

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CAMILA DE CARVALHO RIBEIRO

**ESTUDO SOBRE O COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE REJEITO DE  
MINERAÇÃO DE ZINCO**

CURITIBA

2015

CAMILA DE CARVALHO RIBEIRO

**ESTUDO SOBRE O COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE REJEITO DE  
MINERAÇÃO DE ZINCO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós Graduação em Engenharia da Construção Civil, Área de Geotecnia Ambiental, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Geotecnia.

Orientador: Sidnei Helder Cardoso Teixeira

CURITIBA  
2015

---

R484e

Ribeiro, Camila de Carvalho

Estudo sobre o comportamento geomecânico de rejeito de mineração de zinco/ Camila de Carvalho Ribeiro. – Curitiba, 2015.

113 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia,  
Programa de Pós-graduação em Engenharia da Construção Civil, 2015.

Orientador: Sidnei Helder Cardoso Teixeira .

Bibliografia: p. 106-113.

1. Zinco - Minas e mineração. 2. Resíduos. 3. Mecânica de rochas. 4.  
Geoquímica. 5. Mineralogia. I. Universidade Federal do Paraná. II. Teixeira,  
Sidnei Helder Cardoso. III. Título.

CDD: 553.452

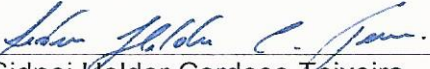
---

## TERMO DE APROVAÇÃO


CAMILA DE CARVALHO RIBEIRO

### ESTUDO SOBRE O COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE ZINCO

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção de grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração de Geotecnia, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:   
Prof. Dr. Sidnei Helder Cardoso Teixeira  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil  
da UFPR

  
Prof. Dr. Alessandro Christopher Morales Kormann  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil  
da UFPR

  
Prof. Dr. Alberto Pio Fiori  
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UFPR

Curitiba, 28 de Maio de 2015.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Dr. Sidnei Helder Cardoso Teixeira pela confiança, sabedoria e paciência durante todo o período do mestrado, apresentando-me à geotecnia de maneira valiosa, através de seu conhecimento prático e teórico.

Aos meus pais, não só pelo exemplo de honestidade e ética, mas também pelo amor e apoio incondicional, acreditando e vibrando a cada vitória alcançada.

Ao Fernando Magalhães, pelo companheirismo, compreensão e apoio, dividindo o peso e ajudando a seguir em frente na conclusão deste trabalho.

Aos colegas de mestrado e profissão José Henrique Ferronato Pretto, Thais Perez Lazarim e Carina Pirolli, não só pela amizade, mas também, pelo conhecimento compartilhado em longas horas de discussão na busca de entender os resultados obtidos nesta pesquisa.

Aos demais colegas do PPGECC, pelo apoio e companhia durante estes dois anos de convivência.

Aos funcionários do CESEC/LACTEC/LAMIR e ao Jhony Pires, pelo apoio e auxílio durante a realização dos ensaios.

À VMZ Três Marias pelas informações amostras de material fornecidas.

À CAPES, pelo apoio e auxílio financeiro.

## RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a influência das etapas do processo industrial de tratamento de minério de zinco nas suas propriedades geotécnicas. Notou-se que as características geotécnicas do minério de zinco apresentam grande variação ao longo do processo de beneficiamento mineral e são estudadas neste trabalho a partir de ensaios realizados em amostras representando 5 etapas do processo de beneficiamento do minério. Os estudos realizados envolveram a realização de ensaios de caracterização, compactação, resistência não drenada, obtenção de curvas de retenção, composição química e mineralógica. Observou-se uma grande alteração em todas as características avaliadas, destacando-se um comportamento atípico com o surgimento de características hidrofílicas à medida que o material evolui no processo de beneficiamento. A exemplo disso, tem-se um material cuja resistência não drenada para o limite de liquidez aumenta ao longo do processo de beneficiamento e, um rejeito cujo limite de liquidez é bastante próximo da umidade ótima de compactação. Ensaio em difratômetros de raio X, realizados para tentar justificar o comportamento observado, resultaram em difratogramas que sugerem a formação de um halo junto à linha de base, podendo indicar a formação de sílica gel durante o processo industrial (material amorfo com características hidrofílicas). O conhecimento da evolução do comportamento geotécnico do material ao longo do processo de beneficiamento a que é submetido pode auxiliar no entendimento do comportamento geomecânico de rejeitos de mineração, uma vez que esses materiais não podem, a rigor, serem considerados solo, embora usualmente seus comportamentos são avaliados à luz da Mecânica dos Solos clássica.

Palavras-chave: Rejeito de mineração. Minério de zinco. Comportamento geomecânico. Características hidrofílicas.

## **ABSTRACT**

This project's goal was evaluate the influence of the mineral processing zinc ore on the geotechnical properties of this. It was realized that the zinc ore geotechnical characteristics presents a large variation over the mineral processing and they were evaluated from laboratory tests performed on specimens representing 5 steps of the mineral processing. The study consisted in running tests of characterization, compaction, undrained shear strength, determination of the water retention curve and chemical and mineralogical composition. It was noticed that all the parameters evaluated suffered huge changes, highlighting an atypical behavior, where the material began to present hydrophilic properties along the process. For example, it was obtained a material whose undrained shear strength on liquid limit increases along the mineral processing and a process waste whose liquid limit its quite near of the optimum moisture for compaction. X-ray diffraction analysis resulted on XRD patterns which suggest an amorphous halo in the line base, indicating that silica gel (amorphous material with hydrophilic characteristics) is formed during the process. The knowledge of geotechnical behavior evolution along the mineral processing can help to understand the tailing mine geomechanical behavior, since these materials cannot be considered like soils, although they are usually evaluated from the classic Soil Mechanics.

Key words: Mine tailing. Zinc ore. Geomechanical behavior. Hydrophilic characteristics.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Etapas do processo "Integrado-Silicato-Sulfeto".	20
Figura 2.2: Difratoograma de rejeito de minério de zinco. (A) $\text{SiO}_2$ ; (B) $\text{ZnSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ; (C) $\text{ZnO}$ ; (D) $\text{Al}_2\text{S}_3$ ; (E) $\text{SiS}_3$ ; (F) $\text{Zn}_4\text{Al}_2\text{O}_{33}$ ; (H) $\text{Fe}_3\text{Si}$ .	29
Figura 2.3: Curvas granulométricas de diferentes resíduos.	30
Figura 2.4: <i>Varição granulométrica de diferentes resíduos.</i> Fonte:	31
Figura 2.5: Principais pontos da curva de retenção de umidade.	37
Figura 2.6: Curva característica de rejeito de minério de ouro.	38
Figura 2.7: Curvas de retenção para diferentes rejeitos.	39
Figura 2.8: Rejeito de Ferro. Relação entre o ângulo de atrito de pico, a porosidade e o teor de ferro.	42
Figura 2.9: Rejeito de Carvão Mineral. Decréscimo de $\phi'$ com o acréscimo de % de finos.	43
Figura 2.10: Rejeito de cobre. Trajetórias de tensões. a) Todos os testes. b) Detalhe para $\sigma'_3 < 2\text{Mpa}$ .	44
Figura 3.1: Localização dos piezômetros PZ.	46
Figura 3.2: Localização dos marcos superficiais MS.	46
Figura 3.3: Deslocamentos horizontais no Dique 3.	47
Figura 3.4: Recalques no Dique 3.	47
Figura 3.5: Relação entre piezometria e pluviometria durante os 3 primeiros meses de instrumentação.	48
Figura 4.1: Amostras fornecidas para ensaio.	50
Figura 4.2: Determinação da massa específica real dos grãos.	54
Figura 4.3: Análise granulométrica.	56
Figura 4.4: Granulometria das amostras 01 – Minério bruto, e 02 – Minério concentrado.	57

Figura 4.5: Granulometria das amostras 03 – Minério autoclavado, e 04 – Retido nos filtros – Rejeito novo. ....	57
Figura 4.6: Granulometria da amostra 05 – Pilha – Rejeito antigo. ....	57
Figura 4.7: Curvas de compactação das amostras 01 - Minério bruto e 02 - Minério concentrado. ....	60
Figura 4.8: Curva de compactação da amostra 03 - Minério autoclavado	60
Figura 4.9. Curvas de compactação das amostras 04 - Retido nos filtros - Rejeito novo. e 05 - Pilha - Rejeito antigo. ....	60
Figura 4.10: Preparação de pastilhas para leitura no difratograma de Raios X. (a) Preparação da pastilha. (b) Pastilhas prontas. ....	63
Figura 4.11. Difratogramas das amostras estudadas. ....	64
Figura 4.12: Moldagem dos anéis a partir de corpo de prova compactado. Fonte: ....	65
Figura 4.13: Ataque ao papel filtro em anéis próximos à saturação na amostra 05 - Pilha - Rejeito antigo. ....	66
Figura 4.14: Equipamentos para a obtenção de valores de sucção após o período de equalização dos papéis filtro. ....	67
Figura 4.15: Pontos de ensaio para sucção total e matricial Amostra 01 – Minério Moído. ....	68
Figura 4.16: Pontos de ensaio para sucção total e matricial Amostra 02 – Minério Concentrado. ....	68
Figura 4.17: Pontos de ensaio para sucção total e matricial Amostra 03 – Minério Autoclavado. ....	69
Figura 4.18: Pontos de ensaio para sucção total e matricial Amostra 04 – Rejeito Novo. ....	69
Figura 4.19: Pontos de ensaio para sucção total e matricial Amostra 05 – Rejeito Antigo. ....	70

Figura 4.20: Equipamento para ensaio de palheta de laboratório. No detalhe, dispositivo para leitura do torque aplicado. ....	71
Figura 4.21: Realização do ensaio. (a) Cravação da palheta. (b) Pontos de leitura. ....	72
Figura 4.22. Curvas Torque x Rotação. Amostra 01 - Minério bruto. ....	73
Figura 4.23. Curvas Torque x Rotação. Amostra 02 - Minério Concentrado. ....	73
Figura 4.24. Curvas Torque x Rotação. Amostra 03 - Minério Autoclavado. ....	73
Figura 4.25. Curvas Torque x Rotação Angular. Amostra 04 – Retido nos filtros – Rejeito novo. ....	74
Figura 4.26. Curvas Torque x Rotação Angular. Amostra 5 – Pilha – Rejeito antigo. ....	74
Figura 5.1: Curvas granulométricas dos materiais. ....	76
Figura 5.2. Composição química das amostras – principais elementos. ....	78
Figura 5.3: Difratoograma amostra 01 - Minério bruto. ....	79
Figura 5.4. Difratoograma amostra 02 - Minério concentrado. ....	80
Figura 5.5. Difratoograma amostra 03 - Minério autoclavado. ....	81
Figura 5.6. Difratoograma amostra 04 - Retido nos filtros - Rejeito novo. ....	82
Figura 5.7. Difratoograma amostra 05 - Pilha - Rejeito antigo. ....	83
Figura 5.8. Comparativo destacando a formação de halo amorfo no difratograma. ....	84
Figura 5.9. Comparação entre as curvas de compactação de todas as amostras. ....	85
Figura 5.10: Amostra 01 – Minério moído. ....	88
Figura 5.11: Amostra 02 – Minério concentrado. ....	89
Figura 5.12: Amostra 03 – Minério autoclavado. ....	90

Figura 5.13: Amostra 04 – Retido nos filtros – Rejeito novo. ....	91
Figura 5.14: Amostra 05 – Pilha – Rejeito antigo.....	92
Figura 5.15. Curvas características de todas as amostras - Sucção total. ....	93
Figura 5.16. Curvas características de todas as amostras – Sucção matricial. ....	94
Figura 5.17. Curvas de variação da resistência em função do teor de umidade. ....	95
Figura 5.18. Curvas de variação da resistência em função do teor de umidade. ....	96
Figura 5.19. Curva de variação da resistência em função do teor de umidade. ....	96
Figura 5.20. Curvas de variação da resistência em função do teor de umidade. ....	97
Figura 5.21. Curva de variação da resistência em função do teor de umidade. ....	98
Figura 5.22. Estimativa da resistência não drenada para os teores de umidade de referência.....	98

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Principais minerais de zinco e sua composição .....	16
Tabela 2.2. Reservas brasileiras de zinco em 2008. ....	17
Tabela 2.3. Composição típica dos concentrados silicatados e sulfetados.	19
Tabela 2.4. Composição química de uma amostra bruta de rejeito mineração de zinco. ....	29
Tabela 2.5 Índices de consistência obtidos para alguns rejeitos. ....	32
Tabela 2.6: Valores médios de propriedades físicas de rejeitos de mineração. ....	33
Tabela 2.7: Tipos de rejeitos e suas propriedades geotécnicas. ....	33
Tabela 2.8: Diferentes técnicas de determinação da curva característica em solos. ....	36
Tabela 2.9: Equações para ajuste das curvas características. ....	38
Tabela 2.10: Parâmetros de resistência usuais em alguns resíduos de mineração. ....	44
Tabela 4.1. Limites de Atterberg .....	58
Tabela 4.2. Composição química das amostras. ....	62
Tabela 5.1: Caracterização básica das amostras. ....	77
Tabela 5.2: Ajuste das curvas de sucção total e matricial para a amostra 01. ....	88
Tabela 5.3: Ajuste das curvas de sucção total e matricial para a amostra 02. ....	89
Tabela 5.4: Ajuste das curvas de sucção total e matricial para a amostra 03. ....	90
Tabela 5.5: Ajuste das curvas de sucção total e matricial para a amostra 04. ....	91

Tabela 5.6: Ajuste das curvas de sucção total e matricial para a amostra 05. ....	92
Tabela 5.7. Resumo dos principais resultados. ....	100

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
2.1	MINÉRIO DE ZINCO.....	16
<b>2.1.1</b>	<b>Beneficiamento mineral</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Aspectos sobre a sílica gel produzida durante a lixiviação.</b>	<b>24</b>
2.2	CARACTERÍSTICAS E COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE SOLOS E REJEITOS DE MINERAÇÃO.....	26
<b>2.2.1</b>	<b>Composição química e mineralogia</b> .....	<b>27</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Granulometria e plasticidade</b> .....	<b>29</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Índices físicos</b> .....	<b>32</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Curva característica de sucção</b> .....	<b>35</b>
<b>2.2.5</b>	<b>Resistência ao cisalhamento</b> .....	<b>39</b>
2.2.5.1	Resistência ao cisalhamento de rejeitos de mineração.....	41
<b>3</b>	<b>DESCRIÇÃO DO CASO</b> .....	<b>45</b>
<b>4</b>	<b>COMPONENTE EXPERIMENTAL</b> .....	<b>49</b>
4.1	OBTENÇÃO DOS DADOS.....	49
4.2	PARÂMETROS GEOTÉCNICOS AO LONGO DO BENEFICIAMENTO....	51
<b>4.2.1</b>	<b>Preparação das amostras</b> .....	<b>52</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Caracterização e índices físicos</b> .....	<b>52</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Compactação</b> .....	<b>59</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Composição químico-mineralógica</b> .....	<b>61</b>
<b>4.2.5</b>	<b>Determinação da Curva Característica</b> .....	<b>64</b>
<b>4.2.6</b>	<b>Resistência não drenada</b> .....	<b>70</b>

<b>5</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>75</b>
5.1	CARACTERIZAÇÃO BÁSICA .....	75
5.2	COMPOSIÇÃO QUÍMICO MINERALÓGICA.....	78
5.3	COMPACTAÇÃO .....	85
5.4	CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS .....	87
5.5	COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA NÃO DRENADA.....	94
5.6	RESUMO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS.....	99
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>101</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS</b> .....	<b>104</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>106</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atividades que envolvem o beneficiamento de minerais, visando o máximo de aproveitamento do minério e dos insumos provenientes desse tem, inevitavelmente, uma enorme geração de resíduos, os quais caracterizam um enorme passivo ambiental.

A disposição desse material, feita na maioria das vezes, na forma de lançamento hidráulico, se mostra bastante desafiadora do ponto de vista geotécnico, uma vez que a variabilidade do minério bruto e do processo de beneficiamento podem resultar em um rejeito final de grande heterogeneidade e, conseqüentemente, comportamento diferenciado na disposição final, independentemente do método de disposição proposto.

No Brasil, as jazidas de minério de zinco correspondem a 1,2% da produção mundial. As principais jazidas estão localizadas em Minas Gerais, onde o processo de beneficiamento é concentrado em uma planta hidro metalúrgica para eletrodeposição do zinco contido em soluções de zinco silicatado e sulfetado. Devido à grande quantidade de impurezas metálicas presentes no material, o processo de beneficiamento é baseado em reações químicas para a obtenção de zinco puro.

Tratados através de teorias relacionadas a materiais granulares aplicáveis a solos de diferentes formações, os rejeitos nem sempre apresentam comportamento comum à mecânica dos solos, mostrando que a abordagem a partir destas teorias pode gerar resultados inconsistentes em função da natureza do material estudado.

Neste contexto, o rejeito proveniente do beneficiamento do minério de zinco apresenta características geomecânicas atípicas, principalmente no que se associa à água adsorvida. Por exemplo, cita-se que esse tipo de rejeito apresenta teores de umidade ótima de compactação superiores ao seu limite de liquidez, e que as pressões neutras que eventualmente surjam em uma massa de rejeitos permanecem por longos períodos de tempo. Essas observações podem estar relacionadas com a formação de compostos provenientes de alterações químicas no material durante ou após o beneficiamento do material.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo principal, avaliar a as variações dos parâmetros geomecânicos do minério de zinco ao longo do seu processamento mineral. Para isso, foram realizados ensaios nos quais buscou-se avaliar como o processo de beneficiamento altera as propriedades geomecânicas do material ao longo do processo de beneficiamento, utilizando-se amostras provenientes de diferentes etapas do processo, selecionadas em função da representatividade que cada processo apresenta sobre o material aqui considerado como rejeito do processo. Através dos ensaios realizados, buscou-se responder as seguintes perguntas:

- Como o processo de beneficiamento influencia no comportamento do rejeito?
- Ocorre a formação de compostos hidrofílicos (sílica gel) em alguma etapa do beneficiamento? Qual sua influência no comportamento geral?
- Há ocorrência de sulfato de cálcio hidratado?
- Até que ponto a mecânica dos solos clássica é aplicável ao estudo do rejeito de zinco estudado?

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MINÉRIO DE ZINCO

O zinco é um dos metais não ferrosos mais consumidos no mundo, apresentando uma vasta gama de aplicações. Dentre suas aplicações, a utilização na indústria de galvanização para proteção contra processos corrosivos, respondendo a aproximadamente 50% da sua demanda. Além disso, a reciclagem do zinco denominado “zinco velho”, proveniente de sucatas, corresponde a 20% do consumo mundial (BRASIL, 2010).

Segundo RUSSO (2007 B), a principal forma de obtenção de zinco é a partir do sulfato de zinco (conhecido como smithsonita), o silicato hidratado (conhecido como calamina) e por fim, o silicato de zinco (conhecido como willemita). A Tabela 2.1 apresenta os principais minerais de zinco, sua composição e % de zinco contido.

Tabela 2.1. Principais minerais de zinco e sua composição

Mineral	Composição	% Zn contido
Esfarelita	ZnFeS	67,00%
Hemimorfita	Zn <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	54,20%
Smithsonita	ZnCO <sub>3</sub>	52,00%
Hidrozincolita	2ZnO <sub>3</sub> .3Zn(OH) <sub>2</sub>	56,00%
Calamina	2ZnO.SiO <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O	54,00%
Zincita	ZnO	80,30%
Willemita	Zn <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	58,50%
Franklinita	Zn,MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	15,00% a 20,00%

Fonte: Betekhine<sup>1</sup>, 1968 (apud BRASIL, 2010).

<sup>1</sup> BETEKHINE, A. **Manuel de Mineralogie descriptive**, Editions MIR, Moscou, 735 p. 1968.

No Brasil, as reservas conhecidas são de minério willemítico e calamítico, associados a rochas carbonáticas de baixo grau de metamorfização, na Mina de Vazante (RUSSO, 2007 B), e esfarelita associada a outros minerais como galena e pirita na Mina de Morro Agudo, Paracatu (SILVA, 2008 A).

De acordo com Brasil (2009 B), as reservas brasileiras representam 1,2% das reservas mundiais, tendo como predomínio o minério de zinco silicatado. A Tabela 2.2 mostra os estados brasileiros que apresentam reservas minerais de zinco e sua capacidade, em toneladas de metal contido. Destes, apenas as jazidas do estado de Minas Gerais apresentam potencial econômico para exploração.

Tabela 2.2. Reservas brasileiras de zinco em 2008.

<b>Unidades da Federação</b>	<b>Total (t.)</b>
Bahia	15.094
Minas Gerais	5.745.484
Mato Grosso	103.828
Rio Grande do Sul	645.146
Total	6.509.553

Fonte: Adaptado de BRASIL (2009 B).

Apesar de ocorrerem reservas de zinco em quatro estados brasileiros, a produção nacional de zinco provém apenas dos estados de Minas Gerais e Mato Grosso, cujas reservas totalizam 5,8 milhões de toneladas. A exploração destas minas é feita a céu aberto, para a extração da calamina, e subterrânea, de onde se obtém a willemita (BRASIL, 2009 A).

Segundo BRASIL (2010), quando na forma de zinco primário, sua produção começa com a extração do mineral das jazidas, passando por várias etapas de beneficiamento a fim de se obter o zinco concentrado, o que permite sua fundição e comercialização. Já quando na forma de “zinco velho”, BRASIL (2009 A) afirma que este é recuperado a partir de sucatas e resíduos provenientes da fabricação de

chapas de aço galvanizado e materiais fora de uso, podendo ser completamente reciclado sem perder suas propriedades físicas e químicas.

### 2.1.1 Beneficiamento mineral

O zinco é um metal do grupo dos não ferrosos que ocorre em grande abundância na natureza, estando os minerais de zinco sempre associados a minerais de outros metais. Dada esta característica, os principais métodos de processamento do zinco são a pirometalurgia e a piro-hidro-eletrometalúrgico, os quais tem como finalidade a obtenção de um produto final tão puro quanto possível.

O beneficiamento do minério de zinco é iniciado pela sua comnuição e posterior flotação, para a obtenção do mineral concentrado, porém, os processos que intermediam o processo são feitos em função da origem do mineral. Durante o processo de beneficiamento são obtidos mercúrio, cádmio, ouro, prata, cobre e chumbo como subprodutos, de acordo com o minério de origem (BRASIL, 2010).

Feijó (2007) apresenta um comparativo (Tabela 2.3) entre as composições típicas dos concentrados silicatados e sulfetados, justificando a necessidade de tratamentos diferenciados em função da origem do minério.

Dentre os processos de beneficiamento do minério de zinco, o processo piro-hidro-eletrometalúrgico conta com a tecnologia que compreende a utilização de processos de ustulação, lixiviação, e eletrólise, conhecida como RLE (*Roasting, Leaching and Electrolysis*), sendo a mais comumente aplicada, praticada em 85% das usinas de metalurgia de zinco do mundo (BRASIL, 2010). Na sua forma

elementar, esse processo é utilizado de maneira eficaz no beneficiamento de concentrados de zinco sulfetado.

Tabela 2.3. Composição típica dos concentrados silicatados e sulfetados.

Elemento	Concentrado silicatado	Concentrado sulfetado
	Teor típico (%)	
Zn	40 - 43	51 - 53
Cu	0,0230	0,5000
Cd	0,0300	0,5000
Fe	3 - 7	7
Co	0,0020	0,0030
Ni	0,0030	0,0070
Pb	0,9	2,5
As	0,0040	0,15
Ge	0,0014	0,0025
Sb	0,001	0,09
CaO	7 - 9	1,5
MgO	3	0,6
CO <sub>3</sub>	14	-
SiO <sub>3</sub>	20 - 25	2

Fonte: Feijó (2007)

Souza (2005) lista, além do método RLE, os processos denominados “Forno Imperial Smelting”, “Lixiviação Direta Atmosférica”, “Lixiviação Sob Pressão” e “Zincex Modificado”, porém o autor afirma que estes processos são pouco utilizados por resultarem em um produto com menor grau de pureza ou menor aproveitamento.

Além destes processos, há ainda o processo denominado “Integrado-Silicato-Sufeto”, desenvolvido por Souza (2005) para possibilitar o beneficiamento de concentrados silicatados e concentrados sulfetados na mesma planta de produção. O material tratado no presente estudo é resultante deste processo. Este método consiste em uma alteração no processo RLE no momento da lixiviação. Basicamente, os concentrados são preparados separadamente, adequando-se à etapa de lixiviação, a partir da qual os concentrados são tratados em conjunto. As

etapas englobadas no processo estão apresentadas Figura 2.1, e suas principais fases, explicadas a seguir.

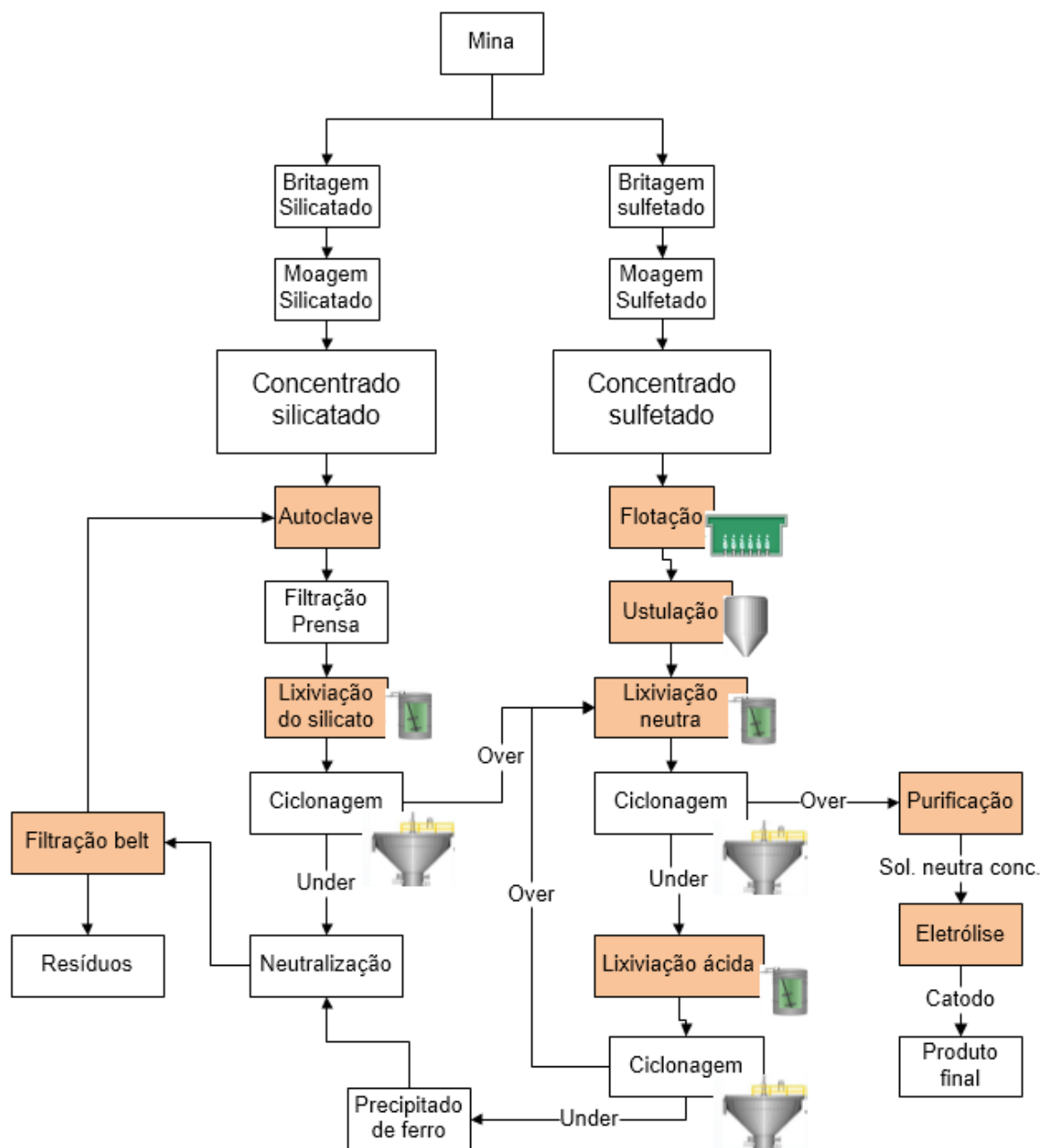


Figura 2.1: Etapas do processo "Integrado-Silicato-Sulfeto".  
Fonte: A Autora (2015).

As etapas iniciais do circuito visam eliminar impurezas que podem gerar danos aos equipamentos nas etapas seguintes do processo. Feijó (2007) afirma que após a moagem inicial do material britado, o material é encaminhado para um tratamento que visa iniciar o processo de solubilização e remoção de compostos de

cálcio e magnésio. Neste tratamento, inicialmente é realizada uma separação do material utilizando técnicas de classificação por cor e densidade, onde são removidos não só algumas impurezas, mas também, minérios de baixo teor de zinco contido (MARTINS, 2011). Uma vez obtido o minério com maior concentração, este segue no processo para a purificação de minérios com maior teor de zinco contido.

- Autoclave e lixiviação de silicato: Nesta etapa, também conhecida como “Tratamento do Magnésio”, ocorre a solubilização do cálcio e magnésio que não foram removidos do material através dos processos de classificação por cor e densidade. Estes elementos estão presentes em altas concentrações na forma de minério dolomítico no concentrado silicatado. Sua remoção se faz necessária para evitar incrustações das tubulações e calhas, bem como evitar a precipitação de seus respectivos sulfatos. O processo é feito via autoclave, onde temperaturas entre 80 a 90°C solubilizam o magnésio, filtrando seletivamente o zinco contido na solução. Ao final desta etapa, a polpa com teor de magnésio em torno de 1,5% é filtrada e o filtrado, enviado para o tratamento de efluentes. Já a porção retida nos filtros, segue para o processo de lixiviação do silicato, cujo objetivo é lixiviar o zinco contido no silicato. A polpa resultante deste processo segue para a lixiviação neutra, integrando-se ao processo RLE (PEREIRA, 2006 A; FEIJÓ, 2007; ABREU, 2009).
- Flotação: Etapa referente ao minério sulfetado de zinco. Souza (2007) explica a complexidade desta etapa em função da solubilidade do minério, variedade de reagentes utilizados no processo, granulometria do material, etc. De acordo com o autor, estas reações, de natureza eletrostática e química, interferem significativamente no resultado final. Assim com a autoclave no concentrado silicatado, a flotação visa remover o cálcio e magnésio do concentrado sulfetado, uma vez que tais elementos são prejudiciais ao processo. Como reagentes desta etapa, Pereira *et al* (2011) citam a utilização de sulfeto de sódio e silicato de sódio, com o objetivo de permitir o trabalho com minérios mais pobres em faixas de granulometria mais fina.

- **Ustulação:** Esta etapa consiste em converter o concentrado de sulfeto de zinco proveniente da flotação em um concentrado de óxido de zinco impuro, o qual pode ser lixiviado em solução de ácido sulfúrico. Geralmente esta etapa é conduzida em leito fluidizado a altas temperaturas (650 – 1000°C) (BRASIL, 2009 A; FEIJÓ, 2007; ABREU, 2009). Nesta etapa, ocorre a geração de grandes quantidades de dióxido de enxofre, o qual é recuperado e convertido em ácido sulfúrico, considerado um sub-produto do tratamento (ÇOPUR *et al*, 2003; ABREU, 2009). O ustulado (principal matéria resultante da ustulação) é então preparado através de resfriamento e moagem, e junta-se à polpa proveniente do concentrado silicatado. A partir deste ponto, os concentrados são tratados no circuito, em conjunto.
- **Lixiviação neutra:** De acordo com Feijó (2007), o ustulado é formado por aproximadamente 90% de óxido de zinco e o restante, por ferrita de zinco e outros óxidos metálicos. A formação destes compostos é explicada por Çopur *et al* (2004), onde afirma-se que a ustulação à altas temperaturas pode levar à formação, não só de concentrados de zinco, mas também, de resíduos na forma de ferrita de zinco e óxidos metálicos. Na lixiviação neutra ocorre a solubilização do zinco contido no ustulado e também a primeira purificação da solução, onde são retirados As, Ge e Sb.
- **Lixiviação ácida:** Conforme apresentado por BRASIL (2009 A) e Souza (2008), os resíduos resultantes do processo de ustulação requerem condições mais agressivas de acidez para serem removidos. Além disso, sua remoção é necessária antes do processo eletrolítico, visto que a presença de ions de ferro geram problemas no processo. A lixiviação ácida é realizada com o objetivo de permitir a remoção destes resíduos, utilizando ácido sulfúrico concentrado para lixiviar o zinco contido na forma de ferrita. Souza (2005 B), Espiari *et al* (2006) e Souza *et al* (2007) citam a formação de sílica gel durante o processo. Dada a importância deste composto para o presente estudo, o Capítulo 2.1.2

apresenta um maior detalhamento sobre sua geração e comportamento químico.

