reutilização são processos igualmente importantes em termos ambientais e para a gestão de resíduos. Ambos visam combater o desperdício de materiais e contribuir para a diminuição de passivos nas unidades de armazenamento de resíduos e da exploração de recursos naturais.

## **2.5 CARACTERIZAÇÃO DE REJEITOS COM ENFOQUE GEOAMBIENTAL PARA FINS DE REAPROVEITAMENTO: ESTUDO DE SOSA (2016)**

O que se verifica sobre caracterizações de rejeitos são metodologias específicas para determinada aplicação já definida previamente ao estudo. Desta forma, são estudados se os rejeitos atendem ou não àquela determinada aplicação específica. Em resposta a isso, foi desenvolvida por Sosa (2016) uma metodologia de caracterização de rejeitos que se trata de uma metodologia com enfoque geoambiental que visa ao íntegro conhecimento das características dos rejeitos, possibilitando assim, a seleção de alternativas de aproveitamento com um enfoque mais sustentável. Ressalta-se que tal metodologia foi desenvolvida utilizando rejeitos dos processos de beneficiamento hidrometalúrgicos de níquel e cobalto.

Entre as formas de reutilização dos rejeitos de mineração de origem metálica, Sosa (2016) ressalta os usos como agregados para a construção civil e por intermédio de processos tecnológicos complexos na extração de bens metálicos. O uso como agregados contempla a utilização dos rejeitos da forma mais simples possível, avaliando basicamente os aspectos granulométricos e mineralógicos sem considerar modificações do material. As aplicações através de processos de caracterização mais complexos objetiva, inicialmente, continuar a extração dos mesmos metais de interesse industrial e posteriormente, a extração de outros metais presentes originalmente na composição dos minérios, mas ao final concentrados nos rejeitos (Sosa, 2016). Os processos que são empregados nestas aplicações geralmente são bem mais complexos do ponto de vista tecnológico, também custosos e com geração de novos resíduos, mas com considerável importância tendo em vista o caráter não renovável dos bens minerais.

As etapas de caracterização proposta por Sosa (2016) abrangem o conhecimento físico, químico, geoquímico, geoambiental e mineralógico dos rejeitos. Sendo esta última uma característica fundamental. Atenta-se ao fato de que todos os conhecimentos prévios dos rejeitos à caracterização são fundamentais para a melhor compreensão dos resultados das caracterizações e melhor escolha de técnicas e metodologias a serem empregadas no reaproveitamento. Segundo Sosa (2016), as escolhas das alternativas de aproveitamento estarão sujeitas aos ganhos obtidos sobre o conhecimento integral dos rejeitos e dos interesses econômicos. Na Figura 2.6 encontra-se apresentado o esquema conceitual de aproveitamento de rejeitos elaborado pela autora, bem como as análises pertinentes a serem realizadas.

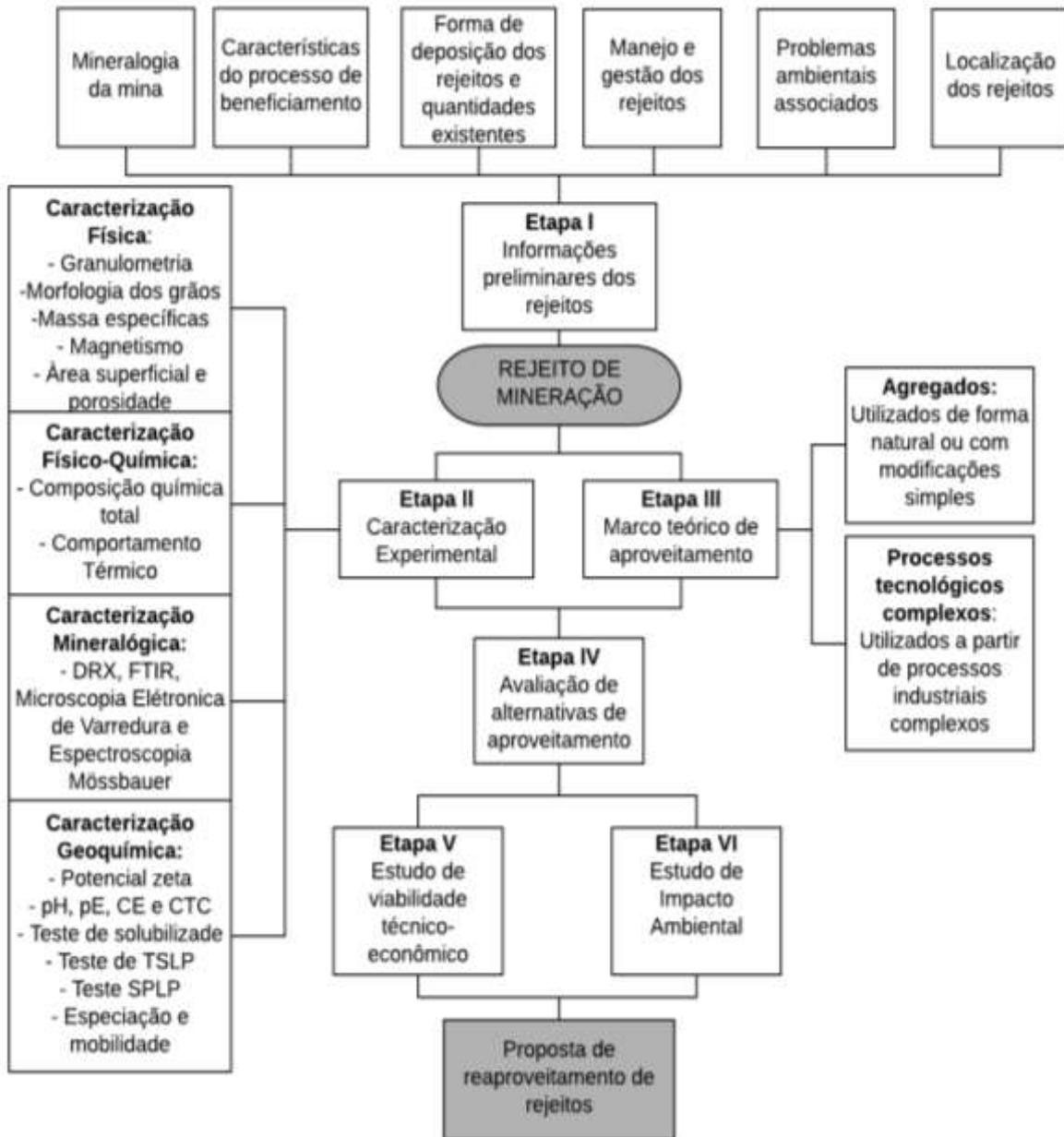


Figura 2.6 Esquema conceitual do reaproveitamento de rejeitos (Sosa, 2016)

Sosa (2016) desenvolveu seus estudos de reaproveitamento atendendo a critérios como a simplicidade das técnicas executadas, a minimização na geração de resíduos, baixo impacto ambiental do método de reaproveitamento e a obtenção de um produto com valor agregado. Outro fator relevante nas propostas de reaproveitamento realizadas pela autora, foi a possibilidade de serem utilizáveis também em rejeitos de mineração com características similares aos por ela estudados, no caso, cobalto e níquel como já mencionado.

Sosa (2016) acrescenta ainda que muitas das propostas analisadas não visam aproveitar as características químicas e mineralógicas que distinguem o minério metálico de outro não

metálico, sendo essas as que aportam maior valor a esses recursos não renováveis. Ou seja, as propostas de reutilização dos rejeitos de mineração nem sempre são estabelecidas sob os aspectos que despertam interesses econômicos sustentáveis.

Em seu estudo, Sosa (2016) avalia a possibilidade do uso dos rejeitos em dois aspectos. Uma aplicação em camadas de revestimentos de pavimentos rodoviários e outra na produção de uma liga metálica. A autora conclui que os rejeitos poderiam ser utilizados tanto como agregados, no caso de material de enchimento como pó mineral também conhecido como material filler, quanto em processos mais complexos como em reações aluminotérmicas. Sendo, esta última, sob o aspecto ambiental, uma alternativa bastante viável devido à quase inexistente geração de resíduos e pelos baixos volumes de gases desprendidos. Outra vantagem é a capacidade da técnica ser aplicável também a outros rejeitos que apresentam elevadas concentrações de alumínio e óxidos metálicos.

Com isso, verifica-se a grande contribuição da pesquisa de Sosa (2016) no segmento de reaproveitamento de rejeitos de mineração pelo caráter inovador da metodologia de caracterização proposta. A complexidade da pesquisa se revela pelo intensivo conhecimento gerado dos rejeitos e de proporcionar a escolha de métodos de aproveitamento capazes de privilegiar as inúmeras potencialidades dos materiais. A pesquisa atendeu ainda as questões ambientais com base no amplo conhecimento de implicações relacionadas à contaminação e a forma de reaproveitamento

Apesar da abrangente pesquisa, Sosa (2016) constata que os estudos acerca de metodologias para caracterização de rejeitos não estão por completo sanados, tendo em vista o supracitado referente às particularidades de cada tipo de rejeito oriundo de diferentes processos e extrações minerais. Entretanto, a metodologia proposta é um grande avanço no contexto da aplicação sustentável de rejeitos e a avaliação das suas mais específicas potencialidades, além de ser uma base muito importante para fundamentar as pesquisas na área.

## **2.6 POTENCIALIDADE DE CONTAMINAÇÃO DOS REJEITOS DE MINERAÇÃO AO MEIO AMBIENTE**

Os metais são utilizados como matéria-prima em diversos setores industriais de bens de consumo, inclusive alimentícios e em fertilizantes agrícolas, de tal forma que são uma das

bases para as atividades essenciais no desenvolvimento da sociedade (Silva *et al.*, 2004). Todavia, também podem agir contaminando fauna e flora decorrente da disposição inadequada ao meio ambiente ou por ações de catástrofes que venham ocorrer na unidade de armazenamento deste material.

Na mineração, as unidades de disposição dos resíduos, como os depósitos de rejeitos e de estéreis, podem ser fontes de contaminação ambiental devido à presença de metais e metaloides, como arsênio e o selênio (Silva *et al.*, 2004). A exposição de tais depósitos à ação da água pode provocar a contaminação do solo e dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

Além disto, minerais sulfetados como pirita ( $\text{FeS}_2$ ) e arsenopirita ( $\text{FeSAs}$ ), típicos de ambientes geológicos auríferos, sob ações intempéries e bacteriológicas podem expor à atmosfera os sulfetos confinados que, ao entrarem em contato com a água e ar, podem sofrer oxidação (Ritcey, 2005). Os produtos da oxidação dos sulfetos são altamente solúveis e apresentam reação fortemente ácida, podendo ser facilmente dissolvidos na fase líquida, acidificando as águas de drenagem (Mello & Abrahão, 1998 *apud* Silva *et al.*, 2004). Como consequência dos baixos valores de pH, elementos potencialmente tóxicos, como Al, Mn, Cu, As, Zn, Pb, Hg e Cd, quando presentes no meio, são solubilizados e mobilizados nas águas de drenagem, podendo ser absorvidos em níveis tóxicos pelas plantas e incorporados na cadeia trófica (Mello & Abrahão, 1998 *apud* Silva *et al.*, 2004; Shu *et al.*, 2001).

Outro grande potencializador de danos ao meio ambiente por rejeitos de mineração são os desastres envolvendo rompimento de uma barragem ou a perda de sua funcionalidade. Entre os maiores acidentes brasileiros, destacam-se o rompimento da barragem de rejeitos de minério de ferro da Mineração Rio Verde, em 2001, o vazamento de lama tóxica pela Mineradora Rio Pomba Cataguazes em 2007 e o derramamento de rejeito de minério de ferro da barragem de Fundão, da mineradora Samarco em 2015, todos no estado de Minas Gerais. Ademais, cita-se ainda o colapso da barragem de rejeito de minério de cobre e ouro da mina Mount em Colúmbia Britânica, no Canadá (SKR, 2015) e o vazamento de resíduos ácidos de rejeitos sulfídicos da mina de Marcopper, em Marinduque, Filipinas, em 1996 (Santos, 2014). Em comum, nos acidentes mencionados os rejeitos alcançaram afluentes próximos alterando significativamente o meio ambiente.

De modo geral, a atividade de mineração, quando comparada a outras fontes de degradação do ambiente, como a agricultura e a pecuária, impacta de modo direto pequenas áreas (Silva *et al.*, 2004). No entanto, os elementos solubilizados de rejeitos ou produtos dos desastres ambientais ao atingirem os cursos d'água, podem afetar negativamente áreas localizadas a centenas de quilômetros da mineração. Estes acidentes são capazes de afetar a qualidade dos recursos hídricos, cujas águas se tornam inadequadas para irrigação, consumo humano e animal e também para uso industrial (Salomons, 1995).

## **2.7 CONTAMINAÇÃO DO SOLO**

O solo, embora atue como uma barreira natural de proteção aos aquíferos, suas fases sólida, líquida e gasosa, bem como a sua microfauna pode interagir com as águas infiltradas e de percolação, afetando o transporte e a retenção dos metais (Soares *et al.*, 2005).

Os princípios que governam a movimentação e a retenção de metais nos solos são extremamente complexos. O fluxo de metais nos solos não depende exclusivamente das propriedades físico-químicas dos íons metálicos, mas também das propriedades físicas e químicas do solo no qual os metais se encontram (Dube *et al.*, 2001). E por isso a complexidade da matriz de cada solo dificulta o entendimento dos processos de interações de adsorção particulares de cada metal, que por si torna árduo o procedimento de formulação dos modelos para previsão do transporte de metais no solo, principalmente a longo prazo (Dube *et al.* 2001; Campos, 2010),

Apesar dos muitos meios de interação dos metais com o solo, apenas uma fração está disponível para os organismos vivos (Campos, 2010). E, portanto, para a investigação da potencialidade de contaminação do meio ambiente por rejeitos de mineração, segundo Sosa (2016), devem ser realizados estudos geoquímicos mais criteriosos que os propostos nas normas de classificação de resíduos sólidos. Isto porque os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização não consideram a natureza e origem dos constituintes químicos, a mobilidade dos metais e os processos que potencializam a sua transferência para o meio ambiente.

A disponibilidade e a mobilidade dos metais pesados são controladas por processos químicos e bioquímicos, tais como precipitação-dissolução, adsorção-dessorção, complexação-

dissociação e oxidação-redução (McBride, 1994). Embora se saiba que cada elemento possui suas particularidades e assim nem todos os processos são igualmente importantes para todos os elementos, todos esses processos são afetados pelo pH do solo e pelos processos biológicos. Martins (2005) destaca ainda que as reações de adsorção-dessorção nas superfícies dos coloides do solo são consideradas os processos mais importantes responsáveis pela concentração de metais na solução do solo e conseqüentemente para a disponibilidade às plantas.

O processo de adsorção-dessorção do solo é controlado, além do pH, pelo potencial redox, força iônica, íons competidores e pelos constituintes do solo (orgânicos e minerais), sendo a importância relativa desses fatores diferente para os diversos metais e condições físico-químicas do sistema (McBride, 1994).

Ademais, é conhecido que a determinação da concentração total dos elementos nas matrizes porosas é uma informação limitada sobre o seu comportamento no ambiente. Conforme Salomons & Forstner (1995), a solução para a compreensão do fluxo dos metais no ambiente, relacionado com sua toxicidade, é a especiação química. Ou seja, a distribuição dos metais entre as diferentes formas químicas, como por exemplo, solúvel, trocável, ligados à matéria orgânica, ligados aos óxidos/hidróxidos de ferro, alumínio e manganês, carbonatos, fosfatos, sulfatos (ou outros minerais secundários), ou ligados aos silicatos.

Vários trabalhos têm buscado combinar métodos de extração de metais pesados com a disponibilidade de metais, majoritariamente em solos e sedimentos, como Tessier *et al.* (1979), Miller *et al.* (1986a), Rauret *et al.* (1998), Sasaki *et al.* (2002), Silveira *et al.* (2006), Wang & Qin (2007) e também em rejeitos de mineração como Anju & Banerjee (2010), Favas *et al.* (2011), Randelovic *et al.* (2015) e Sosa (2016).

Contudo, a compreensão dos mecanismos de transporte e retenção de metais no solo permite o desenvolvimento de ferramentas para a previsão da mobilidade de contaminantes. O que também auxilia na indicação dos critérios mais adequados para o projeto de unidades de gestão de resíduos sólidos, fornecendo informações necessárias para um manejo seguro (Basta & Mc Gowen, 2004). Além disto, contribui para implementar ações adequadas à remediação de áreas onde a contaminação do solo já está instalada.

### 2.7.1 ENSAIOS DE EXTRAÇÃO SIMPLES E SEQUENCIAS

O conhecimento da composição elementar de metais é utilizado como indicador de seu potencial ecotoxicológico, referência do grau de poluição perante as normas e de orientação para estudos. Esse conhecimento não deve ser unicamente utilizado para avaliar os efeitos potenciais da contaminação, haja vista que os constituintes químicos não têm o mesmo impacto sobre o meio ambiente (Iavazzo *et al.*, 2012). Logo, no que se refere aos estudos ambientais, além da quantificação total das concentrações de metais de interesse de contaminação, é muito importante análises mais complexas que levam a identificação das formas de ligação que esses metais estão na matriz de interesse (Tavares, 2013).

Para determinar a especiação em amostras sólidas, deve ser aplicado um método de extração, que pode ser simples ou sequencial. As extrações simples são técnicas na qual um reagente ou um conjunto de reagentes extrai de uma só vez os metais pesados ligados a uma ou mais formas geoquímicas no solo, de maneira a se correlacionar, por exemplo, com a fração disponível às plantas.

Já as extrações sequenciais são técnicas onde as formas químicas são determinadas por uma sucessão de reagentes extratores, com a intenção específica de dissolver suas diferentes fases e assim, determinar os metais associados a elas (De Oliveira & Marins, 2011). A extração sequencial, comumente, inicia-se com extrator fraco, como a água e termina com extrator forte, como o ácido concentrado. São apresentados na literatura diferentes protocolos que podem ser por extrações simples ou sequenciais.

Conforme Tavares (2013), os extratores que quantificam a disponibilidade de metais são divididos em seis categorias. Sendo elas: água ou extrato de saturação; soluções salinas; soluções ácidas; soluções complexantes; oxidantes/redutoras e os combinados. Este último grupo abrange a combinação de dois ou mais reagentes das categorias anteriores. A quantidade de metais extraída das matrizes porosas por meio dos extratores está intimamente relacionada com a concentração dos componentes da solução extratora, do tempo de extração, da relação solo-solução, da temperatura de extração, do tipo de agitação, entre outros (Tavares, 2013). Portanto, modificações nas condições de extração de um método específico acarretam em diferenças nas quantidades de metais extraídos (Abreu *et al.*, 2002).

Entre as extrações simples mais empregadas estão as extrações com extratores salinos e quelantes. Os extratores salinos são soluções que extraem preferencialmente os metais dos sítios de troca iônica do meio, ou seja, as formas metálicas mais móveis e que prontamente se disponibilizam. Já os extratores quelantes, conforme Tavares (2013), são utilizados com a finalidade de complexar os metais deixando-os mais disponíveis ambientalmente. Segundo o mesmo autor, os principais de agentes quelantes são o EGTA, EDTA, HEDTA e o DPTA, sendo o EDTA e o DPTA os mais utilizados nos laboratórios de solos.

O EDTA é um quelante que possui seis ligantes, quatro átomos de oxigênio e 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 se reduz 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. Este composto tem sido utilizado para simular a extração de metais de sedimentos e solos por plantas (Tavares, 2013).

Os métodos de extração simples são bastante rápidos e econômicos, porém muito difícil encontrar um reagente simples e efetivo na separação quantitativa das formas. Com isso, como forma de contornar este problema e ampliar o conhecimento da especiação química do meio, muitos autores como Tessier *et al.* (1979), Miller *et al.* (1986) e Keller & Védy (1994) propuseram o uso da extração sequencial. A determinação da concentração do metal em cada fase das extrações pode fornecer informações sobre a origem, modo de ocorrência, disponibilidade biológica e físico-química, mobilização e transporte do metal (Tessier *et al.*, 1979).

A respeito das especiações químicas, tem-se verificado que os elementos de maior mobilidade e de alta disponibilidade para os seres vivos encontram-se, predominantemente, nas formas químicas solúveis, trocáveis e ligados a carbonato. As fases associadas aos óxidos, hidróxidos e matéria orgânica apresentam média disponibilidade enquanto os de baixa mobilidade e disponibilidade aparecem na fração residual (Amaral Sobrinho *et al.*, 1994; Tessier *et al.*, 1979).

## **CAPÍTULO 3**

### **3. METODOLOGIA**

Neste capítulo estão descritos as metodologias e procedimentos realizados nas caracterizações dos rejeitos de ferro e ouro. O objetivo desta etapa caracterização é gerar um abrangente conhecimento sobre as características dos rejeitos. Possibilitando assim servir de premissa para alternativas de aproveitamento mais sustentável com base na minimização dos riscos ambientais. Inicialmente é apresentado um estudo da área onde os rejeitos foram coletados e posteriormente os métodos e técnicas utilizadas nas caracterizações.

#### **3.1 AMOSTRAS DOS REJEITOS**

A amostra de rejeito de ferro estudada é proveniente do beneficiamento de um minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. Especificadamente, é o rejeito do processo gravítico de separação do concentrado e rejeito por espirais. A amostra de rejeito de ouro estudada neste trabalho foi obtida em uma empresa também sediada no estado de Minas Gerais.

#### **3.2 CARACTERÍSTICAS DAS ÁREAS DE COLETA DE AMOSTRA**

Os estudos apresentados a seguir compreendem o conhecimento prévio da mineralogia, processos de beneficiamento, disposição dos rejeitos e particularidades dos materiais. Os conhecimentos prévios das características das amostras foram necessários como forma de selecionar os procedimentos e técnicas a serem aplicadas nas caracterizações dos rejeitos e compreender os resultados obtidos.

##### **3.2.1 REJEITO DE FERRO – QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MINAS GERAIS**

A mina que deu origem ao rejeito estudado situa-se no Quadrilátero Ferrífero. Na mina em questão, que está em operação desde a década de 60, coexistem minério de ferro hematítico de alto teor e itabiritos que são lavrados a céu aberto por métodos de bancadas em encosta por desmonte mecânico. Atualmente o teor de ferro médio da reserva mineral é de 56%.

Segundo dados da empresa, a produção atual é de 9,6 Mt/ano de minério bruto (ROM), sendo

a produção beneficiada de 5,1 Mt/ano e a movimentação de cerca de 10,9 Mt/ano de estéril, sendo a relação estéril/minério (REM) média do complexo de 1,12.

O beneficiamento do minério na unidade consiste em britagem primária e secundária, peneiramento, deslamagem, espessamento e concentração gravítica por jigagem e espirais. Os produtos gerados são sinter feed (>10 mm) e pellet feed (>1 mm), que por meio de ferrovias seguem até o porto de Tubarão, no Espírito Santo de onde são exportados.

Os resíduos da mineração são encaminhados para cavas quando são estéreis, para pilhas quando são rejeitos arenosos e para barragens quando o rejeito é uma lama. O material disposto em estrutura de pilha é gerado na separação por espirais, um processo de concentração gravítica da fração grossa e que devido ao alto teor de ferro da mina não é necessário a adição de produtos químicos. Conforme arquivos da empresa, embora haja presença de metais potencialmente tóxicos, esse rejeito não é perigoso. O rejeito oriundo deste processo possui uma granulometria na faixa de areia média a fina.

