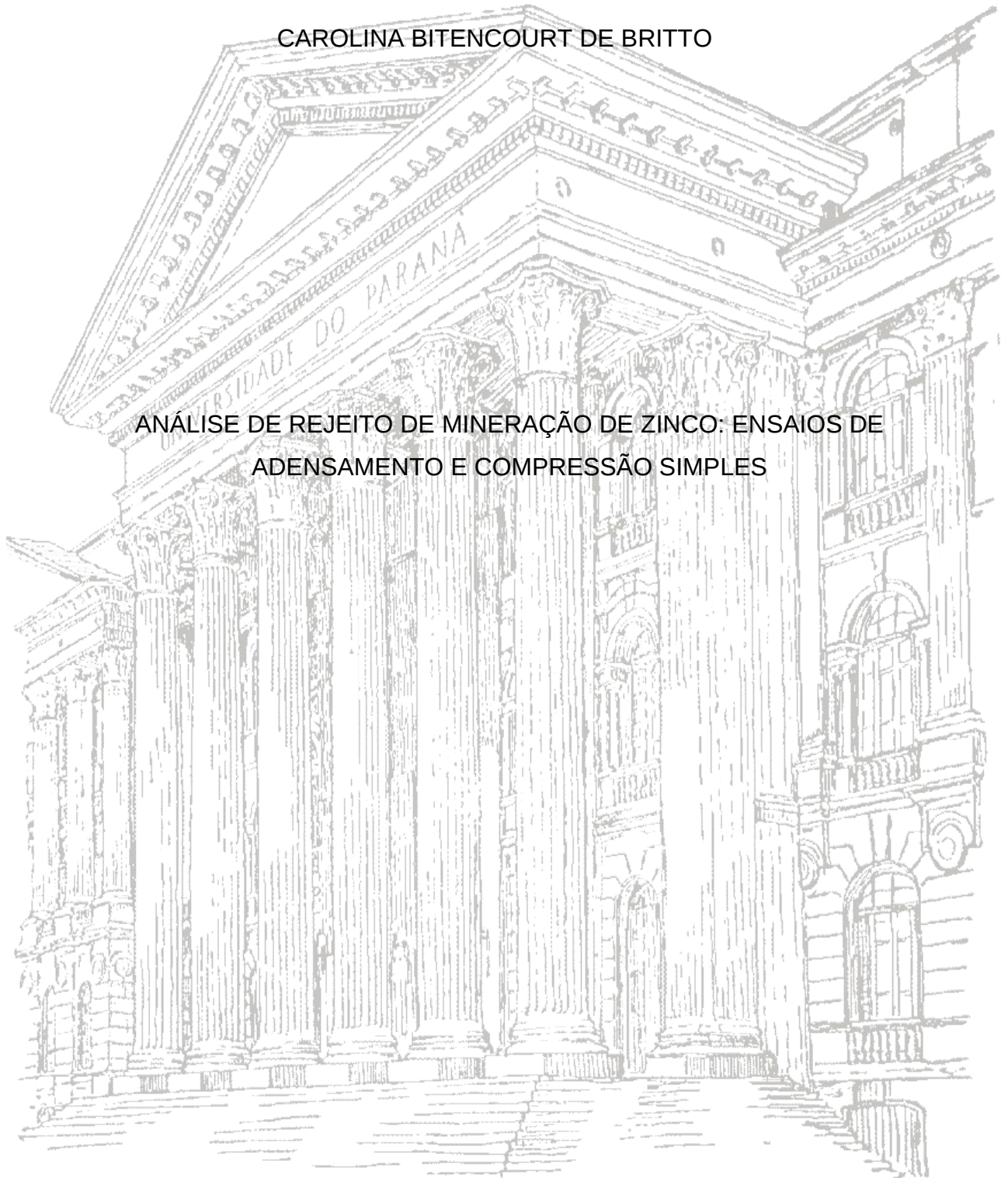


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CAROLINA BITENCOURT DE BRITTO