- **Purificação:** Realizada após as etapas de lixiviação neutra e ácida, a segunda etapa da purificação visa a remoção dos metais Cd, Cu, Co e Ni, considerados mais nobres que o zinco BRASIL (2009 A). Feijó (2007) explica que os processos de lixiviação geram impurezas, as quais devem ser removidas para garantir a qualidade e manutenção da etapa da eletrolise. Ainda segundo o autor, a utilização de processos de cementação tem grande relevância no beneficiamento de minério de zinco. Abreu (2009) relata a utilização de compostos de arsênio, ligas de Zn-Al, Zn-Ca, Sn-Sb-Grafite, Cd-Su-Sb e sal de antimônio como ativadores na purificação. Ao final, a solução é filtrada e a solução, tratada para remover excessos de zinco presentes nos ativadores, seguindo então, para a etapa da eletrolise.
- **Eletrólise:** Considerada etapa final para a geração de concentrado de zinco, a eletrólise consiste na passagem de uma corrente elétrica contínua de anodos e cátodos, através da solução obtida no processo de purificação, resultando em zinco puro depositado pelo cátodo (FEIJÓ, 2007; BRASIL, 2009 A). Nicol (2005) afirma que a eficiência do processo eletrolítico depende da concentração de  $Zn^{2+}$ , acidez, temperatura, densidade e impurezas contidas na solução.

A polpa rica em impurezas provenientes das etapas descritas anteriormente segue para a última etapa do processo de beneficiamento, onde através de um último processo de filtração, a solução é separada em filtrado e torta. O filtrado volta para o processo, onde se busca a máxima recuperação do zinco presente e a torta é encaminhada para a barragem de rejeito (SOUZA, 2007).

Silva (2008 A) compila as características da torta tida como resíduo final do processo de beneficiamento. O autor afirma que amostras retiradas do resíduo

apresentam ainda uma alta concentração de zinco (12% a 21%), bem como alumínio (8% a 14%) e sílica (11% a 20%), além de alto teor de enxofre na forma de sulfato (10%).

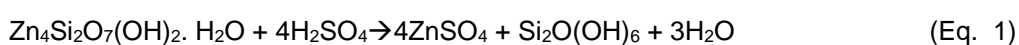
Robertson & Kirsten (2003) complementa dizendo que os rejeitos contêm minérios sulfetados de zinco e chumbo não recuperáveis, impurezas não sulfetadas e resíduos do processo. Quanto à granulometria do material, os autores afirmam que o  $D_{80}$  médio fica em torno de 70 a 80  $\mu\text{m}$ , com partículas indo de 60 a 100  $\mu\text{m}$ .

#### 2.1.2 Aspectos sobre a sílica gel produzida durante a lixiviação.

Moura (2003) afirma que o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) pode apresentar-se nas formas amorfa e cristalina, sendo seu comportamento governado pela estrutura formada pelas ligações atômicas. De acordo com Prado, Faria e Padilha (2005) e Oliveira (2008), a sílica gel é um exemplo da sílica na sua forma amorfa, sendo um polímero em cuja superfície pode existir grupos silanóis, moléculas de água fisissorvidas e ligada por ligações de hidrogênio.

Moura (2003) explica que podem ser encontrados grupos funcionais silanol e siloxano na superfície da sílica. O autor afirma que “um caráter hidrofílico deve ser atribuído aos grupos silanóis, isto é, esses grupos atraem água e são responsáveis pela alta molhabilidade característica da sílica hidrofílica pela água. Em contraste, os grupos siloxanos são quimicamente inertes”. Dinis (2012) afirma que a sílica gel apresenta forte caráter polar superficial, tendo assim, “altas afinidades à água e a elevadas umidades, sendo por isso, denominados adsorvetes hidrofílicos”, apresentando capacidade de adsorção em torno de 40%.

De acordo com Souza (2005 B), Espiari *et al* (2006), Souza *et al* (2007), Fuls, Kruger e Greunen (2009) e Safari *et al* (2009), na etapa do processo de beneficiamento conhecida como lixiviação ácida pode ocorrer formação de sílica gel ( $\text{SiO}_2$ ). De acordo com os autores, a lixiviação ácida para os minérios hemimorfita e willemita são representados pela (Eq. 1) e a (Eq. 2). Para Safari *et al* (2009), as partículas de hemimorfita são consideradas a fonte de sílica responsável pela formação da sílica gel.



Souza (2000), Souza *et al* (2007), Fuls, Kruger e Greunen (2009) e Safari *et al* (2009) afirmam que o ácido mono salicílico gerado na (Eq. 2) ( $\text{Si}(\text{OH})_4$ ) polimeriza, podendo formar partículas de sílica coloidal, o qual pode combinar-se com água, formando sílica gel, ou coagular na forma cristalina, dependendo das condições do processo. Quando na forma de sílica gel, o composto resultante forma uma camada ao redor das partículas e apresenta alta viscosidade, o que pode colmatar os filtros. Já na forma cristalina, o material fica retido nos filtros, sem causar colmatação. Em ambos os casos, o material é considerado rejeito do processo.

Russo (2007) destaca também que no caso da willemita, a quebra dos cristais resulta em superfícies onde predominam cátions que interligam tetraedros de sílica, gerando já na quebra dos grãos, uma superfície hidrofílica. Espiari, Rashchi e Sadrnezaahd (2006) afirmam que o ácido monosílico gerado na reação apresentada na (Eq. 2) polimeriza, promovendo a condensação de grupos silanóis a ligações siloxanos. Porém, quando esta reação de polimerização é continuada por fatores como pH, temperatura e impurezas, as partículas de sílica coloidal resultantes são instáveis e apresentam a estrutura observada na sílica gel.

De acordo com os autores, métodos diferenciados de tratamento ajudam a minimizar a geração de sílica gel sem, contudo, eliminá-la. Fuls, Kruger e Greunen (2009) afirmam que a formação da sílica gel é menos provável em pH entre 1 e 2, temperatura entre 40-50°C e tempo total de residência entre 1 e 3 horas.

## 2.2 CARACTERÍSTICAS E COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE SOLOS E REJEITOS DE MINERAÇÃO.

O rejeito pode ser definido, de acordo com Figueiredo Ferraz<sup>2</sup> (1992 apud LOPES, 2000) como um material com partículas sólidas remanescentes do processo de beneficiamento mineral, cujas características variam de materiais arenosos não plásticos até solos de granulometria muito fina com alta plasticidade, em função do tipo de minério bruto e beneficiamento aplicado. O autor relata ainda que estes materiais “podem ser inertes, como os rejeitos gerados da mineração de ferro ou podem ser ativos, como aqueles gerados pelo processo metalúrgico do ouro e do alumínio”.

Fallet *al* (2010) afirmam que os rejeitos apresentam características variáveis e, em função disso, não há um método considerado completo para sua classificação. Dessa forma, eles podem ser classificados em categorias baseadas na origem do mineral - propriedades da rocha mãe, mineral que está sendo extraído - nos seus índices físicos geotécnicos - granulometria e plasticidade– e na reatividade química - potencial de geração de drenagem ácida e potencial de lixiviação de contaminantes tóxicos.

---

<sup>2</sup> FIGUEIREDO FERRAZ. **Aperfeiçoamento técnico dos serviços de engenharia em atividades de mineração: Disposição de rejeitos.** Figueiredo Ferraz Consultoria e Engenharia de Projeto Ltda. Belo Horizonte, 1992.

Os rejeitos de mineração são usualmente estudados através da aplicação da mecânica dos solos convencional, porém as propriedades físicas resultantes destes estudos devem ser avaliadas e utilizadas de forma conservadora, uma vez que o processo de beneficiamento mineral envolve processos químicos que podem alterar as características dos materiais ao longo do tempo.

A exemplo disso, estudos apresentados por Filho (2004), Costa (2009), Silva *et al* (2006), Mendes (2007) e Presotti (2002) mostram como a presença de teores de ferro pode influenciar o comportamento geotécnico de rejeitos provenientes deste minério. Hegazy, Cushing e Lewis (2004) e Campaña e Verdugo (2013) apresentam variabilidade nas características e propriedades geotécnicas de rejeitos de carvão mineral e cobre, explicando-as em decorrência dos processos de beneficiamento dos mesmos.

### 2.2.1 Composição química e mineralogia

A mineralogia do solo é o principal fator relacionado à granulometria e propriedades das partículas do solo. Em se tratando de argilominerais, esta influência é ainda mais significativa, não só pelo tamanho (inferior a  $2\mu\text{m}$ ), mas também por apresentar uma estrutura complexa, o que leva o solo a ter um comportamento diferenciado do de siltes e areias. A *montmorilonita*, por exemplo, dá ao solo características expansivas, e a *haloisita* pode dar ao solo pesos específicos muito baixos (Lambe e Withman, 1970; Soga e Mitchell, 2005; Pinto, 2006).

Além dos argilominerais presentes no rejeito, a composição química deste também pode ser determinante do comportamento geomecânico do material. Estudos mostram que a presença de determinados componentes químicos (teor de

ferro, por exemplo), pode levar à alteração de diversas propriedades do material (LOPES, 2000; BEDIN, 2010).

Vick (1990) listou uma série de rejeitos de diferentes tipos de minérios, correlacionando suas características mecânicas, mineralogia e composição química, de modo a explicar a interação existente entre estes componentes e, baseado nestas informações, o autor apresentou as seguintes afirmações:

- O rejeito de bauxita apresenta uma alta proporção de argilominerais amorfos, de granulometria fina, levando-os a apresentarem baixos limites de liquidez e índice de plasticidade e fácil disposição.
- O rejeito de carvão mineral apresenta grandes quantidades de montmorilonita sódica, o que o leva a ter baixa densidade, alta plasticidade e dificuldades ao se trabalhar com o material.
- O rejeito de ferro apresenta uma quantidade significativa de hematita, apresentando assim, alto peso específico. Seus argilominerais não tem grande índice de atividade e sua granulometria faz com que o rejeito tenda a ser drenado rapidamente.

O zinco se refere a um mineral, ou uma mistura de substâncias minerais, não sendo uma espécie mineralógica pura. Sua composição pode ser constituída principalmente de sulfato de zinco, carbonato de zinco e silicato de zinco. Neste contexto, Figueiredo (2007) afirma que as características químico-mineralógicas de rejeitos minerais apresentam grandes variações em função do processo de beneficiamento, natureza mineral e frente de lavra.

Buscando avaliar a possibilidade de extrair o zinco presente no rejeito de zinco, descartado pelo processo produtivo, Silva (2008 A) analisou a composição química e mineralógica deste rejeito, estando seus resultados apresentados na Tabela 2.4 e na Figura 2.2, respectivamente.

Tabela 2.4. Composição química de uma amostra bruta de rejeito mineração de zinco.

Parâmetro	Resultado (%)	Parâmetro	Resultado (%)
S total	10,06	Cd	0,001
S sulfato	9,23	Cu	0,001
Umidade	18,0	Ti	0,4
Zn	15,97	P	0,06
Pb	3,00	Mn	0,05
Fe	1,26	Al	3,90
Mg	0,35	K	0,26
Cr	0,03	SiO <sub>2</sub>	10,95

Fonte: Silva, 2008 A.

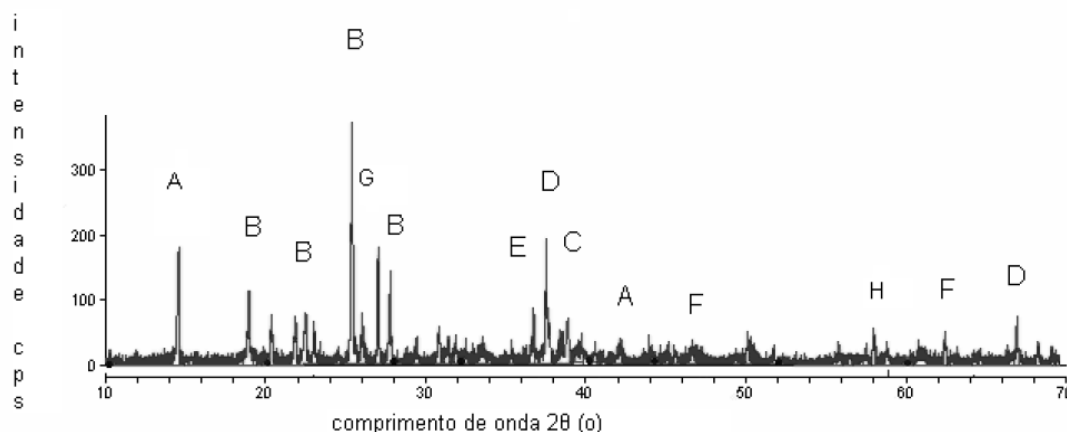


Figura 2.2: Difratograma de rejeito de minério de zinco. (A) SiO<sub>2</sub>; (B) ZnSO<sub>4</sub>.6H<sub>2</sub>O; (C) ZnO; (D) Al<sub>2</sub>S<sub>3</sub>; (E) Si<sub>3</sub>; (F) Zn<sub>4</sub>Al<sub>22</sub>O<sub>33</sub>; (H) Fe<sub>3</sub>Si.

Fonte: Silva, 2008 A.

## 2.2.2 Granulometria e plasticidade

Variando de argilas a areias, a granulometria dos rejeitos de mineração é influenciada pela mineralogia da rocha matriz e o processo de beneficiamento adotado. Visto que as jazidas de um mesmo minério podem ocorrer em regiões com diferentes rochas adjacentes (minério de ferro – itabirito – constituído por camadas de hematita e quartzo, por exemplo), a composição granulométrica pode variar não

só entre diferentes minérios, mas também, em amostras de minério provenientes de uma mesma jazida, sendo possível, neste caso, apenas a determinação da faixa granulométrica em que se encontra determinado rejeito (HERNANDEZ, 2002; MENDES, 2007; BEDIN, 2010).

Araújo (2006) explica que os rejeitos podem variar de materiais arenosos não plásticos até solos de granulometria fina e alta plasticidade. Os rejeitos arenosos, ou granulares, possuem alta permeabilidade e resistência ao cisalhamento e baixa compressibilidade, enquanto que os rejeitos finos, quando constituídos de siltes e argilas, possuem alta plasticidade, difícil sedimentação e alta compressibilidade.

A exemplo disso, na Figura 2.3 estão apresentadas curvas granulométricas características de diferentes tipos de rejeitos, representando a variabilidade em função do minério explorado e na Figura 2.4, estão apresentadas as faixas granulométricas encontradas para rejeitos de um mesmo minério.

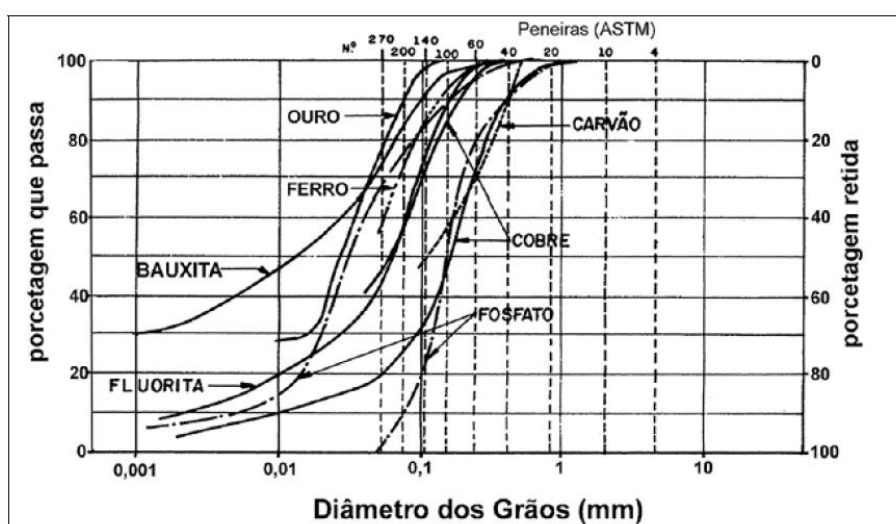


Figura 2.3: Curvas granulométricas de diferentes resíduos.  
Fonte: Abrão<sup>3</sup> (1987, *apud* BEDIN, 2006)

<sup>3</sup> ABRÃO, P. C. Sobre a disposição de rejeitos de mineração no Brasil. In: Simpósio de Barragens de Rejeitos e Resíduos Industriais e de Mineração. **Anais**. V1, p. 2, 1987.

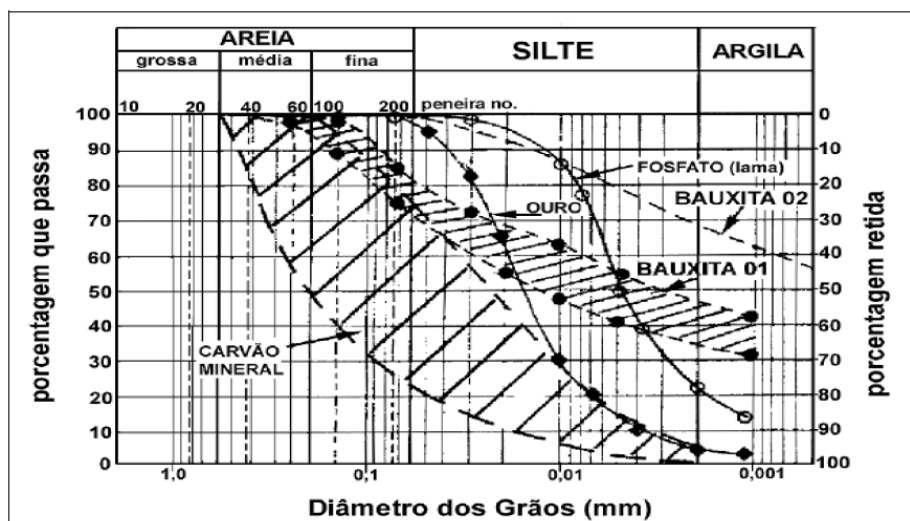


Figura 2.4: Variação granulométrica de diferentes resíduos. Fonte: Campos<sup>4</sup> (1986, apud BEDIN, 2006)

Pinto (2006) afirma que o comportamento do solo em relação aos Limites de Atterberg varia consideravelmente em função dos argilominerais que o compõe. Tal comportamento, de acordo com D'Agostino (2008) também é válido para os rejeitos, onde a plasticidade é referente à porcentagem de finos e ao argilomineral presente no rejeito.

Com base nisso, a Tabela 2.5 mostra alguns valores médios dos índices de consistência de diferentes rejeitos. Nota-se que a faixa de valores de granulometria apresentadas por Swarbick (1992) para os rejeitos de ferro e carvão difere das faixas propostas por Bedin (2006), ressaltando a grande variação nas características de um mesmo tipo de mineral, proveniente de diferentes jazidas.

<sup>4</sup> CAMPOS, T. M. P. de. Geotecnia e Meio Ambiente: Relato do Estado da Arte. In: VIII COBRANSEF. Anais. Porto Alegre, p. 123-157, 1986.

Tabela 2.5 Índices de consistência obtidos para alguns rejeitos.

<b>Tipo de minério</b>	<b>Limite de Liquidez (%)</b>	<b>Índice de plasticidade (%)</b>	<b>% de finos (&lt;2µm)</b>	<b>% de areia (&gt;0,6mm)</b>	<b>Índice de atividade</b>	<b>Fonte</b>
Ferro	30 – 33	9 – 11	42 – 29	4 – 10	0,21 – 0,37	Swarbrick (1992)
Carvão	44 – 74	16 – 46	39 – 57	12 – 8	0,41 – 0,80	Swarbrick (1992)
Bauxita	43 – 78	17 – 26	32 – 57	24 – 0	0,53 – 0,46	Swarbrick (1992); ZHANG, QU, WU (2001)
Ouro	NI – 27	NP – 24	7 – 20	0	0 – 0,125	Pereira (2006 B)
Cobre	26 – 39	4 – 12	10 – 12	0	0,4 – 1	Shamsaietal (2007)

### 2.2.3 Índices físicos

De forma geral, Barnekow, Haase e Wels (1999) apresentam as propriedades físicas comuns a rejeitos de granulometria fina a intermediária (Tabela 2.6) e Mendes (2007) apresenta um resumo das propriedades geotécnicas dos principais tipos de rejeitos gerados no Brasil (Tabela 2.7).

Tabela 2.6: Valores médios de propriedades físicas de rejeitos de mineração.

Propriedade física do solo	Parâmetro	Granulometria intermediária (valores típicos médios)	Granulometria fina (valores típicos médios)
Massa específica aparente	$\rho_n(\text{g/cm}^3)$	1,5 – 1,7	1,18 - ,7
Massa específica dos grãos	$P_s(\text{g/cm}^3)$	2,81	2,81
Classificação pelo tamanho dos grãos	DIN 4022	Argilo-siltoso	Silte ou argila
Classificação pelo tipo de solo	DIN 18196	Silte ou argila, plasticidade alta ou moderada	Silte ou argila com alta plasticidade
Teor de umidade	$W_n(\%)$	55 – 85	65 - >160
Limite de plasticidade	$W_L(\%)$	50 - 60	60 – 70
Limite de liquidez	$W_P(\%)$	22 – 30	22 – 30
Índice de plasticidade	$L_P(\%)$	28 – 35	35 – 45
Índice de vazios	E	1,5 – 2,4	2 – 4,5

Fonte: Adaptado de Barnekow, Haase e Wels (1999).

Tabela 2.7: Tipos de rejeitos e suas propriedades geotécnicas.

TIPO DE REJEITO						
	Gesso (sulfato de cálcio hidratado)	Ferro	Cobre	Minério de alumínio	Ouro	Bauxita
Material	Silte	Areia siltosa (Itabirito) e silte argiloso (hematita)	Siltes argilosos (lama) e areias (>45%)	Silte argiloso (lama) e areias (30%)	Silte arenoso e silteareno-argiloso	Silte arenoso e silte argiloso
Granulom.	CNU < 2	CNU ~ 3 (Itabirito) e CNU ~ 12 (hematita)	CNU ~ 18,92	-	CNU ~ 40	CNU ~ 2,5
Dens. Grãos ( $\text{g/cm}^3$ )	2,36 a 2,39	3,5 a 5,25	2,6 a 2,8 (areias ou lamas)	2,6 a 3,7	2,6 a 3,6	2,9 a 3,7
Plasticidade	IP = 125 (lama) e não plástico (gesso)	Baixa plasticidade a não plástico	IP = 9 a 10	8 (lamas)	Não plástico	IP = 5,1 a 14
Índice de Vazios (e)	11 (lama) e 0,7 a 1,5 (gesso)	0,61 a 1,35	0,6 a 0,8 (areias) e 0,9 a 1,4 (lamas)	8 (lamas)	1,10 a 1,30	1,6 a 2,4

Fonte: Adaptado de Mendes (2007) e Bedin (2010).

Vale lembrar que o modelo de beneficiamento do mineral pode levar a variações em todas as propriedades do material (distribuição granulométrica, formato dos grãos, teor de umidade, densidade, permeabilidade, índice de vazios, limites de Atterberg, peso específico e peso específico seco), excetuando-se apenas as propriedades químicas inerentes à mineralogia do minério bruto. Dessa forma, projetos de engenharia para dimensionamento de barragens e depósitos de rejeitos exigem a realização de ensaios para a obtenção de parâmetros específicos de tal material.

Com relação ao peso específico dos grãos, este descreve a relação entre o peso de partículas sólidas e seu volume. Pinto (2006) afirma que o peso específico dos grãos não apresenta grande variação de solo para solo. Já para rejeitos de mineração, este índice depende do minério explorado e dos diferentes processos de beneficiamento (HERNANDEZ, 2002).

No que se refere ao peso específico aparente seco, Cruz (2004) destaca sua importância como parâmetro de controle em aterros hidráulicos. Mendes (2007) afirma que este índice físico em rejeitos de mineração é facilmente influenciado pelo processo de beneficiamento dos materiais, bem como a sua forma de disposição. Cruz (2004) relata que a composição granulométrica, uniformidade, dimensão, formato dos grãos, fatores construtivos e fator tempo apresentam grande interferência no peso específico seco do material.

Dentre os índices físicos listados, Filho (2004), Presotti (2002), Hernandez (2002) e Russo (2007 A) destacam a grande influência do índice de vazios no comportamento geotécnico dos materiais granulosos, como solos e rejeitos. De acordo com estes autores, as propriedades relacionadas à resistência, deformabilidade e permeabilidade destes materiais estão diretamente relacionadas à densidade, conseqüentemente, ao índice de vazios do material em questão.

#### 2.2.4 Curva característica de sucção

Tratada por alguns autores como um dos parâmetros mais importantes do comportamento de solos não saturados, a sucção dos solos representa a energia necessária para remover uma certa quantidade de água retida ou adsorvida no interior de uma massa de solo. Em outras palavras, Marinho (1997) explica que a magnitude da sucção é em função de condições físico-químicas do solo, e consiste na ação da pressão isotrópica da água intersticial de modo que o meio água/solo absorva ou perca água, variando assim, seu grau de saturação.

De maneira geral, Furlan (2008) explica que a sucção total em solos consiste na soma dos componentes chamados sucção mátrica e sucção osmótica, sendo o primeiro, resultante da “interação entre as três fases do solo (induzido pelo efeito do menisco”, e o segundo, resultante da “diferença de concentração de sais distribuídos no interior da massa de solo (induzido pelo efeito da osmose)”. Em complemento, Fredlund & Xing (1994) destacam que a sucção mátrica e a sucção total podem ser consideradas equivalentes para valores superiores a 1500 kPa, uma vez que a sucção osmótica passa a ser nula.

Graficamente, o comportamento da sucção do solo em função do teor de umidade que este apresenta é representado através de curvas características de retenção de água no solo (CRAS), a qual pode ser obtida através de ensaios em laboratório por diversos métodos, porém, seguindo princípio de trajetórias de umedecimento e secagem do material (MOREIRA, 2011; Duarte, 2012).

Dentre os métodos de obtenção das curvas características, Lopes (2006) explica que estes são classificados em função da maneira com que estes interagem com o solo, sendo divididos em métodos diretos e indiretos. Para o autor, os métodos diretos medem a energia da água nos poros do material, enquanto que nos

indiretos, se obtém um parâmetro relacionado à sucção através de uma calibração, como a umidade relativa/resistividade/condutividade. Na Tabela 2.8 é apresentado um resumo das técnicas de medição da sucção em meios porosos.

Tabela 2.8: Diferentes técnicas de determinação da curva característica em solos.

<b>Técnica</b>	<b>Medida de sucção</b>	<b>Intervalo (kPa)</b>	<b>Tempo de equilíbrio</b>
Psicrômetro	Total	100 a 71000	Minutos
Papel filtro (com contato)	Mátrica	30 a 30000	7 dias
Papel filtro (sem contato)	Total	400 a 30000	1 a 14 dias
Bloco poroso	Mátrica	30 a 30000	Semanas
Sensor de condutividade térmica	Mátrica	0 a 300	Semanas
Placa de sucção	Mátrica	0 a -90	Horas
Placa de pressão	Mátrica	0 a 1500	Horas
Tensiômetro padrão	Mátrica	0 a -100	Minutos
Tensiômetro osmótico	Mátrica	0 a 1500	Horas
Tensiômetro tipo Imperial College	Mátrica	0 a -1800	Minutos

Fonte: Adaptado de Fredlund e Rahardjo 1993) e Marinho (1997).

Dentre as técnicas apresentadas na Tabela 2.8, destaca-se o método do “papel filtro”, nas aplicações com e sem contato. Esta técnica consiste em um método indireto para determinação das sucções mátrica e total em amostras de solo, onde parte-se do princípio de que, uma vez isolado com uma amostra de solo em um ambiente de temperatura controlada, ocorrerá troca de água entre os materiais (papel e solo), até que ambos cheguem ao equilíbrio, sendo neste caso, a água absorvida pelo papel filtro, um indicativo da sucção deste (VILLAR, 2002).

O ensaio, normalizado pela ASTM D 5298-92, permite a estimativa das sucções mátrica e total do solo em função do posicionamento do papel sobre a amostra de solo. Marinho (1994) explica que a leitura da sucção mátrica é feita através do contato direto entre o papel filtro e solo, de modo a permitir a ocorrência de fluxo direto de líquido e vapor, do solo para o papel filtro. Já a leitura da sucção total é feita evitando-se o contato direto entre o solo e o papel, de modo que os

materiais entrem em equilíbrio apenas pela troca de vapor d'água. O autor destaca também a importância de se garantir que o tempo de equalização do conjunto seja suficiente, sendo que este tempo varia em função magnitude estimada para as sucções (o autor sugere até 7 dias, para valores acima de 1MPa, 30 dias para valores entre 100 e 250 kPa e acima de 30 dias, para valores abaixo de 100kPa).

Através de ensaios de laboratório, obtém-se parâmetros de sucção e umidade volumétrica que representam uma relação contínua ao longo da variação entre a umidade volumétrica saturada e residual. Esta continuidade pode então, ser descrita matematicamente, de modo a descrever através de formulações empíricas, o comportamento observado no ensaio. Destaca-se aqui as formulações propostas por van Genuchten (1980) e Fredlund & Xing (1994), as quais, de acordo com Silva (2005), tem grande versatilidade e apresentam um bom ajusta para a maioria dos solos. A Figura 2.5 apresenta uma curva característica na qual são mostrados seus principais pontos, e na Tabela 2.9, apresenta-se os modelos numéricos supracitados.

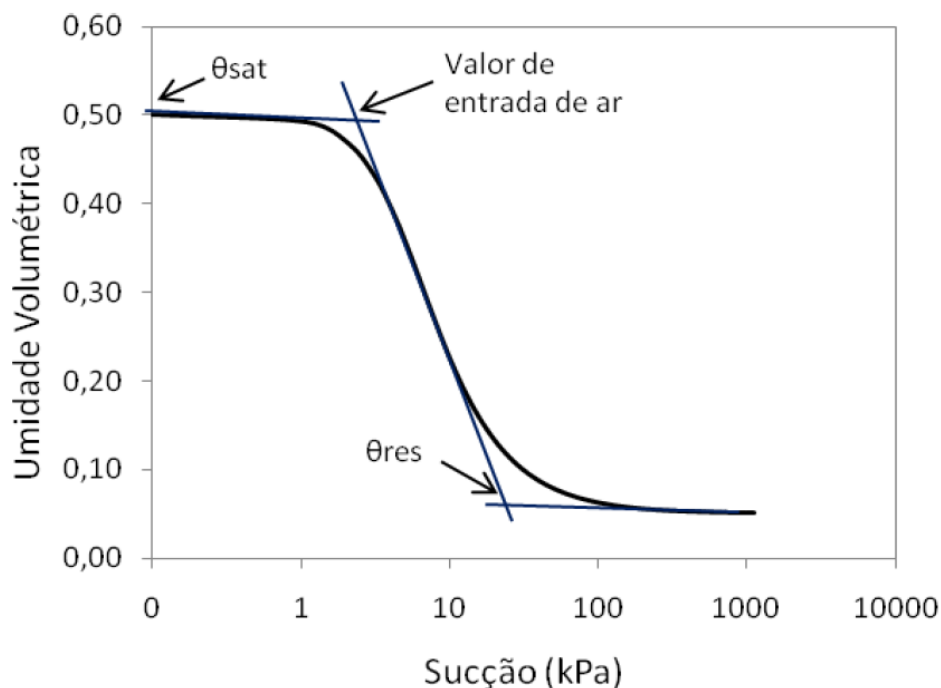


Figura 2.5: Principais pontos da curva de retenção de umidade.  
Fonte: Guizelini (2011).

Tabela 2.9: Equações para ajuste das curvas características.

Autores	Equação do modelo	Parâmetros.
Van Genuchten (1980)	$\theta_w(w) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha \cdot \psi)^n)^m}$	$\theta_r$ : Umidade volumétrica residual $\theta_s$ : Umidade volumétrica na saturação $\Psi$ : Sucção $\alpha$ : Inverso do valor de entrada de ar n e m: Parâmetros de ajuste
Fredlund & Xing (1994)	$\theta_w(w) = \theta_s \cdot \left[ 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{CR}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^5}{CR}\right)} \right] \cdot \left[ \frac{1}{\ln\left\{\exp(1) + \left(\frac{\psi}{a}\right)^{n/m}\right\}} \right]$	$\theta_s$ : Umidade volumétrica na saturação $\Psi$ : Sucção a: Valor de entrada de ar CR, n e m: Parâmetros de ajuste

Em se tratando de rejeitos de mineração, Westraad (2005) analisou o material proveniente da mineração de ouro e, buscando avaliar o mecanismo de estabilidade de pilhas não saturadas alteadas com diferentes tipos de rejeitos, Swanson *et. al.* (1999) traçaram curvas de retenção com rejeitos de características siltsos e arenosas (figura). Os autores afirmam que não só a granulometria, mas também parâmetros como densidade e mineralogia do material podem ser decisivos na sucção do solo. Os resultados são apresentados na Figura 2.6 e na Figura 2.7.

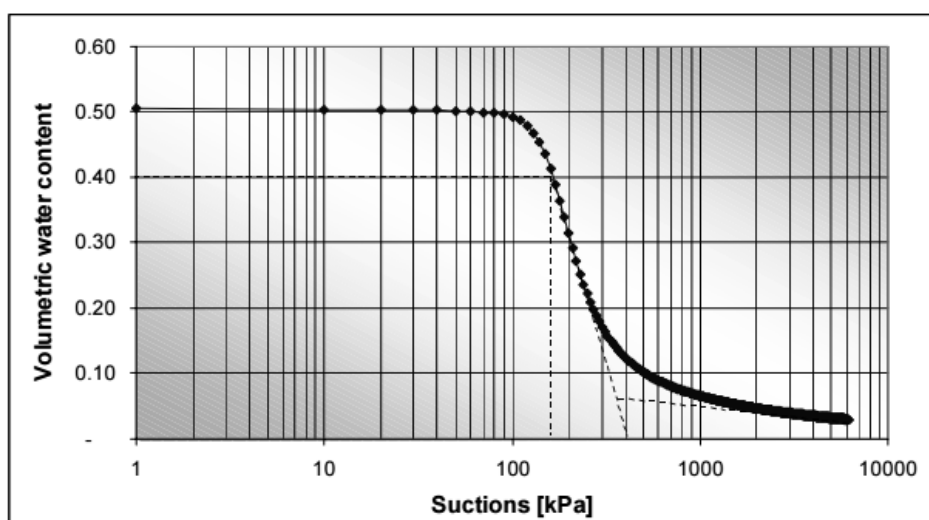


Figura 2.6: Curva característica de rejeito de minério de ouro.  
Fonte: Westraad (2005).