A pilha possui capacidade de estocagem de 14,0 milhões de metros cúbicos de rejeitos e é auto filtrante. Portanto, a água filtrada e armazenada na base da pilha apresenta turbidez próxima a zero e retorna para ao processo de beneficiamento.

### **3.2.2 REJEITO DE OURO – MINAS GERAIS**

O rejeito de ouro caracterizado neste trabalho é resíduo do beneficiamento de minério de ouro de uma mina no estado de Minas Gerais.

Atualmente, a mina em questão possui baixo teor aurífero e a rentabilidade das operações se dá pelo fato da mina ser lavrada à céu aberto, o que difere da maioria das minas de ouro do Brasil e do mundo e pela alta capacidade de produção dessa.

O minério de ouro é lavrado de uma rocha metapelítica. A mineralização aurífera na região do depósito é atribuída à precipitação de fluídos hidrotermais da própria rocha encaixante, ricos em ouro, sulfetos, carbonatos e sílica, conforme arquivos da empresa. Os sulfetos ocorrem disseminados na rocha e distribuídos nos boudins de quartzo e segregações dos quartzitos. Há

ocorrência de arsenopirita, galena, esfarelita, pirita, calcopirita e pirrotita. Arsenopirita e pirita possuem uma maior correlação com o ouro.

A mineralogia da mina é complexa, mas composta predominantemente por mica branca muscovita, illita e quartzo. Estes minerais representam mais de 85% da composição do minério de ouro. Os minerais acessórios são clorita, siderita, albita, rutilo e caulinita, cada mineral é representado por uma porcentagem abaixo de 5%. Os minerais traços são a galena, esfarelita, ilmenita, goethita, pirita e arsenopirita. Arsenopirita e pirita possuem uma maior correlação com o ouro e o alto teor de arsênio faz com que esta seja uma mina com alto risco ambiental.

A lavra na mina é feita parte em encosta e parte em cava e o desmonte do minério é realizado por meios mecânicos ou por uso de explosivos conforme a moabilidade do minério. O tratamento do minério é realizado em plantas de beneficiamento e de hidrometalurgia. Nas plantas de beneficiamento, o minério passa pelas etapas de britagem primária e secundária, moagem primária e secundária, concentração gravítica por jigagem e flotação. Nas plantas de hidrometalurgia o minério passa por circuitos de remoagem e depois segue para a lixiviação do tipo "*Carbon in Leach*", onde as operações de lixiviação e adsorção do ouro pelo carvão ocorrem simultaneamente no mesmo tanque, conforme arquivos da empresa.

Na etapa de lixiviação, o ouro é dissolvido em um meio aquoso. Como o metal não é solúvel em água é necessário ao processo um complexante, no caso, o cianeto, que lixivia e estabiliza o ouro em solução, e um oxidante. No processo, a lixiviação e a adsorção do ouro pelo carvão ativado ocorrem simultaneamente em um mesmo tanque. A solução resultante da dessorção do carvão segue para a etapa de eletrólise, para posterior fundição do ouro. O *bullion* produzido neste processo apresenta teores médios de 65 a 75% de ouro, 15% a 25% de prata e impurezas como chumbo, cobre, níquel e ferro, conforme arquivos da empresa.

O rejeito da hidrometalurgia é enviado a uma planta específica para neutralização do cianeto antes de ser encaminhado aos tanques selados para armazenamento de rejeitos com concentrações residuais desse composto. Esta atividade envolve alta tecnologia de forma a impedir que resíduos dessa substância no efluente final do processo sejam dispostos na barragem de rejeitos. O rejeito do processo do beneficiando é predominantemente composto por partículas de granulometria de areia fina, mas também possuem uma quantidade

significativa de partículas das frações siltes e argila.

### 3.3 COLETA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE REJEITOS

As amostras, Figura 3.1, foram coletadas nas saídas das tubulações dos rejeitodutos e se encontravam preservadas no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília (UnB). Ambas as coletas foram realizadas nos rejeitodutos e não na pilha ou barragem de rejeito devido a polpa de rejeitos ser propensa a segregação de partículas. Conforme Ribeiro (2000), este fenômeno natural ocorre pela tendência da fração sólida, ou parte dela, de ao escoar se sedimentar. Isto ocorre em função do tamanho, da forma e da densidade das partículas. Por conseguinte, o fluxo da polpa gera uma separação de partículas que são depositadas em diferentes locais ao longo da trajetória do fluxo na unidade de disposição, ocasionando uma variabilidade estrutural de forma a alterar, significativamente, as características de resistência, deformabilidade e permeabilidade (Ribeiro, 2000).

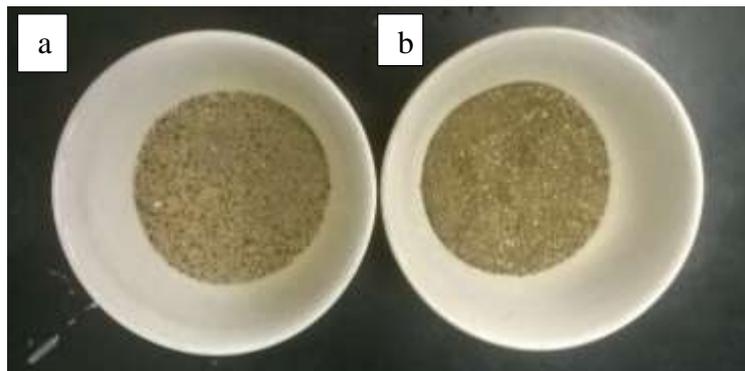


Figura 3.1 a) amostra do rejeito de ferro; b) amostra do rejeito de ouro

As amostras foram secas ao ar, homogeneizadas e separadas com quarteador tipo Jones. Os outros tratamentos prévios específicos de cada ensaio estão detalhados no item 3.4, juntamente com as definições das técnicas e procedimentos.

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS REJEITOS

A caracterização dos rejeitos metálicos foi realizada tomando como premissa a metodologia desenvolvida por Sosa (2016), que envolve caracterizações físicas, mineralógicas químicas, geoquímicas e geoambientais (ver Figura 2.6). As modificações realizadas foram necessárias de forma a adaptar alguns procedimentos e técnicas disponíveis, como foi o caso da

caracterização mineralógica. E também para intensificar o conhecimento geoquímico e geoambiental das amostras por meio de procedimentos de fácil execução. Assim, foram acrescentados ensaios de pH em  $CaCl_2$ ,  $KCL$ , extração simples com EDTA e água destilada e alterado o método de extração sequencial.

### **3.4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA**

A caracterização física dos rejeitos tem como finalidade obter textura, estrutura, um prognóstico da sua natureza, além da indicação de um grande número de propriedades geotécnicas. Como a resistência, a permeabilidade, características de compactação, estimativa de parâmetros para filtros, capilaridade, amplitude de reações químicas e comportamento magnético dos rejeitos. A textura afeta propriedades do solo como a condutividade hidráulica e a retenção de umidade, sendo importante na capacidade de transporte e retenção de metais.

#### **3.4.1.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA**

Por não existir norma específica para análise granulométrica de rejeitos, o ensaio foi realizado conforme a NBR 7181 “Solo – Análise Granulométrica” (ABNT, 2016a). A sedimentação foi realizada com e sem o uso de defloculante. O ensaio de análise granulométrica foi realizado no Laboratório de Geotecnia, no Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, na Universidade de Brasília.

#### **3.4.1.2 MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS**

As determinações das massas específicas dos grãos dos rejeitos foram realizadas pelo emprego de um pentapicnômetro modelo PENTAPYC 5200e da “Quantachrome Instruments”, conforme estabelecido pela D5550 “*Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer*” (ASTM, 2014). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília.

#### **3.4.1.3 ANÁLISE MORFOLÓGICA**

A análise morfológica tem o objetivo de apresentar aspectos relacionados à microestrutura das partículas dos rejeitos. A morfologia das partículas dos rejeitos é dependente das condições

geológicas, das etapas de beneficiamentos do minério e da intemperização sofrida pelo material armazenado e influem no seu comportamento mecânico.

Para o procedimento, cerca de 10 g dos rejeitos foram secas na estufa a temperatura de 60 ° C por 12 horas. Para fixar as amostras ao suporte metálico a ser levado para o microscópio eletrônico de varredura (MEV) foi utilizado fitas dupla-face de carbono, como pode ver visualizado pela Figura 3.2. Em seguida as amostras foram submetidas ao recobrimento com carbono e encaminhadas para análise.

As análises morfológicas foram realizadas no Laboratório de Geocronologia do Instituto de Geociências, na Universidade de Brasília, utilizando um microscópio eletrônico de varredura JEOL Quantas 450. O método analítico utilizado foi o de imageamento com elétrons secundários.

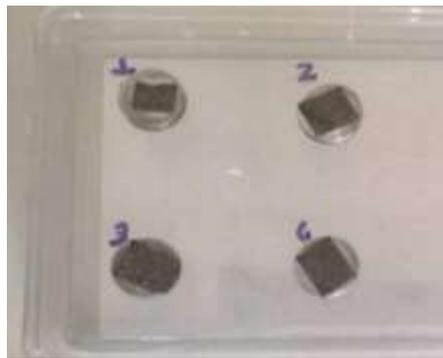


Figura 3.2 Amostras antes do recobrimento com carbono

#### **3.4.1.4 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MAGNÉTICO**

A análise de susceptibilidade magnética dos rejeitos, ainda mais em se tratando de rejeitos metálicos, é de muita importância. O comportamento magnético está relacionado com a presença de bens minerais que contêm ferro em sua estrutura.

Para a realização do ensaio, as amostras de rejeitos foram previamente secas na estufa à temperatura de 105 °C por 24h. Posteriormente, uma quantidade média de rejeito, 500g, foi depositada sobre a superfície de um papel de filtro e submetida à ação do campo magnético de um ímã permanente de base de ferro. Desta forma foi possível observar se as amostras de rejeito apresentavam ou não susceptibilidade magnética. Os materiais utilizados podem ser visualizados na Figura 3.3.

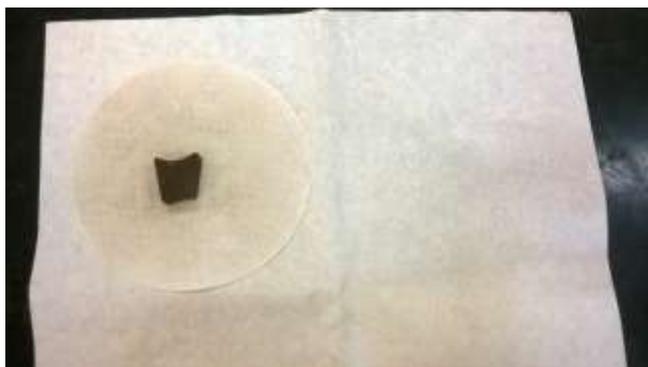


Figura 3.3 Materiais utilizados no ensaio de comportamento magnético

As determinações do comportamento magnético dos rejeitos foram realizadas no Laboratório de Geotecnia, no Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, na Universidade de Brasília

### **3.4.2 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA**

A caracterização mineralógica tem como objetivo a identificação dos minerais presentes nos rejeitos e assim ser possível avaliar o comportamento físico e químico, possibilitando o uso otimizado dos recursos.

#### **3.4.2.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)**

A Difractometria de Raios X (DRX) corresponde a uma das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos e sendo assim foi a técnica selecionada para o conhecimento mineralógico dos rejeitos.

Para o emprego da técnica, as amostras dos rejeitos foram secas em estufas à 105°C, moídas e peneiradas na peneira #200 (0,074 mm). No Laboratório de Difração de Raios X, Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, os materiais foram destorroados (Figura 3.6a) e posteriormente depositados em lâminas de vidro (Figura 3.4b) próprias para o procedimento e então, encaminhados para análise. A DRX foi realizada em um difratômetro da marca Rigaku. A amplitude angular usada foi de  $2\theta$  com um intervalo de medida entre 2-100°, uma velocidade de 0,05°/min e sob voltagem de 35 kV e 15 mA. A identificação mineralógica foi realizada com os padrões de referência do banco de dados do software JADE 9.0.

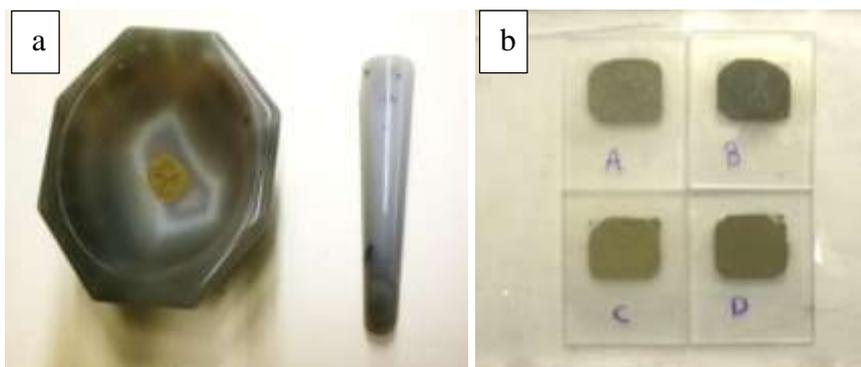


Figura 3.4 a) almofariz de ágata para destorroar amostra; b) amostras preparadas para análise de DRX

### 3.4.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A caracterização química tem como propósito a análise qualitativa e quantitativa das espécies químicas presentes nos rejeitos. Para isto, foram empregadas as técnicas de Fluorescência de raios X por Energia Dispersiva (FRX/EDX) e Espectroscopia de Emissão Atômica por Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES). O emprego de um ou outro método depende da sensibilidade da detecção da radiação emitida por cada um dos elementos.

#### 3.4.3.1 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX)

A técnica de Fluorescência de Raios X (FRX) é muito difundida na comunidade científica por sua capacidade de avaliação quali-quantitativa de espécies químicas de forma rápida, sem destruir a matriz, com baixo custo operacional e fácil preparação de amostra. Entretanto, os elementos com números atômicos baixos apresentam baixa sensibilidade analítica e baixos valores de energia de emissão, portanto são mais difíceis de serem determinados por FRX.

Para a análise química utilizou-se a técnica de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva (FRX/EDX). A EDXRF é uma técnica analítica que se fundamenta na medição das intensidades de raios X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra a partir de excitação por meio de um feixe de raios X (Santos *et al.*, 2013). A detecção dos raios X emitidos é realizada por um detector de silício que gera um espectro de intensidade em função da energia. A intensidade da energia característica emitida pelos elementos analisados na amostra é dependente da concentração de cada elemento presente na amostra (Alexandre & Bueno, 2006).

Em contrapartida à praticidade operacional do método, a técnica não atinge limites de detecção comparáveis aos alcançados pelas técnicas de espectrometria de absorção (AAS) ou emissão atômica (AES ou OES), sendo mais utilizadas onde os limites de detecção, precisão e exatidão podem ser menos rígidos.

A FRX foi realizada utilizando um espectrômetro de XRF/EDX da marca Shimadzu, modelo EDX 720HS, que analisa a faixa de elementos que vai do sódio (11Na) ao urânio (92U), com tubo de raios X com ânodo de ródio (Rh). Para a análise, as amostras foram secas na estufa a 105° C por 24 horas, moídas e peneiradas na peneira #200 (0,074 mm). O material passante foi encaminhado para a análise. O ensaio foi realizado na Central Analítica do Instituto de Química da Universidade de Brasília.

### **3.4.3.2 PLASMA POR ACOPLAMENTO INDUTIVO (ICP)**

Para completar as informações químicas dos rejeitos, foi preciso utilizar uma técnica de maior precisão. A técnica selecionada para tal foi a espectrometria de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES).

As análises de ICP baseiam-se na detecção da radiação eletromagnética emitida por átomos neutros ou íons excitados nas regiões do espectro eletromagnético visível e ultravioleta. Neste caso, a ionização dos elementos a serem analisados é feita pelo plasma indutivo de argônio. O plasma, que pode ter a temperatura variando entre 7000 K e 10000 K, possui energia suficiente para promover a excitação da maioria dos elementos químicos existentes, possibilitando a quantificação de uma ampla faixa de analitos (Yatsuzuka *et al.*, 2018).

A espectrometria de plasma é uma técnica analítica multielementar, apresentando alta sensibilidade e limites de detecção baixos quando comparados às outras técnicas instrumentais. É aplicável para análises de gases e líquidos. A preparação das amostras sólidas é realizada por sistema aberto de digestão ácida.

Para o conhecimento da composição química dos materiais pelo método de ICP, as amostras passaram pelo processo de digestão multiácidos com *HF*, *HCl*, *HNO<sub>3</sub>* e *HClO<sub>4</sub>* concentrados. Para cada rejeito, foi pesado em bequer de teflon descontaminado 1g de material e adicionado

20 ml de  $HF$ , 10 ml de  $HCl$ , 5 ml de  $HNO_3$  e 1 ml de  $HClO_4$ . O conjunto de ácidos, cadinhos e rejeitos foram colocados na capela sob chapa de aquecimento até secura. Posteriormente foram adicionados novamente os mesmos ácidos concentrados nas mesmas quantidades e novamente prosseguiu-se até secura. Por fim, foi adicionado 2 M  $HCl$  até que a amostra solubilizasse. Após o resfriamento, a solução foi transferida para um balão volumétrico e completado com água destilada até 100 ml. O procedimento adotado tem como objetivo liberar os elementos traços retidos na estrutura cristalinas das matrizes ambientais.

Pelo ICP-OES também foram analisadas as amostras líquidas dos extratos dos ensaios de lixiviação, solubilização, extração com EDTA, extração com água destilada e os extratos obtidos na extração sequencial, descritos a seguir. Os elementos analisados pelo ICP-OES se limitaram, por restrições técnicas, ao alumínio (Al), arsênio (As), bário (Ba), cálcio (Ca), cádmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), ferro (Fe), potássio (K), lítio (Li), magnésio (Mg), manganês (Mn), molibdênio (Mo), sódio (Na), níquel (Ni), fósforo (P), chumbo (Pb), selênio (Se), silício (Si), estrôncio (Sr), titânio (Ti), vanádio (V,) zinco (Zn) e zircônio (Zr). As análises foram realizadas em ICP-OES no Laboratório de Geoquímica do Instituto de Geociências, na Universidade de Brasília.

### **3.4.4 CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA**

Para a compreensão dos fenômenos geoquímicos que ocorrem entre os rejeitos e água como meio de dissolução, as amostras foram submetidas a ensaios de pH em água destilada,  $CaCl_2$  e  $KCl$ , potencial de oxidação-redução e condutividade elétrica. Os conhecimentos desses parâmetros contribuem para o entendimento da capacidade de mobilidade dos metais presentes nos rejeitos.

#### **3.4.4.1 pH, CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E POTENCIAL DE OXIRREDUÇÃO**

Para os ensaios de pH em água, condutividade elétrica (CE) e potencial de oxirredução (Eh), foram empregadas 4 g de resíduo e 10 ml de água destilada, de forma a utilizar a proporção de 1: 2,5 (massa/volume) e realizados em triplicata. Da mesma forma, foram feitas as determinação do pH em  $CaCl_2$  e  $KCl$ . Para isso foram feitas soluções de 0,01M  $CaCl_2$ , e 1M  $KCl$  que foram utilizadas na substituição da água para a realização das medições. Ambas as amostras ficaram em agitação por meia hora a baixa velocidade, num agitador Rotator Genie,

marca *Cientific Industries*, seguido de 30 min de repouso e separação do extrato líquido por centrifugação e filtragem. Após este processo as amostras foram encaminhadas para as medições de pH, condutividade elétrica e potencial de oxidação-redução.

As medidas de pH foram obtidas com o emprego de um pHmetro WTW modelo 3210. A condutividade elétrica foi obtida através de um condutivímetro Hach, Modelo SensÍon378. Já o potencial de oxidação redução foi obtido pelo emprego do eletrodo METER modelo 896. Os ensaios foram realizados no Laboratório Geoquímica, no Instituto de Geociências, na Universidade de Brasília.

O pH em  $CaCl_2$  é uma determinação mais precisa do que o pH em água. O pH em água é a atividade do íon  $H^+$  na solução do solo e é bastante afetado por pequenas quantidades de sais presentes no solo, em consequências de adubações, períodos de seca ou da mineralização que ocorre em amostras de solo úmidas acondicionadas em sacos plásticos (IBRA, 2018). Além disso, o pH em água sofre influência da relação usada de solo: solução.

Ademais, o conhecimento das cargas dos meios porosos por meio do pH, levam ao conhecimento do  $\Delta pH$ . O  $\Delta pH$  é a diferença entre o pH em  $KCl$  e o pH em água. Este valor permite estimar a predominância de cargas no meio poroso e reflete também na sua estrutura.

A medida da condutividade elétrica em meio aquoso é uma forma indireta de inferir a presença de íons dissolvidos e ionizados na água, como cloreto, sódio, magnésio, cálcio, ferro e alumínio (Brandão, 2002). Desta forma, a condutividade elétrica quantifica uma grande quantidade de compostos contidos na solução - uns positivos, outros negativos - e que, em solução, permitem a passagem da eletricidade. A salinização dos solos pode causar perda da fertilidade e a susceptibilidade à erosão, além da contaminação do lençol freático e aquíferos (Dias & Blanco, 2010).

### **3.4.5 CARACTERIZAÇÃO GEOAMBIENTAL**

E por último, a caracterização geoambiental tem como finalidade simular a interação do rejeito com o meio ambiente, verificar o potencial de disponibilidade dos metais nos rejeitos e no meio aquoso e conhecer as especiações químicas.

Seja qual for o caminho, natural ou antrópico, pelo qual os metais pesados alcançam o solo e a água, a composição total encontrada é de pouca utilidade para avaliar sua disponibilidade aos organismos (Tavares, 2013). Sendo assim, as técnicas aqui apresentadas foram empregadas de forma a se obter informações de como os metais presentes nos rejeitos estão associados e como possivelmente interagiriam com o meio ambiente.

### 3.3.5.1 ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO

O ensaio de lixiviação foi realizado conforme a norma Method 1312 - *Synthetic Precipitation Leaching Procedure – SPLP* (USEPA, 1994). A solução lixivante foi preparada com um pH de 4,2 como forma de simular uma situação mais rigorosa de chuva ácida. O procedimento foi realizado em duplicata e após o ensaio, os extratos lixiviados foram armazenados com pH 2 a 4°C até que fossem analisadas pelo ICP-OES. A Tabela 3.1 apresenta os procedimentos realizados para a execução do ensaio conforme a norma.