ANÁLISE DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE ZINCO: ENSAIOS DE
ADENSAMENTO E COMPRESSÃO SIMPLES



CURITIBA
2015

CAROLINA BITENCOURT DE BRITTO

ANÁLISE DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE ZINCO: ENSAIOS DE
ADENSAMENTO E COMPRESSÃO SIMPLES

Monografia apresentada à disciplina de Trabalho de
Conclusão de Curso II do curso de Geologia,
Departamento de Geologia, Setor de Ciências da
Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientação: Prof^a Dra. Juciara Carvalho Leite

Co-orientação: Prof. Dr. Sidnei Hélder Teixeira

CURITIBA
2015

RESUMO

A caracterização de rejeito de mineração de zinco quanto à sua resistência ao cisalhamento e à compressão, é de fundamental importância para entender o comportamento desse material frente à estabilidade das pilhas de rejeito. O rejeito de zinco estudado possui alta plasticidade e teor de umidade ótima de compactação maior que o seu limite de liquidez. Para entender o comportamento atípico desse material, foi realizado ensaios de adensamento e compressão simples em amostras de diferentes etapas do processo de beneficiamento do minério de zinco. Os coeficientes de adensamento obtidos, variam de $1,5 \times 10^{-3}$ a $3,5 \times 10^{-3}$ cm²/s, valores estes adequados para argilas, o que não coincidem com a granulometria siltosa das amostras. À medida que o processo de beneficiamento evolui, aumenta o índice de compressão, e os rejeitos apresentam-se mais compressíveis do que solos naturais na mesma consistência. Devido aos resultados apresentados indicarem comportamento de material argiloso, diferentemente do material estudado, a caracterização geomecânica adequada para os rejeitos ainda é uma problemática para a mecânica dos solos.

Palavras-chave: Rejeito de mineração. Minério de zinco. Adensamento. Compressão simples.

ABSTRACT

Characterization of zinc mining tailings as to its shear strength and compression, is very important to understand the behavior of this material front the stability of tailings piles. The tailings studied zinc has high plasticity and optimum moisture content of greater compression than its liquid limit. To understand the unusual behavior of this material was carried out consolidation tests and compressive samples from different stages of beneficiation process zinc ore. The densification ratios obtained $1,5 \times 10^{-3}$ to $3,5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 / \text{s}$ vary, values suitable for clays, which does not coincide with the silt particle size of the samples. As the beneficiation process progresses, it increases the compression ratio and the tailings are shown more compressible than natural soils in the same consistency. Due to the results presented indicate behavior of clay material, unlike the studied material, the geomechanical characterization suitable for the waste is still a problem for soil mechanics.

Keywords: Mine tailing. Zinc ore. Densification. Simple compression.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Fluxograma do processo de beneficiamento do minério de zinco.	12
Figura 3.2 - Curvas granulométricas de vários rejeitos de mineração.....	14
Figura 3.3 - Difratoograma da amostra de rejeito de mineração de zinco.....	16
Figura 3.4 - Permeabilidade de rejeito de mineração de zinco.	17
Figura 3.5 - Relação entre ângulo de atrito, porosidade e teor de ferro.	18
Figura 3.6 - Curvas de compressibilidade de diversos rejeitos de mineração.....	20
Figura 3.7 - Curvas de permeabilidade de diferentes rejeitos de mineração.	21
Figura 4.1 - Comparação entre as curvas de compactação de todas as amostras...	25
Figura 4.2 - Difratoogramas das amostras.	26
Figura 4.3 - Curvas características das amostras.	27
Figura 4.4 - Estimativa da resistência não drenada das amostras.	28
Figura 5.1 - Esquema da célula de adensamento.	30
Figura 5.2 - Prensa de adensamento usada no laboratório.	31
Figura 5.3 - Amostras 2 e 3 após ensaio de adensamento.	31
Figura 5.4 - Corpo-de-prova moldado sobre a prensa EMIC.....	32
Figura 6.1 - Coeficientes de adensamento de todas as amostras.....	35
Figura 6.2 - Curvas de índice de vazios x pressão aplicada.	37
Figura 6.3 - Curvas de tensão x deformação das amostras.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Composição química de rejeito de mineração de zinco.	16
Tabela 3.2 - Valores de coeficientes de adensamento para alguns rejeitos de mineração.....	19
Tabela 3.3 – Alguns tipos de rejeitos e suas propriedades geotécnicas.	19
Tabela 4.1 - Caracterização básica das amostras utilizadas nos ensaios.	24
Tabela 6.1 – Coeficientes de adensamento das amostras.....	34
Tabela 6.2 – Coesão, ângulo de atrito interno e tensão efetiva das amostras	38