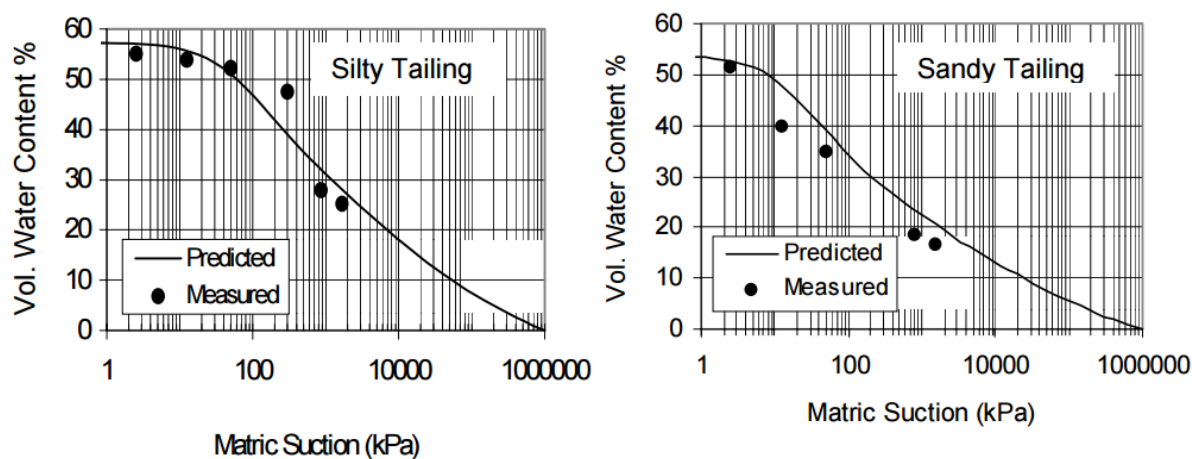


Figura 2.7: Curvas de retenção para diferentes rejeitos.  
Fonte: Swanson *et al* (1999).

## 2.2.5 Resistência ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento de determinado material é função de características como o índice de vazios, nível de tensões, atrito entre os grãos, formato e tamanho dos grãos, composição mineralógica e distribuição granulométrica. Mendes (2007) afirma que a resistência ao cisalhamento dos solos está ligada não só a características inerentes ao material, como presença de finos, porosidade e composição química, mas também, às variáveis do ensaio, como pressão de confinamento e drenagem.

Pinto (2006) afirma que o comportamento de solos finos e de solos granulares é diferenciado pela compressibilidade perante tensões confinantes, uma vez que solos finos sofrem sensíveis reduções no índice de vazios acima das tensões de pré-adensamento. O autor cita também que “enquanto a envoltória de resistência das areias passa pela origem, a envoltória das argilas apresenta um pequeno valor positivo para a tensão normal nula”.

Reynolds (1885) e Casagrande (1940) apresentaram em seus estudos as possíveis variações volumétricas em solos durante o cisalhamento de diferentes areias. Seus resultados mostraram a dilatação de areias densas e a redução volumétrica de areias fofas. Já para solos finos, Pinto (2006) destaca que a resistência de argilas é dependente do índice de vazios em que ela se encontra, sendo este fruto do seu histórico de tensões e da estrutura dos grãos. Neste contexto, fica clara a influência do índice de vazios tanto para solos granulares quanto para solos finos.

Em se tratando de solos granulares, Lambe e Whitman (1969) afirmam que dada a sua alta permeabilidade, sua resistência é definida em termos de tensões efetivas. Já para solos finos, Pinto (2006) destaca a necessidade de se conhecer sua resistência tanto em carregamento drenado quanto não drenado. Neste contexto, Shayea (2001) afirmou que para areias artificialmente misturadas a porções de argila, em misturas sem umidade, os valores de coesão e ângulo de atrito não são afetados pela quantidade de argila. Já para amostras úmidas, foi observado que o aumento no teor de argila resulta em aumento de coesão e redução de ângulo de atrito. No que diz respeito ao teor de umidade, os autores concluíram também que o aumento da umidade resulta em uma redução do ângulo de atrito e a coesão aumenta até certo limite, acima do qual passa a apresentar valores reduzidos.

Uma vez conhecidas as variáveis que interferem na resistência ao cisalhamento dos materiais, e sabendo-se também que os rejeitos de mineração podem ser tratados a partir de conhecimentos da Mecânica dos Solos Clássica, desde que consideradas as particularidades inerentes aos rejeitos, Lopes (2000), Hernandez (2002), Presotti (2002) e Mendes (2007) defendem que o comportamento geotécnico dos rejeitos pode ser avaliado a partir da análise do comportamento dos solos aos quais se assemelham.

### 2.2.5.1 Resistência ao cisalhamento de rejeitos de mineração

Buscando apresentar contribuições ao conhecimento relacionado à disposição de resíduos de indústrias mineradoras, Bedin (2010) estudou o comportamento geomecânico dos rejeitos de bauxita e ouro de minas brasileiras. Quanto ao rejeito de bauxita, a autora concluiu que este apresenta granulometria silto argilosa e silto arenosa, variando de acordo com o local de amostragem no reservatório. Estes rejeitos são chamados de lama vermelha e areia vermelha, respectivamente. Através de ensaios triaxiais simples e ensaios triaxiais com medidas de ondas sísmicas e de compressão, obteve-se  $\phi' = 36^\circ$  e  $c' = 10\text{kPa}$  para a lama vermelha, e  $\phi' = 32^\circ$  e  $c' = 0$  para a areia vermelha. Além disso, baseada na teoria do estado crítico, a autora conclui que a lama vermelha consiste em um material com baixos riscos à liquefação, enquanto que a areia vermelha apresenta risco de liquefação para baixas tensões de confinamento.

Em relação ao rejeito de ouro disposto em lagos de acumulação, ou barragens de rejeitos, este apresenta granulometria de siltes e areias finas. Este material apresenta grãos relativamente angulares, com ângulo de atrito efetivo em torno de  $30^\circ$  e sem coesão. O material apresenta risco de liquefação para baixos níveis de tensão de confinamento e quebra de grãos para tensões de confinamento superiores a  $800\text{kPa}$  (BEDIN, 2010).

Robertson, Lloyd e Robins (2003) estudaram o comportamento geomecânico do rejeito de mineração de ouro proveniente de uma mina localizada na África do Sul. A exploração do minério é feita em saprolitos lateríticos, cujo rejeito resultante apresenta alto teor de finos, com alto índice de vazios e compressibilidade. Através de ensaios triaxiais do tipo adensado drenado, os autores obtiveram  $\phi = 23^\circ$  e  $c = 10\text{kPa}$ .

Hernandez (2002) concluiu que em rejeitos da mineração de ferro, o ângulo de atrito é fortemente afetado pela granulometria, porosidade e composição química do material. O autor ensaiou através de cisalhamento direto, amostras com diferentes teores de ferro em sua composição mantendo, porém, a mesma granulometria no material. Seus resultados estão apresentados na Figura 2.8.

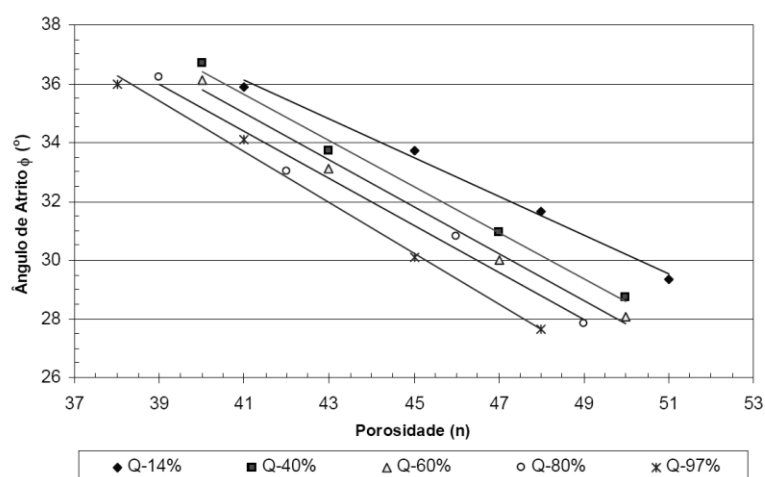


Figura 2.8: Rejeito de Ferro. Relação entre o ângulo de atrito de pico, a porosidade e o teor de ferro. Fonte: Hernandez (2002).

Hegazy, Cushing e Lewis (2004) mostraram em seu trabalho a elaboração de um banco de dados com valores médios e desvio padrão dos parâmetros geotécnicos do rejeito fino de carvão mineral provenientes de diferentes regiões dos Estados Unidos. O estudo mostrou que os rejeitos apresentam poucas variações em termos de ângulo de atrito e grandes variações em termos de coesão ( $\phi'_{\text{médio}} = 33^\circ$  - Desvio padrão = 4 - e  $c'_{\text{médio}} = 11\text{kPa}$  - Desvio padrão = 14). Além disso, os autores concluíram também que a variação encontrada para  $\phi'$  é refletida pelo teor de finos (% passante na peneira #200) nas amostras, conforme mostrado na Figura 2.9.

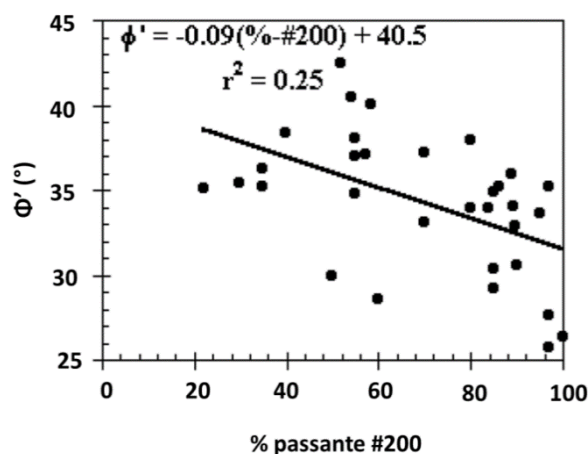


Figura 2.9: Rejeito de Carvão Mineral. Decréscimo de  $\phi'$  com o acréscimo de % de finos.  
 Fonte: Adaptado de Hegazy, Cushing e Lewis (2004).

Campaña e Verdugo (2013) estudaram o comportamento geotécnico do rejeito de mineração de cobre, discutindo os resultados provenientes de ensaios triaxiais drenados e não drenados realizados em rejeitos provenientes de 4 plantas de mineração de cobre localizados no Chile e no Peru. O rejeito foi classificado como areno-siltoso de baixa plasticidade, com índice de plasticidade  $IP < 7$ .

Os autores (CAMPAÑA e VERDUGO, 2013) obtiveram envoltórias de resistência similares em ambos os ensaios, para todas as amostras ensaiadas (Figura 2.10). Os valores de  $\phi'$  variaram entre  $32^\circ - 36^\circ$  (para  $\sigma'_3 < 1\text{MPa}$ ) e  $32^\circ - 34^\circ$  (para  $\sigma'_3 > 1\text{MPa}$ ), não havendo redução na envoltória de resistência para altas tensões. Para os autores, este resultado foi inesperado, e pode ser explicado pela quebra de uma pequena quantidade de partículas com o confinamento, mostrando que os parâmetros de resistência destes rejeitos não sofrem alterações significativas com altas pressões confinantes.

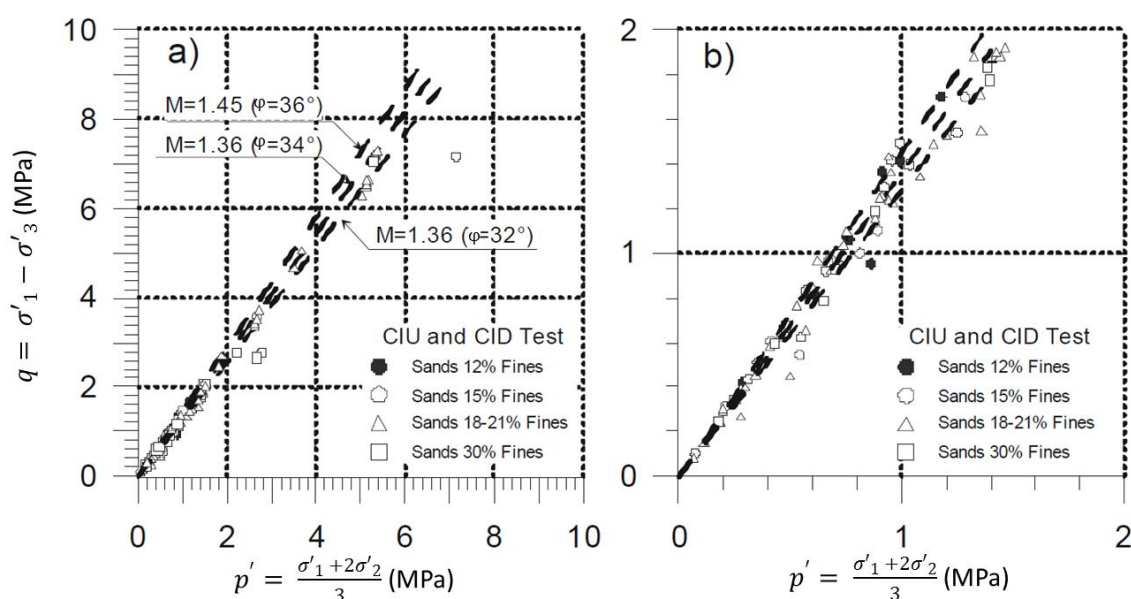


Figura 2.10: Rejeito de cobre. Trajetórias de tensões. a) Todos os testes. b) Detalhe para  $\sigma'_3 < 2$  MPa. Fonte: Adaptado de Campaña e Verdugo (2013).

Nota-se, com base nos trabalhos citados, que dadas as particularidades inerentes aos processos de mineração, a variação dos parâmetros de resistência para os rejeitos de mineração ocorre não só entre diferentes minérios, como também, entre diferentes regiões para obtenção de um mesmo minério, ou diferentes lugares já no interior da barragem de rejeitos. Para exemplificar tal variação, a Tabela 2.10 apresenta faixas de variação para os parâmetros de resistência de rejeitos de mineração.

Tabela 2.10: Parâmetros de resistência usuais em alguns resíduos de mineração.

Tipo de rejeito	$\Phi^\circ$	$c'$ (kPa)	Fonte
Ouro	23 - 30	0 - 10	Robertson <i>et al</i> (2003); Bedin (2010)
Bauxita	22 a 42	0 a 100	Somogyi & Gray (1977)
Ferro	27 a 37	0 a 2	Hernandez (2002); Ribeiro <i>et al</i> (2003)
Carvão mineral	29 - 37	0 - 25	Hegazy, Cushing e Lewis (2004)
Cobre	32 - 36	0	Campaña e Verdugo (2013)

### 3 DESCRIÇÃO DO CASO

O objetivo principal deste trabalho é explicar como as características geomecânicas do minério de zinco são alteradas ao longo do processo de beneficiamento, resultando em um rejeito final com características bastante peculiares do ponto de vista geotécnico. Essa avaliação pode auxiliar no entendimento do comportamento geomecânico de rejeitos de zinco.

Estas características peculiares foram primeiramente notadas durante o processo de transposição de um rejeito de minério de zinco disposto hidraulicamente em barragem, para uma pilha compactada. Visando o alteamento da pilha em uma geometria com condições de segurança adequadas, foram realizadas campanhas de ensaios para avaliar os parâmetros geotécnicos do material.

Nestas campanhas, notou-se que o rejeito do minério de zinco apresentava teor de umidade elevado, granulometria silto-argilosa de média plasticidade e limite de liquidez de 46% e teor de umidade ótima de compactação de 51,5%, levando ao entendimento de que a amostra é compactada no estado líquido, para a umidade ótima de compactação. Durante a investigação geotécnica percebeu-se que o amolgamento do material reduz a permeabilidade deste, em função da modificação estrutural, tendo sido obtidos coeficientes de condutividade hidráulica de  $6,00 \times 10^{-7}$  cm/s a  $9,48 \times 10^{-7}$  cm/s para amostras deformadas. Em relação à resistência ao cisalhamento do material, as envoltórias de resistência obtidas em ensaios triaxiais não drenados apontaram, em termos de tensões efetivas, um material com  $\Phi' = 38^\circ$  e  $c' = 7$  kPa.

O material disposto no reservatório da barragem foi submetido à processos de drenagem e secagem, visando reduzir seu teor de umidade e posteriormente, transportado e compactado em uma pilha instrumentada com piezômetros e marcos

superficiais. A Figura 3.1 e a Figura 3.2 apresentam a localização dos instrumentos em planta.

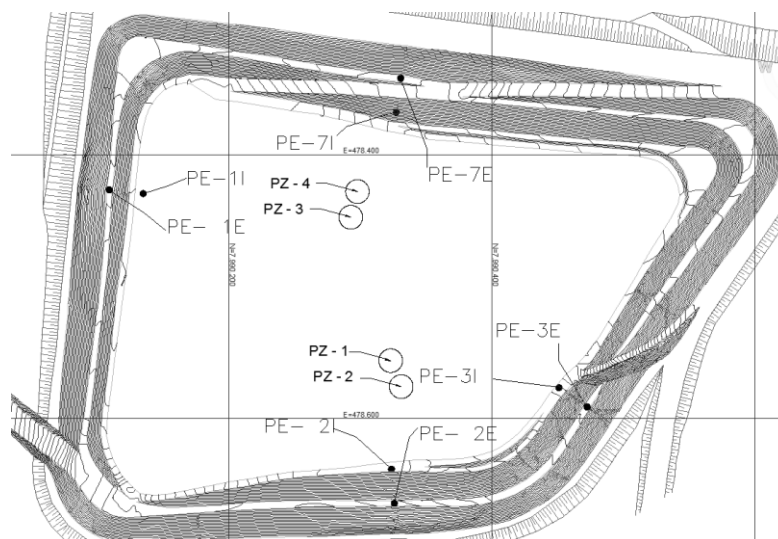


Figura 3.1: Localização dos piezômetros PZ.  
Fonte: Adaptado de Geoconsultoria (2013).

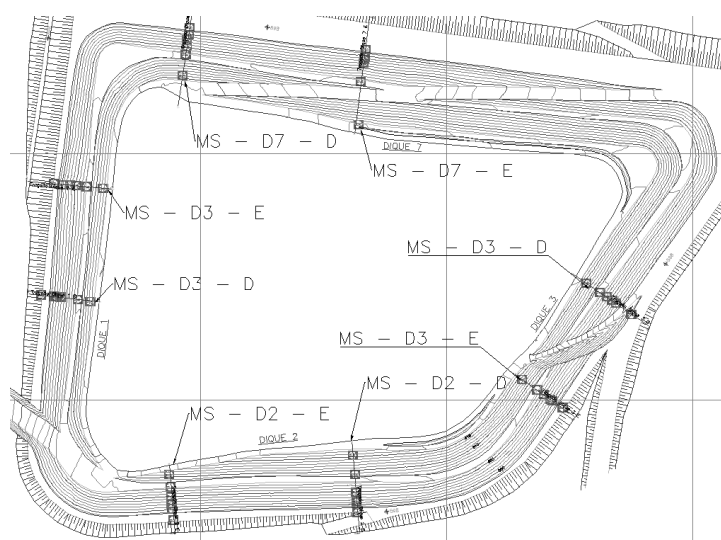


Figura 3.2: Localização dos marcos superficiais MS.  
Fonte: Adaptado de Geoconsultoria (2013.)

Durante os quatro primeiros meses de instrumentação, a pilha foi alteada da cota 559 m à cota 619, resultando em uma elevação total de 20 m. Foram observadas grandes deformações na pilha, destacando-se a medição de

deslocamentos horizontais máximos de 1,7 metros (Figura 3.3) e recalques máximos de 0,8 metros (Figura 3.4) nos marcos superficiais instalados no Dique 3.

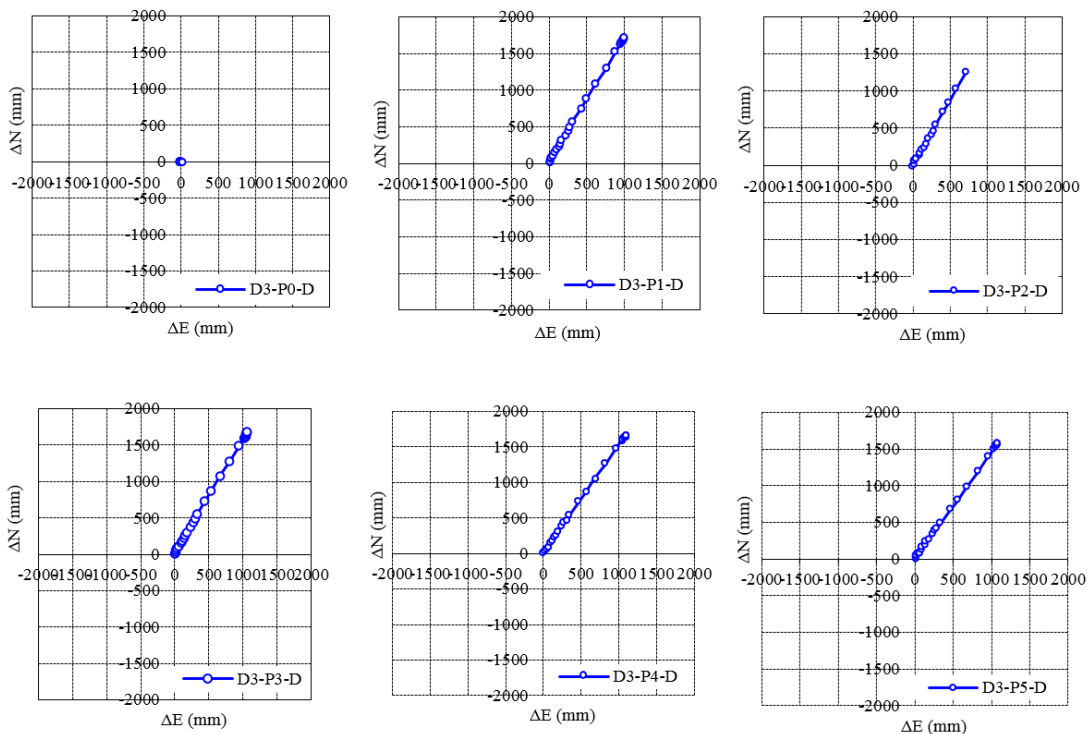


Figura 3.3:Deslocamentos horizontais no Dique 3.  
Fonte: Monitoramento interno VMZ (2014).

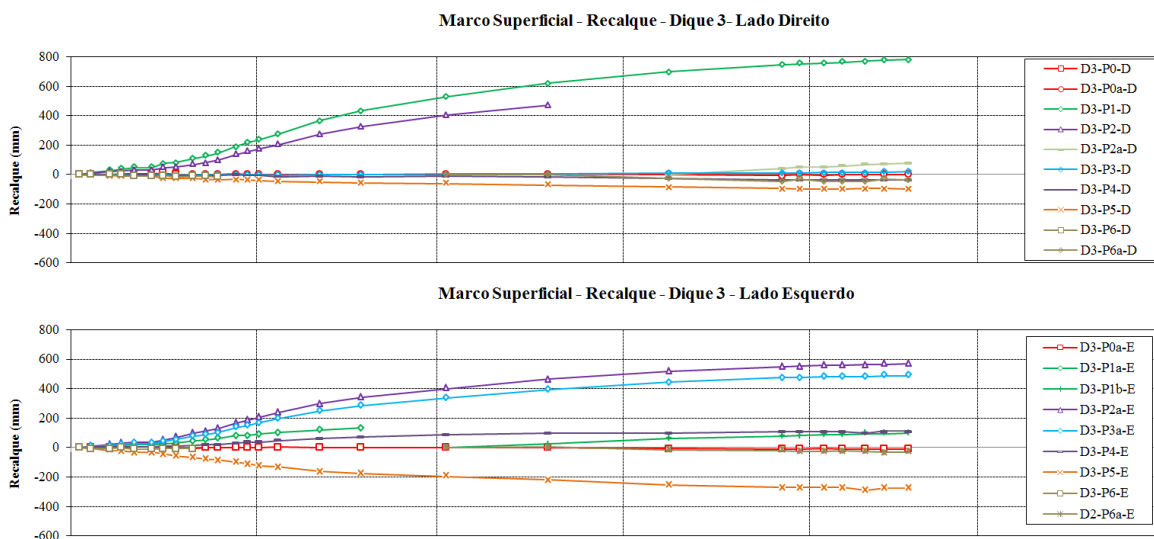


Figura 3.4:Recalques no Dique 3.  
Fonte: Monitoramento interno VMZ (2014).

Também neste período de tempo as poro-pressões geradas no interior da pilha não apresentaram tendência de dissipação. Notou-se uma manutenção dos níveis piezométricos medidos pelos piezômetros. A Figura 3.5 apresenta as séries de leituras realizadas nos piezômetros, bem como a pluviometria diária no período de monitoramento. Observa-se que independente da pluviometria, os níveis piezométricos se mantêm estáveis, sendo notada alguma alteração para mais nos piezômetros PZ-1 e PZ-4.

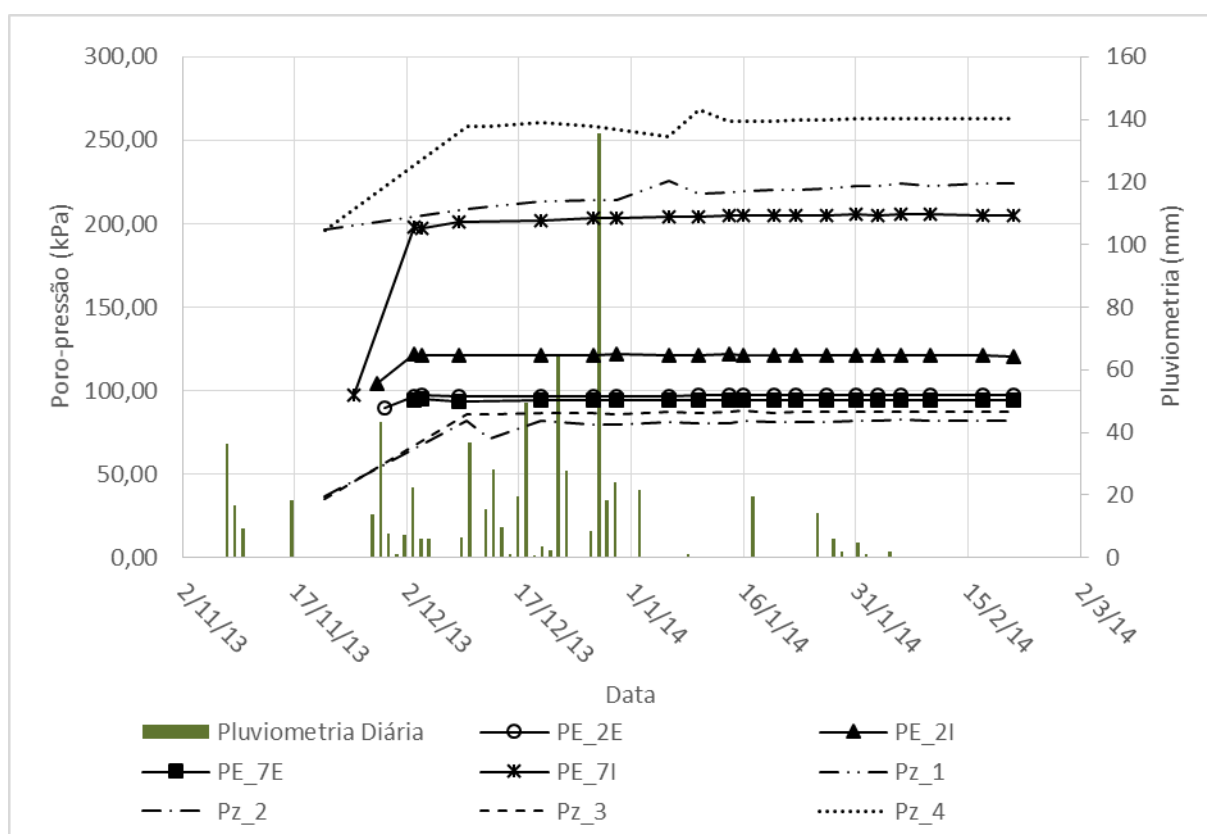


Figura 3.5: Relação entre piezometria e pluviometria durante os 3 primeiros meses de instrumentação.

Fonte: Monitoramento interno VMZ (2014).

Uma vez observadas estas condições na instrumentação, realizou-se nova campanha de ensaios geotécnicos, na qual, na pilha compactada, os ensaios triaxiais não drenados indicaram em termos de tensões efetivas,  $\Phi' = 33,7^\circ$  e  $c' = 17,4\text{kPa}$ . Ademais, os ensaios indicaram um material com granulometria silto-arenosa com umidade ótima de compactação média de 42,9% e limite de liquidez de 44,3%, o qual, apesar de não ser superior à umidade ótima de compactação, é bastante próximo desta, corroborando com o comportamento atípico supracitado.

## 4 COMPONENTE EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados os procedimentos realizados na parte experimental deste trabalho. Para atender aos objetivos do trabalho, a metodologia baseou-se no estudo da variação dos parâmetros geotécnicos do minério de zinco ao longo do processo de beneficiamento de modo a interpretar o comportamento do rejeito mineral disposto em pilha compactada.

### 4.1 OBTENÇÃO DOS DADOS

Para a realização desta pesquisa, a VMZ Três Marias forneceu amostras de material retirado de diferentes pontos da planta de beneficiamento, os quais estão destacados na Figura 4.1. Os ensaios realizados nestas amostras permitiram avaliar a variação dos parâmetros geotécnicos ao longo do processo de beneficiamento.

As amostras dos materiais foram coletadas no estado deformado, na forma e consistência relativa à etapa do processamento a que havia sido submetida e então, transportadas envoltas em sacos plásticos que garantiram uma boa vedação do material. Uma vez recebidas, as amostras receberam as seguintes identificações:

- 01 – Minério bruto
- 02 – Minério concentrado
- 03 – Minério autoclavado
- 04 – Retido nos filtros – Rejeito novo
- 05 – Pilha – Rejeito antigo.

Até a amostra 04, todas as amostras foram retiradas em sequência na planta de beneficiamento, sendo provenientes da mesma frente de lavra tendo, portanto, o mesmo material de origem. A amostra 05 foi retirada da pilha de rejeito, dessa forma, a idade e origem (frente de lavra) deste material são variáveis de difícil determinação, uma vez que o material da pilha não passa por controle de disposição.

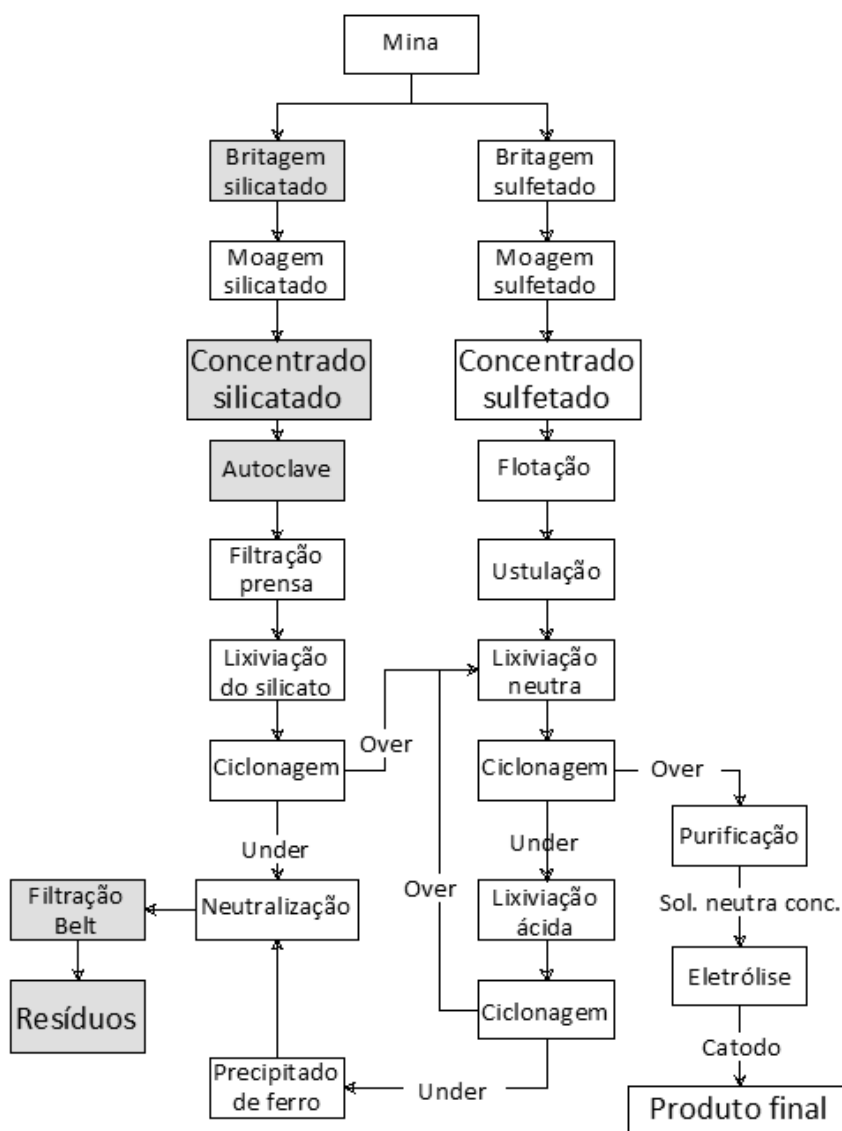


Figura 4.1: Amostras fornecidas para ensaio.  
Fonte: A Autora (2015).