Tabela 3.1 Procedimento de extração conforme SPLP

<b>Passo</b>	<b>Condições Experimentais</b>
1	Pesar 100g de rejeito passante na peneira de abertura 9,5mm.
2	Adicionar ao rejeito a solução de extração de maneira a obter-se a relação de 1:20 (massa/volume). Preparo da solução de extração: mistura de $H_2SO_4$ e $HNO_3$ na proporção em massa de 60:40. Completar até 1L com água deionizada. O pH da solução deve ser de $4,20 \pm 0,05$
3	Agitar por 18 h no aparelho de rotação com velocidade de 30 rpm/min.. Descobrir o frasco para liberar os gases durante a agitação
4	Filtrar a solução com aparelho de filtração guarnecido com membrana filtrante com 0,45 $\mu$ m de porosidade.
5	Medir o pH e acidificar, se necessário
6	Determinar os metais (ICP-OES)

### 3.3.5.2 ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO

O ensaio de solubilização foi realizado conforme a norma a NBR 10.006 “Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos” (ABNT, 2004d), estando os procedimentos descritos na Tabela 3.2. Foi feita a separação do extrato líquido solubilizado

por centrifugação e filtração por uma membrana filtrante de 0,45 µm. O procedimento foi realizado em duplicata e os extratos obtidos foram armazenados com pH 2 a 4°C até que fossem analisadas pelo ICP-OES. Os compostos orgânicos não foram analisados devido a origem dos rejeitos. As concentrações dos constituintes analisados foram comparadas com os limites máximos estipulados pela NBR 10.004 “Resíduos Sólidos - Classificação” (ABNT, 2004a).

Tabela 3.2 Procedimentos para a execução do ensaio de solubilização

<b>Passo</b>	<b>Condições Experimentais</b>
1	Adicionar 1.000 ml de água destilada a 250g de rejeito (base seca)
2	Agitar em baixa velocidade, por 5 min. Cobrir o frasco com filme de PVC e deixar em repouso por 7 dias.
3	Filtrar a solução com membrana filtrante de 0,45 µm de porosidade.
4	Medir o pH e acidificar, se necessário
5	Determinar dos metais (ICP-OES)

### 3.3.5.3 EXTRAÇÃO COM ÁGUA DESTILADA

A concentração dos metais solúveis na solução do solo foi obtida utilizando-se o método de extração descrito por Miller *et al.* (1986b) e Do Nascimento *et al.* (2014). A escolha da metodologia se deu pela similaridade com a fonte contaminante. O objetivo foi avaliar os metais solúveis em água e, portanto, facilmente lixiviados.

Para as extrações foram empregados 4g de rejeito e 20 ml de água destilada. O pH da água destilada foi de 5,75. A solução foi submetida a agitação por 2 horas. Foi feita a separação do extrato líquido por centrifugação e filtração por uma membrana filtrante de 0,45 µm. Os extratos obtidos foram prontamente analisados pelo ICP-OES. As extrações foram realizadas no laboratório de Geoquímica do Instituto de Geociências, na Universidade de Brasília.

### 3.3.5.4 EXTRAÇÃO COM EDTA

As extrações com EDTA foram realizadas conforme Wang & Qin (2007) e Bourlegat (2010). Para o ensaio, foi preparada uma solução 0,05M Na<sub>2</sub>-EDTA com pH 7,0, como mostra Figura

3.5a. A extração foi realizada empregando 5 g de rejeito de mineração a 50 ml da solução, na proporção 1:10 (massa/volume). A solução foi submetida a agitação por 2 horas. Foi feita a separação do extrato líquido por centrifugação e filtragem por uma membrana filtrante de 0,45 µm. Os extratos foram prontamente analisados pelo ICP-OES.

As extrações simples com EDTA foram realizadas no laboratório de Geoquímica do Instituto de Geociências, na Universidade de Brasília.

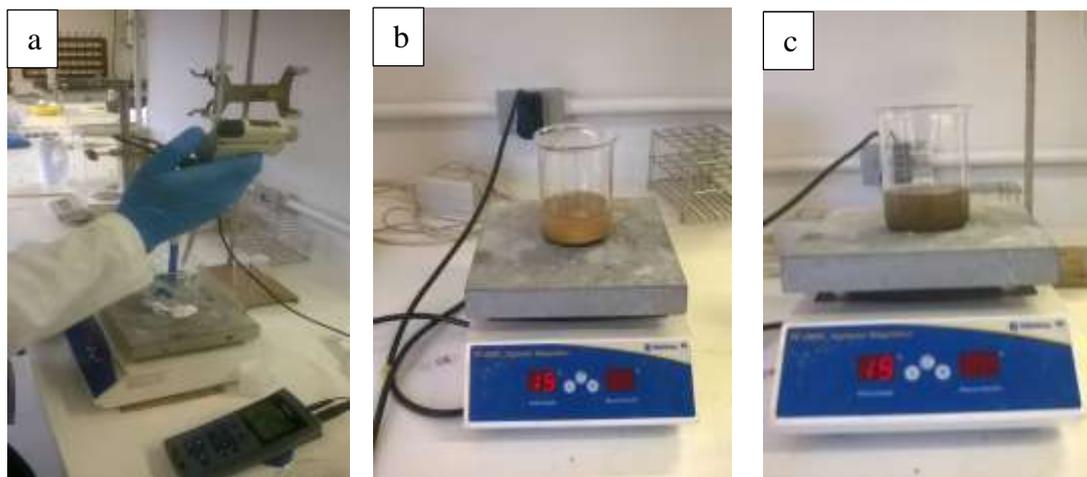


Figura 3.5 a) Preparação da solução de EDTA; b) Extração no rejeito de ferro c) Extração no rejeito de ouro

### 3.3.5.5 EXTRAÇÃO SEQUENCIAL

Para a extração sequencial, o método utilizado foi o da *Community Bureau of Reference (BCR)* modificado (Rauret *et. al.*, 1999).

Os protocolos BCR foram desenvolvidos por uma comissão europeia *Community Bureau of Reference*, em 1987, atualmente conhecida como *Standard, Measurements and Testing Programme*. O objetivo foi aproximar os vários métodos de extração sequencial utilizados pelos laboratórios nos estudos de mobilidade e disponibilidade de metais em solos e sedimentos, desenvolvendo um procedimento padrão de maneira a permitir comparações entre resultados de todo o mundo.

Posteriormente, um protocolo modificado foi proposto por Rauret *et al.* (1999) e ao método foi acrescentado a quarta etapa, que se refere à digestão do material residual da fração 3 como uma verificação interna do procedimento, levando em consideração a heterogeneidade dos materiais. A modificação foi validada pelo comitê.

O protocolo BCR modificado (Rauret *et al.* 1999) submete a amostra a extração de metais em quatro etapas sequenciais. As frações extraídas são: trocável para determinação de espécies solúveis e carbonatos; reduzível para determinação das espécies ligadas aos óxidos de ferro e manganês; oxidável para determinação das espécies associadas à matéria orgânica e sulfetos e residual para dissolver metais-traço retidos na estrutura cristalina do mineral (Mossop & Davidson, 2003).

Para o ensaio pesou-se 1 g de rejeito seco ao ar. O ensaio foi realizado em triplicata. A Tabela 3.3 apresenta a descrição dos procedimentos e a Figura 3.6 o registro fotográfico.

Tabela 3.3 Procedimento BCR modificado (Rauret *et al.*, 1999).

Passo	Fração	Soluções	Condições Experimentais
1	Trocável (Disponível)	40 ml CH <sub>3</sub> COOH (0,11 mol/L)	Agitação constante por 16 horas, temperatura ambiente (22±5°C). Centrifugar por 30 min.
2	Reduzível (Disponível em ambiente reductor)	40 ml HONH <sub>2</sub> ·HCl (0,5 mol/L)	Agitação constante por 16 horas, temperatura ambiente (22±5°C). Centrifugar por 20 min.
3	Oxidável (Relativamente Disponível)	10 ml H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ( 8,8 mol/L)	Temperatura ambiente por 1 hora e banho maria de 85° C por 1 hora. Reduzir volume para 3ml.
		+ 10 ml H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ( 8,8 mol/L)	Banho maria de 85° C por 1 hora, reduzir volume para 1 ml
		+ 50 ml C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub> (1,0 mol/L)	Agitação constante por 16 horas, temperatura ambiente (22±5°C).
4	Residual (Não disponível)	HF, HCl, HNO <sub>3</sub> , HClO <sub>4</sub> ,	Digestão multiácidos *

\* Para a digestão da quarta etapa, que corresponde à fração residual foi adotado o procedimento de digestão multiácido descrito no item 3.4.3.2

Os extratos obtidos foram armazenados com pH 2 a 4°C até que fossem analisadas pelo ICP-OES. A extração sequencial foi realizada no Laboratório de Geoquímica, no Instituto de Geociência da UnB. Nesta etapa, foram analisados os elementos Al, As, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, P, Pb, Ti, V e Zn. A restrição dos elementos se deu pelas limitações do ICP-OES e a pouca relevância ambiental dos outros elementos por ele analisados.

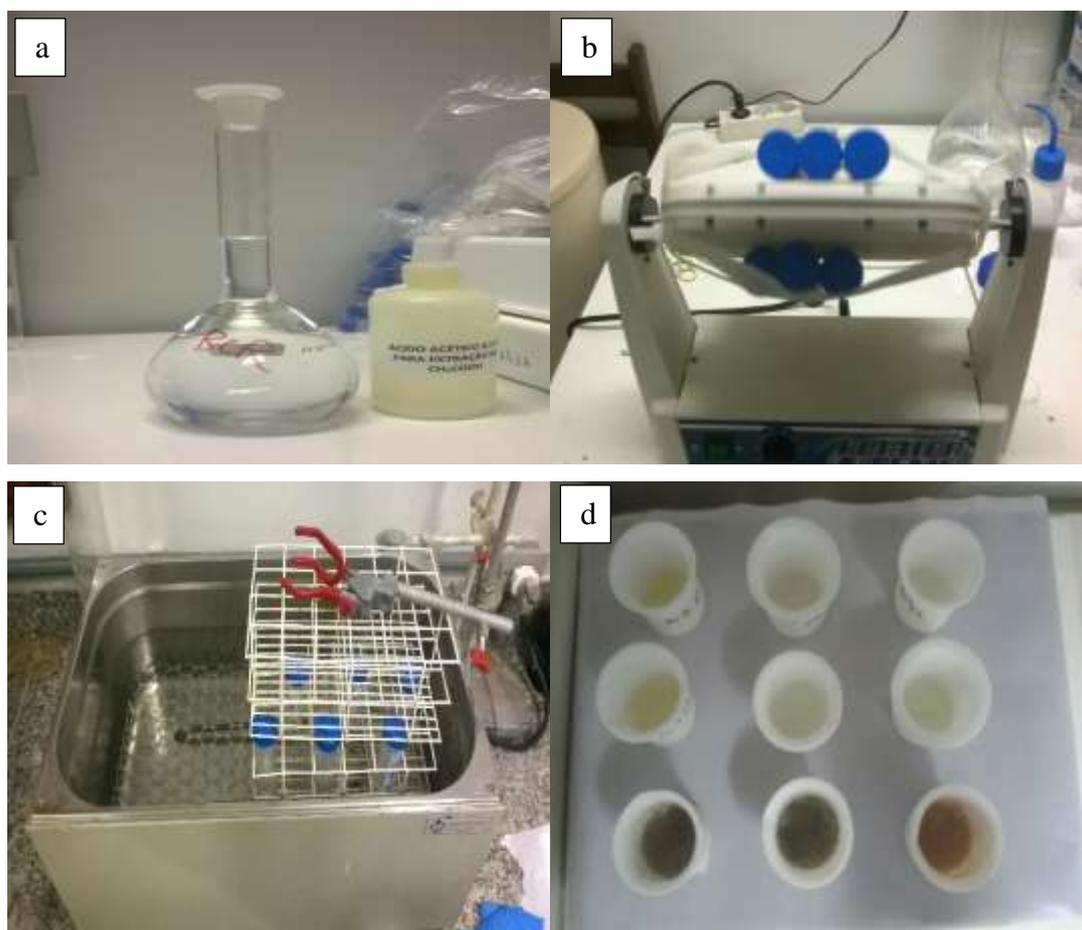


Figura 3.6 a) extração da fração trocável b) extração da fração reduzível c) extração da fração oxidável; d) digestão das amostras para ICP

## CAPÍTULO 4

### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS CARACTERIZAÇÕES DOS REJEITOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados da caracterização dos rejeitos de ferro e ouro. Aos resultados, buscou-se dar enfoque químico dos materiais de forma a melhor compreender a interação dos rejeitos no meio ambiente a longo prazo. As caracterizações aqui apresentadas se tratam de avaliações físicas, mineralógicas, químicas, geoquímicas e geoambientais dos rejeitos.

#### 4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS REJEITOS

A caracterização física um é fator importante na determinação do comportamento dos rejeitos. A análise granulométrica é um dos principais itens para se aferir na caracterização de meios porosos, na qual através dela determina-se a faixa de diâmetro dos grãos do material e é possível inferir outras informações, como aspectos sobre percolação e capilaridade.

##### 4.1.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam as curvas granulométricas dos rejeitos de ferro e ouro, respectivamente, obtidas pelo método de peneiramento e sedimentação.

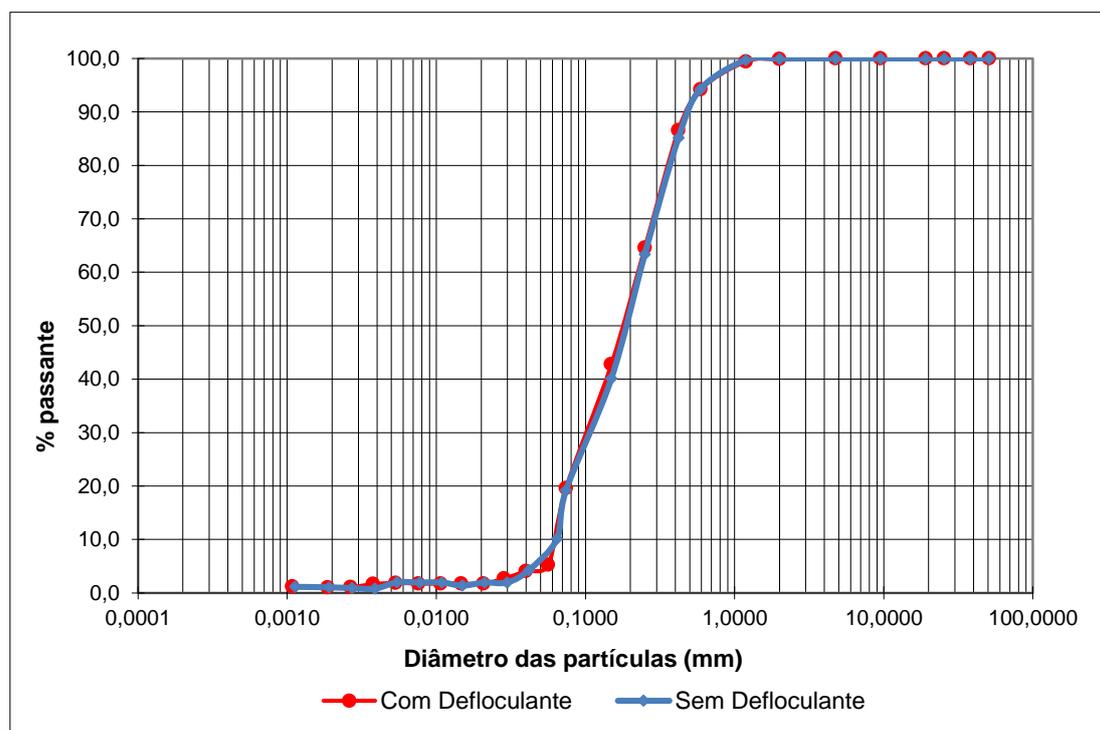


Figura 4.1 Curva granulométrica do rejeito de ferro

O rejeito de ferro situa-se na faixa granulométrica das areias médias a finas, sendo o coeficiente de não uniformidade (CNU) de 3,50 o que indica que o rejeito é mal graduado ( $CNU \leq 6$ ). O coeficiente de curvatura (CC), coeficiente que detecta melhor o formato da curva granulométrica é de 0,8. O que confirma que o material é não graduado ( $CC < 1$  ou  $CC > 3$ ). A Tabela 4.1 apresenta um resumo dos índices granulométricos do rejeito de minério de ferro analisado.

Tabela 4.1 Índices granulométricos da amostra de rejeito de ferro

<b>Rejeito de Ferro</b>				
$D_{10}$	$D_{60}$	$D_{30}$	CNU	CC
0,06	0,21	0,10	3,50	0,80

A curva granulométrica do rejeito de ferro não apresentou alteração na presença ou ausência de defloculante, o que indica que este material não apresenta agregação de partículas. Este resultado está de acordo como estudo de Oliveira *et al.* (2016) para um rejeito de ferro. Este fato pode ser explicado pelo fato do rejeito ser um material modificado de forma que sua fração mais fina é granular, formada principalmente por partículas de óxido de ferro, não apresentando as propriedades de um material argiloso.

A seguir, Figura 4.2, a curva granulométrica do rejeito de ouro.

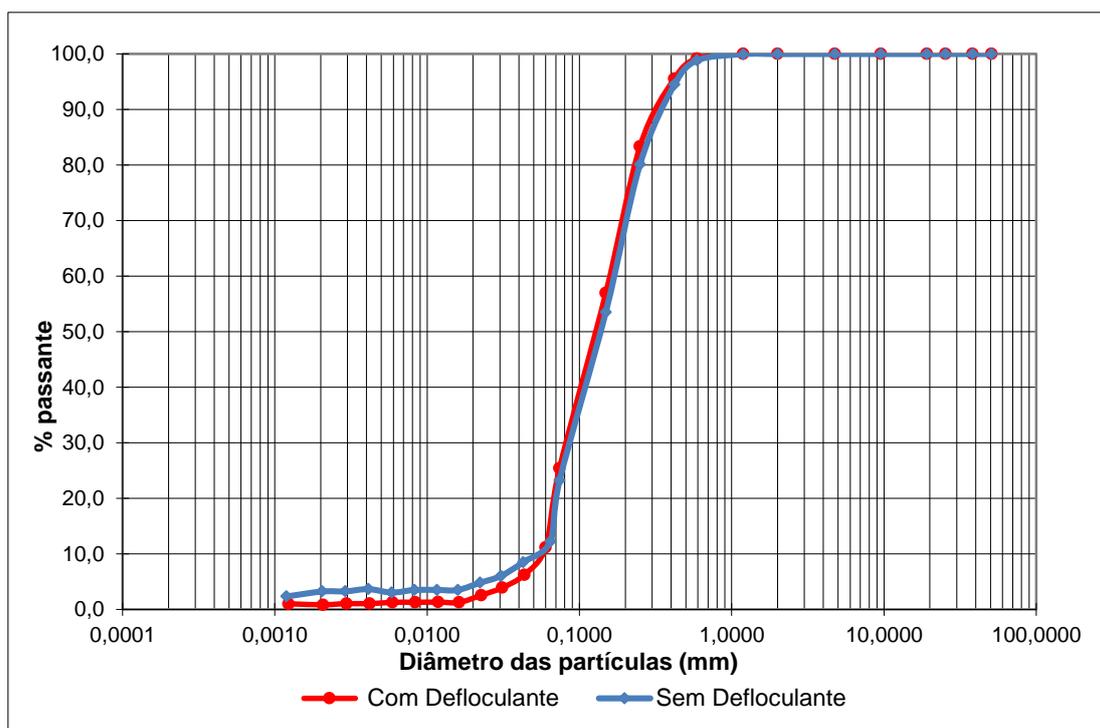


Figura 4.2 Curva granulométrica do rejeito de ouro

O rejeito de ouro situa-se na faixa granulométrica das areias médias a finas. O coeficiente de não uniformidade (CNU) é 3,6, o que indica que este rejeito é mal graduado. O coeficiente de curvatura (CC) é de 0,9, o que confirma que o material é mal graduado. A Tabela 4.2 apresenta um resumo dos índices granulométricos do rejeito de minério de ouro analisado.

Tabela 4.2 Índices granulométricos da amostra de rejeito de ouro

<b>Rejeito de Ouro</b>				
$D_{10}$	$D_{60}$	$D_{30}$	CNU	CC
0,05	0,18	0,09	3,60	0,90

Observando a Figura 4.2 pode-se verificar que as curvas obtidas na condição com e sem defloculante são semelhantes. Entretanto, na curva do rejeito de ouro é possível verificar que o defloculante provocou uma agregação das partículas mais finas (<0,075mm), fazendo com que o rejeito apresentasse um teor de fração tamanho argila ligeiramente menor do que quando ele não foi utilizado. Isso indica que estas pequenas partículas que se agregam, possuem uma constituição química - mineralógica diferenciada das demais e influenciam o comportamento do rejeito durante a fase de sedimentação, dependendo do tipo de fluido e do uso ou não do defloculante (Villar, 2002).

Ou seja, o defloculante na verdade, estaria induzindo a formação de flocos de alguns componentes químicos constituintes do rejeito, numa proporção que deve variar com o tipo e forma dos mesmos. O comportamento descrito também foi verificado por Capelli (2016) em rejeito de ouro da região do Quadrilátero Ferrífero.

#### 4.1.2 MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS ( $\rho_s$ )

A massa específica dos grãos é uma característica física dos meios porosos, sendo função dos seus constituintes mineralógicos. Os valores de  $\rho_s$  dos rejeitos são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Massa específica dos grãos

	<b>Rejeito de Ferro</b>	<b>Rejeito de Ouro</b>
$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	3,49	3,22

As massas específicas encontradas são ligeiramente maiores ao verificado na literatura para rejeitos provenientes de minas com geologia e mineralogia semelhantes aos estudados. Para os rejeitos de ferro e ouro, respectivamente, Espósito (2000) e Pereira (2016) verificaram valores médios de 3,20 g/cm<sup>3</sup> e 2,94 g/cm<sup>3</sup>. Observa-se, como também mencionado por estas autoras, que a massa específica dos grãos está intimamente ligada ao teor de minerais mais densos presentes no rejeito, isto é, a fração remanescente de óxidos de ferro e outros minerais mais densos.

Com as frações granulométricas retidas no peneiramento foram obtidas as massas específicas dos grãos por faixas granulométricas. Na Figura 4.3 e Figura 4.4 estão os resultados obtidos para o rejeito de ferro e ouro, respectivamente.