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. OBJETIVOS	8
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
3.1 O MINÉRIO DE ZINCO	8
3.2 BENEFICIAMENTO DE ZINCO	10
3.3 REJEITOS DE MINERAÇÃO	13
4. ESTUDO DE CASO	22
4.1 DISPOSIÇÃO DO REJEITO	22
4.2 ESTUDOS PRÉVIOS DO MATERIAL	23
5. ENSAIOS	29
5.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	29
5.2 ENSAIO DE ADENSAMENTO	29
5.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES	32
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS	33
7. CONCLUSÃO	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1. INTRODUÇÃO

O estudo do comportamento dos solos com a aplicação de compressão, tensão e deformação é a principal etapa dos projetos geotécnicos em quaisquer obras de engenharia. No âmbito da mineração, o estudo do comportamento dos rejeitos de mineração é indispensável para a estabilização das pilhas de armazenamento dos rejeitos e, conseqüentemente, para prevenir desastres ambientais, tal como o ocorrido em novembro de 2015 em barragem de rejeito de minério de ferro da Mineração Samarco, em Mariana, MG.

Os resíduos gerados do processo de mineração são geralmente empilhados e armazenados por barragens de terra, com o objetivo de isolar esse material para não causar contaminação da água e dos solos superficiais. Porém, os resíduos de mineração não apresentam comportamento semelhante aos materiais naturais granulares, em função dos diversos processos físicos e químicos a que foram submetidos durante o seu beneficiamento. O rejeito de zinco aqui estudado apresenta alta plasticidade e teor de umidade ótima de compactação maior que o seu limite de liquidez; além disso, apresenta grande susceptibilidade à liquefação. Essas características conjuntamente, tão peculiares, podem implicar em ruptura da barragem que contém tal rejeito.

Para caracterizar o rejeito de zinco e verificar a resistência ao cisalhamento e à compressão do mesmo, serão realizados ensaios de compressão simples e de adensamento.

Este trabalho complementa as atividades previstas para a análise do rejeito de zinco selecionado, originalmente estudado em dissertação de mestrado do Departamento de Construção Civil da UFPR (RIBEIRO, 2015), que objetiva compreender como o processo de beneficiamento exerce influência nas características geomecânicas do material. Para isso, foram analisadas amostras de diferentes etapas do processo de beneficiamento, visando entender tal comportamento geomecânico atípico do rejeito de zinco.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste projeto é caracterizar o rejeito de mineração de zinco quanto a suas resistências ao cisalhamento e à compressão e, com os dados obtidos até o momento, buscar entender as peculiaridades de seu comportamento frente à estabilidade das pilhas de rejeito.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os rejeitos de mineração são geralmente estudados no âmbito do beneficiamento mineral para uma maior eficácia do processo e no tratamento dos resíduos para sua disposição final. De modo geral, há poucos estudos sobre as características químicas e físicas dos rejeitos de mineração de zinco, o que torna necessária a realização de várias análises e ensaios laboratoriais para se obter o seu comportamento mecânico.

3.1 O MINÉRIO DE ZINCO

O zinco tem propriedade anticorrosiva e afinidade com outros metais, sendo utilizado como protetor do ferro e do aço nos processos de galvanização, e em ligas com alumínio, cobre e magnésio. Tem grande aplicação nas indústrias automobilísticas, da construção civil e de eletrodomésticos, além da indústria química, sendo usado na forma de óxido de zinco.

Os principais minerais dos quais se extrai o zinco, segundo o DNPM (2009), são: calamina (silicato hidratado de zinco), esfalerita (sulfeto de zinco), franklinita (óxido de zinco e ferro), hidrozincoita (carbonato de zinco), smithsonita (carbonato de zinco), willemita (silicato de zinco), wurtzita (sulfeto de zinco) e zincita (óxido de zinco).