## 4.2 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS AO LONGO DO BENEFICIAMENTO

De acordo com Souza (2007), o processo “Integrado-Silicato-Sulfeto”, utilizado atualmente nas plantas de beneficiamento de minério de zinco no Brasil resulta em um produto final com no mínimo, 96% em zinco puro. Conforme detalhado no Item 2.1.1, este processo consiste em uma série de tratamentos químicos e processos físicos no material ao longo da cadeia produtiva que ao final, transforma-se basicamente em 2 principais “produtos: o zinco SHG (*special high grade*) e o rejeito de mineração.

Buscando avaliar como os parâmetros geotécnicos do material variam durante o processo de beneficiamento, em função das reações a que é submetido, a seguir são apresentados os ensaios que foram realizados nas amostras destacadas pela Figura 4.1.

O programa de ensaios geotécnicos de caracterização, compactação e curvas de retenção foi conduzido nos Laboratórios de Pesquisas Geotécnicas e de Ensaios Especiais em Solos, situados nas dependências do Centro de Pesquisas em Engenharia Civil – CESEC/UFPR. Os ensaios de caracterização química e mineralógica foram realizados no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas – LAMIR/UFPR, e os ensaios para determinação da resistência não drenada, realizados nas dependências do Laboratório de Materiais e Estruturas – LAME, pertencente ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC.

#### 4.2.1 Preparação das amostras

A preparação das amostras para os ensaios descritos a seguir envolveu inicialmente a determinação da umidade “natural” das amostras, ou seja, o teor de umidade que as amostras apresentavam quando foram recebidas. Uma vez que todas as amostras estavam envoltas duplamente em sacos plásticos, este teor de umidade pode representar um número bastante próximo do teor de umidade em campo.

Após a determinação da umidade natural, as amostras passaram por procedimentos de secagem ao ar, destorroamento, peneiramento e determinação da umidade higroscópica conforme os procedimentos recomendados pela norma brasileira NBR 6457/86. Uma vez preparadas, as amostras foram armazenadas em sacos plásticos identificados e vedados.

#### 4.2.2 Caracterização e índices físicos

A caracterização do material foi realizada com o objetivo de classificar os materiais de acordo com o comportamento da engenharia. Das (2011) destaca que este comportamento é regido pela distribuição granulométrica, sendo a plasticidade influenciada pelos argilominerais presentes no material. Para isso, foram realizados os seguintes ensaios:

### Peso específico real dos grãos

O peso específico real dos grãos varia de acordo com a composição do material, sendo maior quanto maior for a concentração materiais com maior peso atômico. A densidade real dos grãos desconsidera os espaços vazios formados entre os grãos da amostra e, de acordo com Brasil (2007), é obtida pela razão entre sua densidade e a densidade de uma substância padrão, usualmente a água.

O peso específico real dos grãos das amostras foi definido a partir de ensaios realizados de acordo com a norma do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem DNER-ME 084/95. A norma define que a amostra a ser ensaiada deve ser seca em estufa até apresentar massa constante e apresentar granulometria passante na peneira de abertura 4,8 mm, e retida na peneira de abertura 0,075 mm.

Ao início do ensaio, foi obtida a massa do picnômetro seco e limpo (Figura 4.2, (a)), ao qual, em seguida, adicionou-se a amostra e solo a ser ensaiada (Figura 4.2, (b)). Para a realização dos ensaios, foram utilizados picnômetros de 50 mL, e aproximadamente 10 g de amostra. Aos picnômetros contendo amostra foi adicionada água destilada em quantidade suficiente para que a amostra fosse recoberta e, em seguida, estes foram levados a uma chapa de aquecimento (Figura 4.2, (c)), na qual permaneceram em fervura por tempo suficiente para que todo o ar fosse expulso das amostras.

A norma recomenda um tempo mínimo de 15 minutos de fervura, porém destaca-se que para as amostras 04 – Retido nos filtros – Rejeito novo, e 05 – Pilha – Rejeito antigo, foram necessários aproximadamente 60 minutos de fervura para que esta condição fosse confirmada.

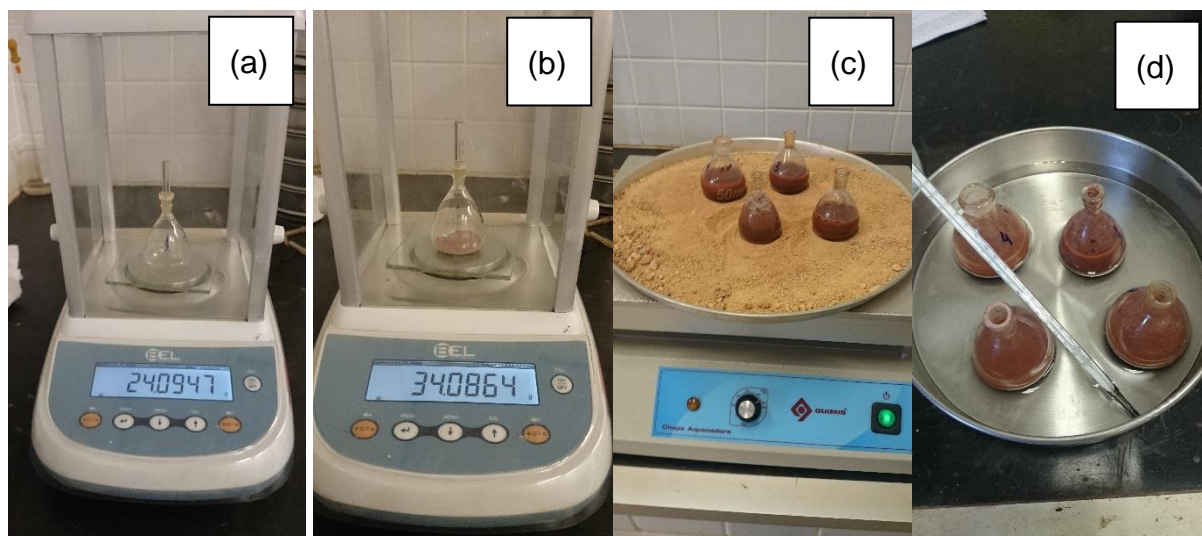


Figura 4.2: Determinação da massa específica real dos grãos.  
Fonte: A Autora (2015).

Após a fervura, os picnômetros foram resfriados em banho maria (Figura 4.2, (d)), cuja temperatura ao final do resfriamento foi registrada para eventuais correções nos cálculos. Uma vez em temperatura ambiente, os picnômetros foram preenchidos com água destilada até o traço de referência e enxugados. A nova massa do conjunto foi anotada e o picnômetro foi esvaziado e higienizado. Em seguida, preenchido com água destilada até o traço de referência e enxugado e pesado. O cálculo realizado para determinar a densidade real do material foi conduzido de acordo com o predisposto pela norma DNER-ME 084/95.

Foram encontrados pesos específicos de 3,24, 3,73, 3,84, 2,89 e 3,47 g/cm<sup>3</sup>, para as amostras 01, 02, 03, 04 e 05, respectivamente. Esta variação do peso específico real dos grãos destacada pela amostra 04 mostra que nesta amostra, todos os minerais de interesse já foram retirados. Por outro lado, o aumento do peso específico a amostra 04 para a amostra 05 ressalta o fato de que estas amostras não são provenientes da mesma frente de lavra, alterando assim, sua composição básica.

## Granulometria

A caracterização dos materiais quanto à granulometria tem fundamental importância, uma vez que está condiciona fatores como permeabilidade, arranjo estrutural e resistência do material.

As curvas granulométricas das amostras foram determinadas de acordo com os procedimentos descritos pela norma brasileira ABNT NBR 7181. De acordo com a norma, a determinação da granulometria do material é feita através da combinação de ensaios de peneiramento e sedimentação. O ensaio se iniciou com a determinação da umidade higroscópica dos materiais que seriam ensaiados. Estes materiais, passantes na peneira com abertura de 2 mm, eram pesados e a eles, adicionava-se 125 mL do defloculante hexametáfosfato de sódio, permanecendo em repouso por 24 horas.

Uma vez passado o período de 24 horas, as soluções eram vertidas em copos agitadores, no qual permaneciam sob dispersão mecânica por 15 minutos (Figura 4.3, (a)). Transcorrido este tempo, as amostras eram vertidas em provetas com capacidade de 1000 mL então iniciavam-se as leituras do densímetro (Figura 4.3, (b) e (c)), correspondentes aos tempos de sedimentação de 0,5, 1, 2, 4, 8, 15 e 30 minutos, 1, 2, 4, 8 e 24 horas. Juntamente à leitura do densímetro era também aferida a temperatura do meio, de modo a permitir a correção da densidade em função da temperatura.

Finalizada a etapa de sedimentação, o material da proveta era então vertido sobre a peneira de 0,075 mm de abertura. Este material era então submetido à lavagem sob água corrente (Figura 4.3, (d)) e então, seco novamente em estufa. Após a secagem, o material era submetido ao peneiramento fino, passando pelas peneiras de 1,2, 0,6, 0,42, 0,25, 0,15 e 0,075 mm de abertura (Figura 4.3, (e)). Os

cálculos utilizados para determinar as porcentagens de material fino e em suspensão foram feitos de acordo com o preconizado pela NBR supracitada.

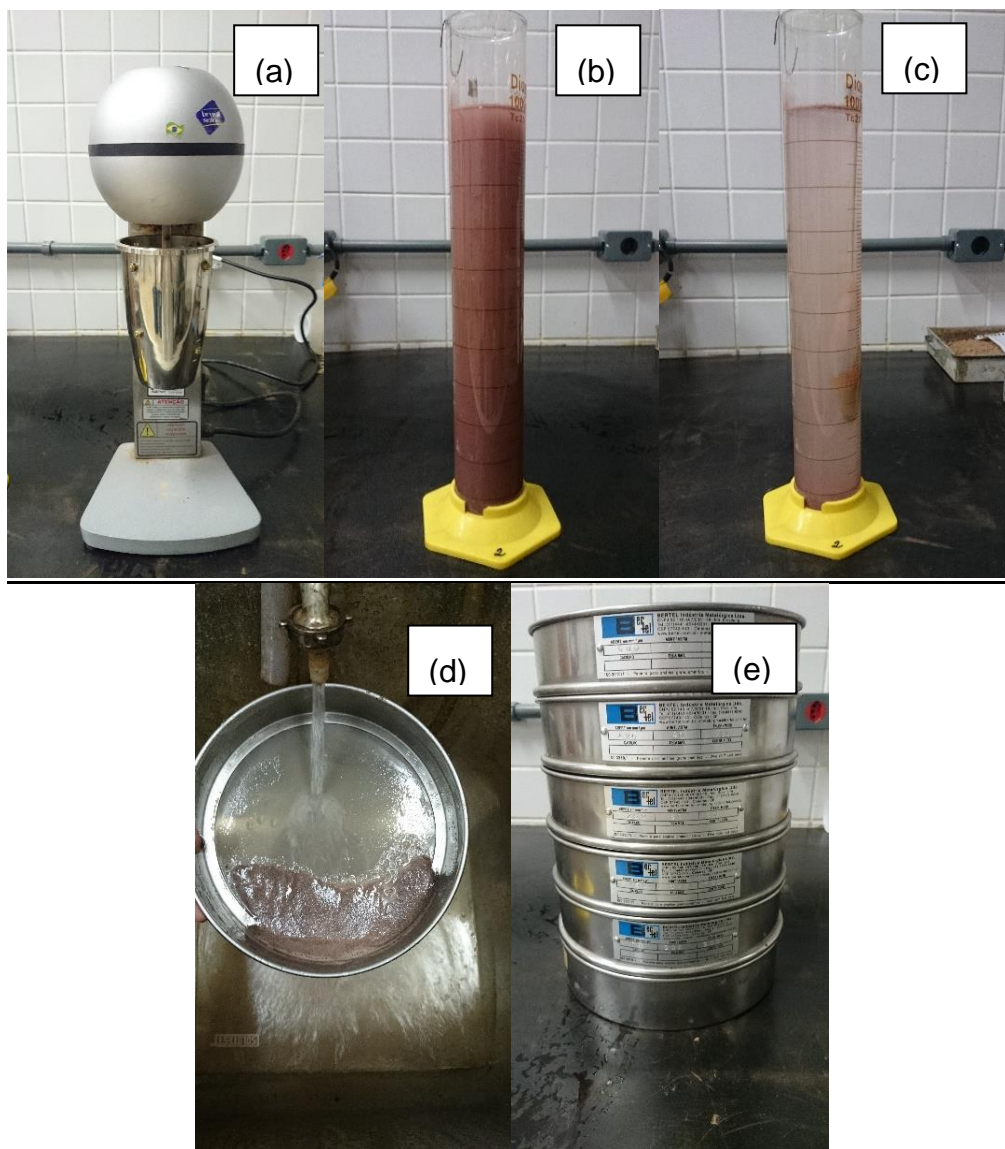


Figura 4.3: Análise granulométrica.  
Fonte: A Autora (2015).

As análises granulométricas realizadas nas amostras resultaram nas curvas apresentadas nas figuras 4.4, 4.5 e 4.6. Através da análise granulométrica realizada, observou-se que à medida que é beneficiado, o material tende a apresentar uma granulometria mais fina, em função dos processos de extração mineral à que é submetido.

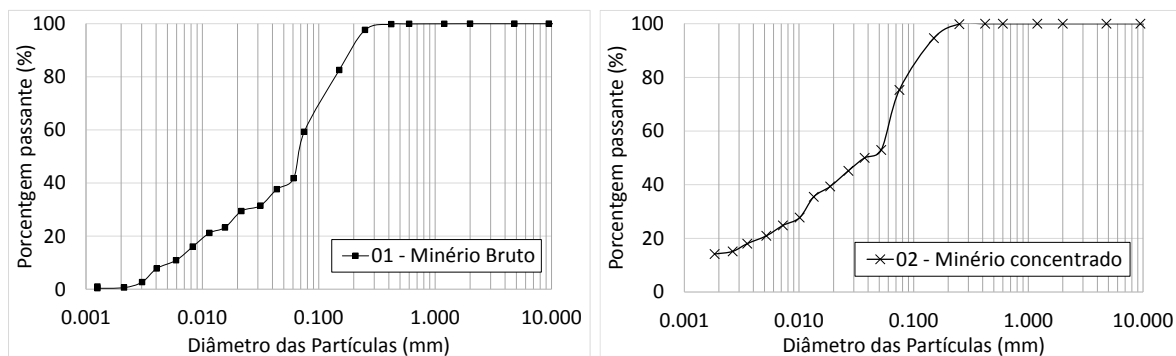


Figura 4.4: Granulometria das amostras 01 – Minério bruto, e 02 – Minério concentrado.

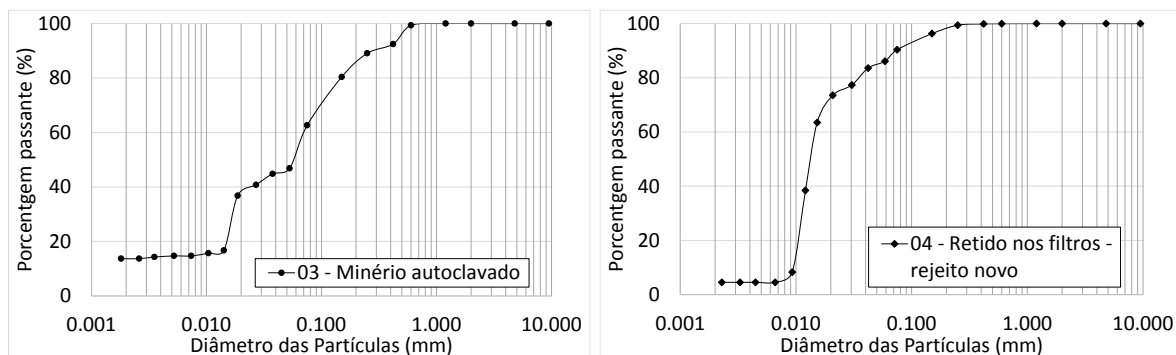


Figura 4.5: Granulometria das amostras 03 – Minério autoclavado, e 04 – Retido nos filtros – Rejeito novo.

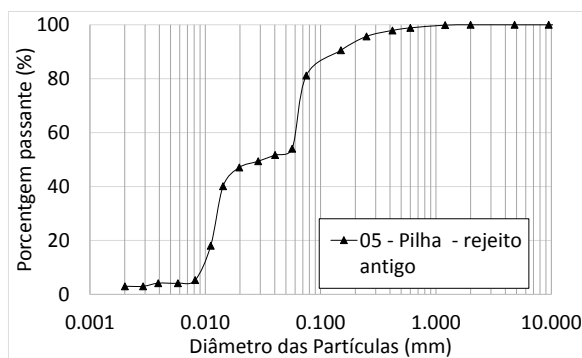


Figura 4.6: Granulometria da amostra 05 – Pilha – Rejeito antigo.

### Limites de Atterberg

A plasticidade dos solos é descrita por Craig (2013) como “a capacidade do solo de sofrer deformação irreversível sem se romper ou esfarelar”. Esta característica é determinada observando-se o comportamento do material em presença de água, configurando os limites de liquidez e plasticidade do material. Tais parâmetros são essenciais para a correta classificação de solos com granulometria predominantemente fina, como é o caso dos materiais estudados neste trabalho.

A determinação do Limite de Liquidez foi realizada de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 6459, e o Limite de Plasticidade, determinado pela NBR 7180. Ambos os ensaios foram realizados por via seca. A diferença entre estes limites representa o intervalo de umidade em que o solo se apresenta plástico. Tais parâmetros são utilizados nesta pesquisa para a caracterização do material quanto ao comportamento geotécnico esperado.

Os ensaios realizados mostraram que o material apresenta uma grande variação nos Limites de Atterberg, passando de um material com características não plásticas até atingir uma alta plasticidade. Os limites de liquidez e plasticidade obtidos nos ensaios são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Limites de Atterberg

<b>Amostra</b>	<b>Limite de Liquidez</b>	<b>Limite de Plasticidade</b>
01 – Minério bruto	11,1	NP
02 – Minério concentrado	12,7	11,8
03 – Minério autoclavado	19,0	16,7
04 – Retido nos filtros – Rejeito novo	69,0	53,3
05 – Pilha – Rejeito antigo	59,7	35,4

### 4.2.3 Compactação

A compactação consiste na densificação de um material pela aplicação de energia mecânica, de modo a aumentar o peso específico deste melhorando de maneira indireta, sua resistência. Das (2011) afirma que o formato dos grãos, granulometria, peso específico e mineralogia do material são parâmetros que exercem grande influência sobre o peso específico seco máximo e a umidade ótima de compactação.

Nas amostras de material estudadas, buscou-se avaliar a variação destes parâmetros em função da evolução do material no processo de beneficiamento. Os ensaios de compactação foram realizados de acordo com o preconizado pela norma ABNT NBR 7182.

Na realização dos ensaios, as amostras foram secadas à temperatura ambiente até o ponto de umidade higroscópica e, em seguida, destorroadas para uma granulometria passante na peneira de 4,8 mm de abertura. Os ensaios foram realizados compactando-se o solo em 3 camadas, escarificadas entre si, sendo as camadas compactadas com 26 golpes à energia Proctor Normal.

Uma vez aferida a massa do conjunto Molde cilíndrico – solo compactado, o corpo de prova era então extraído e, do seu interior, retiravam-se 3 amostras para a determinação do teor de umidade. O material restante era então destorroado e acrescido de uma nova quantidade de água, para a obtenção de um novo ponto na curva de compactação. Todos os procedimentos foram realizados de modo a se obter curvas de compactação com 5 pontos, sendo 2 pontos no ramo seco, 1 na umidade ótima e outros 2 pontos, no ramo úmido.

As figuras 4.7 a 4.9 apresentam as curvas de compactação obtidas para as cinco amostras estudadas. Observa-se uma grande variação nos parâmetros ótimos de compactação, destacando-se os valores de umidade ótima de compactação e massa específica seca máxima obtidos para as amostras 04 e 05.

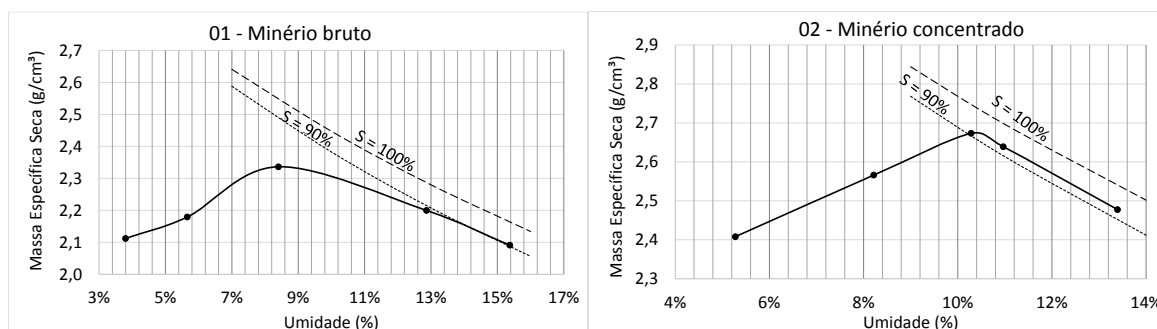


Figura 4.7: Curvas de compactação das amostras 01 - Minério bruto e 02 - Minério concentrado.

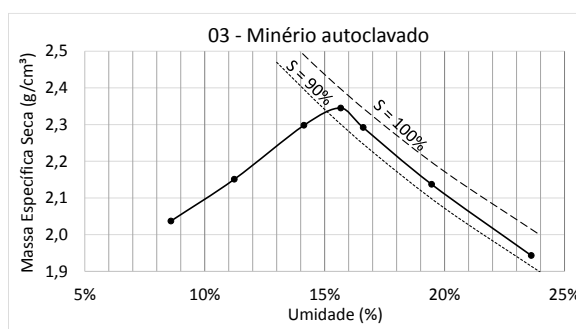


Figura 4.8: Curva de compactação da amostra 03 - Minério autoclavado

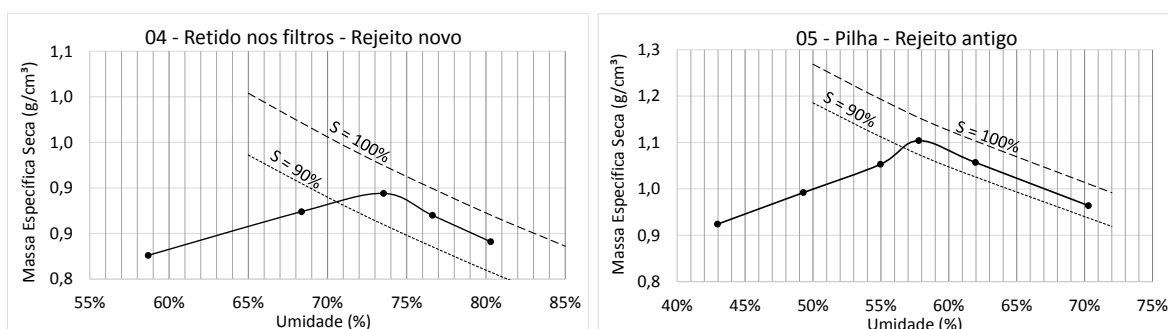


Figura 4.9. Curvas de compactação das amostras 04 - Retido nos filtros - Rejeito novo. e 05 - Pilha - Rejeito antigo.

#### 4.2.4 Composição químico-mineralógica

Foram determinadas as características químico-mineralógicas dos materiais ao longo do processo de beneficiamento, de modo que se obtivesse um panorama das alterações sofridas pelos minerais constituintes da amostra, quando submetida aos diferentes processos da planta metalúrgica.

A preparação das amostras para os ensaios de caracterização químico-mineralógica baseou-se na pulverização do material para uma a obtenção do pó total (#325) para ensaio. Além das amostras de minério citadas na Figura 4.1, nesta etapa foi também analisada uma amostra de sílica gel comercial moída, visando a comparação dos difratogramas das amostras com o difratograma da sílica gel, de modo a confirmar ou não a formação deste material nas etapas finais do beneficiamento.

A composição química das amostras foi determinada semi quantitativamente através do método de Fluorescência de Raios X. Para a realização do ensaio, as amostras previamente pulverizadas foram prensadas em matriz de ácido bórico na forma de pastilhas e encaminhadas para análise. Na análise foi empregado o Espectrômetro de Fluorescência de Raios X da marca PANalytical, modelo Axios Max, com tubos de raios X compostos de Ródio (Rh).

A Tabela 4.2 apresenta a composição química das amostras de material analisadas. Por se tratar de uma análise semi quantitativa, os números apresentados podem ter uma variação de até 10%, em função do método analítico utilizado. Dessa forma, os resultados obtidos na análise são orientativos, e apontam tendências na variação da concentração dos compostos presentes nas amostras.

Tabela 4.2. Composição química das amostras.

<b>Amostra 01 – Minério bruto</b>							
<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>ZnO</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>BaO</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>
20,9	16,7	15,4	7,8	6,8	1,8	0,5	0,3
<b>PbO</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>MnO</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>P.F.</b>		
0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	29,21		
<b>Amostra 02 – Minério concentrado</b>							
<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>ZnO</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>BaO</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>
9,7	11,7	38,6	7,2	14,9	2,5	0,4	0,8
<b>PbO</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>MnO</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>P.F.</b>		
0,5	0,3	0,1	0,1	0,1	13,28		
<b>Amostra 03 – Minério autoclavado</b>							
<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>ZnO</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>BaO</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>
3,6	5,3	52,5	5,8	11,4	1,9	0,3	6,9
<b>PbO</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>MnO</b>	<b>CuO</b>	<b>P.F.</b>	
0,5	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	11,25	
<b>Amostra 04 – Retido nos filtros – Rejeito novo</b>							
<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>ZnO</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>BaO</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>
10,1	1,7	2,9	7,8	26,2	1,2	0,3	19,6
<b>PbO</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>MnO</b>	<b>CuO</b>	<b>SrO</b>	<b>P.F.</b>
0,8	0,2	<0,1	0,1	0,1	<0,1	0,1	28,72
<b>Amostra 05 – Pilha – Rejeito antigo</b>							
<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>ZnO</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>PbO</b>
4,6	0,4	7,6	13,8	31,7	2,0	13,4	0,8
<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>MnO</b>	<b>CuO</b>	<b>SrO</b>	<b>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>P.F.</b>
0,1	0,1	0,2	0,4	<0,1	<0,1	<0,1	22,99

A composição mineralógica das amostras foi definida por meio de difratogramas obtidos pela técnica de difração de raios X. De acordo com Oliveira (2006), esta técnica permite identificar de maneira qualitativa, a presença de minerais cristalinos na amostra ensaiada, tendo como princípio o registro dos ângulos e distâncias interplanares lidos pelo equipamento em função do mineral difratado. O autor explica que “cada mineral gera um conjunto característico de reflexões segundo ângulos  $\Theta$ , que podem ser convertidos nos espaços interplanares formados por seus planos cristalinos”. Em complemento, Martins (2006) afirma que é

possível identificar a presença de fases amorfas (como é o caso da sílica gel) através do aparecimento de halos no difratograma.

A caracterização mineralógica do material consistiu na confecção de pastilhas de material pulverizado (Figura 4.10), as quais foram ensaiadas em um Difratorômetro de Raios X da marca PANalytical, modelo Empyrean, com detector X'Celerator (radiação Cu  $\kappa\alpha$ , varredura de  $2\theta$  3,5/70, 30mA e 40kV). Os difratogramas obtidos foram interpretados com o auxílio do software Philips X'Pert Suite, com banco de dados compatível com o banco de dados PDF-2, do ICDD (*International Centre for Diffraction Data*).

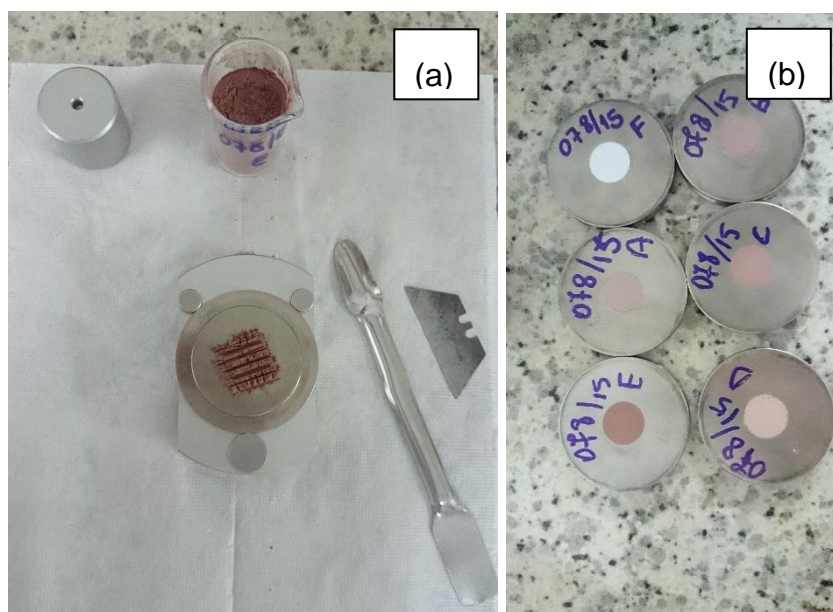


Figura 4.10: Preparação de pastilhas para leitura no em difratograma de Raios X. (a) Preparação da pastilha. (b) Pastilhas prontas.  
Fonte: A Autora (2015).

A Figura 4.11 apresenta os difratogramas obtidos tanto para as amostras do material de estudo, quanto para a amostra de sílica gel moída. Nota-se o surgimento de picos referentes a diferentes minerais à medida que as amostras evoluem no processo de beneficiamento, além da redução na intensidade dos picos dos minerais principais (dolomita e willemita).

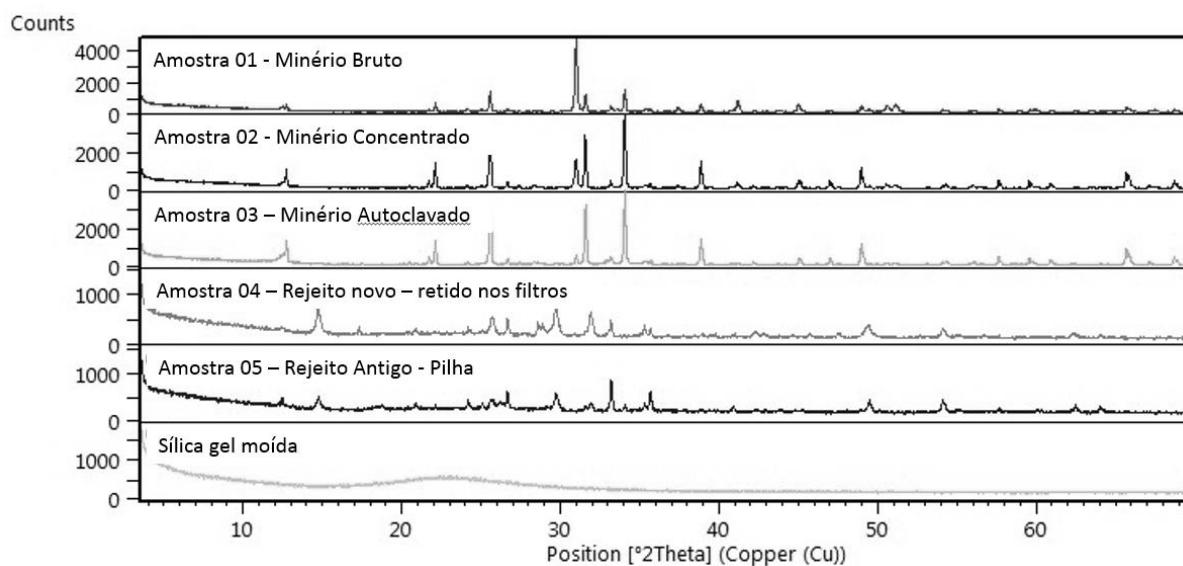


Figura 4.11. Difratomogramas das amostras estudadas.

#### 4.2.5 Determinação da Curva Característica

Em se tratando do comportamento do solo em condição não saturada, a curva de retenção de água apresenta o parâmetro mais importante neste cenário: a sucção. A curva de retenção, ou curva característica é expressa graficamente pela relação entre a sucção exercida pela amostra em determinado teor de umidade volumétrica.

Os ensaios para a definição das curvas características foram realizados em corpos de prova obtidos a partir de amostras compactadas na umidade ótima e massa específica seca máxima. De cada amostra compactada, eram moldados 11 corpos de prova em anéis metálicos de 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura (Figura 4.12), os quais foram ensaiados através do método do papel filtro, descrito por Marinho (1994) e normalizado pela ASTM D 5298/03. Este método foi escolhido por permitir a aferição de altos níveis de tensão, podendo ir de zero a 29 MPa, sendo esta a máxima sucção para que o papel absorva água (MARINHO, 1994).