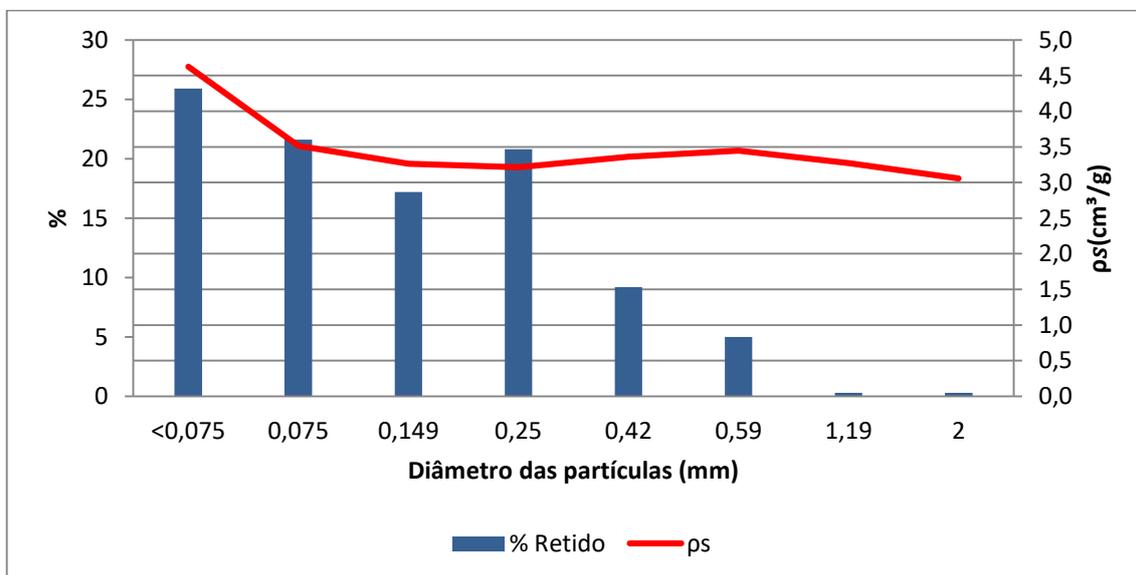


Figura 4.3 Massas específicas das frações retidas no peneiramento do rejeito de ferro

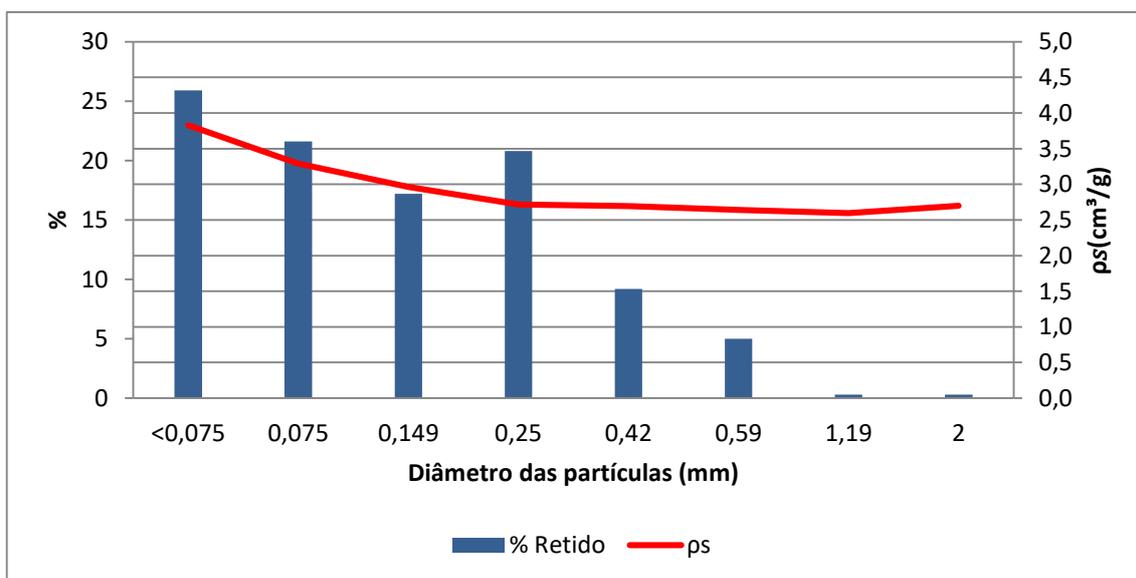


Figura 4.4 Massas específicas das frações retidas no peneiramento do rejeito de ouro

Nota-se que em ambas as amostras de rejeitos as frações mais finas apresentam massas específicas maiores que as frações mais grossas. Observa-se também que em todas as frações, o rejeito de ferro apresenta maiores massas específicas que o rejeito de ouro.

No rejeito de ferro, nos finos há predominância da hematita, mineral identificado pela DRX, que será discutida adiante. Como já citado, este rejeito é procedente da separação gravimétrica por espirais. Este método, muito empregado para o beneficiamento de minério de ferro, não apresenta eficácia no processamento de frações finas iguais ou menores a 0,038 mm (Arenare *et al.*, 2009). O que faz com que o minério de ferro com partículas abaixo desse diâmetro seja tratado como rejeito, tornando para essa fração fina outros métodos de concentração mais adequados, como a flotação e a concentração magnética.

No rejeito de ouro, a diversidade mineralógica e dos processos de tratamento mineral não permitem esse detalhamento. Contudo, certifica-se que as frações finas apresentam, como mencionado anteriormente, minerais mais densos.

#### **4.1.3 ANÁLISE MORFOLÓGICA**

As imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) das amostras de rejeito de ferro e ouro indicam padrões morfológicos bastante distintos entre os rejeitos, apesar de suas distribuições granulométricas serem semelhantes. Isso se deve principalmente a dois motivos, a diferença mineralógica entre os rejeitos e aos diferentes processos de beneficiamento que ambos foram submetidos.

Nota-se que o rejeito de ferro, Figura 4.5, possui partículas com morfologias mais uniformes quando comparada aos rejeitos de ouro, Figura 4.6. O rejeito de ferro não apresenta agregações de partículas, ao contrário do rejeito de ouro, que como pode ser visualizada na Figura 4.6b e c possui agregados de partículas.

Com a análise verificou-se que o rejeito de ferro poderá ter uma contribuição textural para o comportamento mecânico, enquanto o rejeito de ouro influenciará diretamente a estrutura, além da textura.

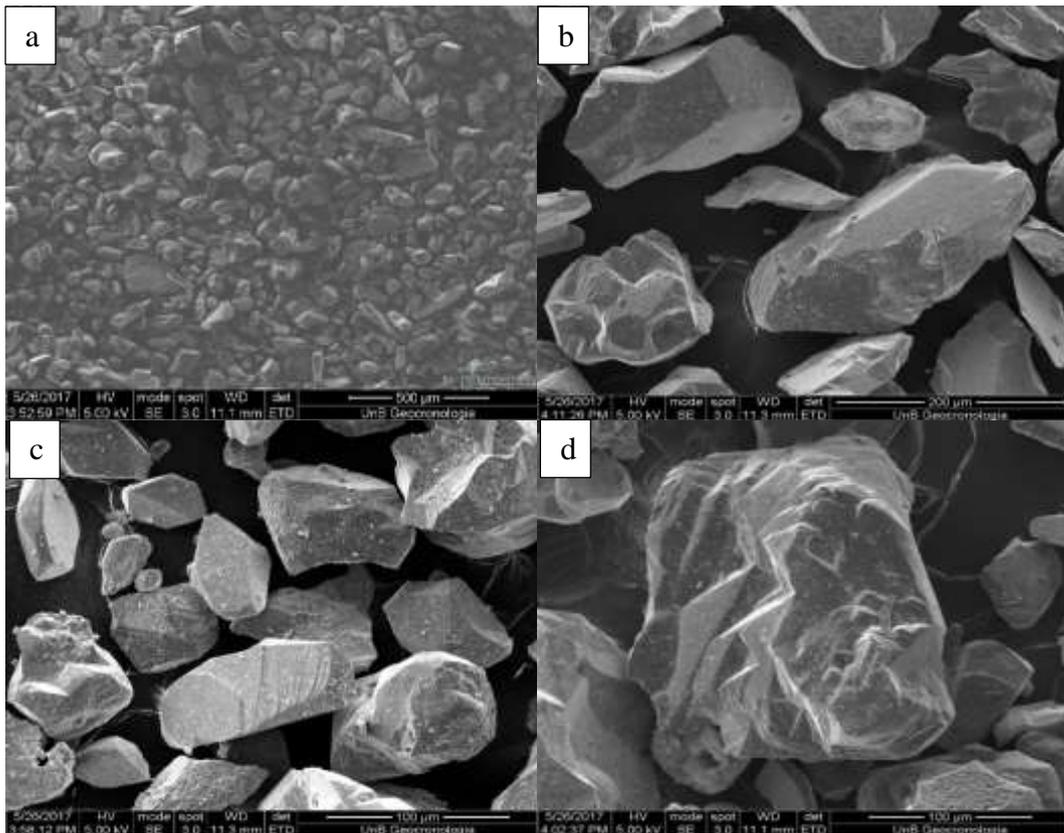


Figura 4.5 Morfologia das partículas do rejeito de ferro; a) aumento de cerca de 100 vezes b) aumento de cerca de 300 vezes c) aumento de cerca de 400 vezes d) aumento de cerca de 400 vezes

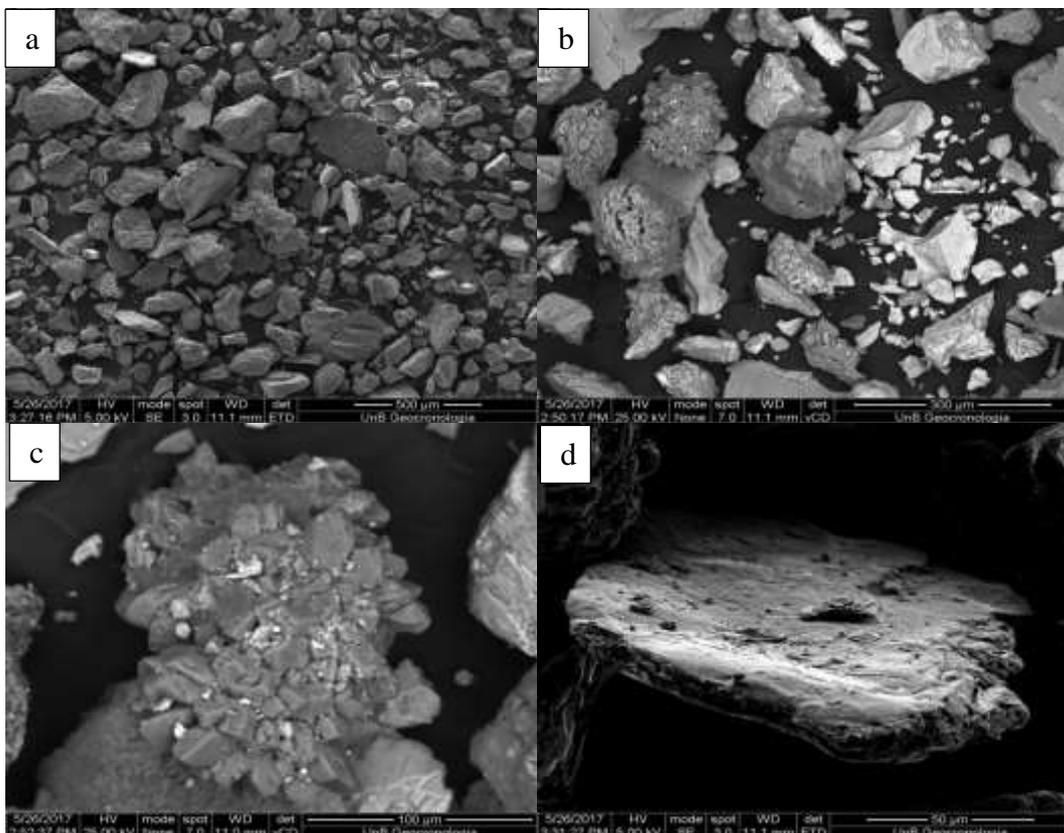


Figura 4.6 Morfologia das partículas do rejeito de ouro; a) aumento de cerca de 100 vezes b) aumento de cerca de 300 vezes c) aumento de cerca de 400 vezes d) aumento de cerca de 800 vezes

#### 4.1.4 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MAGNÉTICO

O comportamento magnético dos materiais é definido pela composição mineralógica ou química, microestrutura e pela ocorrência de eventuais processos aos quais sejam expostos os materiais. No caso dos rejeitos, o magnetismo é uma importante propriedade geralmente relacionada à presença de ferro na sua estrutura.

Ambos os rejeitos estudados apresentaram susceptibilidade magnética significativa na presença de um campo magnético, ver Figura 4.7, o que indica a existência de minerais com presença de ferro em suas estruturas. Minerais estes que foram confirmados pela DRX, como será discutida a seguir.

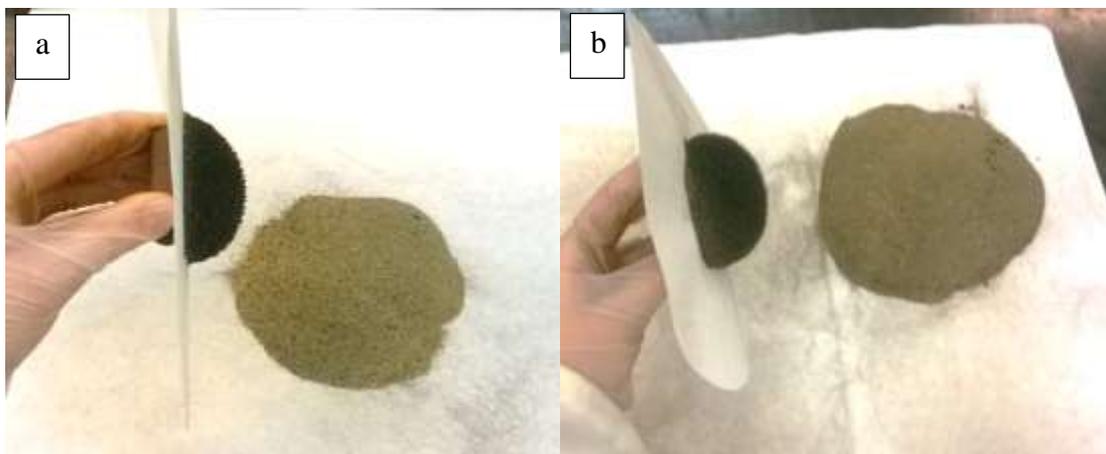


Figura 4.7 susceptibilidade magnética a) amostra de rejeito de ferro b) amostra de rejeito de ouro

#### 4.2 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

A caracterização mineralógica aqui apresentada, apesar de simples, possibilita o conhecimento das fases mineralógicas dos rejeitos. A classificação dos minerais tem como fundamento a constituição química e estrutura cristalina que condicionam suas propriedades físicas e químicas.

##### 4.2.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

As análises mineralógicas realizadas pela DRX identificaram que o rejeito de ferro apresenta quartzo e hematita, como pode ser visualizado na Tabela 4.4, estando de acordo com os estudos realizados por Espósito (2000) para um rejeito de ferro com características semelhantes. O mineral quartzo, segundo mineral mais abundante da crosta, é quimicamente

inerte. A hematita é a principal fonte de ferro do mundo e o mais abundante mineral que o contém. Além disto, a hematita é estável em meio oxidado. O quartzo e a hematita são minerais não expansivos.

Tabela 4.4 DRX da amostra de rejeito de ferro

<b>Rejeito de Ferro</b>		
<b>Mineral</b>	<b>Fórmula Química</b>	<b>Grupo Mineral</b>
Quartzo	$SiO_2$	Silicato
Hematita	$Fe_2O_3$	Óxido

O resultado da mineralogia juntamente com os das massas específicas das frações retidas no peneiramento, indicam, para o rejeito de ferro, que as frações mais finas são predominantemente hematita (densidade relativa de 5,26) enquanto as mais grossas são quartzo (densidade relativa de 2,66).

Já o resultado de DRX para o rejeito de ouro identificou minerais silicatos, óxidos, sulfetos e carbonatos, como apresentado na Tabela 4.5. Observando-a pode-se perceber que o rejeito de ouro apresenta uma composição mineralógica mais diversificada. A mineralogia identificada está de acordo com estudos realizados na região e já mencionados no item 3.2.2. Os autores apontam a predominância dos minerais quartzo e muscovita e em menores quantidades pirita e goethita.

Tabela 4.5 DRX da amostra de rejeito de ouro

<b>Rejeito de Ouro</b>		
<b>Mineral</b>	<b>Fórmula Química</b>	<b>Grupo Mineral</b>
Quartzo	$SiO_2$	Silicatos
Hematita	$Fe_2O_3$	Óxidos
Caulinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Silicatos
Goethita	$FeO(OH)$	Óxidos
Anatásio	$TiO_2$	Óxidos
Rutilo	$TiO_2$	Óxidos
Pirita	$FeS_2$	Sulfetos
Muscovita	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(F,OH)_2$	Silicatos
Calcita	$CaCO_3$	Carbonatos
Dolomita	$CaMg(CO_3)_2$	Carbonatos
Montmorilonita	$CaO_2 \cdot Al_2O_3Si_5O_{10} \cdot 4H_2O$	Silicatos
Sepiolita	$Mg_4(Si_2O_5)_3(OH)_2 \cdot 6H_2O$	Silicatos
Ferroactinolita	$Ca_2Fe^{+2}_5Si_8O_{22}(OH)_2$	Silicatos
Paragonita	$Na_2Al_4(Si_6Al_2O_{20})(OH)_4$	Silicatos

O grupo dos carbonatos se caracterizam pela facilidade de solubilizar e de se intemperizar, já os óxidos de titânio são muito resistentes ao intemperismo. A paragonita e muscovita são pertencentes ao grupo das micas, minerais marcados pelo hábito lamelar. Caulinita e a

montmorilonita são minerais secundários formados a partir de outros minerais, sendo a montmorilonita um argilomineral expansível.

Conhecida a mineralogia da amostra do rejeito de ouro, pode-se inferir que nas frações mais finas há predominância de minerais férricos, hematita e goethita (densidade relativa de 4,30) e nas frações maiores, minerais como muscovita (densidade relativa de 2,63) e quartzo.

Deve-se ressaltar que no rejeito de ouro foi identificado o mineral pirita e apesar de não ter sido identificado o mineral arsenopirita, a presença deste não pode ser descartada. Conforme descrito no item 3.2.2 a arsenopirita é um mineral traço da mina que possui correlação com o ouro e a difratometria de raios X apresenta a limitação de não garantir a identificação de minerais que estão em pequenas quantidades nas amostras (Silva, 2013)

Os minerais sulfetados, como a pirita e a arsenopirita, ao serem expostos as condições ambientais oxidam-se, gerando drenagem ácida de mina (DAM), bem como a dissolução de metais presentes no próprio rejeito. Trata-se de um dos mais graves impactos ambientais associados à atividade de mineração, além do fato do arsênio ser um elemento que apresenta grande potencial tóxico.

### **4.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA**

A caracterização química teve objetivo de conhecer os constituintes químicos dos rejeitos. Entretanto, para isso foi necessário o emprego de técnicas complementares devido as limitações de cada método.

#### **4.3.1 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X E ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓPTICA COM PLASMA**

Na Tabela 4.6 se encontram os resultados da FRX e do ICP-OES. As diferenças dos resultados obtidos são consequências de diferenças técnicas entre ambos os métodos e, porém, podem ser satisfatoriamente justificadas não configurando incoerências entre os métodos. Ressalta-se que o ICP é mais indicado na análise de metais traços e a técnica de FRX é indicada para elementos maiores. Deve-se destacar também a diferença na preparação de amostras.

Tabela 4.6 Composição química dos rejeitos pelos métodos de FRX e ICP-OES

Elementos Químicos	Rejeito de Ferro		Rejeito de Ouro	
	FRX	ICP	FRX	ICP
	%	%	%	%
$Fe_2O_3$	56,229	47,824	34,055	23,862
$SiO_2$	40,019	7,573	23,929	3,315
$Al_2O_3$	3,111	0,914	5,120	4,591
$TiO_2$	NI	0,008	11,045	11,592
$CaO$	0,040	1,749	10,271	10,158
$MgO$	NI	0,123	6,687	5,85
$MnO$	0,145	0,122	0,811	0,601
$K_2O$	0,067	0,365	3,213	1,746
$P_4O_{10}$	NI	0,044	2,651	3,437
$SO_2$	0,059	NI	NI	NI
$ZrO_2$	NI	0,004	0,571	0,22
$CeO_2$	NI	NI	0,499	ND
$Nb_2O_5$	NI	NI	0,430	ND
$SrO$	NI	0,006	0,403	0,191
$Tm_2O_3$	0,331	N. I	0,223	ND
$ZnO$	NI	0,195	0,057	0,060
$Y_2O_3$	NI	NI	0,034	ND
$As_2O_3$	NI	0,005	NI	0,003
$BaO$	NI	0,547	NI	0,292
$CdO$	NI	0,007	NI	0,007
$CoO$	NI	0,0001	NI	0,029
$Cr_2O_3$	NI	0,006	NI	0,012
$CuO$	NI	0,002	NI	0,012
$MoO_3$	NI	0,004	NI	0,010
$NiO$	NI	0,007	NI	0,158
$Na_2O$	NI	0,005	NI	0,134
$PbO$	NI	0,021	NI	0,0044
$SeO_2$	NI	0,007	NI	0,006

NI – Não identificado

ND – Não é possível ser detectado pelo método

As grandes diferenças das porcentagens de Si entre FRX e o ICP se devem ao fato das amostras para serem analisadas pelo ICP-OES passarem pelo processo de digestão com multiácidos. No caso, um dos ácidos utilizados é o ácido fluorídrico (HF). O produto da reação do ácido fluorídrico com a sílica é fluoreto de silício, que é volátil e, portanto, resultando em um valor bem inferior do que o real.

Entre os elementos químicos encontrados, majoritariamente, tem-se ferro e o silício. O ferro se encontra principalmente na forma de hematita no rejeito de ferro e está disseminado no rejeito de ouro entre outros minerais. O silício se encontra em ambos os rejeitos, em sua maioria, na forma de quartzo.

Dos metais presentes nos rejeitos, destacam-se a presença de alguns que podem ser nocivos ao meio ambiente, sendo eles o alumínio (Al), arsênio (As), bário (Ba), cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), chumbo (Pb), selênio (Se), cobalto (Co), níquel (Ni) e zinco (Zn). Destes, os mais tóxicos ao meio ambiente são Pb, Cd, Cu, Ni e Co. Sendo o Pb e o Cd mais tóxicos aos animais e o Cu, Ni e Co mais tóxicos as plantas, chamados então de fitotóxicos. Do ponto de vista do potencial perigo para a saúde humana estão o As, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni Se e Zn (Mc Bride, 1994).

Porém, apenas a quantificação desses elementos não é suficiente para determinar a possível contaminação do ambiente pelos rejeitos. É necessário o estudo de mobilidade desses metais, que assim como a disponibilidade está intimamente ligada com a especiação química, como por exemplo, as espécies sólidas tendem a ter menos mobilidade do que as formas coloidais e dissolvidas.

#### **4.4 CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA**

A caracterização geoquímica foi realizada com os rejeitos na condição mais natural possível, ou seja, sem realizar nenhuma modificação química ou granulométrica prévia aos ensaios, assim como foram realizados os estudos mecânicos no capítulo 5.

#### 4.4.1 pH, CONDUTIVIDADE ELÉTRICA, POTENCIAL DE OXIRREDUÇÃO

Entre os parâmetros de pH, condutividade elétrica (CE) e potencial de oxirredução (Eh), é o conhecimento do pH dos rejeitos que mais contribui para o entendimento sobre a disponibilidade e mobilidade dos metais presentes nos rejeitos, haja vista sua influência nos processos de adsorção-dessorção em sólidos porosos. Isto porque os metais são cátions que, em sua maioria são solúveis em meios ácidos e, portanto, mais móveis, enquanto condições de pH acima de seis favorecem a sua retenção no meio poroso (Sodré, 2001). Conforme Impellitteri *et al.* (2001), com a diminuição do pH o íon  $H^+$  compete com os metais pelos sítios de troca. Ainda segundo os mesmos autores, o aumento do pH normalmente reduz sua mobilidade, pois as cargas negativas originadas pela desprotonação dos componentes do solo tendem a ser balanceadas pelos metais, retendo-os nos solos. A Tabela 4.7 mostra os parâmetros geoquímicos obtidos para os rejeitos estudados.