Segundo a USGS, em 2013, as reservas mundiais de zinco chegam a aproximadamente 250 milhões de toneladas e os recursos mundiais a cerca de 1,9 bilhão de toneladas. Esses recursos estão localizados principalmente na Austrália

(25,5%), China (17,2%), Peru (9,6%) e México (7,2%). As principais reservas brasileiras, que representam apenas 0,7% das mundiais, estão localizadas no Estado de Minas Gerais, nos municípios de Vazante e Paracatu (DNPM, 2015).

A Votorantim Metais S/A é a única produtora de zinco no país, possuindo as minas de Vazante (Vazante - MG) e Morro Agudo (Paracatu - MG), das quais são extraídas o minério concentrado silicatado e sulfetado, respectivamente.

As reservas desses depósitos totalizam 5,8 milhões de toneladas de zinco contido. As reservas medidas das minas de Vazante apresentam teores médios de 20,0% e 15,0%, enquanto que a de Rio Branco e Paracatu registram teores de 5,1% e 3,6%, respectivamente (DNPM, 2009).

Vazante e Morro Agudo situam-se na parte oeste do Cráton do São Francisco, em meio a rochas dobradas e metamorfozadas em grau incipiente a baixo, de idades proterozóicas, que ocorrem em meio a rochas dolomíticas do Grupo Bambuí (BIONDI, 2003). O minério primário é acompanhado por intensa silicificação e dolomitização dos dolomitos encaixantes, intensamente cisalhado e controlado diretamente por falhas.

O rejeito de minério de zinco a ser estudado provém da mina de Vazante, onde a mineralização primária de zinco é composta por willemita, associada à hematita e a zincita, com quantidades menores de franklinita, smithsonita, esfalerita e galena (BIONDI, 2003).

Na mina de Vazante, o processo de beneficiamento é hidrometalúrgico, realizado através do método Integrado-Silicatado-Sulfeto de Souza (2000), que consiste na integração do processo RLE (*Roasting, Leaching and Electrolysis*) com o tratamento de concentrados silicatados. O resíduo gerado por esse processo irá compor o rejeito, que apresentará baixo teor e granulometria reduzida, e o concentrado de zinco puro formará o metal do tipo *Special High Grade* (SHG), cujo teor de zinco é 99,99%, além de produzir também o metal em lingotes, ligas de Zn e óxido de Zn (RUSSO, 2007).

3.2 BENEFICIAMENTO DE ZINCO

O processo de beneficiamento do minério de zinco ocorre inicialmente com o desmonte do minério das minas, com teor metálico que varia entre 3,6% a 20,0% (DNPM, 2009). Em seguida, são executadas sucessivas fases de britagem, e então o minério moído passa pelos processos de flotação e filtragem para a obtenção do concentrado, no qual o teor pode alcançar 45% (BRASIL, 2010).

A flotação é executada em minérios sulfetados de zinco, e tem como objetivo eliminar as impurezas presentes no concentrado sulfetado, como o cálcio e o magnésio. Estes elementos são provenientes do minério dolomítico e, se mantidos juntos ao concentrado sulfetado ao longo do processo, principalmente na lixiviação ácida, causam danos aos equipamentos devido à precipitação de sulfatos e incrustação do mesmo nesses materiais.

A flotação, segundo Souza (2007), é um processo complexo devido à solubilidade elevada do minério, à granulometria fina do material e aos reagentes usados no processo que, através das reações químicas, podem gerar variáveis que interferem no concentrado final de zinco.

Para o beneficiamento do minério concentrado sulfetado de zinco, é aplicado o processo hidrometalúrgico em aproximadamente 85% da produção das indústrias metalúrgicas de zinco (BRASIL, 2010). Esse tratamento do concentrado sulfetado de zinco é conhecido como RLE (*Roasting, Leaching and Electrolysis*), e consiste nos processos de ustulação, lixiviação e eletrólise do material (SOUZA, 2007).

A ustulação, também conhecida por “calcinação de sulfeto”, produz óxido de zinco (ZnO), chamado de calcinado, a partir do aquecimento do sulfeto de zinco (ZnS) em presença de gás oxigênio (SOUZA, 2007). Como subproduto desta reação, é gerado o dióxido de enxofre (SO₂), convertido posteriormente em ácido sulfúrico (H₂SO₄) para uso na lixiviação ácida (BRASIL, 2010). De acordo com Feijó (2007), compõe o ustulado, além de óxido de zinco, ferrita de zinco e outros óxidos metálicos, que chegam a 10% desse material.