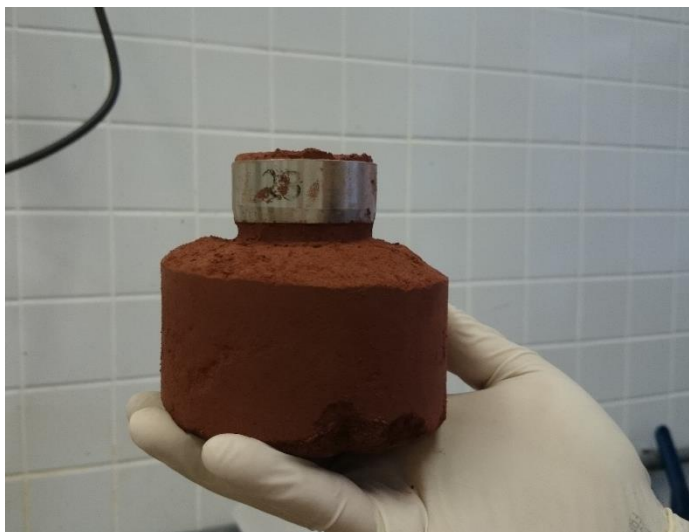


Figura 4.12: Moldagem dos anéis a partir de corpo de prova compactado. Fonte: A Autora (2015).

O ensaio para obtenção das curvas completas foi realizado em 2 ciclos de 20 dias cada. No primeiro ciclo, dos corpos de prova moldados para o ensaio, 1 deles foi mantido na umidade ótima de compactação, 5 corpos de prova foram secados ao ar, e os outros 5, umedecidos. Os corpos de prova foram então ensaiados fechando o primeiro ciclo de 20 dias. No segundo ciclo, os corpos de prova que inicialmente foram secos ao ar foram então umedecidos, e os corpos que haviam sido umedecidos, passaram pelo processo de secagem ao ar, sendo então procedido novamente o ensaio.

Desta forma, foi possível obter curvas de retenção com uma boa distribuição de teores de umidade volumétrica ao longo da curva para todas as amostras, com exceção da amostra 05 – Pilha – Rejeito antigo. Nesta amostra, os corpos de prova com alto grau de saturação apresentaram a formação, aparentemente, de cristais minerais, os quais atacaram o papel filtro, inutilizando-o, conforme pode ser observado pelas imagens apresentadas na Figura 4.13.



Figura 4.13: Ataque ao papel filtro em anéis próximos à saturação na amostra 05 - Pilha - Rejeito antigo.  
Fonte: A Autora (2015).

A sucção mátrica nos corpos de prova foi determinada pela colocação do papel filtro *Whatman 42* em contato direto com a massa de solo, enquanto que a sucção total foi determinada através da colocação de um espaçador entre o papel filtro e a massa de solo, evitando o contato direto destes. Dessa forma, em um mesmo corpo de prova, as sucções mátrica e total foram determinadas por papéis filtro colocados respectivamente, no topo e na base do anel.

Uma vez posicionados os papéis filtro, o corpo de prova era embalado em plástico-filme seguido de papel alumínio e então, acomodadas em uma embalagem de isopor, para evitar perdas de umidade e variações de temperatura. Os anéis foram mantidos nesta condição durante 20 dias – tempo necessário para a equalização das umidades do corpo de prova e dos papéis filtro.

Ao final do processo de equalização (Figura 4.14), os corpos de prova eram desembulhados e então, o papel filtro era retirado com o auxílio de uma pinça e transferido para uma embalagem zip cuja massa havia sido aferida previamente. Nesta etapa, a transferência do papel filtro para a embalagem zip era feita em um período máximo de 5 segundos, buscando evitar variações no teor de umidade do papel durante a transferência.

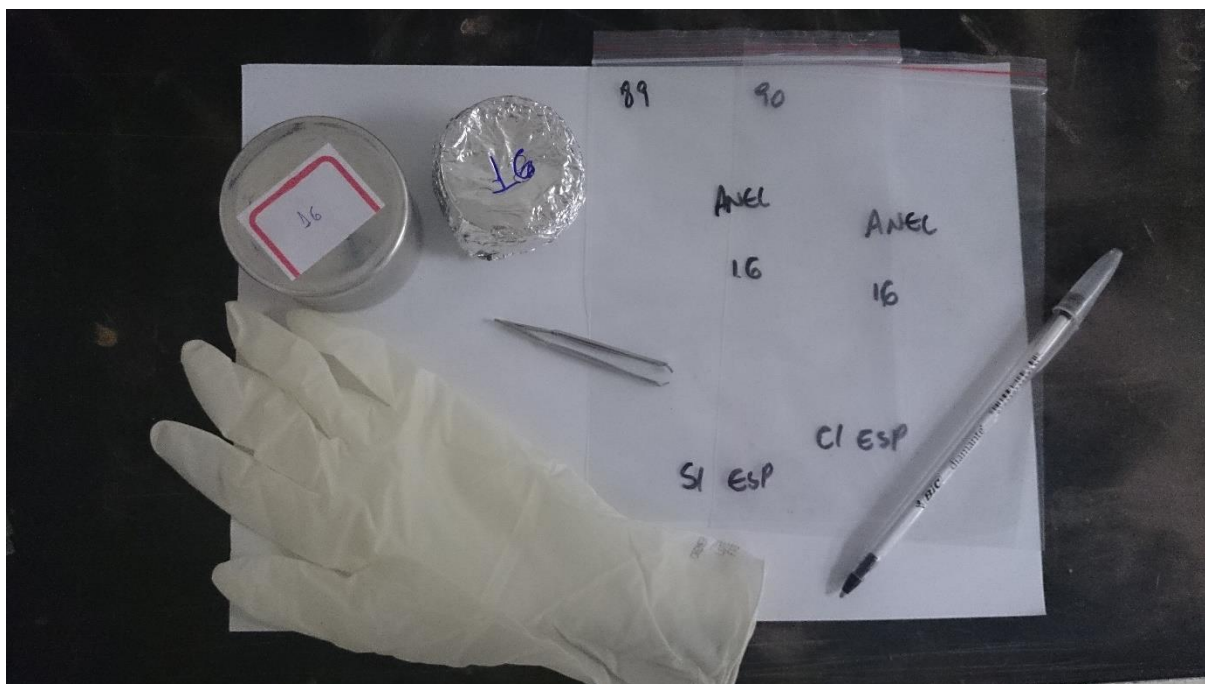


Figura 4.14: Equipamentos para a obtenção de valores de sucção após o período de equalização dos papéis filtro.  
Fonte: A Autora (2015).

Após serem acondicionados em embalagens zip, os papéis filtro úmidos eram pesados e encaminhados para secagem em estufa a 60°C durante um período mínimo de 2 horas. Após a secagem, os papéis filtro retornavam para a embalagem zip e eram novamente pesados. O cálculo das sucções foi realizado de acordo com o sugerido por Chandler et al (1992) em função de curvas de calibração do papel filtro *Whatman 42*, conforme descrito pelas equações (Eq. 3) e (Eq. 4).

$$S_u = 10^{(6,05 - 2,48 \log w)} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$S_u = 10^{(4,84 - 0,0622 \log w)} \quad (\text{Eq. 4})$$

Sendo a (Eq. 3), utilizada para umidade  $w$  do papel filtro inferior a 47%, e a (Eq. 4), para umidade  $w$  do papel filtro igual ou superior a 47%.

Os dados obtidos em laboratório estão apresentados nas figuras 4.15 a 4.19. Os pontos apresentados nas figuras a seguir serviram de base para o ajuste das curvas, apresentados no item de análise dos resultados.

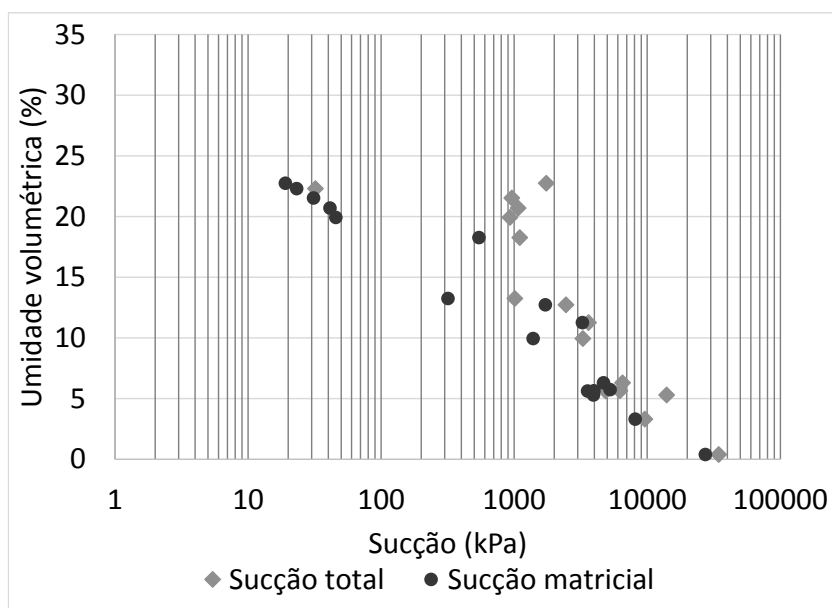


Figura 4.15: Pontos de ensaio para sucção total e matricial Amostra 01 – Minério Moído.

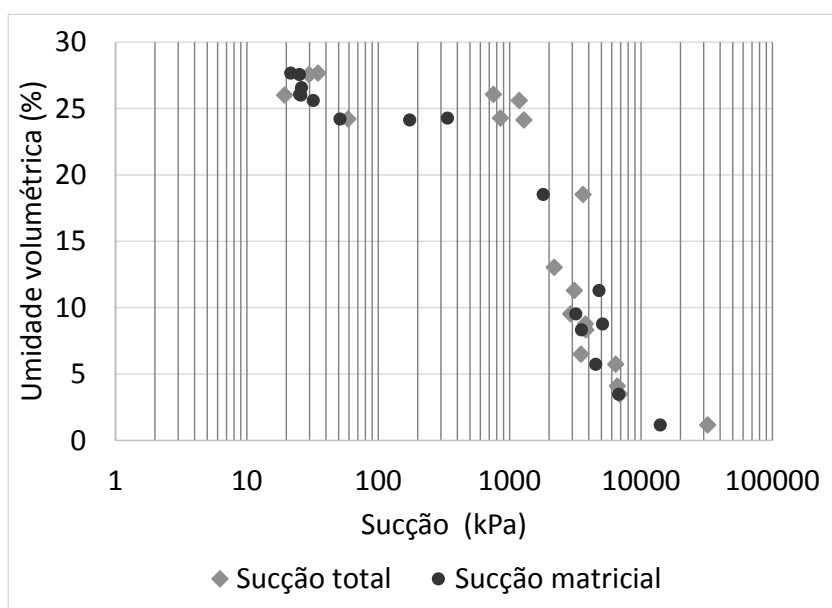


Figura 4.16: Pontos de ensaio para sucção total e matricial Amostra 02 – Minério Concentrado.

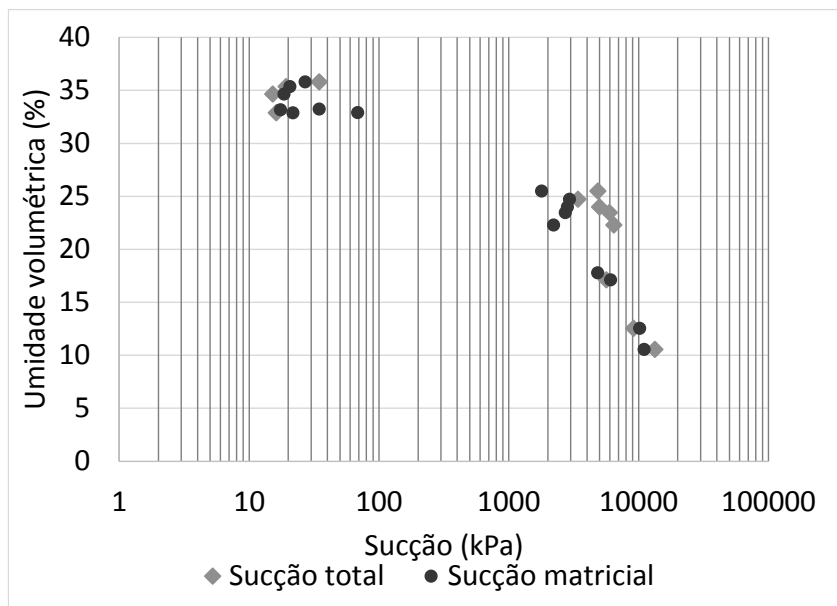


Figura 4.17: Pontos de ensaio para sucção total e matricial Amostra 03 – Minério Autoclavado.

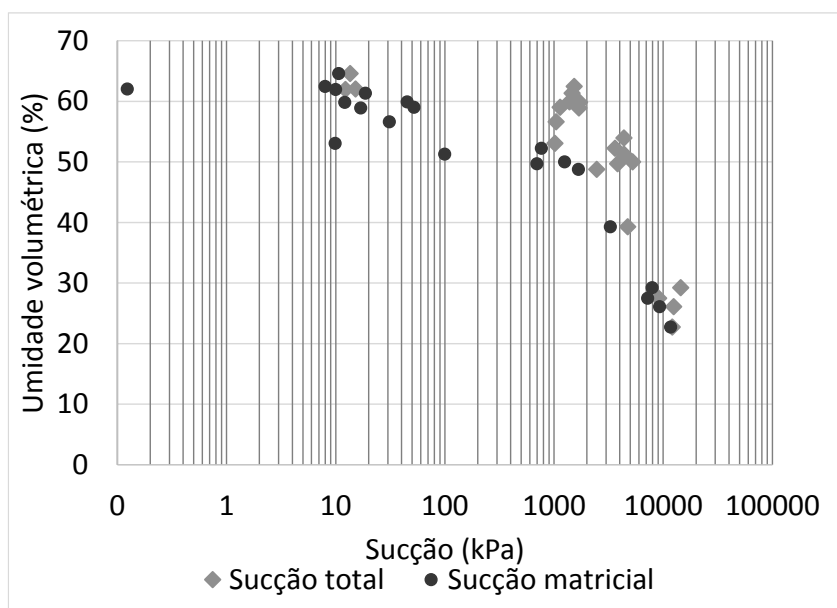


Figura 4.18: Pontos de ensaio para sucção total e matricial Amostra 04 – Rejeito Novo.

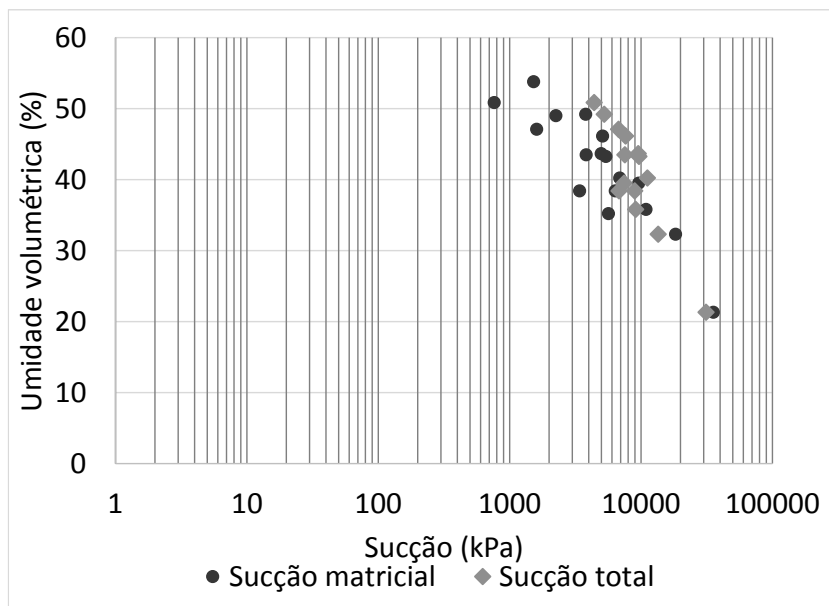


Figura 4.19: Pontos de ensaio para sucção total e matricial Amostra 05 – Rejeito Antigo.

#### 4.2.6 Resistência não drenada

De acordo com Pinto (2006), em situações em que se deseja conhecer a resistência do solo na condição em que ele se encontra, de modo a prever rupturas hipotéticas do material antes da drenagem deste, o parâmetro de maior importância é a resistência não drenada “Su”, principalmente em se tratando de solos moles. Dadas as características dos materiais estudados, considerou-se o comportamento destes, similar ao de solos moles, sendo sua resistência avaliada em parâmetros não drenados.

Buscando obter um indicativo do comportamento da resistência não drenada das amostras ensaiadas em diferentes teores de umidade, foram realizados ensaios de palheta em laboratório. Este ensaio é baseado no ensaio de palheta realizado em campo, e é normalizado pela ASTM D 4648/00. Os ensaios foram realizados no equipamento manual de palheta de laboratório fabricado pela Via Test (Figura 4.20).

Nos ensaios realizados utilizou-se palheta com 12,6 mm de altura e 12,6 mm de altura, combinada a uma mola cuja constante é 0,00122.

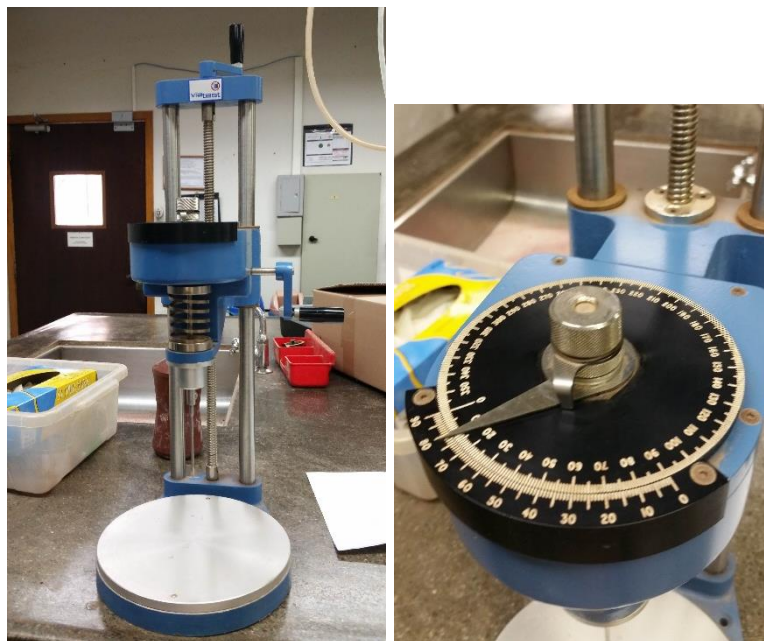


Figura 4.20: Equipamento para ensaio de palheta de laboratório. No detalhe, dispositivo para leitura do torque aplicado.

Fonte: A Autora (2015).

No ensaio, as amostras foram moldadas em um recipiente com altura e diâmetro suficientes para permitir a cravação da palheta a uma profundidade igual a duas vezes sua altura e diâmetro. Nas amostras, a determinação da curva de torque *versus* rotação angular era obtida aplicando-se uma rotação média de 60°/min, realizando-se o procedimento em triplicata (Figura 4.21), da qual posteriormente calculava-se a resistência não drenada média do material.

Para cada amostra, o teor de umidade ao final do ensaio era determinado e a amostra, remoldada em novo teor de umidade. Todas as amostras foram moldadas com teores de umidade próximos ao do limite de liquidez e da umidade ótima de compactação, para então serem ensaiados no aparelho de mini-vane para determinação da resistência não drenada.

Estes teores de umidade de moldagem foram escolhidos tendo em vista que a pilha foi construída segundo os parâmetros ótimos de compactação, ou seja, segundo o teor de umidade ótimo que é superior ao limite de liquidez. Isso equivale dizer que o rejeito foi compactado assim no estado líquido. O limite de liquidez foi escolhido com o objetivo de padronizar um estado de consistência para todas as amostras, ou seja, todas as amostras estavam com teor de umidade referentes ao limite entre os estados plástico e líquido.

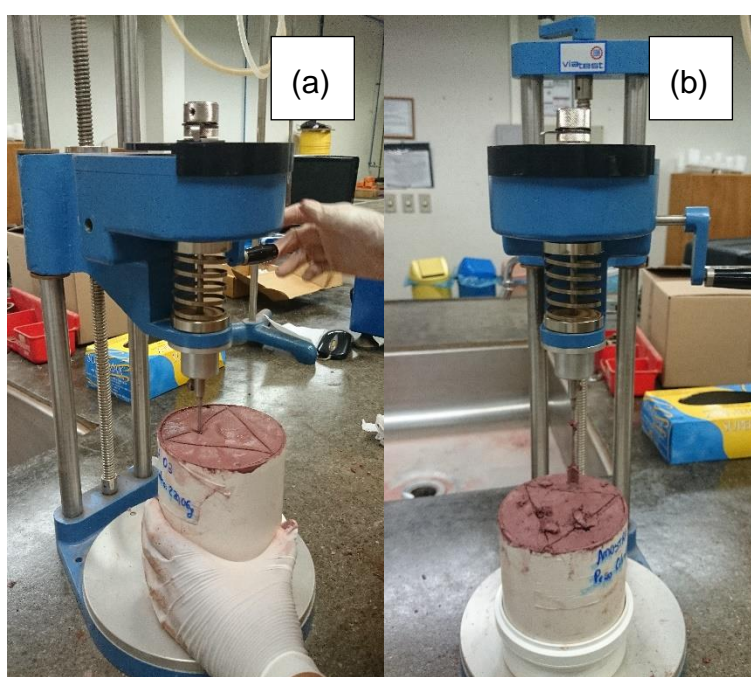


Figura 4.21: Realização do ensaio. (a) Cravação da palheta. (b) Pontos de leitura.  
Fonte: A Autora (2015).

O cálculo da resistência não drenada do material foi realizado de acordo com o descrito na norma ASTM D 4648/00, e os resultados obtidos fornecem uma previsão do comportamento destes materiais sob diferentes teores de umidade. As figuras 4.22 a 4.26 apresentam as curvas de torque x rotação obtidas nos ensaios realizados variando o teor de umidade das amostras conforme descrito anteriormente.

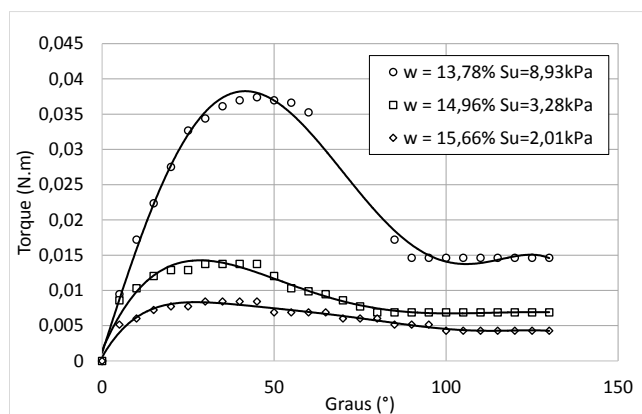


Figura 4.22. Curvas Torque x Rotação. Amostra 01 - Minério bruto.

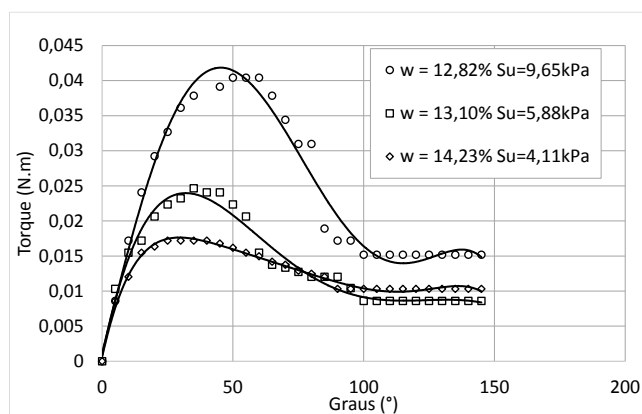


Figura 4.23. Curvas Torque x Rotação. Amostra 02 - Minério Concentrado.

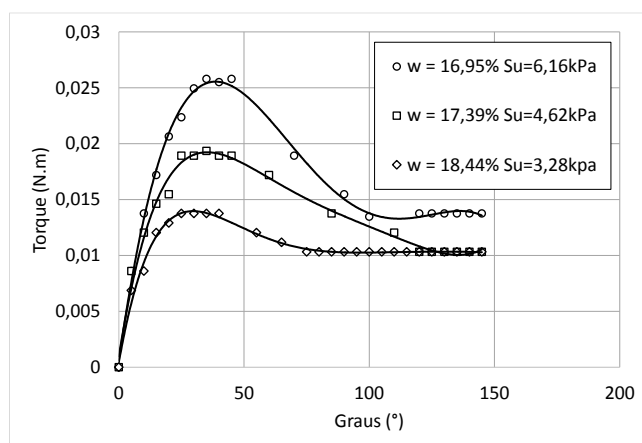


Figura 4.24. Curvas Torque x Rotação. Amostra 03 - Minério Autoclavado.

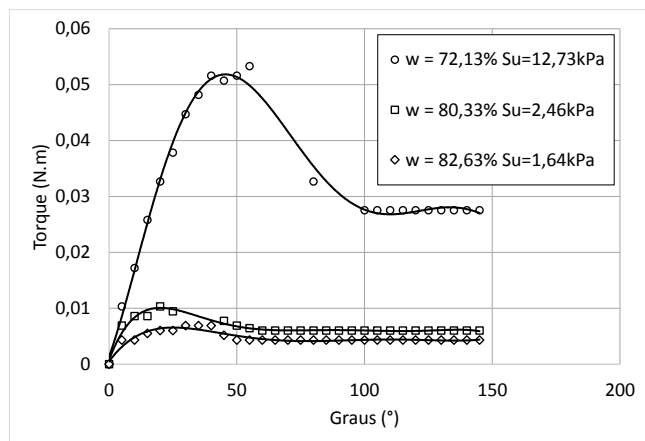


Figura 4.25. Curvas Torque x Rotação Angular. Amostra 04 – Retido nos filtros – Rejeito novo.

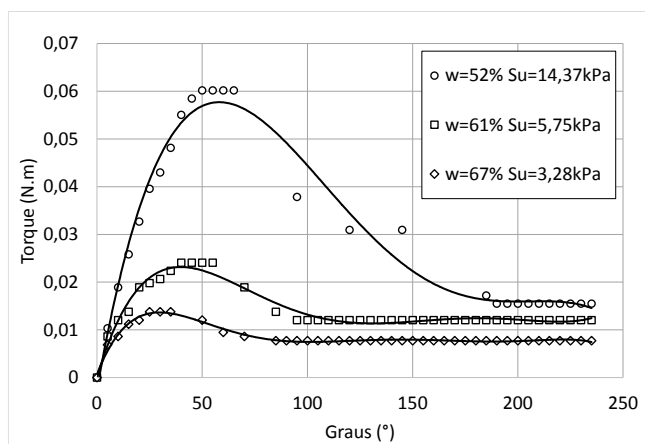


Figura 4.26. Curvas Torque x Rotação Angular. Amostra 5 – Pilha – Rejeito antigo.

## 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Conforme visto no capítulo 2.1.1, para que o zinco comercial apresente um teor de pureza mínimo de 96%, é necessário que o minério bruto passe por diversos processos de natureza físico-química os quais visam eliminar impurezas do material.

Neste trabalho buscou-se avaliar os efeitos que estes processos físico-químicos têm sobre as propriedades geotécnicas do material e, dessa forma, entender o comportamento que este apresenta ao final do processo, quando deverá ser disposto de forma definitiva em depósitos de rejeitos.

Neste capítulo serão apresentadas análises e discussões dos resultados dos ensaios realizados nas amostras provenientes das diferentes etapas do processo de beneficiamento. Os resultados obtidos são apresentados de forma comparativa entre si, de modo a permitir a visualização da variação do parâmetro avaliado nos materiais.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO BÁSICA

Através das análises granulométricas dos materiais foi possível verificar que o minério bruto moído entra no processo de beneficiamento com granulometria areno-siltosa, apresentando 59% de material passante na peneira # 200. Ao longo do processo, suas características evoluem para um material mais fino, cuja porcentagem de finos vai de 75% a 90% (% de material passante na peneira # 200). Esta modificação é feita através da quebra e destruição dos grãos pelos processos químicos e físicos aos quais o minério é submetido. A Figura 5.1 apresenta um

gráfico no qual estão compiladas as curvas granulométricas das 5 amostras estudadas.

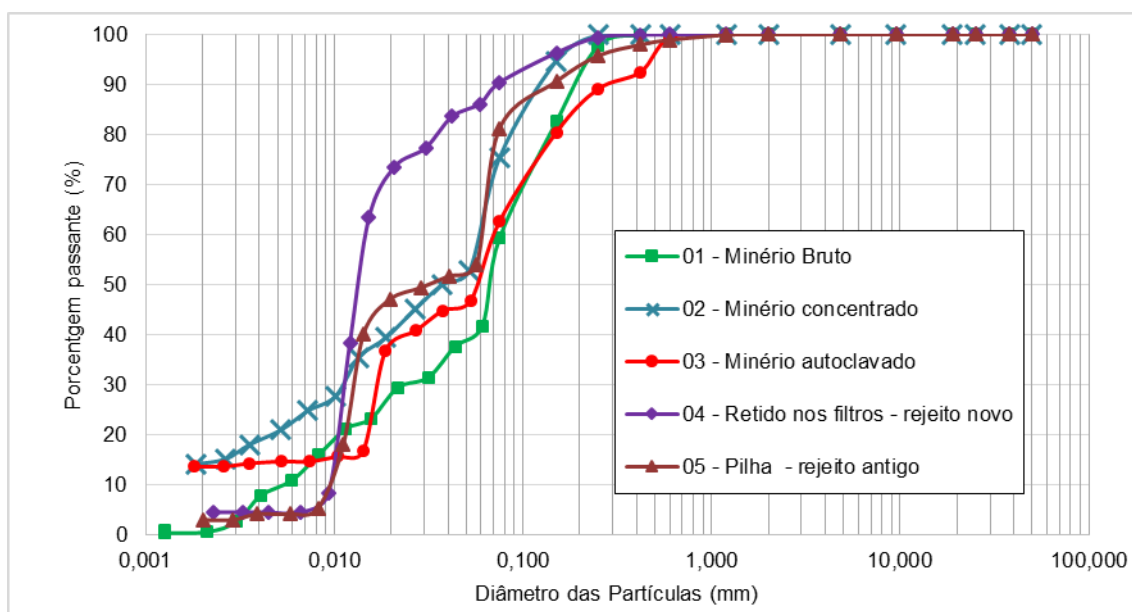


Figura 5.1: Curvas granulométricas dos materiais.

Em linhas gerais, os materiais apresentam granulometria mal graduada, com exceção da amostra 05, representante do Rejeito antigo, disposto na pilha. A variação granulométrica do rejeito novo para o rejeito antigo pode ser explicada pelas características da frente de lavra de onde o minério foi extraído, bem como variações no processo de beneficiamento e até mesmo alterações químicas que continuaram ocorrendo após a compactação do rejeito na pilha.

Uma vez obtidas as curvas granulométricas, peso específico real dos grãos e limites de liquidez e plasticidade, os materiais foram classificados através do Sistema Unificado de Classificação de Solos, normalizado através da ASTM D 2487. Observa-se que as amostras provenientes do beneficiamento em si (amostra 01, 02 e 03) apresentam comportamento ligeiramente plástico, enquanto que o rejeito novo tem plasticidade média e o rejeito antigo, alta plasticidade.

Destaca-se também o alto teor de umidade higroscópica (material seco ao ar) do rejeito novo e do rejeito antigo, indicando a presença de compostos com alta

capacidade de retenção de água. A Tabela 5.1 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização realizados nos materiais.

Tabela 5.1: Caracterização básica das amostras.

Amostra	01 – Minério bruto	02 – Minério concentrado	03 – Minério autoclavado	04 – Retido nos filtros – Rejeito novo	05 – Pilha – Rejeito antigo
Umidade higroscópica (%)	0,24	0,23	6,35	16,97	31,27
Material passante na peneira nº 200	59,3	75,3	62,6	90,3	81,1
Peso específico real dos grãos ( $\rho_s$ ) (g/cm <sup>3</sup> )	3,24	3,73	3,84	2,89	3,47
Limite de liquidez (%)	11,1	12,7	19,0	69,0	59,7
Limite de plasticidade (%)	NP	11,8	16,7	53,3	35,4
Índice de plasticidade	NP	1,2	2,3	15,7	24,6
Classificação Unificada SUCS	SM – Areia siltosa	ML – Silte com areia	ML – Silte arenoso	MH – Silte com alta plasticidade	MH – Silte de alta plasticidade com areia

Nota-se uma grande variação nos Limites de Atterberg para as amostras ao longo do processo de beneficiamento. Esta variação deve-se às modificações sofridas tanto na granulometria quanto na mineralogia das amostras. O mesmo pode ser aplicado à densidade real dos grãos. Nota-se que o material retido nos filtros, considerado rejeito novo, apresenta um peso específico significativamente inferior à densidade das demais amostras. A diferença entre a densidade do rejeito novo para o rejeito antigo pode ser explicada tanto pela variação na frente de lavra da qual os dois materiais se originaram quanto pela oxidação de alguns compostos presentes no rejeito.

## 5.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICO MINERALÓGICA

As análises realizadas com o objetivo de caracterizar o material quanto à composição química e mineralógica visaram avaliar o quanto estas modificações podem alterar o comportamento geotécnico do material. Observa-se que durante o beneficiamento do material (amostras 01, 02 e 03), os processos realizados visam induzir reações que resultem na redução dos teores de óxidos de cálcio e magnésio, e aumento do teor de zinco contido no material, concentrando-o.