Tabela 4.7 Parâmetros geoquímicos dos rejeitos

Parâmetros	Rejeito de Ferro	Rejeito de Ouro
pH	$7,40 \pm 0,03$	$9,16 \pm 0,01$
pH em $CaCl_2$	$6,32 \pm 0,29$	$7,44 \pm 0,06$
CE ( $\mu S/cm$ )	$29,66 \pm 3,12$	$117,55 \pm 5,44$
Eh (mV)	$487,0 \pm 4,9$	$400,0 \pm 4,2$
pH em $KCl$	$7,07 \pm 0,03$	$7,67 \pm 0,01$
$\Delta$ pH	$- 0,33 \pm 0,05$	$- 1,49 \pm 0,15$

Observa-se na Tabela 4.7 que os rejeitos são alcalinos em meio aquoso, o que indica baixa mobilidade de metais. Reafirmando a análise de pH, o pH do rejeito de ferro em  $CaCl_2$  possui acidez muito fraca e o rejeito de ouro é alcalino. Confirmando a tendência de baixa mobilidade dos metais presentes nos rejeitos.

Em ambos os rejeitos se verificam baixos valores de CE, refletindo a baixa quantidade de sais dissolvidos presentes nos extratos analisados. Estes valores estão de acordo com os resultados de pH em  $CaCl_2$ , onde se obteve maior variação em relação ao pH em água no rejeito de ouro, onde se inferiu também maior concentração de íons dissolvidos. Na literatura, encontram-se altos valores de CE para rejeitos de mineração, da ordem de  $6.500 \mu S/cm$ , sendo considerados salinos ( $CE > 4.000 \mu S/cm$ ) conforme sistema de Classificação de Scofield (Teissedre, 1997).

Em geral, todas as espécies de plantas sobrevivem em CE variando de 0 a 2.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , espécies sensíveis são afetadas por CE entre 4.000 e 8.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , enquanto somente espécies tolerantes podem crescer satisfatoriamente em CE superior a 8.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Silva *et al.*, 2004).

Outro fator de grande relevância nos estudos de mobilidade de metais é o potencial de oxidação-redução (Eh). Nos solos e sedimentos, a faixa de ocorrência do potencial de oxidação-redução é de -300 a 700 mV (Tian-Yen, 1985, *apud* Camargo *et al.*, 1999). Os elevados valores encontrados para ambos os rejeitos indicam condições oxidantes para o meio aquoso, favorecendo a liberação de metais a partir da formação de espécies solúveis ou a precipitação de outras (Sosa, 2016).

O balanço de cargas dos rejeitos tem correlação direta com o delta pH ( $\Delta\text{pH}$ ) e influencia na adsorção dos metais no meio poroso. Quando o  $\Delta\text{pH}$  é negativo, ocorre a predominância de cargas negativas nos coloides, que aumentam a adsorção dos cátions, ou seja, a retenção de metais na matriz porosa (Prado *et al.*, 2004).

Deste modo, as análises geoquímicas realizadas estão coerentes entre si e refletem a baixa mobilidade dos metais dos rejeitos, em decorrência da sua tendência em reter cátions.

## **4.5 CARACTERIZAÇÃO GEOAMBIENTAL**

O grupo de métodos aqui apresentados foram agrupados em razão de suas buscas pela simulação do rejeito com o meio ambiente. Os ensaios foram realizados com as amostras de rejeito *in natura*, como forma a avaliar não somente a disponibilidade de metais nas diversas formas de reaproveitamento, mas também em seu armazenamento nas pilhas e barragens.

### **4.5.1 EXTRAÇÕES SIMPLES**

#### **4.5.1.1 LIXIVIAÇÃO**

Os resultados da lixiviação foram comparados com os valores da NBR 10.004 (ABNT, 2004a), uma vez que a USEPA 1312 não estabelece limites para os concentrados lixiviados. Os resultados podem ser verificados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 Resultados da lixiviação

Elementos	Rejeito de Ferro (mg/L)	Desvio padrão	Rejeito de Ouro (mg/L)	Desvio padrão	Limites máximos (mg/L) Norma NBR 10.004:2004
As	0,012	0,003	0,020	0,007	1,000
Ba	0,398	0,019	1,003	0,011	70,000
Cd	0,002	0,000	0,010	0,000	0,500
Cr	0,010	0,001	0,018	0,001	5,000
Pb	0,083	0,009	0,064	0,001	1,000
Se	0,360	0,007	0,310	0,005	1,000

Conforme limites de concentrações máximas impostas pela NBR 10.004 (2004a), ambos os resultados dos rejeitos apresentam concentrações dos extratos lixiviados bem inferiores ao estabelecido pela norma. Entretanto, ainda assim não é possível classificá-los como não perigosos. Isto, porque a verificação entre os valores da lixiviação pelo método utilizado (*SPLP*) com a NBR 10.004 (ABNT, 2004a) é apenas de caráter comparativo, visto que sob aspecto técnico e legal o procedimento adotado no ensaio não corresponde ao adotado pela NBR 10.004 (ABNT, 2004a) sendo, portanto, incoerente a classificação. Caso o ensaio *SPLP* fosse adotado como padrão para a classificação de resíduos de mineração e os limites de classificação fossem mantidos os da 10.004 (ABNT, 2004a), esses rejeitos estariam classificados como não perigosos.

#### 4.5.1.2 SOLUBILIZAÇÃO

O ensaio de solubilização indica os elementos que vão solubilizar prontamente por mecanismos de dissolução. Os valores obtidos, Tabela 4.9, foram comparados com limites estipulados na NBR 10.004 (2004a) para a classificação dos resíduos.

De maneira geral, o ensaio de solubilização indicou que o As e Mn contidos no rejeito de ferro não são inertes em meio aquoso. O mesmo ocorre com o As e Pb no rejeito de ouro, sendo solubilizados em água em valores acima dos valores de referência da norma. Apesar de não estabelecido o limite máximo de concentração para os elementos químicos Co e Ni, estes elementos foram analisados conforme CONAMA 396/2008 (2008).

Tabela 4.9 Resultados do ensaio de solubilização

<b>Elementos</b>	<b>Rejeito de Ferro (mg/L)</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Rejeito de Ouro (mg/L)</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Limites máximos (mg/L) Norma NBR 10.004(2004a)</b>
Al	0,094	0,046	0,092	0,046	0,2000
As	0,013	0,004	0,014	0,001	0,0100
Ba	0,028	0,005	0,153	0,011	0,7000
Cd	0,001	0,000	0,001	0,000	0,0055
Cr	0,005	0,000	0,013	0,001	0,0500
Cu	0,007	0,003	0,004	0,001	2,0000
Pb	0,007	0,003	0,013	0,003	0,0100
Fe	0,120	0,028	0,146	0,002	0,3000
Mn	0,508	0,214	0,079	0,042	0,1000
Na	0,046	0,014	1,970	0,06	200,0000
Se	0,010	0,002	0,005	0,003	0,0100
Zn	0,052	0,012	0,102	0,032	5,0000
Co	0,003	0,046	0,001	0,046	N.E
Ni	0,180	0,008	0,002	0,001	N.E

N.E – não estabelecido pela NBR 10.004(2004a)

O CONAMA 396/2008 (2008) recomenda que o limite da concentração de Co em água não seja superior a 0,05mg/L caso a destinação na água seja para irrigação ou 1 mg/L. Caso a finalidade de uso da água seja para dessedentação de animais, o que faz com que as concentrações de cobalto identificadas não sejam restritivas. Já para o níquel, o limite recomendado é 0,2 mg/L para irrigação e 1 ml/L para dessedentação de animais, o que indica que as concentrações desses metais obtidas pela solubilização são aceitáveis para o contato com o meio ambiente CONAMA 396/2008 (2008). Cabendo aqui a ressalva do curto prazo de exposição do rejeito com o meio de dissolução no ensaio.

Por haver elementos que ultrapassam os limites estabelecidos pela norma, ambos os rejeitos são classificados como não inertes conforme a NBR 10.004 (ABNT, 2004a). Esta condição justifica as próximas análises realizadas no sentido de avaliar os possíveis riscos de contaminação nos diferentes métodos de aproveitamento a serem aplicados.

O procedimento de solubilização avalia em um curto prazo de 7 dias qual seria a liberação de metais pelos rejeitos. Consequentemente, as limitações dos ensaios de curto prazo geralmente fazem com que esses não sejam aplicáveis para avaliar as taxas em que uma reação ocorre a longo prazo e prever qual será a qualidade da água influenciada pelo contato com o rejeito. Entretanto, os resultados desses ensaios proporcionam uma avaliação inicial do que pode se esperar em termos de solubilização de metais em um primeiro momento em uma determinada amostra.

Então, perante a NBR 10.004 (ABNT, 2004a), os resíduos de mineração foram classificados como não perigoso (conforme ressalva) e não inertes (Classe II B).

#### 4.5.1.3 EXTRAÇÃO COM ÁGUA DESTILADA

Nos ensaios de extração com água destilada são verificadas as formas metálicas móveis que se disponibilizam facilmente, ou seja, os metais solúveis em água. Na Tabela 4.10 estão apresentados os resultados das extrações.

Tabela 4.10 Extração simples com água destilada

Elementos Químicos	Rejeito de Ferro		Rejeito de Ouro	
	mg/L	Recuperação (%)	mg/L	Recuperação (%)
Al	0,460	0,014	3,248	0,013
As	0,002	0,004	0,006	0,025
Ba	0,091	0,184	0,418	0,016
Ca	26,180	0,208	244,068	0,336
Cd	0,004	0,005	0,000	0,001
Co	0,002	0,150	0,002	0,001
Cr	0,005	0,333	0,009	0,012
Cu	0,013	0,108	0,028	0,029
Fe	0,110	0,000	3,598	0,002
K	1,098	0,036	118,881	0,814
Li	0,040	0,733	0,070	0,741
Mg	2,330	0,300	43,573	0,123
Mn	0,299	0,045	0,069	0,002
Mo	0,001	0,002	0,033	0,130

Elementos Químicos	Rejeito de Ferro		Rejeito de Ouro	
	mg/L	Recuperação (%)	mg/L	Recuperação (%)
Na	0,570	1,626	3,958	3,981
Ni	0,003	0,125	0,014	0,021
P	0,114	0,054	2,356	0,016
Pb	0,056	0,029	0,012	0,031
Se	0,258	0,525	0,270	0,662
Sr	0,107	0,229	0,972	0,061
Ti	0,005	0,004	0,010	0,000
V	0,003	0,021	0,016	0,007
Zn	0,006	0,004	0,045	0,011
Zr	0,022	0,068	0,079	0,006

(Continuação)

Recuperação (%): quantidade do metal extraído em relação a concentração total

Com exceção do Cd, Pb e Mn, todos os outros metais são mais móveis no rejeito de ouro do que no rejeito de ferro. A quantidade de metais solúveis não se mostra significativa, tendo em vista que os elementos mais solúveis foram Ca, K, Mg, Na e P, ambos elementos não nocivos ao meio ambiente e o Al, elemento de baixa toxicidade (McBride, 1994). Os elementos As, Mn e Pb apresentaram concentrações muito baixas.

Silva *et al.*(2004), em seu estudo de caracterização de um rejeito de ouro de uma empresa sediada no estado de Minas Gerais e mineralogia próxima ao da amostra estudada aqui, obteve valores de concentrações iguais ou inferiores aos da Tabela 4.10 para os elementos As, Cu, Cd, Cr, Fe, Ni, Pb e Zn. Os outros elementos não foram analisados pelo autor.

#### 4.5.1.4 EXTRAÇÃO COM EDTA

O EDTA é considerado um eficiente agente orgânico metal-complexante e é o quelante mais utilizado para avaliação de metais disponíveis em solos e sedimentos. A extração com esse reagente tem relação com a adsorção de metais pelas plantas por sua propriedade de complexar os metais deixando-os mais fitodisponíveis (Tavares, 2013). Os resultados destas análises estão apresentados na Tabela 4.11.

Observa-se a baixa disponibilidade dos metais, principalmente no que diz respeito ao As, Mn e Pb que excederam o limite da extração solubilizado. Os metais do rejeito de ouro mostraram-se com maior disponibilidade do que os do rejeito de ferro, com exceção apenas do Cr, Mo, Se e Sr. Em ambas as amostras constata-se a maior disponibilidade do Ca e a menor disponibilidade de Cr, como podem ser visto na Tabela 4.12, a ordem decrescente de disponibilidade dos metais. Destaca-se ainda que apesar do elemento Fe ser o maior em termos de composição elementar em ambos os rejeitos, não se mostra o mais disponível.

Tabela 4.11 Resultado dos extratos de EDTA

Elementos Químicos	Rejeito de Ferro		Rejeito de Ouro	
	mg/Kg	Recuperação (%)	mg/Kg	Recuperação (%)
Al	11,69	0,36	37,41	0,15
As	0,18	0,11	0,61	2,37
Ba	1,16	2,37	66,66	2,55
Ca	87,06	0,69	9.441,45	12,99
Cd	0,23	0,30	0,27	0,42
Co	0,06	6,06	2,72	1,19
Cr	0,04	2,42	0,01	0,01
Cu	0,86	0,33	0,92	0,94
Fe	66,31	0,02	165,45	0,10
Mg	5,74	0,74	689,79	1,95
Mn	14,06	2,13	112,31	3,18
Mo	0,18	0,68	0,14	0,56
Ni	0,18	0,33	0,56	0,87
P	1,04	0,49	700,04	4,66
Pb	0,85	0,44	1,00	2,44
Se	0,48	0,10	0,29	0,71
Sr	0,53	7,00	0,29	0,02
Ti	0,12	0,09	10,64	0,02
V	0,02	0,14	2,60	1,04
Zn	21,99	15,19	61,02	14,49
Zr	0,09	0,28	6,16	0,47

Recuperação (%): quantidade do metal extraído em relação a concentração total

Souza (2009), em seu estudo com sedimento estuarino da Bahia, obteve valores superiores aos apresentados na Tabela 4.11 para os elementos As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, V, Zn de ambos os rejeitos, com exceção de Ba e Mn do rejeito de ouro. É importante ressaltar que a metodologia utilizada por Souza (2009) foi a mesma adotada nesta pesquisa.

Silva *et al.* (2004) constatou, para um rejeito de ouro, valores de concentrações iguais ou superiores para os elementos As, Cu, Cd, Cr, Fe e Ni e ligeiramente inferiores aos aqui encontrados para Pb (0 mg/kg) e Zn (15 mg/kg). Na Tabela 4.12 estão apresentados em ordem decrescente a disponibilidade dos metais para as amostras de rejeito.

Tabela 4.12 Ordem de disponibilidade dos metais

<b>Rejeito de Ferro</b>	<b>Rejeito de Ouro</b>
Ca > Fe > Zn > Mn > Al > Mg > Ba > Cu > Pb > Sr > Se > Cd > As > Ni > Mo > Ti > Zr > Co > Cr > V	Ca > P > Mg > Fe > Mn > Ba > Zn > Al > Ti > Zr > Co > V > Pb > Cu > As > Ni > Cd > Se > Sr > Mo > Cr

Os teores extraídos por água destilada e EDTA, a despeito da inexistência de valores de referência ou de intervenção para elementos obtidos por esses extratores, foram considerados pouco significantes para elementos potencialmente perigosos. Verificou-se também, como esperado, a maior capacidade de extração do EDTA quando comparado à água destilada, ao método de *SPLP* e também a solubilização realizada. Isto pode ser atribuído principalmente ao fato do EDTA ser um quelante forte que é capaz de competir com a maioria dos ligantes inorgânicos e orgânicos contidos nos solos.

#### **4.5.2 EXTRAÇÃO SEQUÊNCIAL**

O ensaio de extração sequencial foi empregado com a finalidade de conhecer as formas químicas e assim avaliar a disponibilidade dos metais presentes nos rejeitos e considerados como possíveis contaminantes. Sendo possível também inferir a mobilidade dos elementos. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabela 4.13 e Tabela 4.14, para a amostra de ferro e ouro respectivamente.

Tabela 4.13 Resultados do BCR modificado (Rauret, *et al.*, 1999) para a amostra de rejeito de ferro

<b>Rejeito de Ferro</b>						
<b>Elemento Químico</b>		<b>Trocável</b>	<b>Reduzível</b>	<b>Oxidável</b>	<b>Residual</b>	<b>Total*</b>
Al	mg/kg	21,84	40,95	62,33	3.186,24	3.311,36
	%	0,66	1,24	1,88	96,22	
As	mg/kg	0,56	0,26	9,89	23,62	34,33
	%	1,63	0,76	28,76	68,86	
Ca	mg/kg	88,47	122,98	49,95	1.152,00	1.413,40
	%	6,26	8,70	3,53	81,51	
Cd	mg/kg	1,55	1,96	8,07	60,33	71,91
	%	2,16	2,73	11,22	83,89	
Co	mg/kg	0,42	0,31	0,23	0,49	1,45
	%	28,91	21,54	15,83	33,72	
Cr	mg/kg	0,14	0,00	0,23	0,99	1,36
	%	10,29	0,00	16,91	72,79	
Cu	mg/kg	2,24	3,36	0,97	2,96	9,53
	%	23,46	35,29	10,15	31,10	
Fe	mg/kg	129,68	152,18	115,93	292.737,95	293.135,74
	%	0,04	0,05	0,04	99,87	
Mn	mg/kg	11,03	365,49	12,05	163,20	551,77
	%	2,00	66,24	2,18	29,58	
Mo	mg/kg	0,52	0,00	2,30	20,02	22,84
	%	2,28	0,00	10,29	24,53	
Ni	mg/kg	0,42	0,21	0,47	1,51	2,61
	%	20,08	9,94	22,24	47,72	
P	mg/kg	0,77	3,10	17,57	172,33	193,77
	%	0,40	1,61	9,10	74,62	
Pb	mg/kg	0,64	16,23	20,87	118,64	156,38
	%	0,41	10,42	13,40	57,66	
Ti	mg/kg	0,00	0,00	0,94	131,08	132,02
	%	0,00	0,00	0,94	52,73	
V	mg/kg	0,00	0,00	6,33	7,56	13,89
	%	0,00	0,00	45,58	18,94	
Zn	mg/kg	3,23	3,13	4,54	117,99	128,89
	%	2,51	2,49	3,61	93,90	

Total\*=soma das frações

Os elementos Fe, Ca e Al foram os que apresentaram maior concentração na fração trocável, a mais disponível. Como pode ser melhor visualizado pela Figura 4.8, Co, Cu, Cr e Ni apesar de apresentarem expressivas percentagens de metais nas frações trocáveis, reduzíveis e oxidáveis, apresentam concentrações totais pouco expressivas, estando dentro dos valores de referência de qualidade de solos (CONAMA, 2009; McBride, 1994)

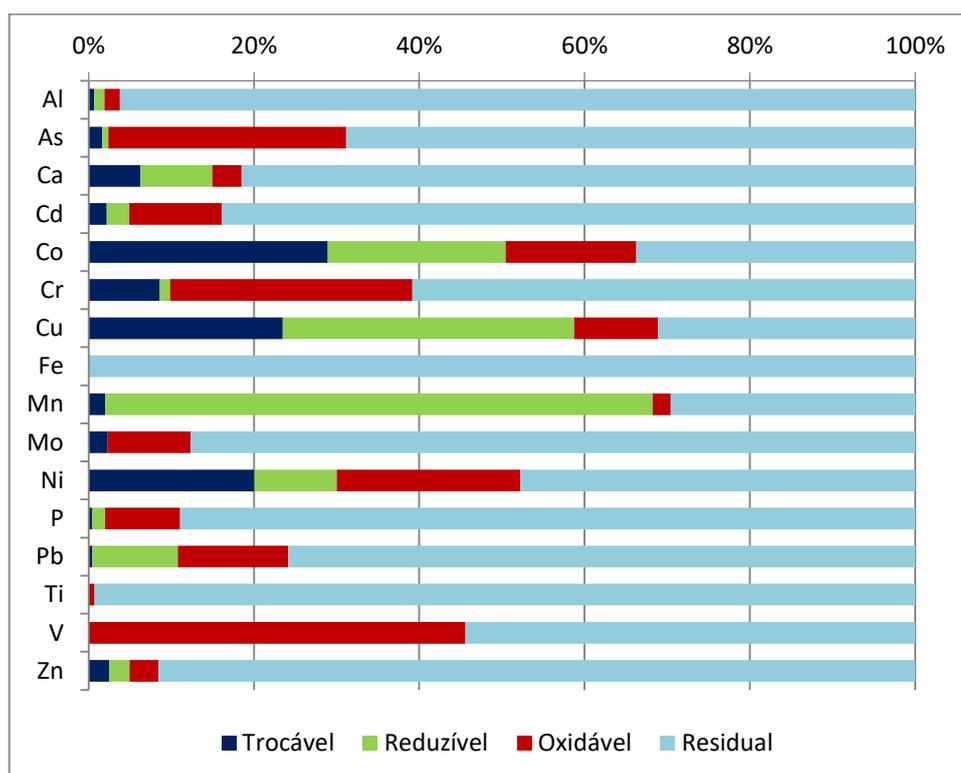


Figura 4.8 Distribuição dos metais entre as formas químicas para o rejeito de ferro

Na Tabela 4.14 a seguir, é possível observar que o Ca, Mn, Al e P são os elementos químicos mais disponíveis no rejeito de ouro. Na Figura 4.9 é possível verificar a distribuição dos metais presentes na amostra do rejeito de ouro entre as frações analisadas. Os resultados revelam consideráveis percentagens de metais ligados a óxidos de Fe e Mn, e, portanto, disponíveis em ambientes redutores. Elementos como Ca e P, apesar de muito disponíveis não são contaminantes.