Esse ustulado segue para a lixiviação neutra, na qual o zinco é solubilizado e purificado. Posteriormente, a solução de zinco vai para lixiviação com ácido sulfúrico, para extrair o zinco presente na ferrita, e em seguida é submetido a uma segunda purificação para remoção de metais que ainda possam estar presentes na

solução, tais como Cu, Co, Cd e Ni, (SOUZA, 2005). Durante essa fase, as impurezas geradas nos processos de lixiviação também são eliminadas para não afetarem o processo final de eletrólise.

O sulfato de zinco obtido pelo processo de purificação é submetido a uma corrente elétrica, com ânodo de chumbo e cátodo de alumínio, sobre o qual se deposita o zinco puro (BRASIL, 2010). A partir da deposição eletrolítica é produzido o zinco metálico *Special High Grade* (SHG), cujo teor de zinco é 99,99% (SOUZA, 2007; DNPM, 2009). São produzidos também metal em lingotes, ligas de Zn e óxido de Zn (RUSSO, 2007).

Após essas etapas, é feita a filtração da solução, e o material retido no filtro apresentará granulometria reduzida e baixos teores, e é ele que irá compor o rejeito (RUSSO, 2007). O filtrado retorna para o processo a fim de que ocorra a extração máxima do zinco (SOUZA, 2007).

Há algumas restrições no uso do processo RLE no tratamento dos concentrados de zinco com elevados teores de sílica, cálcio, cobre e ferro, conforme Souza (2007), que ainda informa da problemática causada pela grande quantidade de ácido sulfúrico gerado como subproduto. Segundo o mesmo autor, existem outros processos, como a Lixiviação Direta Atmosférica e a Lixiviação Sob Pressão, porém, tratam-se de processos que resultam em baixa pureza e menor aproveitamento e, por consequência, são muito pouco empregados.

Outro processo utilizado é o desenvolvido por Souza (2000), que consiste no processo de integração no tratamento de concentrados de silicatos e sulfetos de zinco, como é o caso do material de estudo. Este processo é denominado “Integrado-Silicato-Sulfeto”, e consiste na modificação do processo RLE, onde na etapa de lixiviação, os concentrados são tratados em conjunto (Figura 3.1).

Inicialmente, o minério concentrado silicatado passa por uma autoclave, com temperaturas entre 80° a 90°C, que solubiliza o cálcio e o magnésio, pelo mesmo motivo da flotação do concentrado sulfetado, e depois é filtrado a solução de zinco. Em seguida essa solução segue para o processo de lixiviação do silicato para separar o zinco, que será incorporado ao ustulado resultante do concentrado sulfetado para, juntos, passarem pela lixiviação neutra e demais processos do RLE (PEREIRA, 2006A; FEIJÓ, 2007; ABREU, 2009).

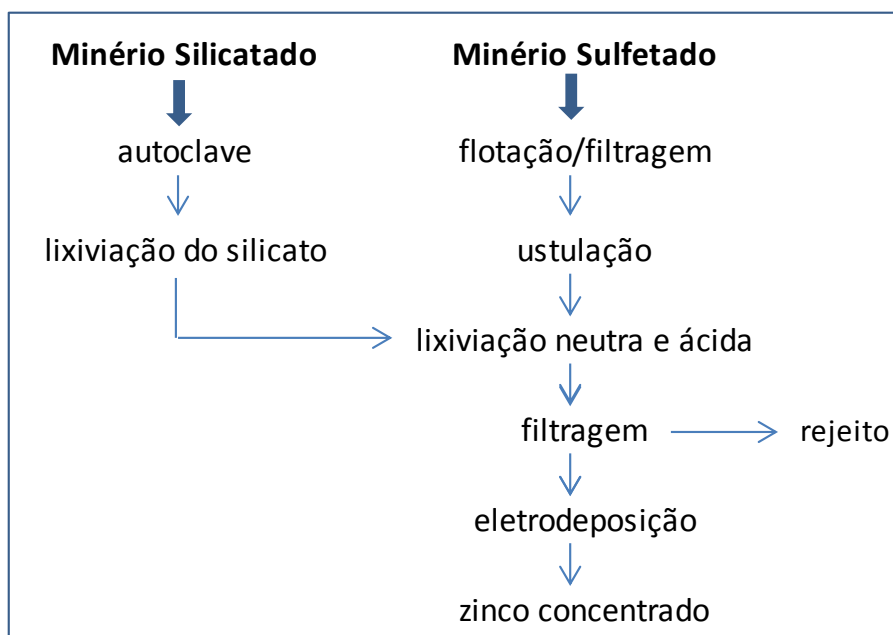
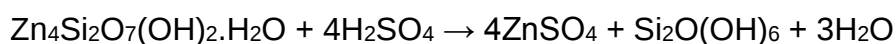