Nota-se através da composição química apresentada pela Figura 5.2, que estas amostras representam um processo no qual os minerais “contaminantes” (compostos de cálcio e magnésio), são degradados pelos processos a que são submetidos. Esta degradação é bem representada pela variação dos picos obtidos pelos difratogramas.

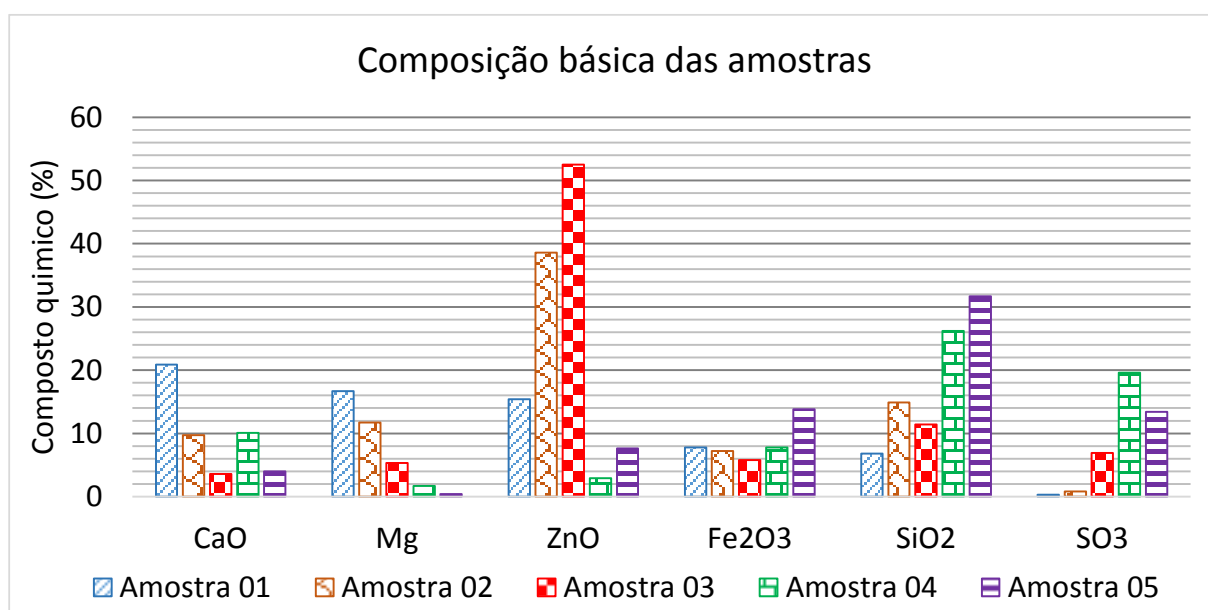


Figura 5.2. Composição química das amostras – principais elementos.

Na amostra 01 – Minério bruto, nota-se a presença de picos intensos de cristais de dolomita, seguidos pela willemita (Figura 5.3), caracterizando a presença destes minerais com estrutura bem definida, e então, picos de menor intensidade de cristais de quartzo, hematita, clinocloro e calcita, caracterizando minerais cuja estrutura é mais instável na amostra.

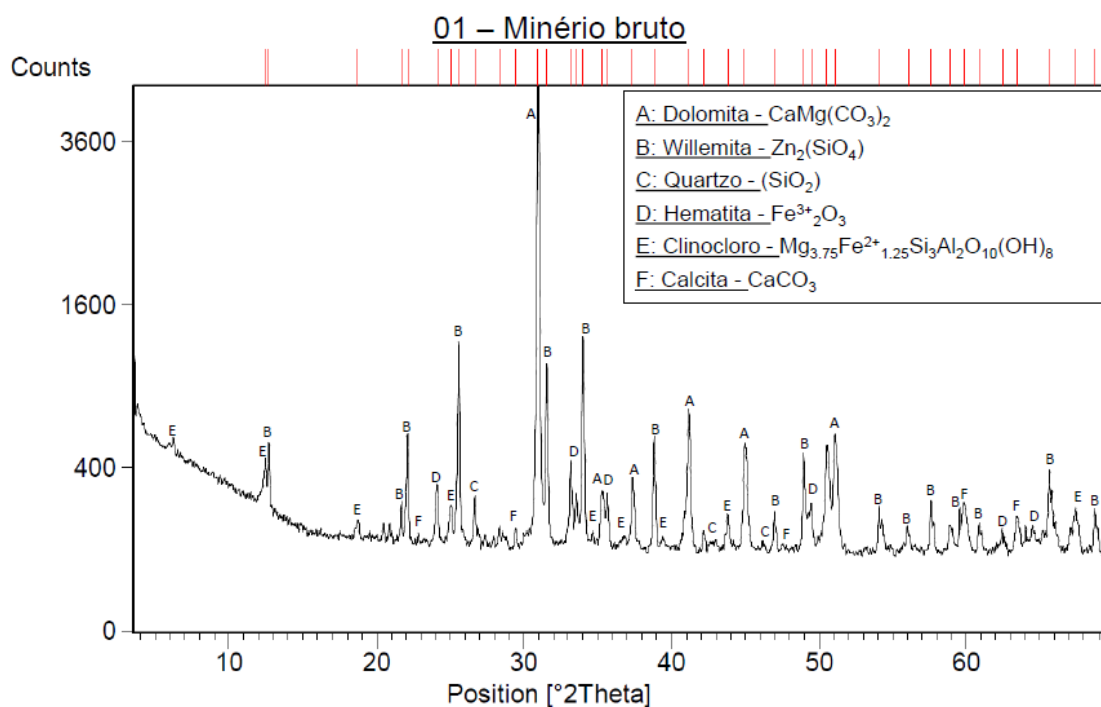


Figura 5.3: Difratoograma amostra 01 - Minério bruto.

Ao passar pela primeira etapa de concentração do minério, percebe-se que os cristais de clinocloro e calcita, instáveis na amostra 01, já foram removidos na amostra 02, aumentando a intensidade dos picos de willemita na amostra (Figura 5.4).

Através da composição química da amostra (Figura 5.2), percebe-se um aumento no teor de óxido de zinco, e diminuição nos teores de óxido de cálcio e magnésio. Há também um aumento no teor de dióxido de silício, uma vez que este é parte da composição do minério de zinco que está sendo concentrado.

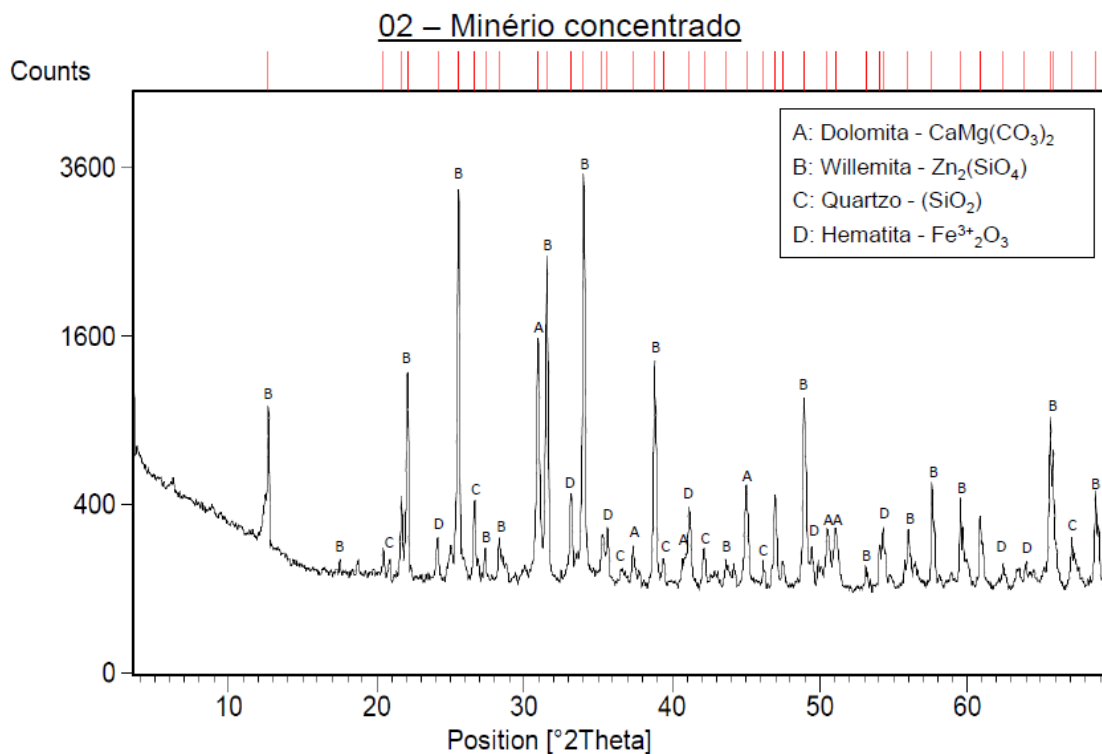


Figura 5.4. Difratoograma amostra 02 - Minério concentrado.

Ao final do processo de autoclavagem, percebe-se uma grande redução nos picos de dolomita e a presença de picos muito intensos de willemita (Figura 5.5). Através da caracterização química (Figura 5.2), nota-se novamente uma significativa redução nos teores dos óxidos de cálcio e magnésio, e aumento no teor de óxido de zinco.

Ao longo destas três etapas, tanto os difratogramas quanto as composições químicas mostraram a redução dos materiais contaminantes e aumento dos teores do minério de interesse, variando concentrações e intensidades dos parâmetros analisados. Uma vez reduzidos os teores de cálcio e magnésio, o minério tratado segue na planta de beneficiamento para os processos de ciclonagem e lixiviação.

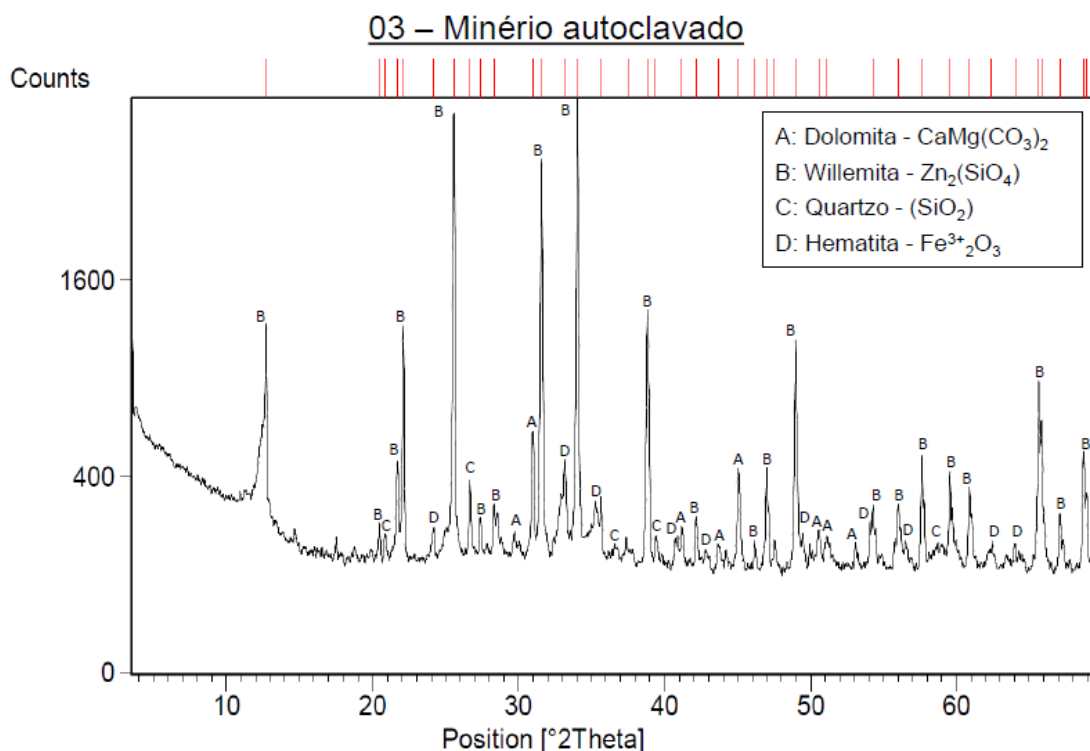


Figura 5.5. Difratoograma amostra 03 - Minério autoclavado.

Após a lixiviação, o material é encaminhado para o processo de filtração, onde o material passante continua no processo de beneficiamento para obtenção de zinco com alto teor de pureza e o material retido é encaminhado para a disposição final, sendo considerado rejeito do processo de mineração.

Ao contrário das amostras 01 a 03, nas quais os cristais constituintes eram alterados pelo processo com o objetivo de purificar o material, na amostra 4 observa-se o surgimento (Figura 5.6) de picos intensos de cristais de Bassanita (sulfato de cálcio hidratado), e de picos menos intensos do mineral Goslarita.

Ainda no difratograma, é possível notar entre as posições 15 ( $^{\circ}2\theta$ ) e 30 ( $^{\circ}2\theta$ ), a formação discreta de um halo, ocasionando o deslocamento dos pontos da linha de base, indicando a presença de material amorfo no meio. Através da composição química (Figura 5.2), nota-se que há um baixo teor de zinco, indicando que ocorreu boa remoção deste durante a lixiviação, e um aumento significativo no teor de dióxido de silício.

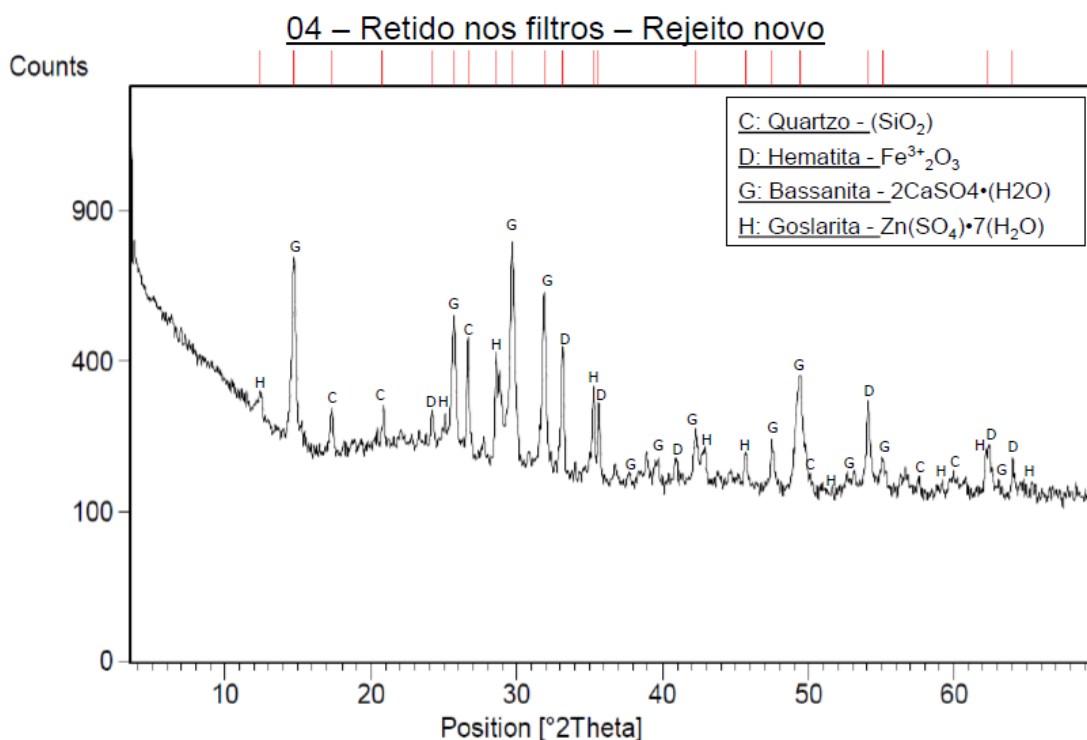


Figura 5.6. Difratoograma amostra 04 - Retido nos filtros - Rejeito novo.

A amostra proveniente da pilha de rejeitos compactados caracteriza um material com idade desconhecida e exposto a variações ambientais, como ação de ventos, chuva e sol. Através do difratograma realizado, apresentado na Figura 5.7, foi possível observar o surgimento de picos de baixa intensidade característicos de cristais de bassanita, goslarita e gipsita.

Tanto a gipsita quanto a bassanita podem apresentar influência sobre o alto limite de liquidez do material, indo de encontro ao apresentado por Mendes (2007), o qual apresentou altos índices de plasticidade para rejeitos provenientes da mineração de gesso (sulfato de cálcio hidratado).

Além dos novos cristais minerais encontrados na amostra, observou-se uma intensificação do halo formado entre as posições 15 (°2Theta) e 30 (°2Theta). Na

composição química, destacam-se os teores de óxido de ferro (III), a qual explica o alto peso específico do material, e dióxido de silício.

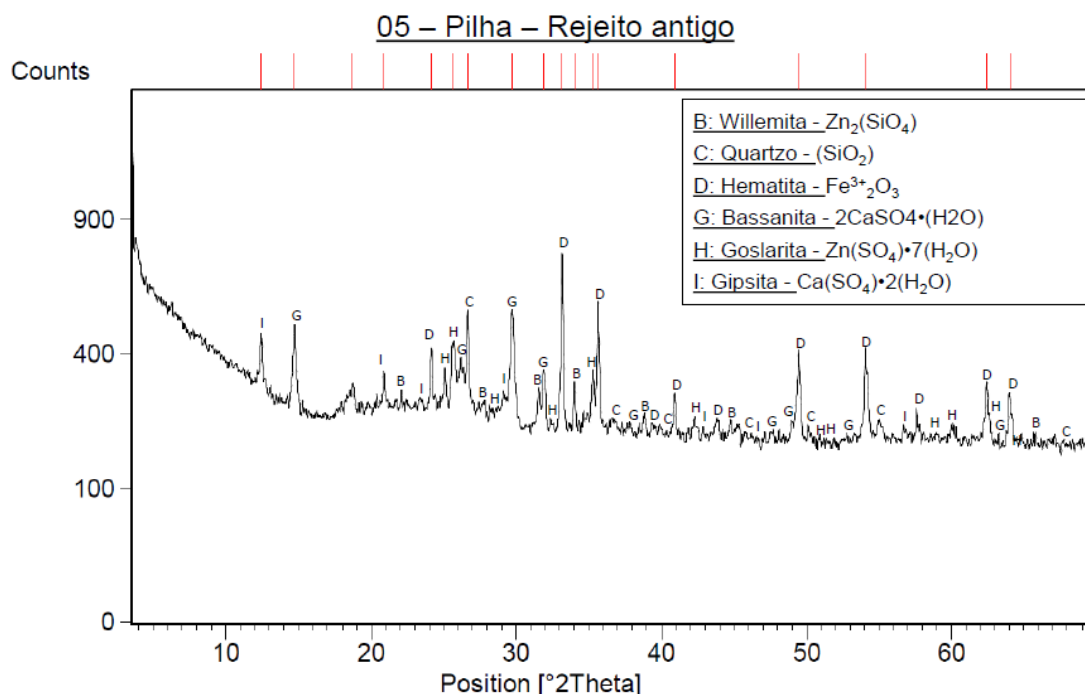


Figura 5.7. Difratograma amostra 05 - Pilha - Rejeito antigo.

Na Figura 5.8 é apresentado um comparativo entre os difratogramas obtidos para a amostra de minério autoclavado de rejeito novo e de sílica gel pura. A sílica gel, por ser um material amorfo, não apresenta picos de difração. Seu difratograma, portanto, tem a forma de um halo, cujo início é observado na posição 15 ( $^{\circ}2\text{Theta}$ ), e seu final, na posição 30 ( $^{\circ}2\text{Theta}$ ). Observou-se nas amostras 04 e 05, a tendência de deslocamento da linha de base do difratograma de modo a também formar um halo entre estas posições.

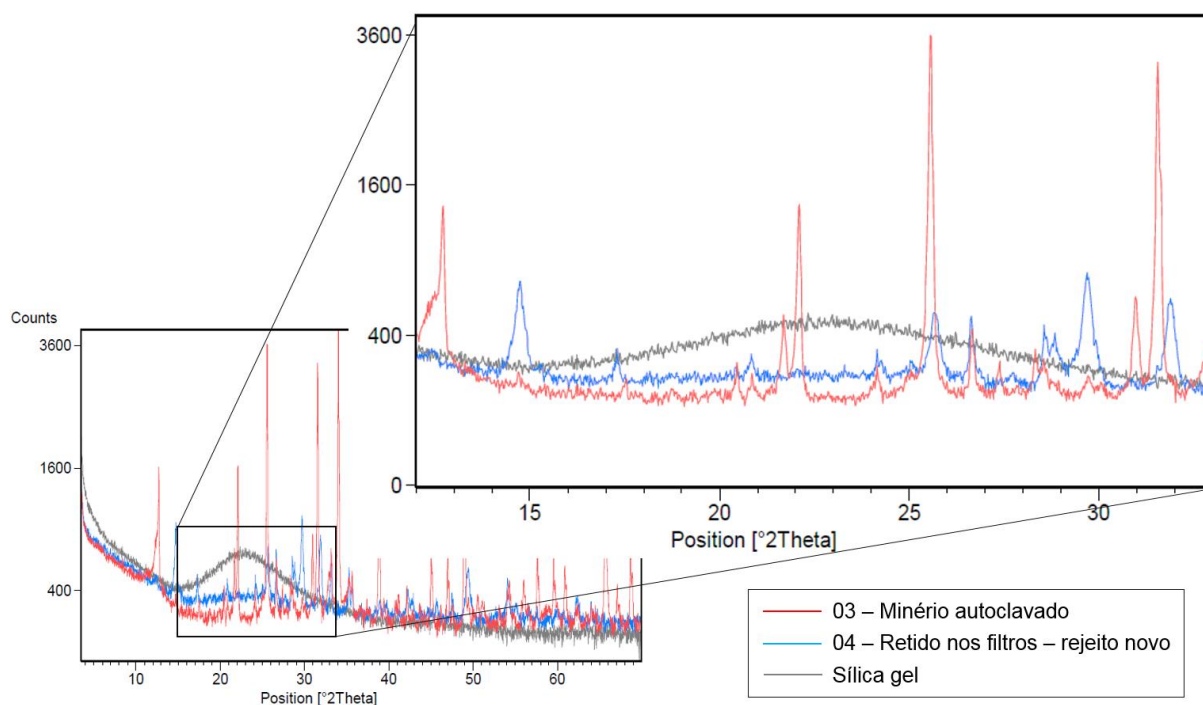


Figura 5.8. Comparativo destacando a formação de halo amorfo no difratograma.

Na análise mineralógica, a sutil formação de um halo no difratograma das amostras de rejeito novo e antigo na mesma posição do halo formado pela amostra de sílica gel confirma o início da formação deste composto hidrofílico após a lixiviação ácida e a sua continuidade após a disposição final na pilha.

Nota-se pelo destaque apresentado na figura, que há um discreto deslocamento dos pontos em direção à curva representativa da sílica gel. Dessa forma, pode-se afirmar que mesmo tomadas as devidas precauções descritas no capítulo 2.1.2 para evitar a formação de sílica gel, ainda assim é verificado seu surgimento após a lixiviação ácida.

Tal fato confirma o exposto por Souza (2005 B), Espiari *et al* (2006), Souza *et al* (2007), Fuls, Kruger e Greunen (2009) e Safari *et al* (2009), os quais afirmam que este composto é formado em condições de pH, temperatura e tempo de residência não controlados.

Assim como os minerais bassanita e gipsita, a sílica gel também pode explicar o comportamento do rejeito com relação à água, uma vez que este material apresenta características hidrofílicas.

### 5.3 COMPACTAÇÃO

A compactação dos materiais tem como objetivo aumentar o contato entre os grãos de solo e, conseqüentemente, melhorar sua resistência ao cisalhamento e reduzir sua permeabilidade e compressibilidade. Esta melhoria nas propriedades do material é possível uma vez que o processo de compactação envolve a expulsão do ar e conseqüentemente, promove maior contato entre as partículas de material. A Figura 5.9 apresenta um gráfico comparativo das cinco amostras estudadas.

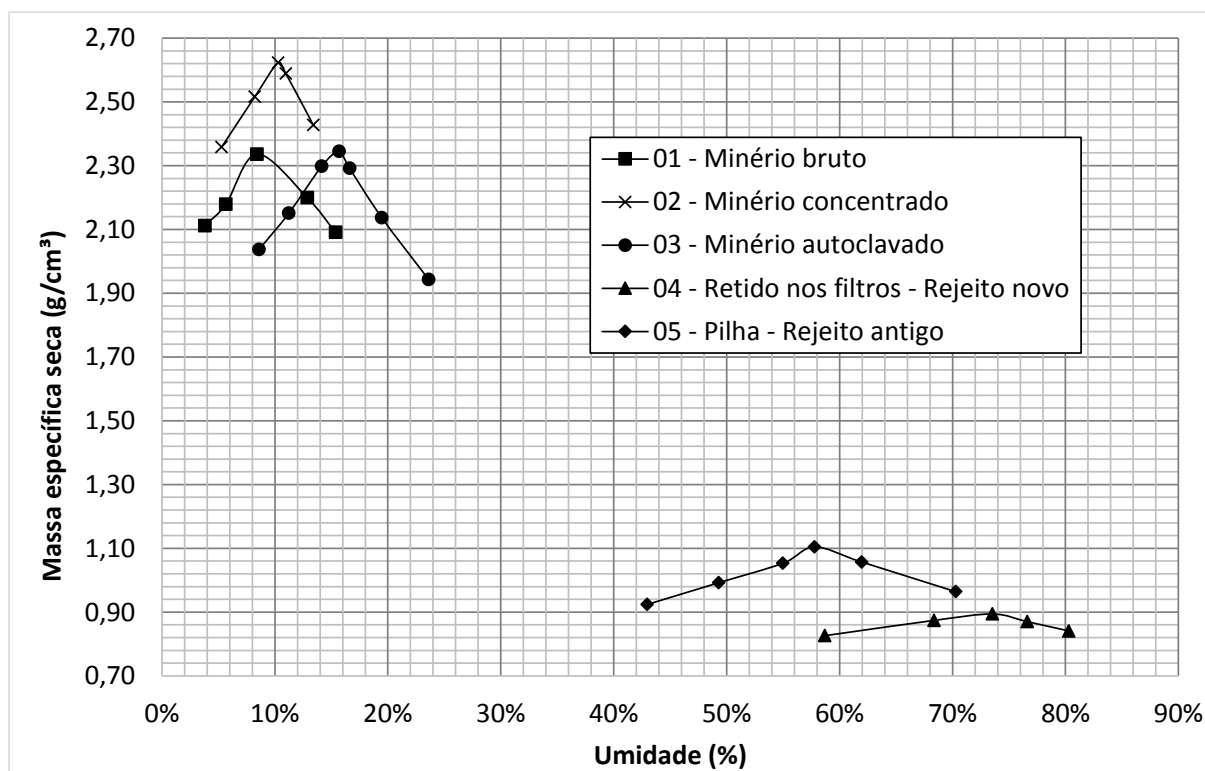


Figura 5.9. Comparação entre as curvas de compactação de todas as amostras.

Destaca-se que a amostra 01 – Minério bruto, apresenta um grau de saturação de 73% a umidade ótima de compactação e densidade seca máxima. Este grau de saturação aumenta à medida que o material evolui no processo de beneficiamento, chegando a atingir 95% de saturação na umidade ótima de compactação.

Observa-se que, ao longo do processo de beneficiamento, as amostras apresentam teor de umidade ótimo de compactação compatível com faixas de valores típicos de solos siltosos. Esta característica deixa de existir na amostra 04, considerada rejeito novo, assim como na amostra 05 – Rejeito antigo. Para estas duas amostras, a umidade ótima de compactação é de 73% e 58%, respectivamente.

O material retido nos filtros, aqui tratado como rejeito novo, é removido do processo de filtragem e encaminhado para a compactação na pilha de rejeitos e, de acordo com a curva de compactação deste material, a densidade seca máxima é atingida quando o rejeito apresenta 70% de seu peso em água, sendo este um valor atípico para solos estudados pela mecânica dos solos clássica.

As amostras de rejeito novo e rejeito antigo apresentam comportamento atípico em relação aos parâmetros de compactação obtidos. Quando comparadas as umidades ótimas de compactação com seus respectivos limites de liquidez, percebe-se que a amostra 04, representativa do material que é encaminhado para a pilha para compactação e disposição final, apresenta teor de umidade no limite de liquidez de 69%, enquanto sua umidade ótima de compactação é de 73%. Através destes números, a mecânica dos solos afirmaria que a amostra compactada sob condições ótimas estaria em estado de consistência líquido. Todavia, isso não ocorre, conforme constatado em campo e laboratório.

#### 5.4 CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

O conhecimento do comportamento da sucção em função do teor de umidade da amostra orienta a interpretação de demais características do material, como a resistência do material e as particularidades deste em relação à afinidade com a água. Por sua vez, o comportamento da sucção pode ser influenciado tanto pela mineralogia do material quanto pela granulometria deste.

As curvas características dos materiais foram obtidas através da plotagem das diversas medições de sucção realizadas em função da umidade volumétrica da amostra correspondente. Os anéis que forneceram estes dados foram moldados em corpos de prova moldados na umidade ótima de compactação e densidade seca máxima. Uma vez moldados, os corpos de prova foram submetidos aos processos de umedecimento e secagem e seus resultados, plotados de modo a fornecer subsídio para que os ajustes das curvas fossem realizados.

Para todas as amostras, os pontos de sucção mátrica e total foram interligados em função da tendência geral para uma curva. Pontos que eventualmente destoaram do restante indicaram erro de ensaio e foram eliminados. O teor de umidade volumétrica saturada (necessário para as equações de ajuste das curvas) foi determinado em função do índice de vazios máximo da amostra, obtido através dos anéis ensaiados.

Uma vez realizado este tratamento inicial, através das equações propostas por van Genuchten (1980) e Fredlund & Xing (1994), obteve-se curvas de sucção mátrica e total ajustadas em funções dos pontos obtidos em ensaio. Nas tabelas e figuras a seguir, são apresentados os resultados de ensaio juntamente com os ajustes realizados através das formulações empíricas. Nos gráficos com as curvas de sucção total e mátrica, é indicado o valor da sucção da amostra para o teor de umidade volumétrica relativo aos parâmetros ótimos de compactação.

Observa-se na Tabela 5.2, para a amostra 01 – Minério bruto, que as curvas de ajuste para sucção mátrica apresentaram bons fatores de correlação, para os dois métodos de ajuste aplicados. Já as curvas de sucção total apresentaram ajustes cujos fatores de correlação ficaram abaixo de 0,9. Por apresentar melhores fatores de correlação, o ajuste feito através da equação de van Genuchten (1980) foi adotada como representativa da amostra, conforme pode ser observado na Figura 5.10.

Tabela 5.2: Ajuste das curvas de sucção total e matricial para a amostra 01.

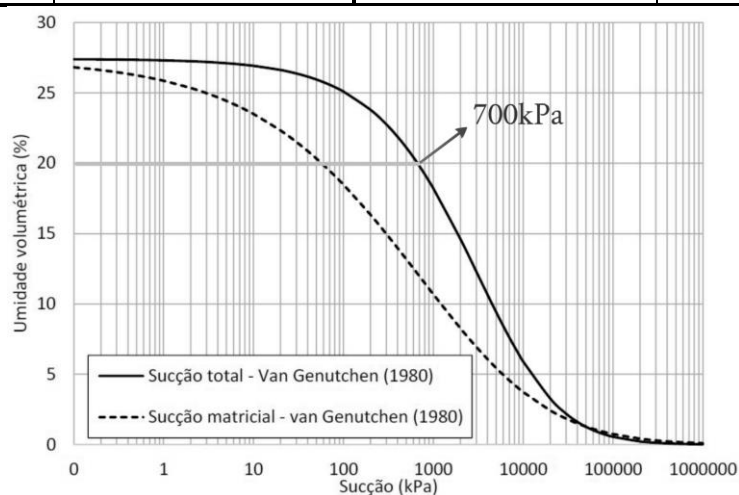
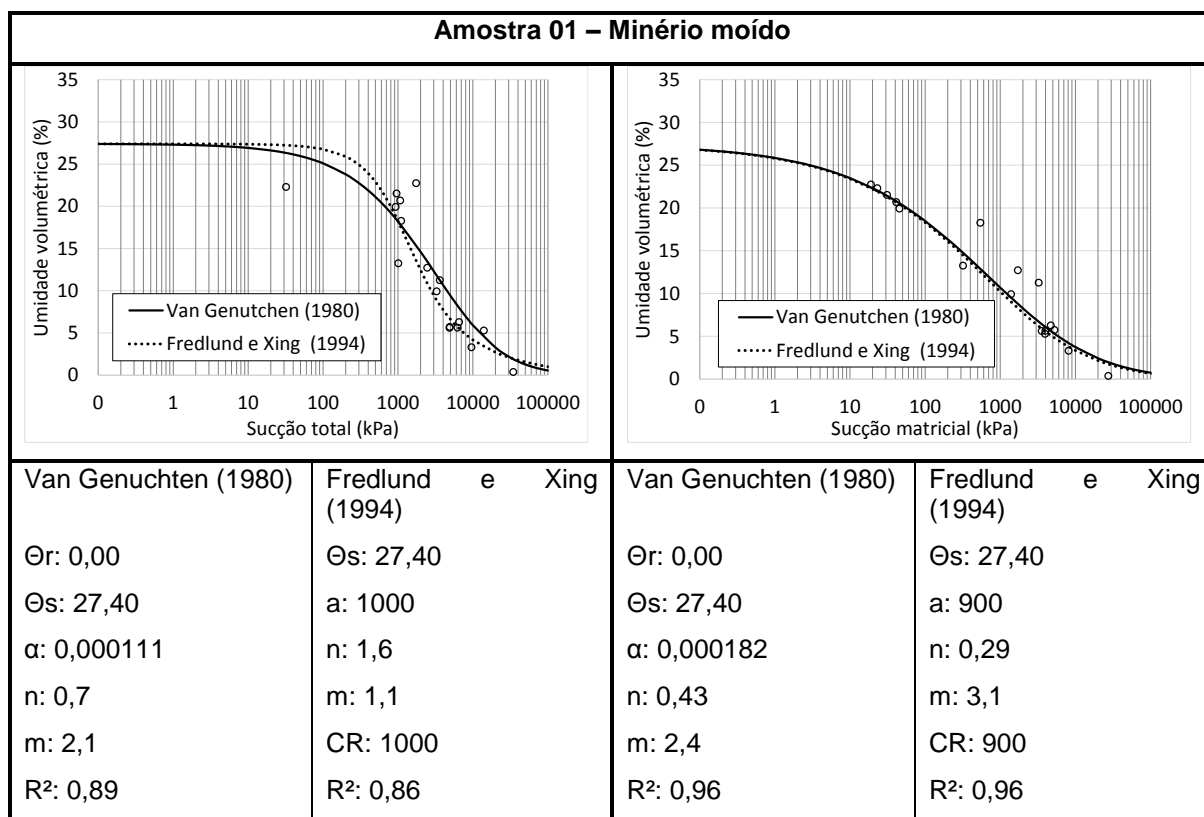


Figura 5.10: Amostra 01 – Minério moído.