Tabela 4.14 Resultados do BCR modificado (Rauret, *et al.*, 1999) para a amostra de rejeito de ouro

<b>Rejeito de Ouro</b>						
<b>Elemento Químico</b>		<b>Trocável</b>	<b>Reduzível</b>	<b>Oxidável</b>	<b>Residual</b>	<b>Total*</b>
Al	mg/kg	69,30	1.092,00	1.726,80	12.152,66	15.040,76
	%	0,46	7,26	11,48	80,80	
As	mg/kg	0,63	4,84	3,60	17,10	26,17
	%	2,41	18,49	13,76	65,34	
Ca	mg/kg	5.695,00	28.360,00	2.104,00	39.414,50	75.573,50
	%	7,54	37,53	2,78	52,15	
Cd	mg/kg	1,47	1,51	1,65	55,91	60,54
	%	2,43	2,49	2,73	92,35	
Co	mg/kg	0,21	26,54	3,11	170,00	199,86
	%	0,11	13,28	1,56	85,06	
Cr	mg/kg	0,27	1,35	2,31	63,79	67,73
	%	0,40	2,00	3,42	94,18	
Cu	mg/kg	1,01	6,29	3,01	74,16	84,46
	%	1,20	7,44	3,56	87,80	
Fe	mg/kg	0,63	1.170,88	1.982,00	126.891,34	130.044,85
	%	0,00	0,90	1,52	97,58	
Mn	mg/kg	35,75	1.244,00	125,50	1.843,00	3.248,25
	%	1,10	38,30	3,86	56,74	
Mo	mg/kg	0,67	0,32	3,34	12,62	16,96
	%	3,96	1,89	19,72	74,43	
Ni	mg/kg	0,59	6,07	5,29	42,14	54,09
	%	1,09	11,23	9,78	77,90	
P	mg/kg	496,63	11.571,45	910,97	1.542,65	14.521,70
	%	3,42	79,68	6,27	10,62	
Pb	mg/kg	0,84	6,72	6,02	22,77	36,34
	%	2,31	18,48	16,55	62,65	
Ti	mg/kg	0,00	4,20	389,81	53.243,00	53.637,01
	%	0,00	0,01	0,73	99,27	
V	mg/kg	0,21	17,42	11,84	206,74	236,21
	%	0,09	7,38	5,01	87,52	
Zn	mg/kg	52,71	37,86	22,48	241,73	354,78
	%	14,86	10,67	6,34	68,13	

Total\*=soma das frações

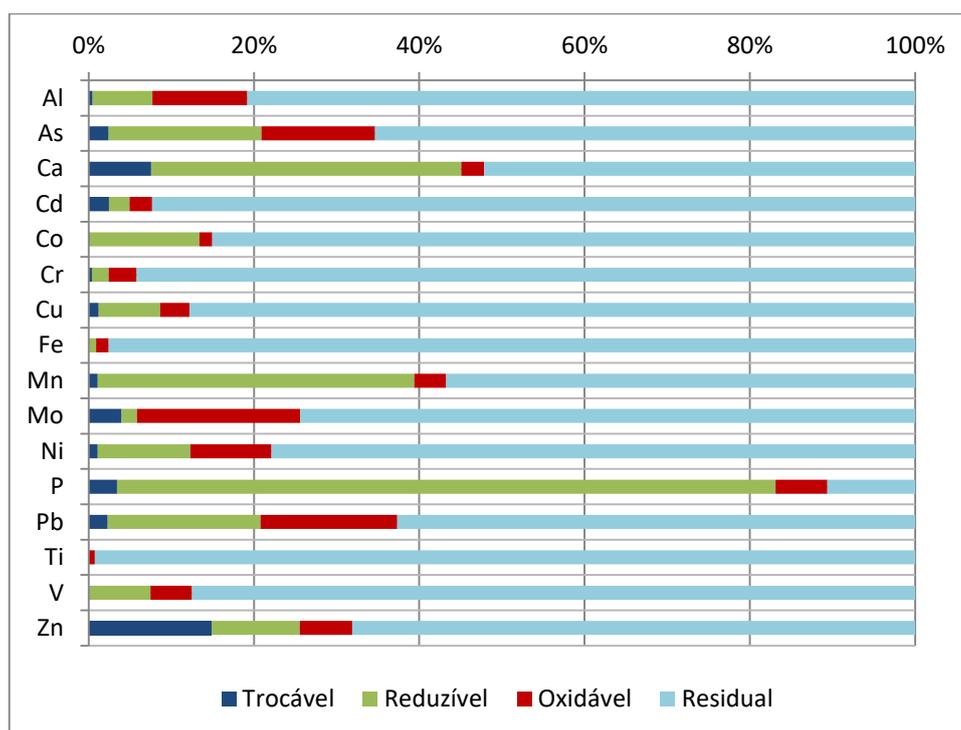


Figura 4.9 Distribuição dos metais entre as formas químicas para o rejeito de ouro

De modo geral, os resultados das extrações sequenciais revelam a baixa presença de metais ligados a Fração 1 - Trocável. Nesta fase, são extraídos apenas os metais solúveis em água e ácido fraco, trocáveis e co-precipitados com carbonatos. Em suma são metais fracamente adsorvidos e, portanto, são os considerados prontamente móveis e altamente disponíveis para os seres vivos.

Os rejeitos apresentam significativas concentrações de metais na Fração 2 - Reduzível, que é a responsável por extrair os metais ligados aos óxidos de Fe e Mn. A importância destes dois elementos na geoquímica dos metais é bastante conhecida, uma vez que ambos são considerados excelentes carreadores de metais traços. Essas substâncias em condições anóxicas tornam-se instáveis, provocando uma disponibilização dos metais a ela associados. De modo geral, entre as 3 frações disponíveis ao meio ambiente é a que apresenta maior concentração de metais. Nessa fração, verifica-se considerável disponibilidade de Mn para ambos os rejeitos. Já os valores de As e Pb extraídos em ambas as amostras foram baixos e mais significativos na amostra do rejeito de ouro do que no de ferro.

A Fração 3 - Oxidável reflete a quantidade de metais complexados à matéria orgânica ou a sulfetos e que vem a ser liberada se o sedimento for submetido a condições oxidantes. Nesta

fração, destaca-se as maiores concentrações de Fe, Al e Ca para o rejeito de ferro e de Al, Ca, Fe, P, Ti para o rejeito de ouro. O rejeito de ouro apresenta maiores concentrações de metais nesta fração do que o rejeito de ferro.

A Fração 4 - Residual é a que indica a porção mais estável e indisponível dos metais, indica os metais com ligações mais fortes nos rejeitos. Nesta fração, verifica-se que se encontra a grande percentagem dos metais em ambos os rejeitos, indicando que esses metais não estão disponíveis ao meio ambiente e são também os de menor mobilidade.

Apesar do As, Pb e Mn apresentarem concentrações superiores ao limite estipulado pela NBR 10.004 (ABNT, 2004a), os baixos teores de As, Pb e Mn na fração trocável e a predominância destes ligados a fração residual, demonstram a baixa disponibilidade imediata destes metais em ambos os rejeitos. Ou seja, apesar de excederem o limite de concentração na solubilização, não estão prontamente disponíveis, como mostra a Figura 4.10.

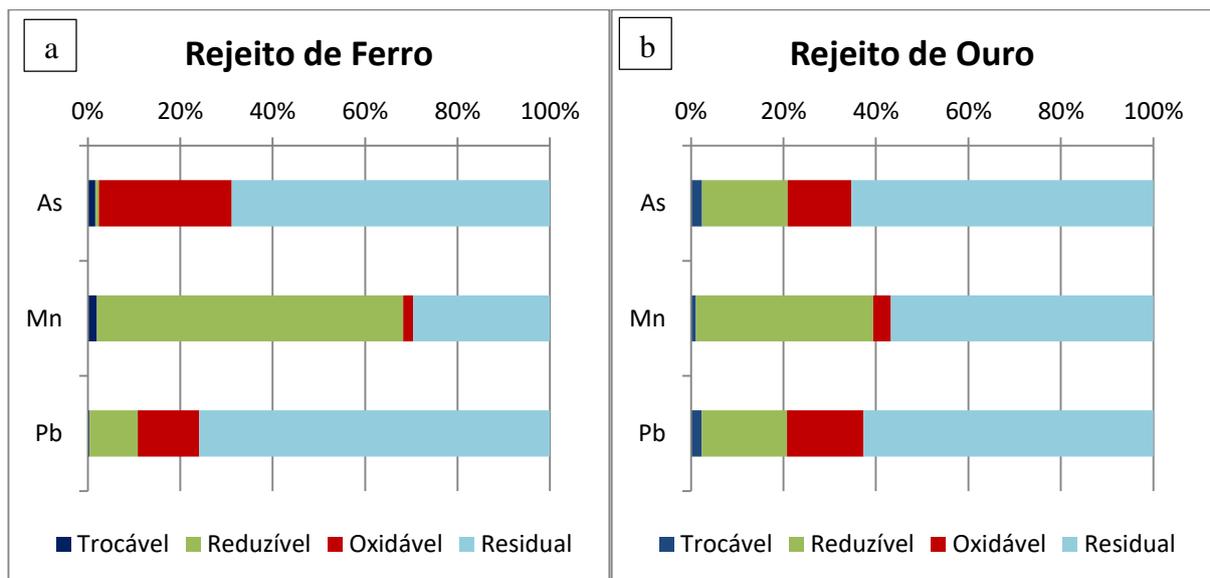


Figura 4.10 Distribuição de As, Mn e Pb nos diferentes grupos químicos; a) rejeito de ferro; b) rejeito de ouro

Em suma, os metais com maior disponibilidade em ambas as amostras são o Fe, Ca, Mn e Al, sendo o mais perigoso para o meio ambiente o Mn. A Tabela 4.15 exhibe a ordem decrescente de disponibilidade dos metais contidos nas amostras por fração extraída e ordem de disponibilidade como um todo.

Tabela 4.15 Disponibilidade dos metais nas amostras dos rejeitos por fração

	<b>Rejeito de Ferro</b>	<b>Rejeito de Ouro</b>
1	Fe>Ca>Al>Mn>Zn>Cu>Cd>P>As>Pb >Mo>Co ≥ Ni>Cr>Ti ≈ V	Ca>P>Al>Zn>Mn>Cd>Cu>Pb>Mo>As≈Fe >Ni>Cr>Co≈V>Ti
2	Mn>Fe>Ca>Al>Pb>Cu>Zn>P>Cd>Co >As>Cr>Ni>V ≈ Ti ≈ Mo	Ca>Mn>Fe>P>Al>Zn>Co>V>Pb>Cu>Ni> As >Ti>Cd>Co>Mo
3	Fe>Al>Ca>Pb>P>Mn>As>Cd>V>Zn> Mo>Cu>Ti>Cr>Ni>Co	Ca>Fe>Al>P>Ti>Mn>Zn>V>Pb>Ni>As> Mo>Co>Cu>Cr>Cd
4	Fe>Al>Ca>P>Pb>Zn>Ti>Mn>Cd>As> Mo>V>Cu>Ni>Co>Cr	Fe>Ti>Ca>Al>Mn>P>Zn>V>Co>Cu>Cr> Cd>Ni>Pb>As>Mo
D	Fe>Mn>Ca>Al>Pb>P>Cd>Zn>As>Cu >V>Mo>Ni>Co>Ti>Cr	Ca>P>Fe>Al>Mn>Ti>Zn>Co>V>Pb>Ni> Cu>As>Cd>Mo>Cr

1: Fração Trocável;

2: Fração Reduzível;

3: Fração Oxidável;

D: Disponível, parcialmente disponível e relativamente disponível (Fração1+Fração2+Fração3)

Com base nos resultados, verifica-se que apesar da presença de elementos potencialmente tóxicos nos rejeitos, estes apresentam a baixa tendência de mobilidade. Fato verificado pelos resultados da caracterização geoquímica. Além disto, com os resultados da caracterização geoambiental, verificou-se a baixa disponibilidade de metais nas frações trocáveis e prontamente móveis. Quanto aos elementos As, Pb e Mn, os quais se solubilizaram em concentrações superiores ao considerável inerte, verificou-se que a maior parcela destes elementos são disponíveis em ambientes redutores.

## CAPÍTULO 5

### 5. AVALIAÇÃO DAS POSSIBILIDADES DE REAPROVEITAMENTO

Este capítulo aborda os estudos de reaproveitamento dos rejeitos em misturas com solo de forma a simular o reaproveitamento em aplicações geotécnicas. São abordados primeiramente a caracterização do solo e depois, os ensaios realizados com as misturas de solo com os rejeitos. Desta forma foram verificados o comportamento químico e mecânico dos novos compósitos, bem como feitas comparações entre as propriedades das misturas e do solo.

#### 5.1 CONSIDERAÇÕES ADOTADAS

Para as misturas com os rejeitos, foi utilizado o solo do campo experimental de ensaios de campo e fundações da UnB. Este material foi escolhido devido à existência de uma ampla base de dados proveniente de pesquisas anteriores, que serviriam como referência para o presente trabalho. A profundidade do material coletado foi de 1,0 a 1,5 metros. O solo utilizado, segundo Pastore (1996) citado por Guimarães (2002) é um solo residual laterítico, que sofreu processo de intemperismo, sendo constituído por uma argila arenosa vermelha.

As misturas de solo com os rejeitos foram feitas na proporção, em massa seca, de 0% (solo puro), 5% (M. 5%), 10% (M.10%) e 15% (M.15%) de rejeito. Para distinção entre os rejeitos, os códigos das misturas foram acrescidos de Fe para indicar o rejeito de ferro e Au para indicar o rejeito de ouro. O emprego dos rejeitos foi de forma *in natura*, da mesma forma em que foram realizados os estudos ambientais.

#### 5.2 METODOLOGIA DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

De modo a caracterizar o solo, foram feitas análises granulométricas, massa específica dos grãos, análises químicas pelas técnicas de fluorescência de raios X, ICP-OES, difração de raios X, pH em água e pH em 1M *KCl*. Todos estes procedimentos foram realizados conforme já descrito no Capítulo 3, sendo os mesmos procedimentos realizados para os rejeitos.

Entretanto, para o solo foi realizado o ensaio de Limites de Liquidez segundo NBR 6459 “Solo - Determinação do limite de liquidez” (ABNT, 2016b), Limites de Plasticidade

segundo, NBR 7180 “Solo - Determinação do limite de plasticidade” (ABNT, 2016c) e capacidade de troca catiônica (CTC), abordada a seguir.

### **5.2.1 CAPACIDADE DE TROCA CATIÔNICA (CTC)**

A capacidade de troca catiônica (CTC) é definida como a soma total dos cátions que o solo pode reter na superfície coloidal. Conforme McBride (1994) os solos possuem diferentes CTCs de acordo com o tipo de argila predominante e o teor de matéria orgânica, já que tais constituintes são os principais responsáveis pela geração de carga negativa no solo.

No âmbito de contaminação do solo por metais, o conhecimento do CTC é um parâmetro importante, uma vez que os metais podem substituir os íons trocáveis adsorvidos e ficarem retidos nos complexos de troca (argila e matéria orgânica) do solo. Essa retenção pode atenuar a migração de metais do solo para águas superficiais e subterrâneas (Fetter, 1993). Desta forma, juntamente com o pH, a capacidade de troca catiônica é um parâmetro muito importante na análise do comportamento dos metais no solo.

O método utilizado para obter o CTC do solo foi o de azul de metileno. Esta técnica fundamenta-se na característica do azul de metileno de ser um corante orgânico catiônico. O método consiste na determinação por titulação do máximo consumo de corante pelo solo. Com base no volume da adsorção máxima da solução padrão de azul de metileno consumida pelo solo, torna-se possível calcular os parâmetros de atividade, superfície específica e capacidade de troca de cátions do solo (Lan, 1979 *apud* Gurjão, 2005).

Para o ensaio, o solo foi seco ao ar, destorroado, passado na peneira de abertura de 2,00 mm (#10) e o material passante foi encaminhado para análise. O ensaio foi realizado no Laboratório de Solos da CAMPO ANÁLISES, unidade de Paracatu, Minas Gerais.

## **5.3 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO SOLO**

A seguir são apresentados os resultados das caracterizações realizados nas amostras dos solos obtidos no campo experimental da Geotecnia do PPG/Unb.

A Figura 5.1 mostra a distribuição granulométrica com base nos ensaios de granulometria

com e sem o uso de defloculante e na Tabela 5.1 são apresentados os limites de consistência do solo.

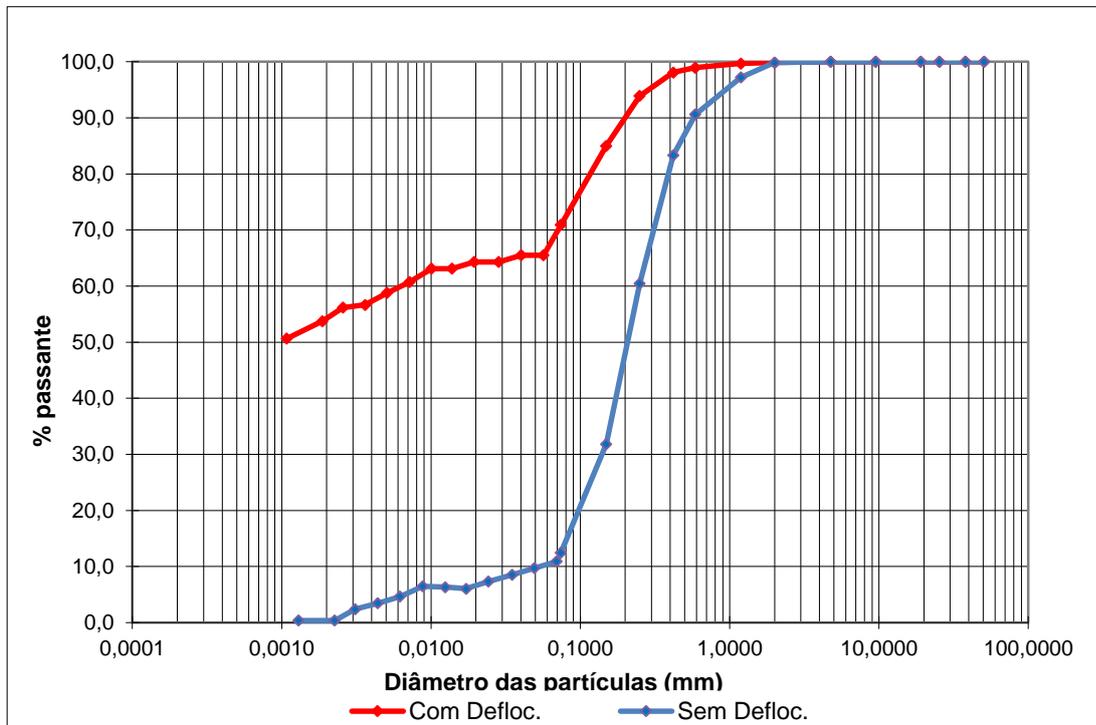


Figura 5.1 Distribuição granulométrica do solo

Tabela 5.1 Limites de consistência do solo

Classificação do solo			
WL (%)	WP (%)	IP (%)	SUCS
45	26	19	CL-ML

O solo estudado é uma argila siltosa de baixa plasticidade. A diferença entre as curvas granulométricas com e sem defloculante estão de acordo com resultados obtidos por Guimarães (2002) e permitem verificar o grau de agregação do solo, o que dá ideia do nível de intemperismo sofrido pelo mesmo. A curva de compactação do solo será apresentada no item 5.4.2.1.

A massa específica dos grãos do solo foi de 2,69 g/cm<sup>3</sup>. Complementando os resultados de caracterização, a Tabela 5.2 apresenta os resultados das análises de DRX.

Tabela 5.2 Resultado da DRX para o solo

<b>Solo</b>		
<b>Mineral</b>	<b>Fórmula Química</b>	<b>Grupo Mineral</b>
Quartzo	$SiO_2$	Silicato
Hematita	$Fe_2O_3$	Óxido
Caulinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Silicato
Gibbsita	$Al(OH)_3$	Hidróxidos
Rutilo	$TiO_2$	Óxidos
Anatásio	$TiO_2$	Óxidos
Goethita	$FeO(OH)$	Óxidos

A mineralogia encontrada está em acordo com os estudos realizado por Guimarães (2002). Segundo este autor, no solo estudado há predominância de gibbsita (2,32 g/cm<sup>3</sup>), valores próximos de 40% e quartzo (2,65 g/cm<sup>3</sup>), com valores próximos de 30%. O que condiz o valor da massa específica encontrada.

A seguir, na Tabela 5.3, estão apresentados os resultados da análise química. Ressalta-se que os elementos maiores (Al, Fe, Si e Ti) foram analisados com o FRX e os demais elementos pelo ICP-OES.

Tabela 5.3 Composição química do solo

<b>Solo</b>	
<b>Elementos Químicos</b>	<b>%</b>
Al	41,416
Fe	34,566
Si	19,735
Ti	3,259
Zr	0,393
Cu	0,243
K	0,117
Cr	0,101
Ca	0,065
Mn	0,056
Zn	0,047
Na	0,002

O solo apresenta um pH em água de 5,66 e pH em 1M *KCl* de 5,82, resultando em um  $\Delta\text{pH}$  de 0,16. Este valor indica a ligeira dispersão das partículas do solo pela repulsão entre as cargas elétricas de mesmo sinal. A acidez verificada é comum em solos que passaram por processos de lixiviação capazes de lixiviar quantidades significativas de bases permutáveis como Ca, K, Mg e Na das camadas superficiais dos solos (Ronquim, 2010). O que concorda com a composição química encontrada. Na Tabela 5.4, está o resultado do CTC.

Tabela 5.4 CTC do solo

<b>Material</b>	<b>CTC <math>\text{mmol}_c/\text{kg}</math></b>	<b>Incerteza</b>
Solo	92,83	$\pm 5,87$

O valor de CTC encontrado é compatível com o de solos constituídos de argilominerais cauliníticos (argilominerais do tipo 1:1) e mineralogia oxídica (óxidos de Fe e Al), estando de acordo com a mineralogia do solo (McBride, 1994). O baixo valor de CTC indica solos com argilas de baixa atividade e minerais pouco reativos. Argilominerais de alta atividade podem chegar a apresentar CTC da ordem de 1500  $\text{mmol}_c/\text{kg}$ , como é o caso da vermiculita (McBride, 1994). Este resultado reflete a baixa capacidade do solo de reter os metais oriundos das misturas de solo com rejeitos. Como consequência, tais metais serão mais dificilmente adsorvidos pelas raízes de plantas.

## **5.4 ESTUDOS DAS MISTURAS DE SOLO COM REJEITOS**

Para simular de forma generalista a interação do solo com os rejeitos por meio de misturas, foram feitos estudos químicos e mecânicos, apresentados a seguir.

### **5.4.1 ESTUDOS QUÍMICOS**

Como forma simples de avaliar a interação química do solo com rejeitos, foram realizados ensaios de pH em água, pH em 1 M *KCl* e CTC, conforme os procedimentos já descritos nos itens 3.4.4.1 e 5.2.1. A Tabela 5.5 apresenta os resultados do ensaio de CTC para as misturas de rejeitos com solo.

Tabela 5.5 CTC das misturas de rejeito com solo

<b>Material</b>	<b>CTC <math>mmol_c/kg</math></b>	<b>Incerteza</b>
M. 5% Fe	75,63	± 4,78
M. 10% Fe	68,98	± 4,36
M. 15% Fe	59,99	± 3,79
M. 5 % Au	79,96	± 5,05
M. 10% Au	71,15	± 4,50
M. 15 % Au	64,98	± 4,11

Em relação ao CTC do solo, Tabela 5.4, a adição de rejeitos de ferro provocou uma diminuição desse valor de modo mais significativo do que nas misturas com rejeito de ouro. Este comportamento ocorreu porque a adição do rejeito de ferro proporcionou um aumento mais acentuado de minerais com baixa atividade, como hematita e quartzo, do que o rejeito de ouro. Esta condição pode ser justificada pelas análises mineralógicas (ver Tabela 4.4 e Tabela 4.5) e composições químicas dos rejeitos (ver Tabela 4.6), que indicam a presença majoritária desses elementos no rejeito de ferro em detrimento ao rejeito de ouro. À medida que as porcentagens de adição de rejeitos aumentaram nas misturas, esse fato se intensificou. Vale ressaltar que na DRX do rejeito de ouro foram identificadas a caulinita e montmorilonita, que são minerais que apresentam atividade química considerável, porém estão em baixas quantidades no rejeito.

A seguir, Tabela 5.6, os resultados de pH em água e em 1 M *KCl*. Acrescenta-se que esta tabela apresentam os valores de  $\Delta pH$ .

Tabela 5.6 Resultados de pH em água, *KCl* e  $\Delta pH$ 

<b>Material</b>	<b>pH em <math>H_2O</math></b>	<b>pH em <i>KCl</i></b>	<b><math>\Delta pH</math></b>
M. 5% Fe	5,49	5,98	0,49
M. 10% Fe	5,36	5,92	0,56
M. 15% Fe	5,31	5,94	0,63
M. 5 % Au	5,75	5,94	0,19
M. 10% Au	5,86	6,07	0,21
M. 15 % Au	5,99	6,25	0,26

Observa-se que a adição dos rejeitos provocou mudanças nos valores de pH do solo, que quando puro era de 5,66. Com relação ao balanço de cargas, a avaliação do  $\Delta\text{pH}$  feita para avaliar o grau de intemperismo dos solos tropicais já não se aplica as misturas, visto que agora já não correspondem as condições originais do solo e sim um novo compósito. No entanto, sob o aspecto mineralógico, o valor de  $\Delta\text{pH}$  positivo indica a predominância de óxidos de ferro e alumínio nessas misturas (Carvalho *et al.*, 2015). Os valores de  $\Delta\text{pH}$  para as misturas de ferro são maiores, haja vista a presença de maiores teores de óxidos de ferro e alumínio presentes neste rejeito em comparação com o rejeito de ouro, conforme já citado.

Segundo Andrade (2014), rejeitos de mineração ricos em óxidos de ferro quando adicionados em pequenas quantidades em materiais cerâmicos, podem contribuir com a queima destes e na manutenção da temperatura durante o resfriamento, evitando problemas e defeitos. Esta situação, conforme a mesma autora, não ocorre na adição em grande escala.

As análises da composição granulométrica dos rejeitos na condição *in natura* indicam que o rejeito de ferro apresenta granulometria que se enquadra na norma DNIT 141 “Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço” (DNIT, 2010a) para tráfego menos intenso. Ainda conforme as análises granulométricas obtidas, ambos os rejeitos apresentam potencialidades de serem utilizados em aplicações de solo-cimento, conforme DNIT 143 “Pavimentação – Base de solo-cimento - Especificação de serviço” (DNIT, 2010b). Entretanto são necessários outros procedimentos para verificação do atendimento da norma pelos rejeitos e bem como a compatibilidade química com o cimento e as implicações no processo de cura.

O emprego de rejeitos de ferro como agregado miúdo para concreto está limitada mais pelo tamanho das partículas do que pela composição química (Andrade, 2014; Sosa, 2016). Dado que as impurezas orgânicas, materiais carbonosos, cloretos e sulfatos são danosos a esses usos e não são característicos dos rejeitos da mineração de ferro. O que se respalda pelos resultados químicos e mineralógicos já discutidos do material. O mesmo não se aplica para o rejeito de ouro, já que foram identificados a presença de minerais carbonatados pela DRX, sendo necessários estudos mais específicos para avaliar mais detalhadamente essas aplicações.

Conforme Bauer *et al.* (2012), a presença de óxidos de ferro nos agregados para concreto e argamassas, em pequenas porcentagens, podem ser úteis devido ao papel fundente e melhorar

as propriedades dos materiais. Por outro lado, ocasiona coloração avermelhada, o que é indesejável do ponto de vista estético.

Todavia, as análises realizadas evidenciam que é necessário um amplo estudo químico-mineralógico da interação entre as partículas do solo e dos rejeitos, que agora constituem um novo material e certamente complementar as análises físicas realizadas no contexto da interação rejeito e solos naturais. Neste sentido, as caracterizações tecnológicas dos materiais de forma individual e puramente mecânica auxiliam na compreensão do comportamento global, mas são insuficientes para uma avaliação mais específica das possíveis associações entre esses materiais.

#### **5.4.2 ESTUDOS MECÂNICOS**

Os estudos aqui presentes tiveram o objetivo de verificar o comportamento mecânico do solo e das misturas de solo com rejeitos como maneira simples de verificar parâmetros de resistência destes materiais. Os ensaios apresentados são os ensaios de compactação e resistência a compressão uniaxial.

A utilização da técnica de compactação é essencial em obras de terraplanagem. Tem como objetivo provocar o aumento da resistência dos solos sob a ação de cargas externas, a redução de possíveis variações volumétricas e impermeabilização dos solos pela redução do coeficiente de permeabilidade, como consequência da diminuição dos vazios. Por isso, o ensaio de compactação é frequentemente utilizado como técnica de estabilização em estudos de uso de materiais alternativos para melhoria de solos.

A utilização de ensaios de compressão simples como forma de avaliar a resistência de solos e de materiais alternativos como elementos de construção têm sido empregados com recorrência. O ensaio submete o solo a condição mais crítica possível, justificada pela isenção de confinamento lateral durante a compressão axial. O comportamento mecânico no ensaio de compressão simples é reflexo da estrutura do solo, da porosidade, da distribuição de poros, da da sucção e capilaridade atuante (Burgos, 2016).

A escolha deste tipo de ensaio se deu basicamente pela possibilidade de verificação simples do real ganho de resistência das amostras submetidas à adição de rejeitos, como também do

estabelecimento de comparações com o solo laterítico em condições naturais. Ressalta-se que pela simplicidade do ensaio esta abordagem tem um caráter de avaliação preliminar da eficiência das porcentagens de rejeitos associadas ao solo. Uma forma rápida de avaliar qualitativamente o desempenho destes compósitos. Entretanto, uma vez detectada sua viabilidade e qualificação é necessária a realização de ensaios mais específicos que visem uma melhor avaliação do desempenho desses materiais nas aplicações propostas.

### 5.4.2.1 COMPACTAÇÃO

O ensaio de compactação foi realizado conforme a NBR 7182 “Solo Ensaio de Compactação” (ABNT, 2016), sem reuso de material e na energia normal. A Figura 5.2 e a Figura 5.4 apresentam as curvas de compactação obtidas para o solo e as misturas com o rejeito de ferro e ouro, respectivamente. Adicionalmente, foi verificado o índice de vazios dos pontos obtidos de maneira a compreender a influência efetiva da adição de rejeitos na mudança nos índices de vazios durante o processo de compactação. Os índices de vazios dos pontos obtidos pelas compactações estão apresentados nas Figura 5.3 e Figura 5.5, respectivamente, para as associações do solo com rejeito de ferro e rejeitos de ouro.

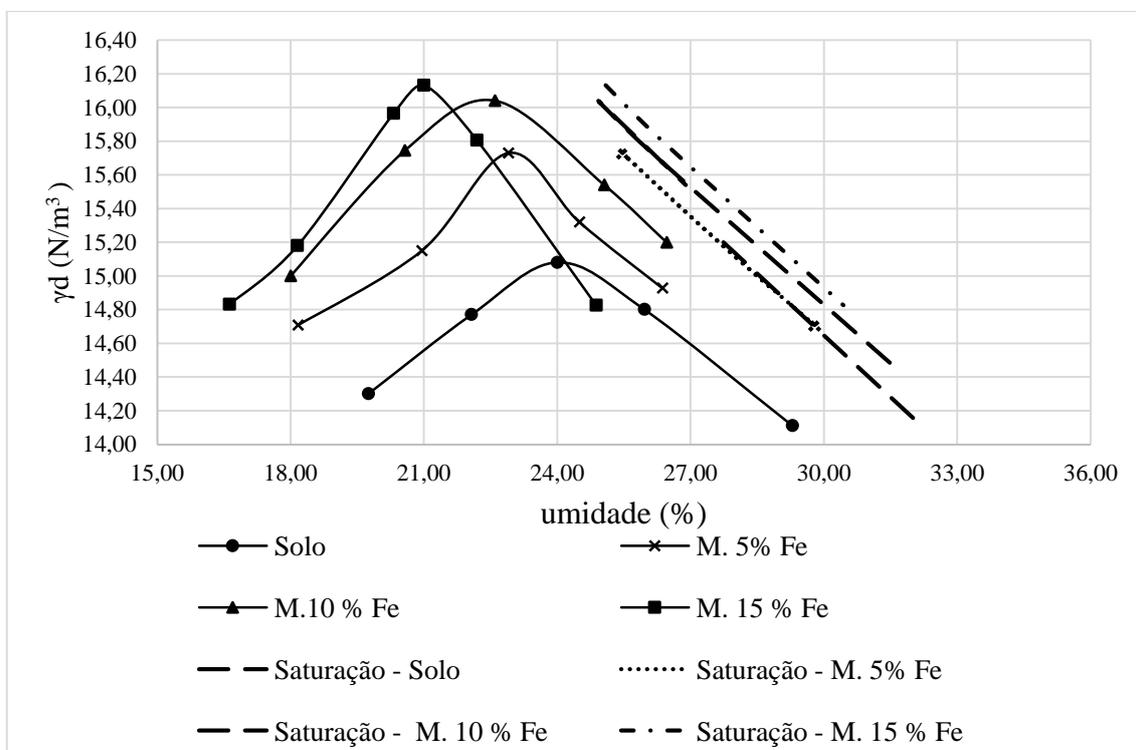


Figura 5.2 Curva de compactação do solo e das misturas com rejeito de ferro

Analisando as curvas de compactação das misturas de ferro em relação ao solo puro verifica-se uma relação entre o incremento de rejeito adicionado e o aumento do peso específico aparente seco, enquanto a umidade ótima diminuiu. A inclinação da curva indica a pouca estabilidade das misturas, haja vista que uma pequena variação na umidade de compactação pode influenciar bruscamente no peso específico.

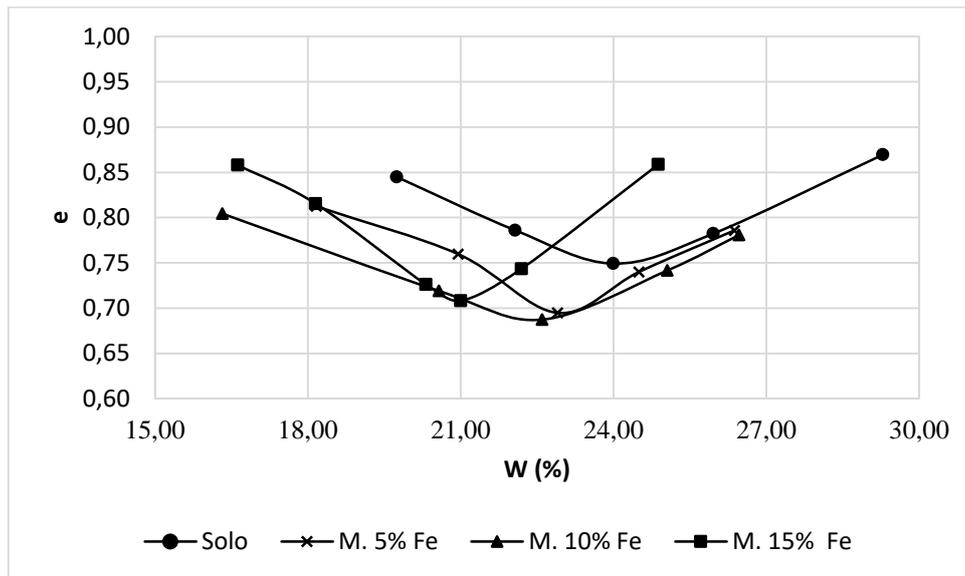


Figura 5.3 Curvas de índice de vazios e umidade do solo e misturas com rejeito de ferro

Com relação a variação do índice de vazios obtido para o solo e para as misturas, verifica-se a diminuição dos valores com associação do rejeito ao solo. Entretanto, a variação entre os teores de rejeito de ferro associado ao solo e os índices de vazios obtidos com a compactação foi pouco significativa. Excetuando o caso da mistura contendo 15% de rejeito em que o índice de vazios na condição ótima foi um pouco superior as demais associações. Com base nestas análises, pode-se concluir que o aumento das massas específicas aparentes secas das misturas se dá, principalmente, pelo aumento do peso específico da mistura, devido à alta massa específica dos grãos do rejeito de ferro e não pela redução dos vazios.

Já para o rejeito de ouro, Figura 5.4, o incremento do rejeito nas misturas não foi acompanhado do aumento de peso específico e diminuição da umidade ótima como no rejeito de ferro. Para tais misturas, o aumento do  $\gamma_d$  foi bem menos significativo quando comparado com as associações contendo o rejeito de ferro.

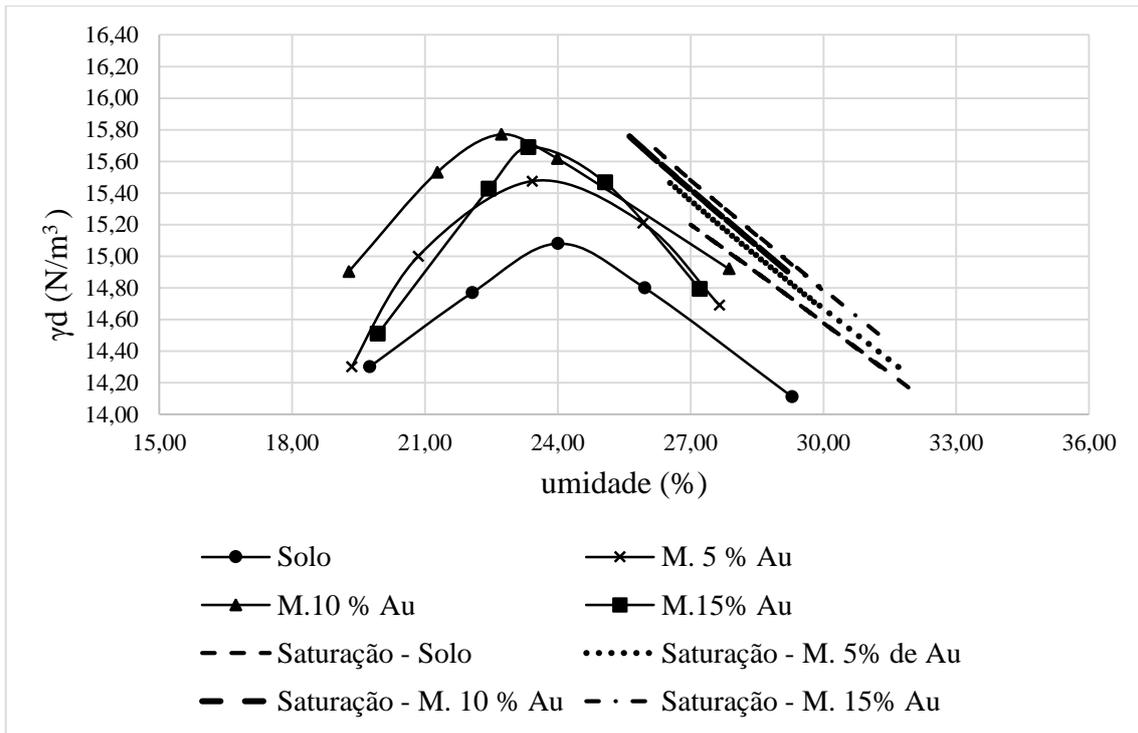


Figura 5.4 Curvas de compactação do solo e misturas com rejeito de ouro

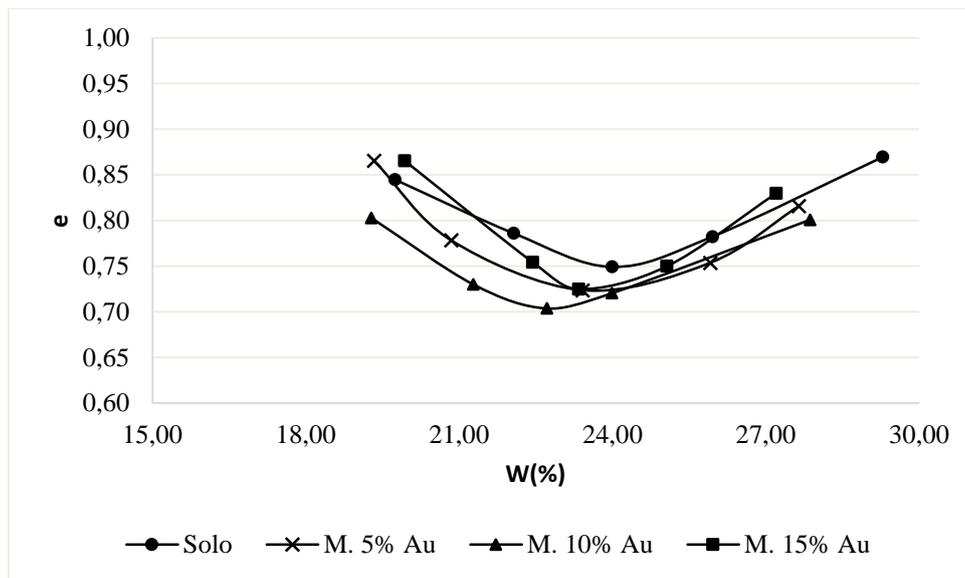


Figura 5.5 Índice de vazios dos pontos compactados

Analisando a Figura 5.5 observa-se também uma pequena variação do índice de vazios obtido na compactação do solo e nas diferentes misturas com o rejeito de ouro. O efeito do peso específico dos grãos do rejeito de ouro não exerceu grande influência no valor de  $\gamma_d$ . Este comportamento pode ser verificado na análise da mistura de M. 10% Au que apresentou um maior peso específico e uma consequente diminuição no valor do índice de vazios. Entretanto,

como dito anteriormente, essa variação foi muito pouco significativa no contexto da densidade final dos compósitos em relação ao solo puro. Vale ressaltar que as misturas contendo rejeito de ouro se mostraram mais estáveis, em relação à influência da variação de umidade de compactação no peso específico, do que as misturas com rejeito de ferro.

De modo geral, verificou-se que a adição dos rejeitos proporcionou um melhor arranjo de grãos pelo preenchimento dos vazios existentes na compactação na condição natural do solo. Destaca-se que as reduções nas umidades ótimas se devem basicamente em função da característica essencialmente granular das partículas dos rejeitos.

Os resultados obtidos na compactação foram satisfatórios. Comumente, materiais com massas específicas aparentes secas elevadas apresentam bons comportamentos quando sujeitos a solicitações, com resistências elevadas e baixa compressibilidade, próprio para materiais de pavimentação (Dantas, 2015).

#### 5.4.2.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL (RCS)

Os ensaios de resistência a compressão uniaxial (RCS) foram realizados conforme a NBR 12770 “Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada” (ABNT, 1992). As amostras foram compactadas dinamicamente na energia normal, umidade ótima e com o  $\gamma_{dmax}$  obtido nos ensaios de compactação e prontamente ensaiadas em uma prensa de compressão CBR e Marshall. A velocidade de deformação foi de 1,27 mm/min. Os ensaios foram conduzidos até a ruptura dos corpos de prova. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 Resultados da RCS

Mistura	RCS (kPa)	Umidade após ruptura	Umidade ótima	$\gamma_d$ (kN/ m <sup>3</sup> )	e
Solo	100	24,16 %	24,00%	15,26	0,73
M. 5% Fe	119	22,90 %	22,90 %	15,63	0,71
M. 10% Fe	130	22,33 %	22,60 %	15,95	0,70
M. 15% Fe	135	21,00 %	21,00 %	16,13	0,71
M. 5 % Au	155	23,95 %	23,50 %	15,39	0,73
M. 10% Au	99	22,72 %	22,90%	15,77	0,70
M. 15 % Au	66	24,00 %	23,50 %	15,60	0,73

As misturas com rejeito de ferro apresentaram resistência à compressão uniaxial maiores do que a do solo. Os resultados obtidos revelaram que o incremento de rejeito foi acompanhado do aumento da resistência a compressão uniaxial dos corpos de prova. Entretanto, o mesmo não foi verificado para as misturas de solo com rejeito de ouro. A mistura M.5%Au apresentou um valor de resistência à compressão bem superior ao do solo, enquanto a mistura M.10%Au apresentou resistência igual e a M. 15% Au apresentou um valor de resistência inferior à do solo, como pode ser visualizado pela Figura 5.6 .

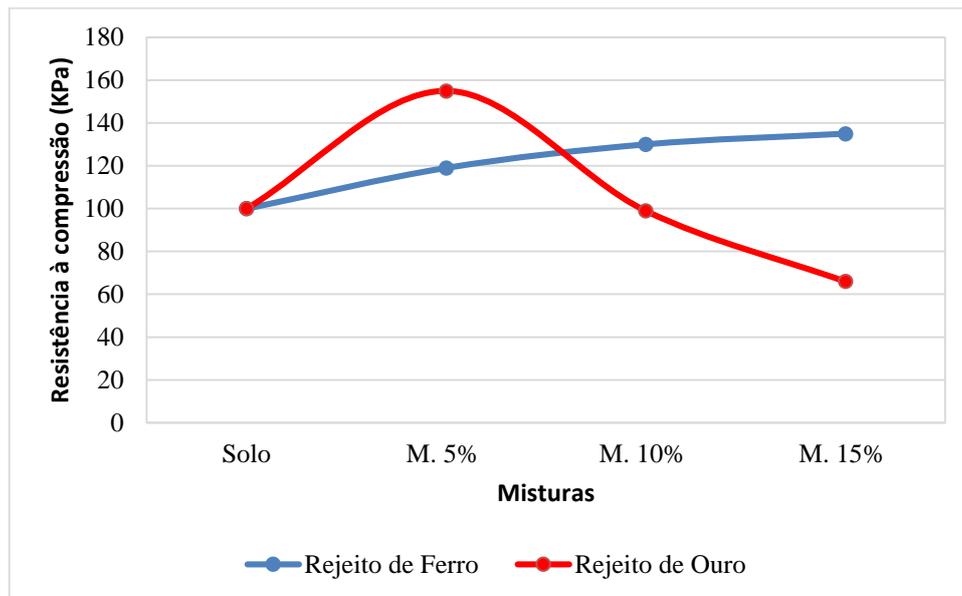


Figura 5.6 Resultados da RSC

Vale ressaltar que os procedimentos foram realizados em triplicata como forma de verificar a tendência de aumento ou diminuição da resistência a compressão.

Em relação ao solo, os resultados da compressão simples para as misturas de M. 10% Au e M. 15% Au não apresentaram ganho de resistência, apesar do aumento de massa específica aparente seca e diminuição do índice de vazios, conforme apresentado na Tabela 5.7. Este resultado pode ser justificado levando em consideração os resultados da difração de raios x e morfologia. O rejeito de ouro é formado por minerais placoides, como é o caso do grupo das micas, detectado pela presença da muscovita. Estes minerais se quebram muito mais facilmente do que grãos arredondados, o que diminui o índice de vazios, sem significar ganho de resistência.

Destaca-se, no entanto, que o complexo comportamento geotécnico destes materiais acentua a necessidade de um amplo programa de investigação geotécnica, sendo os simples ensaios aqui

apresentados pouco representativos para credenciar os rejeitos como materiais potencias para obras civis sob o aspecto mais complexo de aplicação. Por outro lado, os resultados demonstraram o ganho de resistência do solo quando misturado ao rejeito de minério de ferro em ambas as porcentagens estudadas. Também verificado para o rejeito de ouro quando adicionado 5% e sem alteração para a mistura de M. 10% Au, o que abre precedentes para estudos mais específicos como forma de avaliar a real possibilidade de uso das misturas de solo com rejeito.

Ressalta-se ainda a importante influência do solo no comportamento das misturas. Neste sentido, investigações utilizando outros tipos de solo devem ser realizadas de modo a avaliar a compatibilidade química e física dos rejeitos com diferentes tipos de solos. Estas análises certamente seriam bem suportadas pela metodologia de caracterização química e geoquímica realizada nesta dissertação.

## **CAPÍTULO 6**

### **6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS**

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões acerca da caracterização dos rejeitos, potencialidade destes de contaminarem o meio ambiente e a avaliação do reaproveitamento dos rejeitos em obras geotécnicas por meio de misturas dos rejeitos com solo. Posteriormente são apresentadas as sugestões para pesquisas futuras.