Para a amostra 02 – Minério concentrado, nota-se através da Tabela 5.3, que a equação proposta por Fredlund & Xing (1994) apresentou bons fatores de correlação, tanto para sucção mátrica quanto para sucção total. Observa-se, todavia, que mesmo apresentando fator de correlação abaixo de 0,9 para sucção total, o modelo proposto por van Genuchten (1980) apresentou um melhor ajuste aos pontos de ensaio, sendo portanto, adotada como representativa da amostra e representada na Figura 5.11.

Tabela 5.3: Ajuste das curvas de sucção total e matricial para a amostra 02.

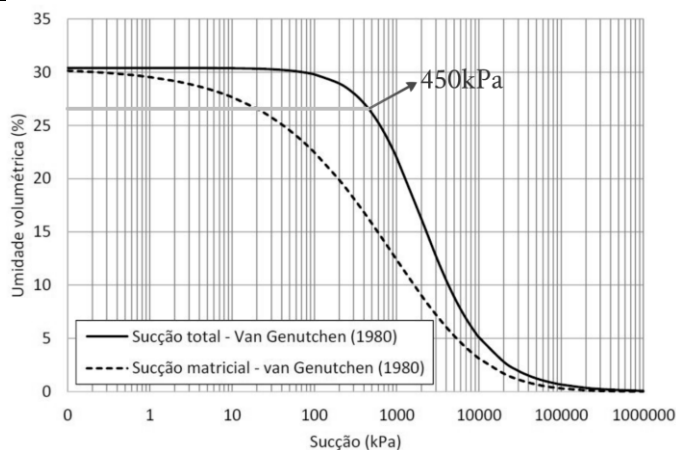
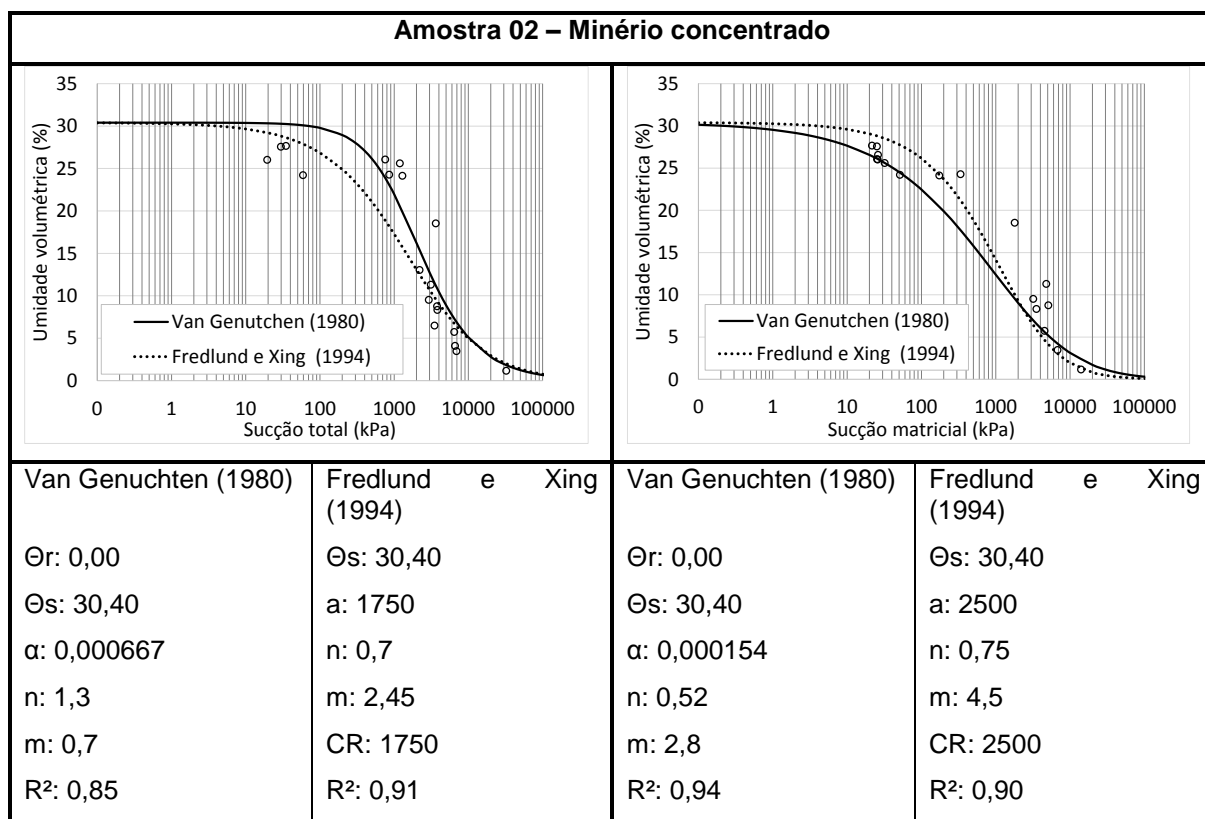


Figura 5.11: Amostra 02 – Minério concentrado.

Para a amostra 03 –Minério autoclavado, nota-se que tanto a equação proposta por Fredlund & Xing (1994), quanto a proposta por van Genuchten (1980) apresentam bons fatores de correlação no ajuste e, mais uma vez, o modelo proposto por van Genuchten apresentou melhor ajuste aos pontos obtidos no ensaio, sendo ambas as curvas de sucção mátrica e total apresentadas na Figura 5.12.

Tabela 5.4: Ajuste das curvas de sucção total e matricial para a amostra 03.

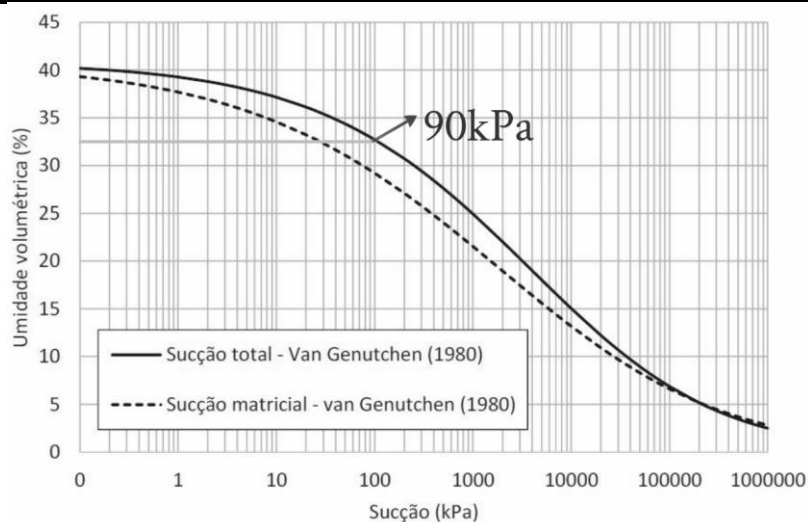
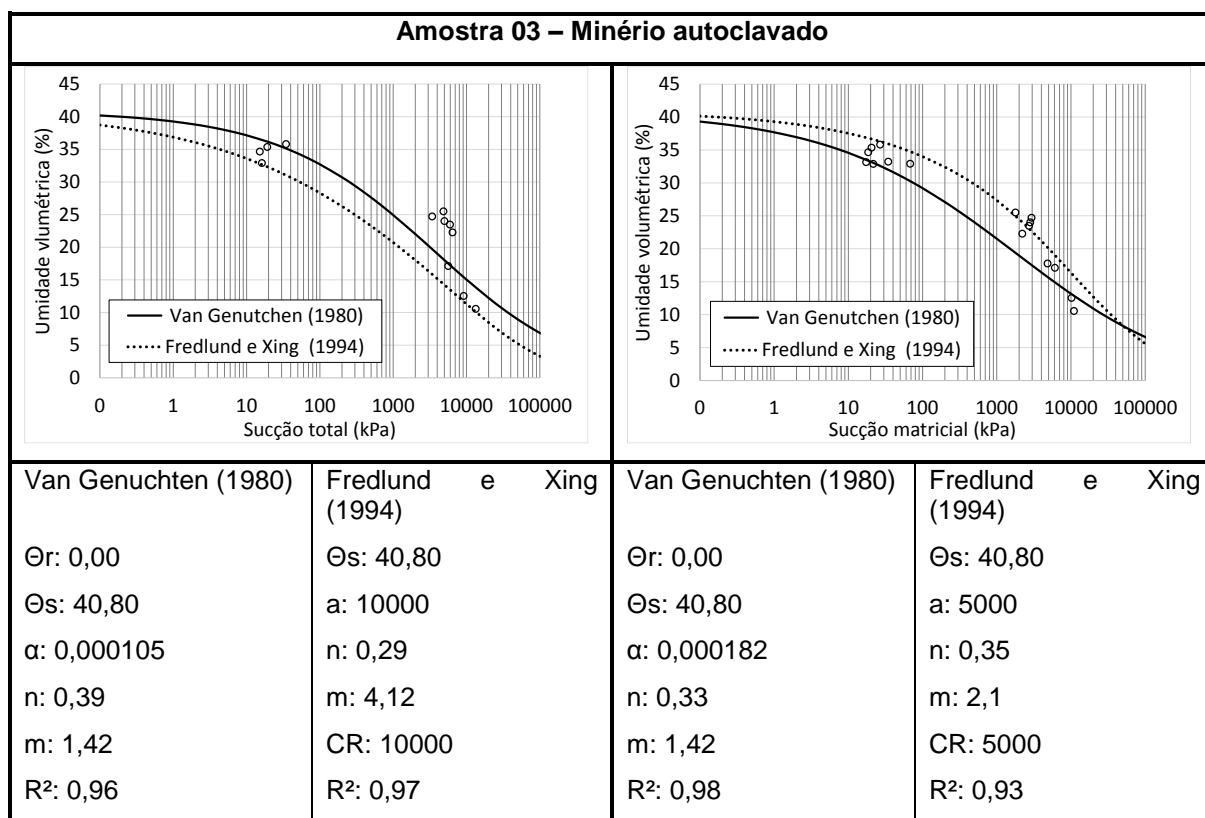


Figura 5.12: Amostra 03 – Minério autoclavado.

Como pode-se observar na Tabela 5.5, tanto o modelo proposto por van Genuchten (1980), quanto o modelo proposto por Fredlund & Xing (1994) não apresentaram fatores de correlação satisfatórios para a curva de sucção total. Todavia, a equação proposta por van Genuchten (1980) apresentou melhor ajuste aos pontos obtidos experimentalmente.

Tabela 5.5: Ajuste das curvas de sucção total e matricial para a amostra 04.

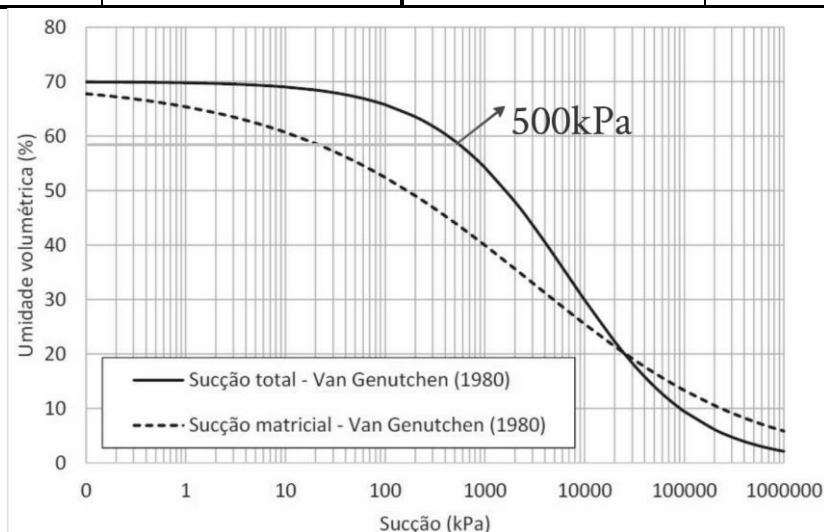
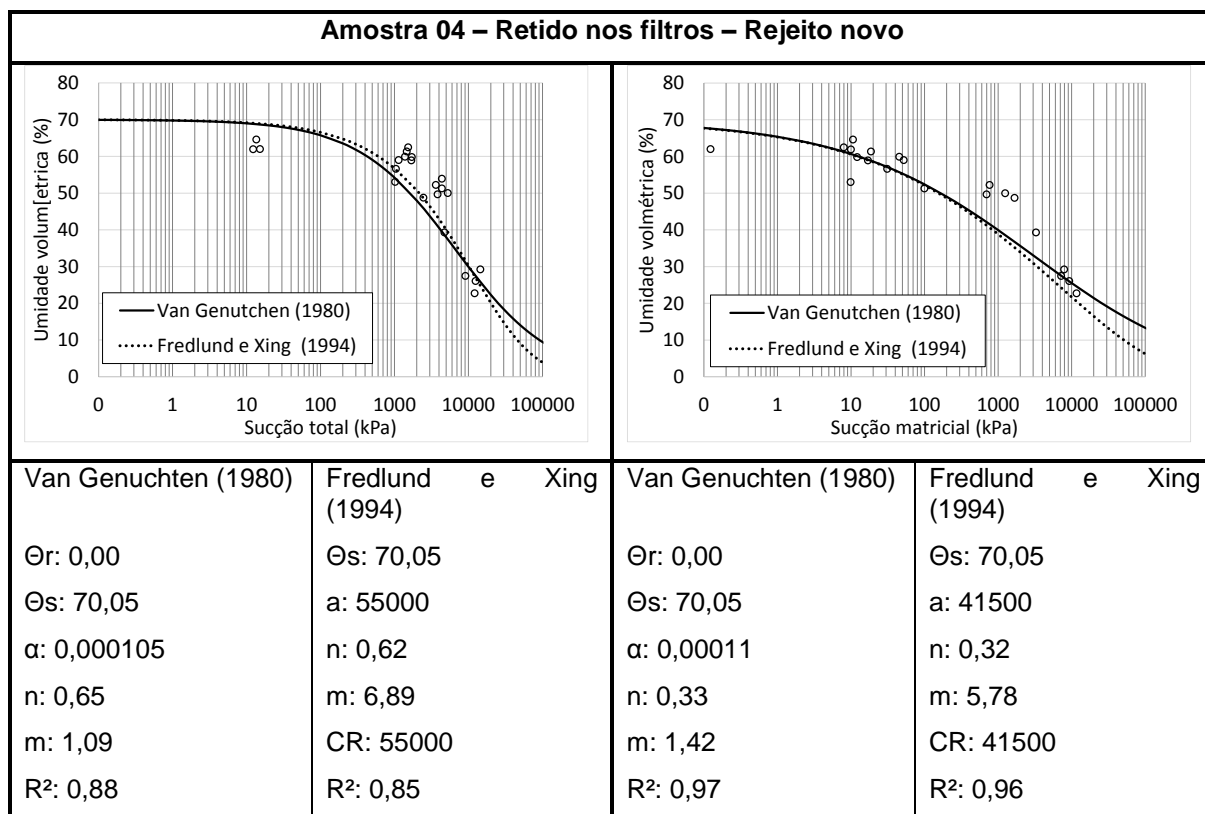


Figura 5.13: Amostra 04 – Retido nos filtros – Rejeito novo.

Para a amostra 05 – Pilha – Rejeito antigo, o principal problema encontrado foi na distribuição dos dados de ensaio. Tal fato ocorreu em função da dificuldade de obtenção de anéis com altos teores de umidade volumétrica durante o ensaio. Dessa forma, a umidade volumétrica saturada foi estimada em função do índice de vazios máximo obtido, não se sabendo, todavia, se este é o índice de vazios máximo da amostra. Dessa forma, os ajustes obtidos apresentam apenas uma tendência de comportamento da curva característica do material.

Tabela 5.6: Ajuste das curvas de sucção total e matricial para a amostra 05.

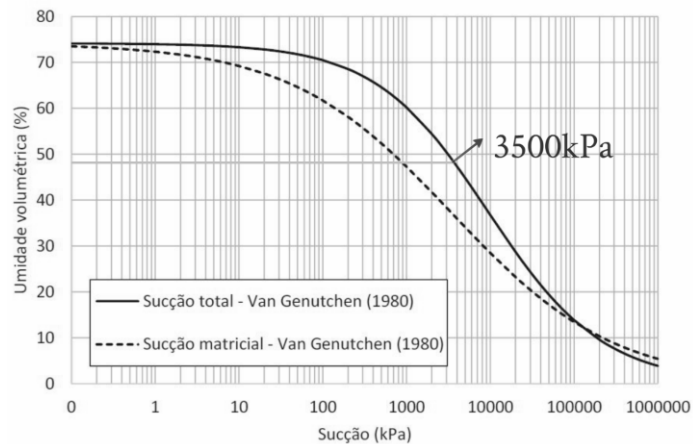
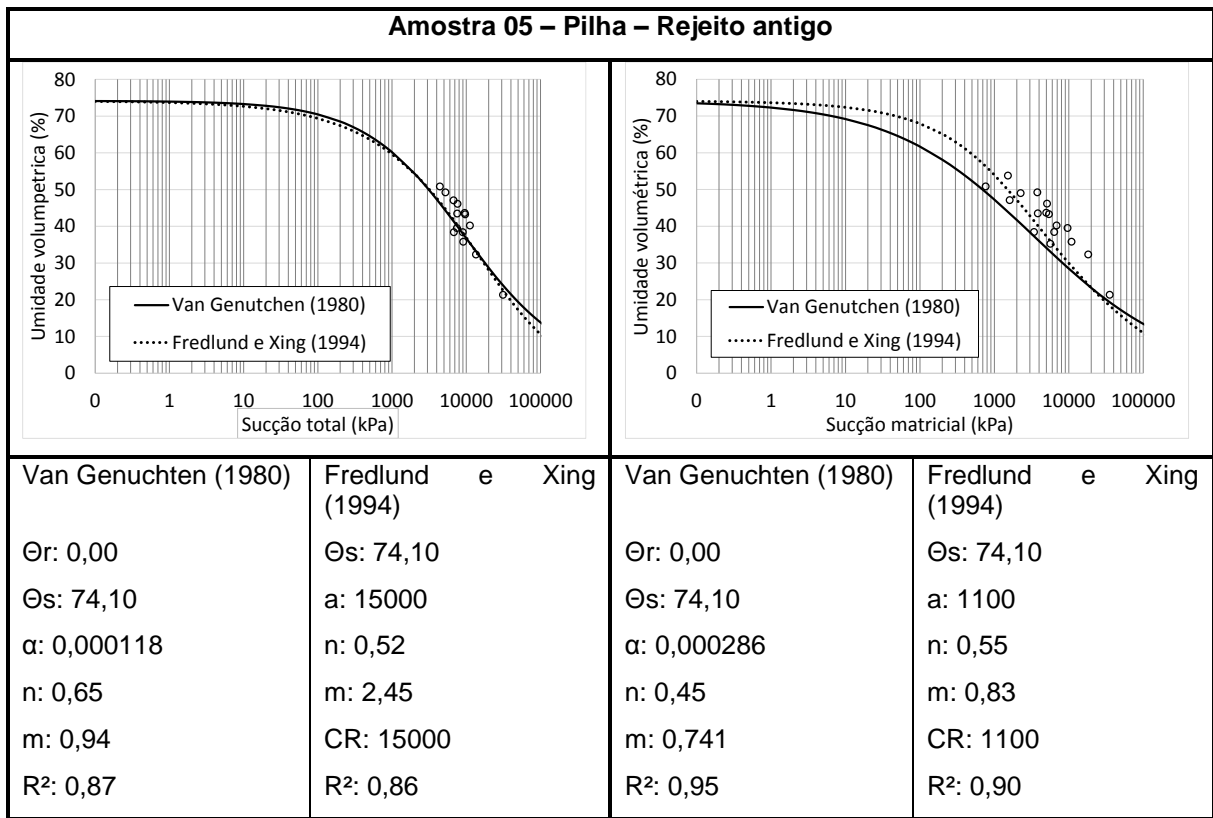


Figura 5.14: Amostra 05 – Pilha – Rejeito antigo.

Nota-se tanto pela Figura 5.13 quanto pela Figura 5.14, que as curvas de sucção mátrica e total se cruzaram em 20000 e 100000 kPa de sucção, respectivamente. Este cruzamento pode ter ocorrido por erros de ensaio, considerando-se a necessidade de obtenção de mais pontos para ajuste do ensaio. Vale lembrar que Fredlund & Xing (1994) afirmam que a sucção mátrica e a sucção total podem ser consideradas equivalentes para valores acima de 1500 kPa. Dessa forma, admite-se que estas curvas tenderiam a ficar sobrepostas graficamente.

Nas figuras 5.15 e 5.16 são apresentados os dados compilados de todas as curvas características encontradas em termos de sucção total e matricial. Nota-se que para uma mesma sucção, as amostras têm teor de umidade crescente ao longo do processo de beneficiamento. Nota-se também que à medida que evolui ao longo do beneficiamento, o material passa a apresentar teores de sucção mais altos. Este aumento na magnitude da sucção pode ser explicado tanto pela variação na granulometria do material quanto pelo surgimento de compostos adsorventes na amostra, como a sílica gel.

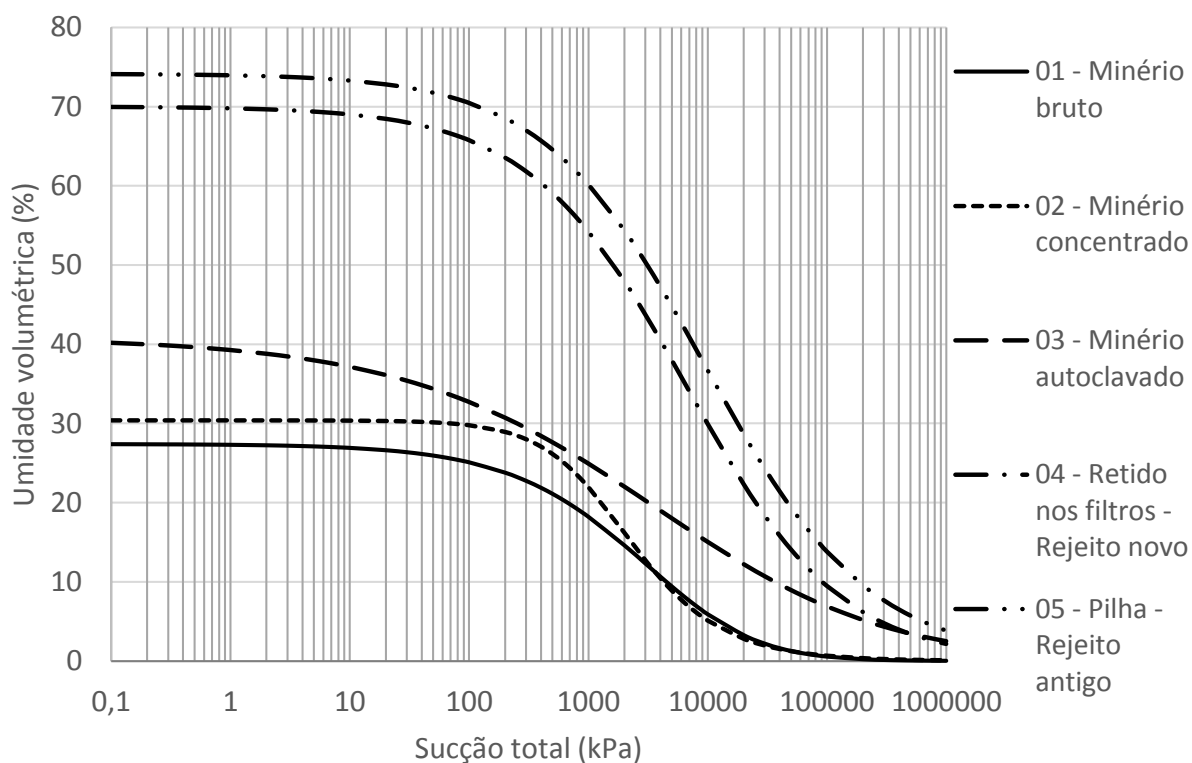


Figura 5.15. Curvas características de todas as amostras - Sucção total.

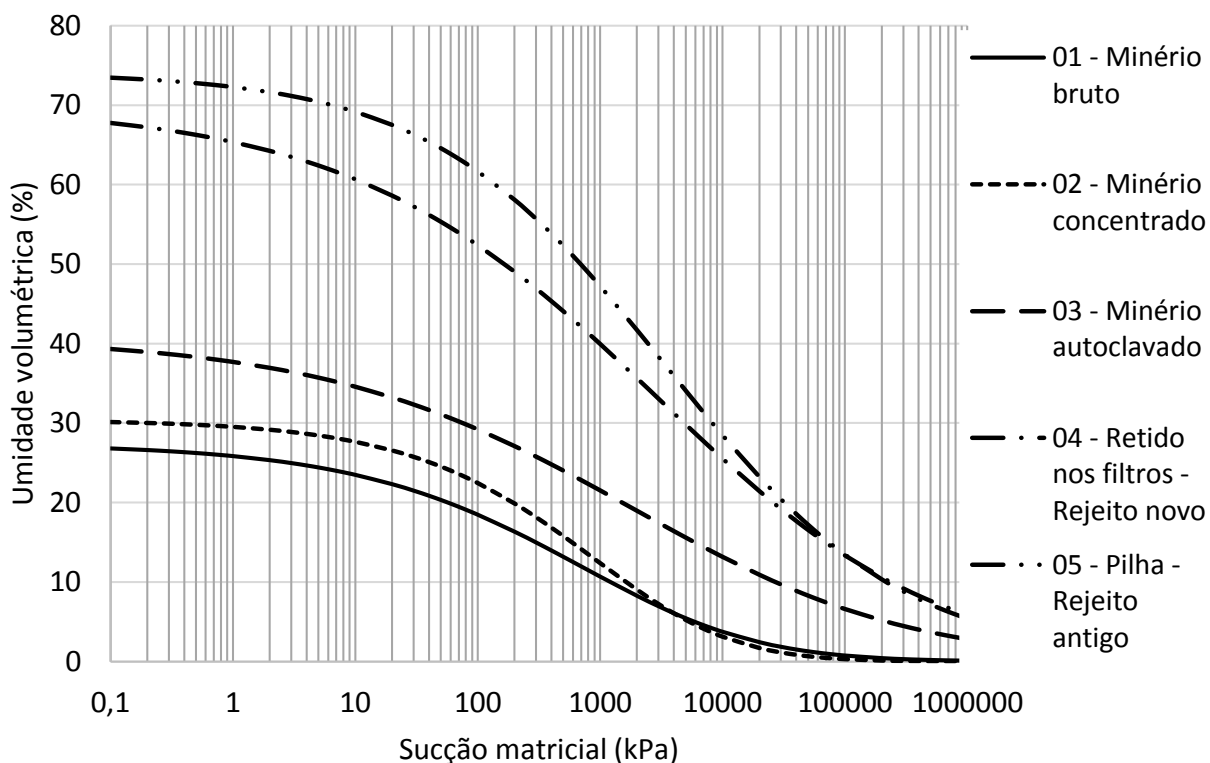


Figura 5.16. Curvas características de todas as amostras – Sucção matricial.

## 5.5 COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA NÃO DRENADA

O ensaio de palheta de laboratório foi realizado com o objetivo de avaliar a variação da resistência não drenada das amostras dentro de uma faixa de umidade gravimétrica, variando da umidade do limite de liquidez à umidade ótima de compactação. Nestes ensaios, foi possível avaliar tanto a sensibilidade (razão da resistência de pico e residual, definida por Skempton & Northey (1952)) do material para os diferentes teores de umidade quanto a máxima resistência não drenada das amostras, estimando-se por meio de regressão linear, o comportamento da resistência quando próximo dos teores de umidade de referência ( $LL$  e  $w_{ót}$ ).

A Figura 5.17 apresenta os resultados obtidos para a amostra 01. Nota-se que, para o teor de umidade de 13,78%, a amostra apresenta uma alta resistência de pico, resultando em uma sensibilidade de 2,55. Já para os demais teores de umidade, as resistências de pico são menores, e mais próximas da umidade residual, indicando que para maiores teores de umidade, o material tem comportamento de baixa sensibilidade. Destaca-se também a grande variação na resistência de pico em um pequeno intervalo de teor de umidade, mostrando que o material tem uma resposta significativa à quantidade de água no seu interior.

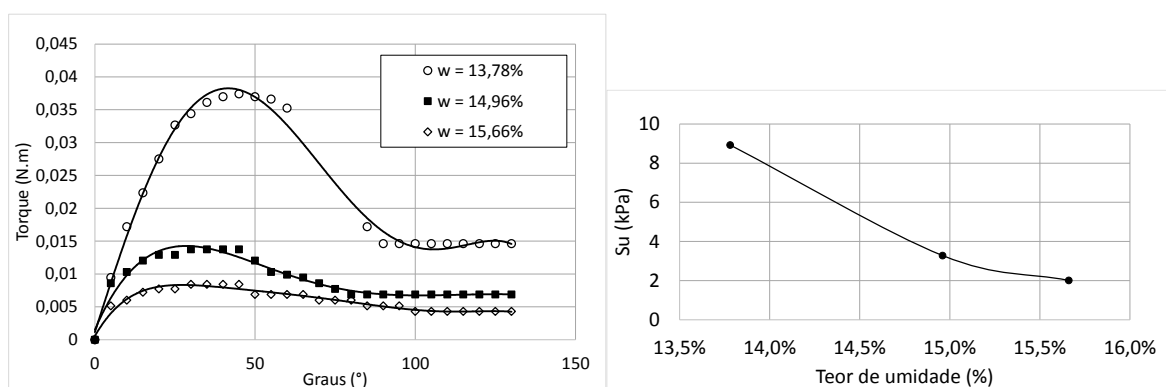


Figura 5.17. Curvas de variação da resistência em função do teor de umidade. Amostra 01 - Minério bruto.

Para a amostra 02, observou-se que o material apresentou comportamento medianamente sensível para as três faixas de teor de umidade ensaiadas (Figura 5.18). Nota-se que o teor de umidade de 12,8% apresentou uma resistência de pico superior à tendência indicada pelos demais teores de umidade. Ressalta-se ainda que, assim como na amostra 01, a faixa de variação da resistência para uma pequena variação do teor de umidade se manteve, variando em média 6 kPa em uma variação de 2% nos teores de umidade para a amostra 01 e de 5 kPa para 1,5% de variação na umidade, para a amostra 02.

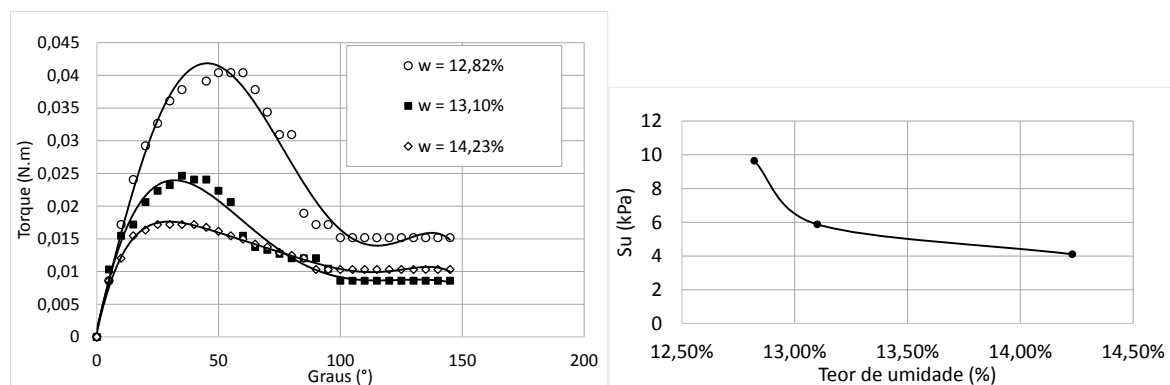


Figura 5.18. Curvas de variação da resistência em função do teor de umidade.  
Amostra 02 - Minério Concentrado.