#### **6.1 ASPECTOS SOBRE A CARACTERIZAÇÃO DOS REJEITOS**

Os rejeitos foram classificados como areias médias a finas, mal graduadas e relativamente densas. O rejeito de ferro possui mineralogia simples, apenas com dois minerais, um silicato e o outro óxido, já o rejeito de ouro apresentou uma mineralogia mais diversificada, com silicatos, óxidos, sulfetos e carbonatos. Sob o aspecto ambiental, a presença de minerais sulfetados merece atenção devido a possibilidade de gerar drenagem ácida. Nos rejeitos foram verificados a presença majoritária do elemento ferro, seguido de silício.

Ambos os rejeitos foram classificados conforme a NBR 10.004 (ABNT, 2004a) como não inertes (Classe II B), sendo os metais não inertes As, Mn e Pb, o que não descartam a possibilidade de reutilização dos rejeitos. Uma vez que os estudos geoquímicos demonstraram grande tendência dos rejeitos em reter os metais, diminuindo assim seu fluxo em solução.

Os ensaios de extração simples e sequencial reafirmaram a baixa tendência dos rejeitos em disponibilizarem os metais nocivos à saúde humana e ao meio ambiente. De modo geral, As, Mn e Pb apresentam-se mais disponíveis em ambientes redutores. Além disto, o rejeito de ouro apresenta majoritariamente nas extrações maior grau de liberação dos metais do que o rejeito de ferro, fato esperado devido a mineralogia do rejeito de ferro ser composta exclusivamente por minerais de baixa atividade química.

O uso de diferentes extratores procedeu na elevada variabilidade dos resultados, refletindo as diferentes capacidades de extrações dos reagentes. O extrator mais forte foi o EDTA e o mais fraco a água destilada.

Por fim, a adaptação da metodologia de Sosa (2016) para a caracterização de rejeitos de ferro e ouro para fins de reaproveitamento se mostrou eficaz. Os procedimentos adicionados

demonstraram-se muito importantes para melhor verificar a mobilidade e disponibilidade dos metais e contribuíram na compreensão de aspectos químicos. Foi verificado também que as simplificações necessárias conforme as técnicas disponíveis não limitaram o conhecimento sobre os rejeitos.

Verifica-se também a importância da caracterização no contexto das questões ambientais pelo conhecimento das muitas implicações relacionadas à contaminação e ao reaproveitamento de rejeitos. Se reconhece que o assunto não foi esgotado, principalmente relacionado à peculiaridade de cada rejeito e complexidade de compreensão do fluxo de metais nas várias matrizes ambientais. Contudo, a metodologia proposta representa um importante passo no contexto da avaliação ambiental desses materiais e a avaliação das suas mais específicas contribuições de uso.

## **6.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE REAPROVEITAMENTO DOS REJEITOS DE FERRO E OURO EM APLICAÇÕES GEOTÉCNICAS**

Os estudos obtidos pelas misturas de rejeitos com o solo foram satisfatórios. Os estudos mecânicos de solo com rejeitos indicaram, em sua maioria, o ganho de resistência à compressão uniaxial, o que é de grande valia na reutilização de materiais alternativos em obras civis.

As características químicas e mineralógicas das amostras de rejeito demonstram potencial para a aplicação na construção civil. Entretanto, é de fundamental importância que as composições químicas e mineralógicas estejam associadas à granulometria para que se possa melhor avaliar a aplicação destes materiais.

Cabe salientar que nenhum dos usos mostrados nesta pesquisa representam formas completamente conclusivas, uma vez que as análises de outras propriedades físicas, além da granulometria, precisam ser realizadas, além de testadas propriedades mecânicas destes materiais tanto para utilização dos rejeitos na forma bruta quanto na forma estabilizada. Ressalta-se assim que a proposta destes estudos foi contribuir com a validação das metodologias de caracterização propostas, no sentido de viabilizar de forma mais eficaz o reaproveitamento dos rejeitos de mineração em um contexto mais abrangente que a análise

puramente mecânica. Acrescentando, ainda, a avaliação do seu potencial de contaminação nas aplicações propostas.

### **6.3 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

Durante o desenvolvimento da pesquisa foram verificadas algumas análises, situações e inquietações que não puderam ser avaliadas ou provadas e neste sentido são apresentadas algumas sugestões para pesquisas futuras.

Entre as sugestões para pesquisas futuras, recomenda-se a realização do ensaio de lixiviação conforme a NBR 10.005 (ABNT, 2004c) para fins de comparação com o procedimento *SPLP*;

Recomenda-se a utilização de métodos mais rigorosos para verificação de arsenopirita no rejeito de ouro, bem como avaliar o potencial de geração de drenagem ácida.

Propõem-se avaliar a possibilidade de extração dos metais contidos nos rejeitos, como forma de reaproveitamento íntegro dos materiais.

A avaliar de modo decisivo a possibilidade de reaproveitamento das misturas de rejeitos com solo para finalidades específicas e validar para as novas condições ambientais o potencial de contaminação neste novo contexto.

Foi constatada também a necessidade de aprofundar os estudos químicos-mineralógicas da interação de solo e rejeito, buscando compreensão deste novo produto e também como forma a compreender essa interação a longo prazo. Em relação ao solo, devem ser acrescentados estudos sobre matéria orgânica.

Para fins de ganho de conhecimento da mobilidade dos metais contidos nos rejeitos, é indicado que sejam realizados ensaios em coluna com as misturas de solo e rejeitos e difusão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- ALECRIM, A. V. (2009). Estudo do resíduo de quartzito foleado para emprego em estruturas de pavimento. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia civil, São Paulo, SP, 152p.
- ALEXANDRE T. L. & BUENO, M. I. M. S. (2006). Classification of some species, genera and families of plants by x-ray spectrometry. X-ray spectrometry, 35(4): 257- 260.
- AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; VELLOSO, A.C.X.; COSTA, L.M. & OLIVEIRA, C. (1994). Formas químicas de zinco e sua absorção por plantas de milho cultivadas em solo tratado com resíduo siderúrgico. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 18:313-320.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2014) D5550, Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer
- ANDRADE, L. C. R. (2014). Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 96p.
- ANJU, M. & BENERJEE, D. K. (2010). Comparison of two sequential extraction procedures for heavy metal partitioning in mine tailings. Chemosphere, 78:1393–1402.
- ARENARE, D. S., RODRIGUES, O. M. S., ARAÚJO, A. C. & VIANA, P. R. M. (2009). Espirais concentradoras no tratamento de minérios de ferro: uma breve revisão. Revista Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, São Paulo, 5(4): 224-228,
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2004a). NBR-10.004: Resíduos sólidos – Classificação. Brasil.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2004c). NBR-10.005: Procedimentos para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Brasil.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2004d). NBR-10.006: Procedimentos para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Brasil.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2004b). NBR-10.007: Amostragem dos resíduos sólidos. Brasil.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1992). NBR 12770 “Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada” Brasil.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2016b). NBR 6459 “Solo - Determinação do limite de liquidez”. Brasil.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2016c). NBR 7180 “Solo - Determinação do limite de plasticidade”. Brasil.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2016a). NBR 7181 “Solo – Análise Granulométrica”. Brasil.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2016d). NBR 7182 “Solo Ensaio de Compactação ” Brasil.

- BASTA, N.T. & Mc GOWEN, S.L. (2004). Evaluation of chemical immobilization treatments for reducing heavy metal transport in a smeltercontaminated soil. *Env. Poll.* 127, 73-82.
- BASTOS, L. A. C. (2013). Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária. Dissertação de mestrado, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Universidade de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 97p.
- BAUER, L. A. F. NORONHA, M. A. A. FALCÃO BAUER, R. J. (2012). Uso de aditivos no concreto. FALCÃO BAUER, L. A. *Materiais de Construção*. 1 vol. 5 eds. 35-63 p.
- BÉDARD, C., GOUSLISTY, P. & LEMIEUX, J. (2001) Seal in gof decant structure at QCM using a tailing cement grout mix; Proceedings of the 8th. International Conference on Tailing sand Mine Waste '01; Balkema: 461-470
- BISPO, L.H.O. & ALMEIDA, S. L. M. (2003). Obtenção de areia artificial a partir de finos de pedraira – análise de ensaios. *Jornada da Iniciação Científica*.
- BISSACOT, L. C. G. (2014). Caracterização geoquímica de rejeitos de mineração de ouro como contribuição à gestão ambiental e ao projeto de fechamento da mina. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 90 p.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências, 2010
- BRANDÃO, S. L. & LIMA, S.C. (2002). pH e condutividade elétrica em solução do solo, em áreas de pinus e cerrado na chapada, em Uberlândia (MG). *Caminhos de geografia - revista on line programa de pós-graduação em geografia*,3(6): 46-56p.
- BORGES, A. A. (2008). Caracterização da parcela magnética de minério fosfático de carbonatito Ouro Preto, *REM - Revista Escola de Minas*, 61(1):29-34, 2008.
- BOURLEGAT, F. M. (2010). Disponibilidade de metais em amostras de fosfogesso e fertilizantes fosfatados utilizados na agricultura. Dissertação de mestrado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, Brasil, 87 p.
- BOSCOV, M.E.G. (1997). Contribuição ao projeto de contenção de resíduos perigosos utilizando solos lateríticos. Tese de Doutorado, EPUSP, São Paulo
- BURGOS, J. F. (2016). Influência da microestrutura no comportamento mecânico dos solos tropicais naturais e compactados. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-272/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 149 p.
- CAMARGO, F. A. O.; SANTOS, G. A. & ZONTA, E. (1999). Alterações eletroquímicas em solos inundados. *Ciência Rural*, 29(1):171-180.
- CAMPOS, M. C. C. (2010). Atributos dos solos e riscos de lixiviação de metais pesados em solos tropicais. *Ambiência*. 6(3): 547-565.
- CAPELLI, R. B. (2016). Comparação de métodos na análise granulométrica de rejeitos de mineração. Monografia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, 30 p.
- CARVALHO, J. C., GILTIRANA JUNIOR, G. F. N., MACHADO, S. L. & SILVA FILHO, F. C. (2015). Solos não saturados no contexto geotécnico. *ABMS*, São Paulo, SP, 759p.
- COLTURATO, L. F. D. B., FERREIRA, G, B. & ARAÚJO, A. C. (2003). Aproveitamento de rejeitos gerados no beneficiamento de minério de ferro. III ENECS - Encontro Nacional

- sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, Curitiba. PR.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 396, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.
- DANTAS, A. A. N. (2015). Caracterização de resíduos oriundos do beneficiamento do minério de ferro para uso em pavimentação. 88pp. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- 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.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE. (2010a). DNIT: 141 Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Brasil
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE. (2010b). DNIT 143: Pavimentação – Base de solo-cimento - Especificação de serviço. Brasil
- DIAS, N. D. & BLANCO, F. F. (2010). Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. 470p.
- DO NASCIMENTO, Robervone S. de M. P.; SKORUPA, Alba L. A.; PASSOS, Leônidas P.; MARQUES, João J. Extração e fitodisponibilidade de zinco e chumbo em latossolo tratado com resíduos de siderurgia, *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, Recife: UFRPE, v.9, p.322-329, 2014.
- DUBE, A., ZBYTNIIEWSKI, R., KOWALKOWSKI, T., CUKROWSKA, E. & BUSZEWSKI, B. (2001). Adsorption and migration of heavy metals in soil. *Polish Journal of Environmental Studies*, 10(1): 1-10.
- ECHEVERRI, J. (2012). Aplicabilidade dos Rejeitos de Mineração de Ferro para Utilização em Filtros de Barragens. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 112p.
- ESPÓSITO, T.J. (2000). Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 363 p.
- FAVAS, P.J.C.; PRATAS, J.; GOMES, E.M.P. & CALA, V., (2011). Selective chemical extraction of heavy metals in tailings and soils contaminated by mining activity: Environmental implications. *Journal of Geochemical Exploration* 111:160–171.
- FETTER, C. W. Contaminant hydrogeology. U.S.: Macmillan Publishing Company, 1993. 458p
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. (2017). Inventário de resíduos sólidos da mineração: ano base 2015. Fundação Estadual do Meio Ambiente, Belo Horizonte, Minas Gerais, 48 p.
- GUIMARÃES, R.C. (2002). Análise das propriedades e comportamento de um perfil de

- solo laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavadas. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-090A/02, Dep. de Engenharia Civil e Amb., Universidade de Brasília, Brasília, DF, 180 p.
- GURJÃO, C. M. C. (2005). Estimativa de Propriedades Geoambientais de Camadas Impermeabilizantes de Solos Tropicais. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-029/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 257 p.
- HARRIS, D. C. (1948). Análise Química Quantitativa, Editora LTC, 7a edição (2001), Rio de Janeiro, RJ, 45-68p e 254-256p
- IAVAZZO, P.; ADAMO, P.; BONI, M.; HILLIER, S. & ZAMPELLA, M. (2012) Mineralogy and chemical forms of lead and zinc in abandoned mine wastes and soils: An example from Morocco. *Journal of Geochemical Exploration* 113: 56–67.
- IMPELLITTERI, C. A.; ALLEN, H. E.; YIN, Y.; YOU, S. J.; SAXE, J. K. (2001). Soil properties controlling metal partitioning. In: SELIM, H. M.; SPARKS, D. L. (ed.). *Heavy metals release in soils*. Boca Raton: Lewis Publishers, pp. 149 – 165
- INSTITUTO BRASILEIRO DE ANÁLISES. (2018). Interpretação da Análise do Solo. Disponível em < <http://www.ibra.com.br/soloelplanta/interpretacao-da-analise-do-solo/>>. Acesso em março de 2018.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. (2015). Informações sobre a economia mineral brasileira 2015. Brasília, DF, 25p.
- INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. (2012). Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos. IPEA, Brasília, Brasil, 1vol., 77p.
- KELLER, C. & VÉDY, J. C. (1994). Distribution of cadmium fractions in two forest soils. *Journal Environmental Quality*, 23:987-999
- LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A. & FRANÇA, S. C. A. (2010). Tratamento de Minérios. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, RJ, 1 vol., 896p.
- OLIVEIRA, T. G. MENDES, G. C., PEREIRA, E. L. & FERREIRA, L. D. (2016). Análise Comparativa entre o Granulômetro a Laser e o Método Convencional de Granulometria por Sedimentação. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG, Belo Horizonte, Brasil.
- OLIVEIRA JÚNIOR, G. G. (2011) Desenvolvimento de uma rota de processo de dessulfurização de rejeitos de um minério aurífero sulfetado. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 71p.
- MARTINS, S. C. (2005). Adsorção e dessorção de cobre em solos sob aplicação de lodo de esgoto e calda bordalesa. Dissertação de mestrado, ESALQ, Piracicaba, 99 p.
- McBRIDE, M.B. *Environmental chemistry of soils*. New York, Oxford University Press, 1994. 406p
- MELFI, A. J., MISI, A., CAMPOS, D. A. & CORDANI, U. G. (2016). Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios. Academia Brasileira de Ciências. Rio de Janeiro, 420 p.
- MENDES, K. S. (1999). O emprego de finos de pedreiras de basalto em concreto compactado a rolo utilizado para pavimentação. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 109p.

- MILLER, W. P., MARTENS, D. C. & ZELAZNY, L. W. (1986a). Effect of sequence in extraction of trace metals from soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, 558–560.
- MILLER, W. P.; MARTENS, D. C., ZELAZNY, L. W.; KORNEGAY, E. T. (1986b). Forms of solid phase copper enriched swine manure, *Journal Environmental Quality*, v.15, p.69-72.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. (2018). O novo arcabouço legal e perspectivas para o setor mineral brasileiro. Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, Ouro Preto, MG, 17p.
- MOSSOP, K. F. & DAVIDSON, C. M. (2003). Comparison of original and modified BCR sequential extraction procedures for the fractionation of copper, iron, lead, manganese and zinc in soils and sediments. *Analytica Chimica Acta* 478: 111–118
- MOTTER, L., & KETTL, E. (2015). Gerenciamento de resíduos sólidos (SGA) em uma indústria de papel cartão no oeste catarinense. *Revista Tecnológica*. 2(1): 288-301.
- 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
- PRADO, H., VASCONCELOS, A.C.M. & LANDELL, M.G.A. (2018). Relação entre balanço de cargas elétricas, matéria orgânica e soma de bases em perfis de Latossolos ácidos do Brasil. Disponível em <[http://www.pedologiafacil.com.br/artig\\_8.php](http://www.pedologiafacil.com.br/artig_8.php)>. Acesso em: janeiro de 2018
- RANDELOVIC, D., STANKOVIĆ, S., MIHAILOVIĆ N. & LEŠTAN, D. (2015). Remediation of Copper from Copper Mine Wastes and Contaminated Soils Using (S,S)-Ethylenediaminedisuccinic Acid and Acidophilic Bacteria, *Bioremediation Journal*, 19:3, 231-238.
- RAURET, G.; LÓPEZ-SÁNCHEZ, J.F.; SAHUQUILLO, A.; DAVIDSON, C.; URE, A. & QUEVAUVILLER, P., (1999). Improvement of the BCR 3-step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials. *J. Environ. Monit.* 1:57–61
- REIS, É. L. (2005). Caracterização de resíduos provenientes da planta de beneficiamento do minério de manganês sílico-carbonatado da RDM-Unidade Morro da Mina. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, MG, 124p.
- 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, 235 p.
- RITCEY, G. M. (2005). Tailings management in gold plants. *Hydrometallurgy*, 78: 3 –20
- RODRÍGUEZ, R.P. & GARCÍA, A.C., (2006). Los residuos minero-metalúrgicos en el medio ambiente. Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Madrid, 758p.
- RONQUIM, C. C. (2010). Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Embrapa Monitoramento por Satélite, Campinas*: 26 p.
- SALOMÃO, E. P. (2015). Indicadores da indústria mineral brasileira. ABPM, Brasília.
- SALOMONS, W. (1995). Environmental impacts of metals derived from mining activities:

- process, predictions, prevention. *Journal of Geochemical Exploration*, 52(1):5-23.
- SALOMONS, W. & FORSTNER, U., (1995). *Heavy metals – problems and solutions*. Berlin, Springer Verlag. 420p
- SANTOS, E. S., GAMA, E.M., FRANÇA, R. S., SOUZA, A. S. & MATOS, R. P. (2013). Espectrometria de fluorescência de raios-x na determinação de espécies químicas. *ENCICLOPÉDIA BIOSFERA*, Centro Científico Conhecer, 9(17); 3413-3432.
- SANTOS, R. S. P. (2014). Filipinas: 'catástrofe' ambiental, sociedade civil e coalizão anti-mineral. In: Julianna Malerba. (Org.). *Diferentes Formas de Dizer Não. Experiências internacionais de resistência, restrição e proibição ao extrativismo mineral*. 1ed. Rio de Janeiro: FASE, v. 1, p. 149-189.
- SASAKI, K., HAGA T., HIRAJIMA, T., KUROSAWA, K. (2002). Distribution and transition of heavy metals in mine tailing dumps. *Materials Transactions.*, 43(11): 2778-2783.
- SHU, W.S.; YE, Z.H.; LAN, C.Y.; ZHANG, Z.Q. & WONG, M.H. (2001). Acidification of lead/zinc mine tailings and its effect on heavy metal mobility. *Environ. Inter.*, 26:389-394, 2001
- SILVA, A. L. (2013). Caracterização mineralógica por difração de raios x e determinação de terras raras por ICP-MS de rochas da região sul da Bahia. Dissertação de mestrado, UFMG, Minas Gerais, 100p.
- SILVA, F. L. (2014). “Aproveitamento e Reciclagem de Resíduos de Concentração de Minério de Ferro na Produção de Pavos e Cerâmica”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 109 p.
- SILVA, S.R., PROCÓPIO, S. O., QUEIROZ, T. F. N. & 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.
- SILVEIRA, M.L.; ALLEONI, L.R.F.; O’CONNOR, G.A. & CHANG, A.C.; (2006). Heavy metal sequential extraction methods—A modification for tropical soils. *Chemosphere*, 64:1929–1938.
- SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DA EXTRAÇÃO DO FERRO E METAIS BÁSICOS. (2016). *Relatório Anual de 2015*. Brasília, DF, 8 p.
- SOARES, P. S. M. YOKOYAMA, L. & FREIRE, D. D. C. (2005). *Transporte de Metais Pesados no Solo no Contexto da Disposição de Resíduos Sólidos*. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, Brasil, 1 vol., 45 p.
- SODRÉ, F.F.; LENZI, E.; COSTA, A.C. (2001). Utilização de modelos físico-químicos de adsorção no estudo do comportamento do cobre em solos argilosos. *Química Nova*, São Paulo, 24(3): 324- 330.
- SKR Consulting Inc. (2015). *Mount Polley Mine Tailings Dam Failure: Update on Geochemical Characterization of Spilled Tailings*. Vancouver, BC, Canada, 19 p.
- SOSA, E.R. (2016). Caracterização e aproveitamento dos rejeitos oriundos de processos hidrometalúrgicos do níquel e cobalto com um enfoque geoambiental. Tese de Doutorado em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 170 p.
- SOUZA, G. C. (2009). Avaliação da biodisponibilidade de metais em sedimentos estuarinos. Monografia de conclusão de curso. UFBA, Salvador, 51p.

- TAVARES, S. R. L. (2015). *Remediação de solos e águas contaminadas por metais pesados: Conceitos Básicos e Fundamentos*. Rio de Janeiro, Brasil, 147 p.
- TEISSEDRE, J. M. (1997). Água subterrânea na irrigação. X Encontro Nacional de Perfuradores de Poços.
- TESSIER, A.; CAMPBELL, P.G.C., & BISSON, M., (1979). Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, 51:844–851.
- TOFFOLO, R. V. M. SANT'ANA, F. J. N. BATISTA, J. O. S. Silva, S. N. CURY, A. A. PEIXOTO, R. A. F. (2014). Viabilidade técnica de elementos de concreto para pavimentação produzidos com rejeito de barragem de minério de ferro. In: *Anais do 56º Congresso Brasileiro Do Concreto - CBC2014 – 56CBC*.
- USEPA-Method 1311, (1992). Toxicity Characteristic Leaching. Procedure (TCLP) disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/1311.pdf>. (Acesso em Março de 2016).
- USEPA-Method 1312, (1994). Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP). disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/1312.pdf>. (Acesso em março de 2016).
- USEPA Questions. Disponível em: <https://waste.zendesk.com/hc/en-us/articles/217167588-Should-a-used-oil-marketer-use-SW-846-Method-1311-TCLP-to-determine-whether-used-oil-meets-the-specification-levels-for-arsenic-cadmium-chromium-and-lead->>. Acesso em março de 2018.
- VILLAR, L. F. S. (2002). *Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita*. Tese de doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 551 p.
- XU, S. (2013). Research on application of iron tailings on road base. *Advanced Materials Research*, 743 vol., 54-57p.
- WANG, X.S. & QIN, Y. (2007). "Leaching Characteristics of Heavy Metals and As from Two Urban Roadside Soils". *Environ Monit Assess*, 132: 83-92
- YATSUZUKA, R.; ROCHA, M. ASTUTO, V. B. (2018). Espectrometria de emissão óptica com plasma - ICP OES. Disponível em < [http://ca.iq.usp.br/novo/paginas\\_view.php?idPagina=13](http://ca.iq.usp.br/novo/paginas_view.php?idPagina=13) >. Acesso fevereiro de 2018.
- ZANDARÍN, M., OLDECOP, L., RODRÍGUEZ, R. & ZABALA, F., (2009). The role of capillary water in the stability of tailing dams. *Engineering Geology*, 105:108–118.