A Figura 5.19 apresenta o comportamento da amostra 03. Observa-se que a amostra se comporta de maneira medianamente sensível para os teores de umidade de 16,95% e 17,39%, tendendo a apresentar um comportamento insensível, onde a resistência de pico é equivalente à resistência residual, quanto maior for o teor de umidade. Quanto à modificação da resistência em função da umidade, a amostra 03 apresentou uma variação de 3 kPa para 1,5% de variação no teor de umidade, mostrando uma tendência de redução na resposta do material em função do teor de água contida na amostra.

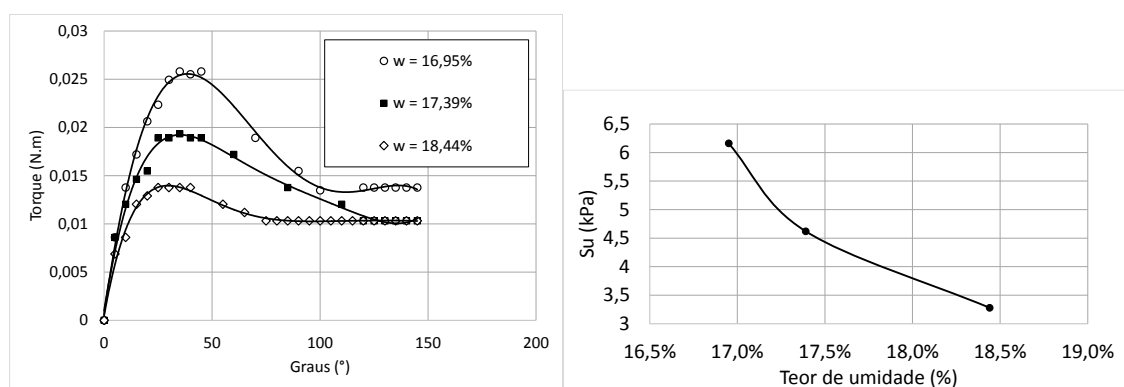


Figura 5.19. Curva de variação da resistência em função do teor de umidade.  
Amostra 03 - Minério Autoclavado.

Para a amostra de rejeito novo, observou-se pela Figura 5.20, que para um teor de umidade de 72%, o material apresenta uma resistência de pico significativamente superior às resistências obtidas para os demais teores de

umidade. Além disso, observou-se que o material com menor teor de umidade tende a apresentar maior sensibilidade quando comparado aos demais teores avaliados. Com relação à variação da resistência na faixa de teores de umidade, nota-se que há uma variação de 11 kPa, para diferenças de 10% no teor de umidade, mantendo, portanto, a tendência de redução na resposta do material em função do teor de água contida na amostra

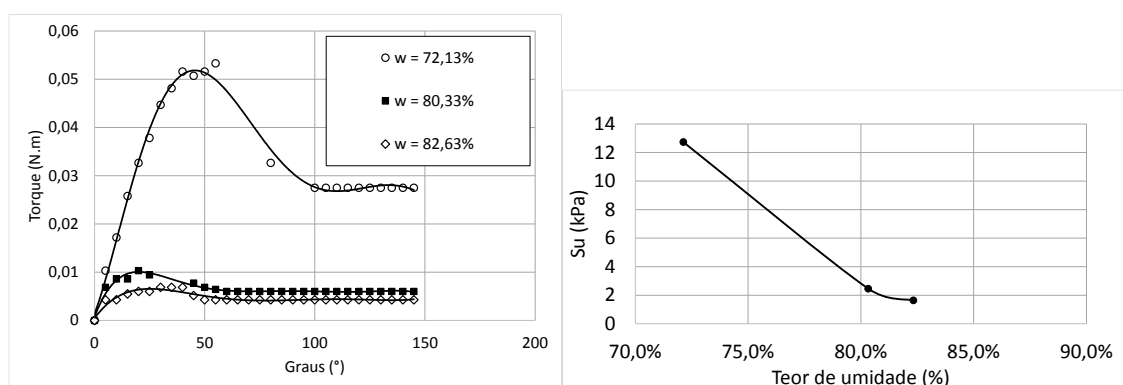


Figura 5.20. Curvas de variação da resistência em função do teor de umidade.  
Amostra 04 – Retido nos filtros – Rejeito novo.

De acordo com o apresentado na Figura 5.21, a amostra 05 apresenta um comportamento de material sensível à medida que seu teor de umidade diminui. Para o teor de umidade de 52%, calculou-se uma sensibilidade de 3,9, enquanto que para os teores de umidade de 61% e 67%, obteve-se 2,00 e 1,78, respectivamente. Nota-se que mesmo com altos teores de umidade (67%), o material apresenta uma resistência não drenada equivalente à do minério bruto com 14% de umidade, variando 11 kPa para uma faixa de variação de 11% da umidade.

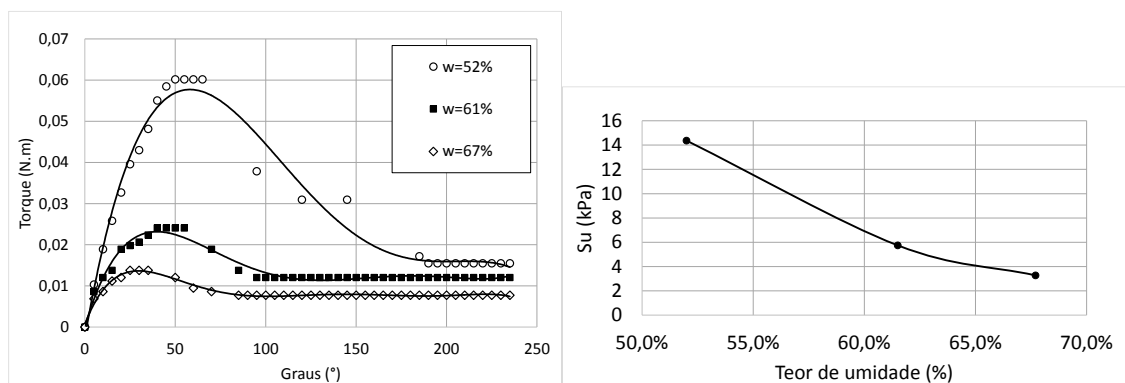


Figura 5.21. Curva de variação da resistência em função do teor de umidade.  
Amostra 5 – Pilha – Rejeito antigo.

Por fim, a Figura 5.22 apresenta uma estimativa da resistência não drenada dos materiais para os teores de umidade do limite de liquidez e umidade ótima de compactação. Vale lembrar que os valores aqui apresentados indicam apenas uma estimativa do comportamento, uma vez que as amostras ensaiadas não foram compactadas, não correspondendo, portanto, a valores construtivos.

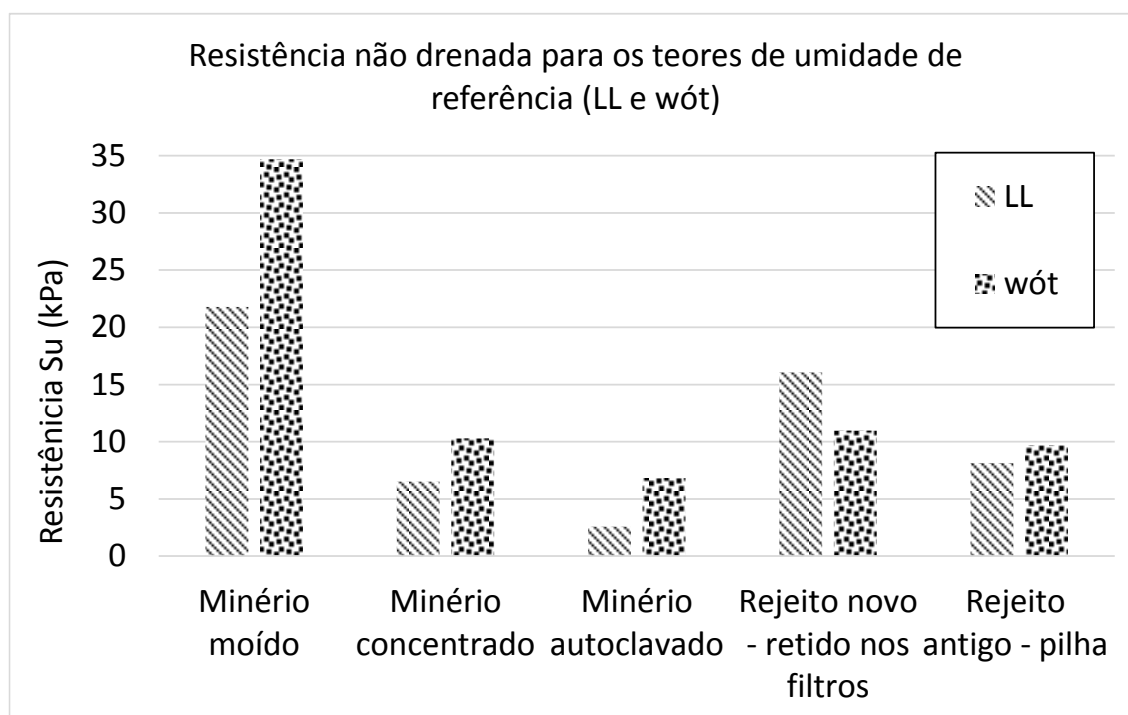


Figura 5.22. Estimativa da resistência não drenada para os teores de umidade de referência.

Percebe-se que o material tende a sofrer uma perda na resistência à medida que vai sendo beneficiado, ocorrendo no rejeito novo, um aparente ganho de resistência, o qual pode ser explicado pela coesão aparente do material, resultante da alta sucção da amostra, e também do surgimento de minerais que configuram maior resistência ao material, conforme observado pela análise mineralógica.

Em linhas gerais, a variação da resistência não drenada dos materiais apresentou maior sensibilidade quanto à variação da umidade para as amostras de minério bruto, concentrado e autoclavado. Para as amostras de rejeito novo, além de ser notada menor resistência do material em função do teor de umidade, nota-se também um ganho de resistência quando comparado ao minério autoclavado, o qual pode estar relacionado ao surgimento de minerais como o sulfato de cálcio hemihidratado (bassanita) e o sulfato de cálcio hidratado (gipsita), os quais, de acordo com Brasil (2005), apresentam alta resistência mecânica.

## 5.6 RESUMO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS

Em função da grande variabilidade de resultados obtidos nos ensaios realizados, a Tabela 5.7 apresentada a seguir busca apresentar uma compilação dos principais resultados obtidos, de modo a permitir uma rápida comparação entre as amostras estudadas.

Tabela 5.7. Resumo dos principais resultados.

<b>Amostra</b>	<b>01 – Minério bruto</b>	<b>02 – Minério concentrado</b>	<b>03 – Minério autoclavado</b>	<b>04 – Retido nos filtros – Rejeito novo</b>	<b>05 – Pilha – Rejeito antigo</b>
<b>Umidade higroscópica (%)</b>	0,24	0,23	6,35	16,97	31,27
<b>% de finos</b>	59,3	75,3	62,6	90,3	81,1
<b>Peso específico real dos grãos - <math>\rho_s</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	3,24	3,73	3,84	2,89	3,47
<b>% de CaO</b>	20,9	9,7	3,6	10,1	4,6
<b>% de SiO<sub>2</sub></b>	6,8	14,9	11,4	26,2	31,7
<b>% de ZnO</b>	15,4	38,6	52,5	2,9	7,6
<b>Limite de liquidez - LL (%)</b>	11,1	12,7	19,0	69,0	59,7
<b>Limite de plasticidade - LP (%)</b>	NP	11,8	16,7	53,3	35,4
<b>Umidade gravimétrica ótima de compactação - <math>w_{ótg}</math> (%)</b>	8,1	10	15,9	73	58
<b>Umidade volumétrica ótima de compactação - <math>w_{ótv}</math> (%)</b>	20	27	32,5	58	49
<b>Massa específica seca máxima - <math>\gamma_d</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,34	2,62	2,30	0,88	1,10
<b>Umidade volumétrica máxima (%)</b>	27	30	40	70	74
<b>Sucção total na <math>w_{ótv}</math> (kPa)</b>	700	450	90	500	3500
<b>Resistência não drenada na <math>w_{ót}</math> (Su) (kPa)</b>	34	10	7	11	9
<b>Resistência não drenada no LL (Su) (kPa)</b>	22	7	3	16	8

## 6 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como principal objetivo avaliar a variação dos parâmetros geomecânicos do minério de zinco ao longo do processo de beneficiamento industrial. A proposta básica consistiu na investigação de diferentes parâmetros geotécnicos interdependentes e atuantes sobre o comportamento do material, do ponto de vista da mecânica dos solos clássica, em amostras extraídas de diferentes etapas do processo. Para isso, foram utilizadas amostras provenientes de diferentes etapas do processo, selecionadas em função da sua representatividade sobre o material considerado rejeito do processo, possibilitando responder aos questionamentos apresentados no capítulo 1 deste trabalho.

Foram realizados estudos e ensaios laboratoriais visando caracterizar o material e determinar parâmetros de compactação, curva característica e resistência não drenada em 5 amostras representativas de diferentes etapas de beneficiamento mineral. Os resultados destes estudos, quando comparados entre si, permitem estabelecer as seguintes conclusões:

- Os resultados dos ensaios granulométricos realizados nas amostras apontam uma diferença de granulometria entre as partículas de minério, que consiste de um material de granulometria predominantemente areno-siltosa, e partículas de rejeito, que consiste de um material de granulometria siltosa com comportamento altamente plástico. Os materiais apresentam, portanto, características distintas.
- Foi constatada uma variação significativa no peso específico real dos grãos em todas as amostras, sendo esta variação devido aos processos que visam a concentração de zinco puro, nas amostras de minério bruto ( $\rho_s = 3,24 \text{ g/cm}^3$ ), concentrado ( $\rho_s = 3,73 \text{ g/cm}^3$ ) e autoclavado ( $\rho_s = 3,84 \text{ g/cm}^3$ ). Para as amostras de rejeito novo ( $\rho_s = 2,89 \text{ g/cm}^3$ ) e antigo ( $\rho_s = 3,47 \text{ g/cm}^3$ ), a

variação de peso específico ocorreu em função tanto das alterações na mineralogia das amostras quanto das diferenças de propriedades das frentes de lavra das quais cada uma se originou.

- Entende-se que a presença de sílica gel faz com que o rejeito apresente comportamento típico de material plástico, mesmo com teores de umidade superiores ao LL, quando se esperaria um comportamento típico do estado líquido dos solos.
- A grande variação no teor de umidade higroscópica, limite de liquidez e umidade ótima de compactação entre as amostras durante o beneficiamento (minério bruto, concentrado e autoclavado), e rejeitos (rejeito novo e antigo) confirmam o comportamento hidrofílico do material após a lixiviação ácida. Este comportamento hidrofílico e atípico para solos naturais está relacionado à formação de sílica gel no material lixiviado, retido nos filtros.
- As curvas características obtidas indicam um aumento no teor de umidade volumétrica saturada dos materiais ao longo do processo, indo de 40% para o minério autoclavado, para 70% para o rejeito novo. Este acréscimo se deve ao aumento no teor de finos das amostras (62,6% e 90,3% passante na peneira #200, respectivamente) e também, ao surgimento de características hidrofílicas no material.
- As curvas de retenção determinadas através do papel filtro mostram que os rejeitos novo e antigo apresentam maiores teores de umidade volumétrica para um mesmo valor de sucção, quando comparados aos minérios bruto, concentrado e autoclavado.
- Ao se comparar os teores de umidade volumétrica ótima de compactação com os teores de umidade volumétrica do material, pode-se afirmar que quando compactados na umidade ótima, os rejeitos novo e antigo apresentam altos valores de sucção no material, sendo que a alta nestes valores se deve tanto à presença de sílica gel quando ao aumento do teor de finos no material.
- Da comparação das curvas de resistência não drenada dos materiais, observou-se que o processo de beneficiamento resulta em uma considerável perda de resistência no material, indo de 34 kPa no minério bruto, para 7 kPa no minério autoclavado, ambas estimadas para a amostra moldada na

umidade ótima de compactação. Após a autoclavagem, o rejeito novo passa a apresentar um ganho de resistência, indo para  $S_u=11\text{kPa}$ .

- O rejeito de zinco estudado apresenta teor de umidade ótima de compactação muito próximo do limite de liquidez. Dessa forma, para que o material apresente um comportamento geotécnico adequado, é necessário que sua compactação seja feita no ramo seco.
- Quanto à composição química e mineralógica das amostras, os resultados dos ensaios de caracterização, compactação, curvas de retenção e resistência não drenada comprovam que estas características têm grande influência sobre o comportamento geotécnico do material, fazendo com que a cada etapa de beneficiamento em que a mineralogia do material é alterada, os parâmetros geotécnicos sofram alterações em função disso.
- Em linhas gerais, o processo de beneficiamento do minério provoca alterações em suas características, resultando em materiais cujas propriedades geotécnicas sofre influência de variações da mineralogia e, conseqüentemente, dos componentes com características hidrofílicas. Tal fato deve influenciar os níveis de poro pressão observados em campo, que se mantém constante em função da presença de água adsorvida pela sílica gel na massa de rejeito.

Finalmente, pode-se concluir que o estudo dos rejeitos de mineração como materiais geotécnicos para construção representa um grande desafio perante a mecânica dos solos clássica. A evolução de minério para rejeito resulta em materiais com comportamento geotécnico distinto do material de origem e variável em função dos processos industriais aos quais o material é submetido. Dessa forma, o rejeito de mineração não pode ser avaliado puramente através de analogias com a mecânica dos solos clássicas, e sim, através de um estudo detalhado de evolução mineralógica e parâmetros geotécnicos. Entende-se que se torna necessário criar um capítulo especial dentro da Mecânica dos Solos para o estudo destes materiais, este capítulo poderia se chamar Mecânica dos Rejeitos e deve estudar as especificidades aplicáveis a estes materiais.

## 7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

O processo de beneficiamento mineral mostrou ter grande influência sobre o comportamento geomecânico do rejeito ao final o processo. A série de ensaios realizados e apresentados no presente trabalho mostrou a ocorrência da variação dos parâmetros, porém, ainda não apresenta de maneira sucinta a variação dos parâmetros de resistência, por exemplo.

Dessa forma, a continuação de pesquisas na área pode dar sequência ao entendimento do comportamento do rejeito de mineração em função do processo de beneficiamento a que é submetido, uma vez que esta é uma abordagem ainda pouco estudada. Neste contexto, são sugeridas as seguintes pesquisas futuras:

- Avaliação do comportamento tensão x deformação dos materiais para amostras moldadas tanto nos parâmetros ótimos de compactação, quanto nos ramos seco e úmido, de modo a verificar o quanto a variação em teores de umidade pode influenciar na resistência final do material compactado.
- Determinação da função de condutividade hidráulica dos materiais, visando avaliar o comportamento da permeabilidade não saturada dos materiais. Além disso, recomenda-se a repetição dos ensaios para determinação das curvas características através de outro método, de modo a permitir a interpolação dos pontos obtidos pelos dois métodos e a correta estimativa das trajetórias de umedecimento e secagem.
- Realização de ensaios visando a confirmação das características hidrofílicas do material e avaliação de até que ponto, a capacidade de adsorção de água interfere nos demais parâmetros geotécnicos.

- Se possível, avaliar as alterações ocasionadas pelo beneficiamento de outros minerais, buscando responder se apenas a frente de lavra é responsável pela variação em parâmetros geotécnicos de rejeitos de um mesmo minério, ou também o processo de beneficiamento ao qual é submetido.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Carolina Bittencourt de. **Tratamento hidrometalúrgico do resíduo da rota de processamento de zinco primário para a recuperação de sulfato de calico visando aplicação industrial.** 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009.

AL-SHAYEA, Naser A. The combined effect of clay and moisture content on the behavior of remolded unsaturated soils. **Engineering Geology**. v. 62. p. 319-342, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 2487.** Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). ASTM, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 4648.** Standard test method for Laboratory Miniature Vane Shear Test for Saturated Fine-Grained Clayey Soil. ASTM, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 5298.** Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. ASTM, 2003.

ARAUJO, Cecília Bhering de. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro.** Rio de Janeiro, 2006. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459.** Determinação do Limite de Liquidez. ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502.** Rochas e solos. ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180.** Determinação do Limite de Plasticidade. ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181.** Análise Granulométrica. ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182.** Ensaio de compactação. ABNT, 1986.

BARNEKOW, Ulf; HAASE, Matthias; WELS, Christoph. Geomechanical fine tailings characterization and 1-D-Consolidation modeling of slime zones at WISMUT tailings impoundments. In: SOFT TAILINGS STABILIZATION WORKSHOP, 1999, Chemnitz, Germany **Practice and Experiences**. Disponível em: <http://www.infomine.com/library/publications/docs/barnekow.pdf>. Acesso em: 08/05/2014.

BEDIN, Jucélia. **Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração**. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

BORGES, Antonio Landi; PAIVA, Paulo Roberto. **Relatório Executivo de Projeto - VMZ-TM-2011-PE-GT-RT-001**. 2011.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Economia Mineral do Brasil**. Brasília: DIDEM, 2009 B.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia, Centro de Tecnologia Mineral – CETEM. **Gipsita**. Rio de Janeiro, 2005.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia, Centro de Tecnologia Mineral – CETEM. **Determinação das densidades de sólidos e polpa**. Rio de Janeiro, 2007.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – SGM. **Relatório Técnico 25 – Perfil do Minério de Zinco**. Brasília, 2010.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – SGM. **Relatório Técnico 65 – Perfil do Zinco**. Brasília, 2009 A.

CAMPAÑA, J. Bard E.; VERDUGO, R. Shear strength and deformation modulus of tailing sands under high pressures. 18<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. **Proceedings**. p. 313-316, 2013.

CASAGRANDE, Arthur. Characteristic of Cohesionless Soils Affecting the Stability of Slope and Earth Fill. **Journal of the Boston Society of Civil Engineering**. January, p. 13 – 32, 1936.

CASAGRANDE, Arthur. Liquefaction and cyclic deformation of sands. Critical review. In: FIFTH PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1975, Buenos Aires. **Proceedings**. Buenos Aires: ISSMFE. p. 79-133.

ÇOPUR, Mehmet *et al.* Optimization study of the leaching of roasted zinc sulphide concentrate with sulphuric acid solutions. **Chemical Engineering and Processing**. v. 43. p. 1007 – 1014, 2004.

COSTA, Teófilo Aquino Vieira da. **Caracterização geológico-geotécnica e modos de ruptura do minério hematítico friável nas Minas da Vale**. 212 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil,

Área de concentração de Geotecnia Aplicada à Mineração) – Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2009.

CRAIG, Robert F. **Mecânica dos Solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

CRUZ, Paulo Teixeira da. **100 Barragens Brasileiras: Casos históricos, Materiais de Construção e Projeto**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

DAS, Braja M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 084**. Solos – Determinação da Densidade Real. DER, 1995.

D'AGOSTINO, Luis Fernando. **Praias de barragens de rejeitos de mineração: características e análise da sedimentação**. São Paulo, 2008. 244 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

DINIS, C. S. **Captação de vapor de água em sílica gel para sistema de refrigeração a vácuo**. 66 f. Dissertação (Mestrado em Mecânica, Área de Energia e Ambiente) – Universidade de Coimbra. Coimbra, 2013.

DUARTE, Lucas Barros. **Avaliação numérica do dimensionamento de sistemas de cobertura para reservatórios de disposição de resíduos de mineração**. 143f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.

ESPIARI, Shirin; RASHCHI, Fereshteh; SADMEZHAAD, S. K. Hydrometallurgical treatment of tailings with high zinc content. **Hydrometallurgy**.v. 82.p. 54 – 62, 2006.

FALL, M.; *et al.* A contribution to understanding the effects of curing temperature on the mechanical properties of mine cemented tailings backfill. **Engineering Geology** 114 (2010) 397–413

FEIJÓ, Fernanda Diamantino. **Redução das perdas de zinco associadas aos processos de purificação do licor por cementação e de tratamento dos resíduos gerados da Votorantin Metais**. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Área de concentração de Hidrometalurgia) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

FILHO, Luiz Heleno Albuquerque. **Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de piezocone**. 213 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Área de concentração de Geotecnia) – Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2004.

FILHO, J. M.; FREITAS, J. A.; COSTA, M. M .M. **Disciplina Materiais de Construção – Reologia - Notas de aula**.. 32 f. – Universidade Federal do Paraná. Paraná, 2007.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**. v. 31, n. 4, p. 521-532. 1994.

FULS, H. F.; KRUGER, J.; GREUNEN, P van. Water reduction at skorpion zinc and the impact on the environment. **The Southern African Institute of Mining and Metallurgy Base Metals Conference 2009**. v. 82. p. 54 – 62, 2009.

FUGRO IN SITU GEOTECNIA LTDA. **Investigação técnica – Relatório Técnico - GHT-02-LAB-01** . 2011.

FURLAN, Gladis Cristina. **Avaliação da influência de um agente repelente sobre as propriedades mecânicas e hidráulicas de um solo arenoso**. 105f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia Ambiental) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008.

GEOCONSULTORIA. **Relatório técnico -CM35-RT-11**. 2014.

GEOCONSULTORIA. **Locação das investigações e instrumentação - CM35-DE-031**. 2013.

GEOHYDROTEC. **Relatório técnico - VMZ001-X-RT-003-R0** . 2014 A.

GEOHYDROTEC. **Relatório técnico - GHT-02-LAB-01**. 2014 B.

GUIZELINI, Adhara Palácio. **Estudo do comportamento hidromecânico de solos visando a construção de sistemas de cobertura alternativos para aterros sanitários**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). 168f. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

HEGAZY, Y. A.; CUSHING, A. G.; LEWIS, C. G. Physical, mechanical, and hydraulic properties of coal refuse for slurry impoundment design. In: 2<sup>nd</sup> International Conference on Site Characterization. **Proceedings**. Porto. 2004. p. 1285 – 1292.

HERNANDEZ, Hector Mauricio Osorio. **Caracterização geomecânica de rejeitos aplicada a barragens de aterro hidráulico**. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília. Brasília, 2002.

LAMBE, T. William; WHITMAN, Robert V. **Mecânica de Suelos**. Mexico: Limusa, 1994.

LAMBE, T. William; WHITMAN, Robert V. **Soil Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1970.

LOPES, Marilene Christina Oliveira. **Disposição hidráulica de rejeitos arenosos e influencia nos parâmetros de resistência**. 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília. Brasília, 2000.

LOPES, Maria Bernadete Luciano. **Influência da sucção na resistência ao cisalhamento de um solo residual de filito de Belo Horizonte, MG.** 175f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

MARINHO, Fernando Antônio Medeiros. Medição de sucção com o método do papel filtro. **X Brazilian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.** v.2. p.515-522.1994.

MARINHO, Fernando Antônio Medeiros. Medição de sucção em solos. In: 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. **Anais.** v. 2. Rio de Janeiro, 1997.

MARTINS, Lemyr. **Produção de concentrado de zinco a partir de minério silicatado com redução no teor de carbonatos.** 152f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011.

MENDES, Mardon Borges. **Comportamento geotécnico de uma barragem de rejeito alteada para montante.** 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia, Área de concentração de Engenharia Geotécnica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

MOREIRA, Thiago Borges Gomes. **Avaliação de sistemas de drenagem com geossintético para diminuição da umidade no minério de ferro da Serra de Carajás.** 232f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011.

MOURA, Sérgio de Paula. **Bicamadas Catiônicas em sílica: Adsorção e estabilidade coloidal a baixa força catiônica.** 55 f. Dissertação (Mestrado em Bioquímica) -Universidade de São Paulo, 2003.

NICOL, J. M. **Electrowinning and electrorefining of metals. A course presented to UFMG.** Programa de Cooperação UFMG (Depto. Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Murdoch University (Parker Center). Brasil, p. 1 – 23, 2005.

OLIVEIRA, V. V. **Novos adsorventes derivados de sílica gel modificada com aminas e glutaraldeído.** 90 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Departamento de Química da Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2008.

PATROL INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA E INSTRUMENTAÇÃO. **Relatório de ensaios de Laboratório.** 2014 A.

PATROL INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA E INSTRUMENTAÇÃO. **Relatório de ensaios de Campo - CPTu.** 2014 B.

PATROL INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA E INSTRUMENTAÇÃO. **Relatório de ensaios de Campo – Vane Shear Test.** 2014 C.

PRADO, A. G. S.; FARIA, E. A.; PADILHA, P. M. Aplicação e modificação química da sílica gel obtida de areia. **In: Quim. Nova**, Vol. 28, No. 3, 544-547, 2005

PEREIRA, Brasileu Agnaldo. **Adensamento e simulação do processo de enchimento do reservatório de uma barragem para contenção de rejeitos de ouro**. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2006 B.

PEREIRA, Daniel Dayrell. **Recuperação de zinco presente em efluentes industriais produzidos pela Votorantin Metais unidade Três Marias utilizando-se a técnica de extração líquido-líquido**. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006 A.

PEREIRA, Carlos Alberto; *et al.* Depressores para dolomita na flotação de willemita. **Revista Escola de Minas de Ouro Preto**. v. 64. p. 105-109. 2011.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PRESOTTI, Ednelson da Silva. **Influência do teor de ferro nos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro**. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Área de concentração de Geotecnia) – Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2002.

ROBERTSON, A. Macg; LLYOD, T.; ROBINS, M. Residue Disposal at Sadiola Hill Gold Mine: Stability Evaluation by Field Testing. In: International Mining Conference.. **Proceedings**. Johannesburg, 2003. Disponível em: <<https://www.rgc.ca/files/publications/AMRsadiola2003.pdf>> Acessado em: 01/07/2014.

ROBERTSON, Steffen; KIRSTEN. **Red Dog Mine Closure and Reclamation Plan – Consolidation of Studies on Geochemical characterization**. Vancouver, 2003.

RUSSO, Felipe de Moraes. **Comportamento de barragens de rejeitos construídas por aterro hidráulico: caracterização laboratorial e simulação numérica do processo construtivo**. 331 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília. Brasília, 2007 A.

RUSSO, Mário Luís Cabello. **Beneficiamento de rejeito de minério de zinco**. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Área de concentração de Tratamento de Minérios e Resíduos) – Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2007 B.

SAFARI, Vida et al. A Shrinking particle-shrinking core model for leaching of a zinc ore containing sílica. **International Journal of Mineral Processing**. v. 93. p. 79 – 83, 2009.

SHAMSAI, Abolfazl *et al.* Geotechnical Characteristics of Copper Mine Tailings: A case study. **Geotechnical and Geological Engineering**. v. 25. p. 591 – 602, 2007.

SILVA, Gilson Pereira *et al.* Caracterização química, física e mineralógica de estéreis de rejeito da mineração de ferro da Mina de Alegria, Mariana – MG. **Pesquisa agropecuária Mineral**. v. 36. n. 1. p. 45 – 52, 2006.

SILVA, Kriscila Pedrosa da. **Estudo do reaproveitamento do resíduo gerado no processo hidrometalúrgico de fabricação de sulfato de zinco heptahidratado**. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental, Área de concentração de Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2008 A.

SILVA, W. R. **Nova Metodologia para Determinação de Propriedades de Sedimentação e Adensamento de Rejeitos de Mineração**. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, 2008 B.

SKEMPTON, A. W.; NORTHEY, R. D. The sensitivity of clays. **Géotechnique**. Reino Unido. v. 3, n. 1, p. 30-53. 1952.

SOGA, Kenichi; MITCHELL, J. K. **Fundamentals of soil Behavior**. New York: John Wiley & Sons, 2005.

SOUZA, Adelson Dias de *et al.* Kinetics of sulphuric acid leaching of a zinc silicate calcine. **Hydrometallurgy**. v. 89. p. 337 – 345, 2007.

SOUZA, Adelson Dias de. **Integration processes of the treatments of zinc silicate ore and roasted concentrates of zinc sulphides**, US 2005/0069473 A1, Mar. 31, 2005 A.

SOUZA, Adelson Dias de. **Cinética de lixiviação dos concentrados de zinco utilizados na Votorantin Metais**. 113 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Área de concentração de Processos de Fabricação) – Rede Temática em Engenharia de Materiais. Ouro Preto, 2007.

SOUZA, Adelson Dias de. **Processo integrado: biolixiviação e lixiviação química na indústria do zinco**. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais, Área de concentração de Engenharia de Processos) – Rede Temática em Engenharia de Materiais. Ouro Preto, 2005 B.

SWARBRICK, Gareth; FELL, Robin. Modeling Desiccating Behavior of Mine Tailings. **Journal of Geotechnical Engineering**. v. 118. n. 4. p. 540 – 557, 1992.

Swanson, D. A. *et al* Predicting the soil-water characteristics of mine soils. **Proceedings of Tailings and Mine Waste**. v. 99. p. 344-349, 1999.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1948.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**. n. 44, p. 892-898. 1980.

VICK, S. G. **Planning, Design, and Analysis of Tailing dams**. New York: John Wiley & Sons, 1990.

VILLAR, Lúcio Flávio de Souza. **Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita**. 511f Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro . Rio de Janeiro, 2002.

WESTRAAD, Delmé. **Suction induced shear strength of gold mine tailings**. 150f. Dissertação (Master of Engineering – Geotechnical Engineering) University of Pretoria. Pretoria, 2004.

WORTMANN, Heidi. **Sedimentation and Desiccation of Gold Mine Tailings**. 226 f. Dissertação (Master of Engineering, Geotechnical area) – University of Pretoria. Gauteng, 2007.

ZHANG, Yongshuang; QU, Yongxin; WU, Shuren. Engineering Geological Properties and Comprehensive Utilization of the Solid Waste (red mud) in Aluminium Industry. **Environmental Geology**. v. 41. p. 249 – 256, 2001.