Figura 3.1 - Fluxograma do processo de beneficiamento do minério de zinco. Fonte: a autora.

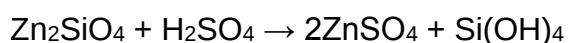
Ao término das etapas desse processo de beneficiamento Integrado-Silicatado-Sulfeto, o rejeito retido no filtro apresenta ainda alta concentração de zinco (12% a 21%), com grande quantidade de sílica (11% a 20%) e de alumínio (8% a 14%), assim como alto teor de enxofre (10%), e é encontrado na forma de sulfato (SILVA, 2008a).

Neste processo Integrado-Silicatado-Sulfeto, é produzida sílica gel (dióxido de silício sintético amorfo) durante o processo de lixiviação ácida (SOUZA, 2000; SOUZA *et al.*, 2007), formando uma camada em torno dos cristais de willemita e calamina. Na equação 1 e 2 é possível observar a formação de ácido monossilícico a partir da lixiviação com ácido sulfúrico, que a depender do pH e da temperatura, polimeriza, podendo formar partículas de sílica coloidal, que combinadas com água, formam sílica gel.

Equação 1: Lixiviação da calamina formando sulfato de zinco e ácido monossilícico.



Equação 2: Lixiviação da willemita formando sulfato de zinco e ácido monossilícico.



De acordo com Russo (2007), o processo químico de lixiviação ácida quebra os cristais de willemita, resultando em uma estrutura cristalina com afinidade à sílica, formando uma superfície hidrofílica.

3.3 REJEITOS DE MINERAÇÃO

O minério ao ser lavrado em uma jazida passa pelo processo industrial de beneficiamento, que visa à eliminação de outros minerais associados ao minério e consequente pureza e enriquecimento do produto final.

Os processos de beneficiamentos de minérios geram resíduos com granulação diferenciada do material de origem e cuja composição será influenciada pelos processos químicos a que foram submetidos os materiais. Tais resíduos são dispostos por lançamento hidráulico em reservatórios de barragens para essa finalidade, ou são armazenados em pilhas.

Os rejeitos de mineração possuem granulometria variada, dependente da mineralogia da rocha, do tipo de frente de lavra e do tipo de beneficiamento do minério. Segundo Pinto (2006), os solos de mesma origem possuem características comuns, mas frequentemente podem apresentar uma razoável dispersão de constituição granulométrica. Para os rejeitos, a granulometria pode variar na própria disposição do rejeito, próximo ao local de despejo, apresentando grãos de vários tamanhos, ou mais profundos no alteamento, com concentrações de argilas devido a um processo de seleção das partículas (BEDIN, 2006; HERNANDEZ, 2002; e MENDES, 2007).

Os rejeitos podem variar de granulares a lamas, dependendo do tipo de minério e do tratamento utilizado. Os rejeitos granulares são constituídos por areias, de alta permeabilidade, alta resistência ao cisalhamento e baixa compressibilidade. As lamas são de granulometria fina (siltes e argilas), com alta plasticidade e alta compressibilidade; apresentam maior dificuldade de sedimentação e de adensamento (ARAÚJO, 2006).

Os rejeitos de mineração apresentam-se em ampla faixa de granulometria, como pode ser observado na Figura 3.2 as curvas granulométricas de rejeitos de mineração de ouro, ferro, bauxita, fluorita, carvão, cobre e fosfato, expostas por

Abrão (1987), e de rejeitos de ouro, bauxita, carvão mineral e fosfato, por Campos (1986), *apud* Bedin (2006).

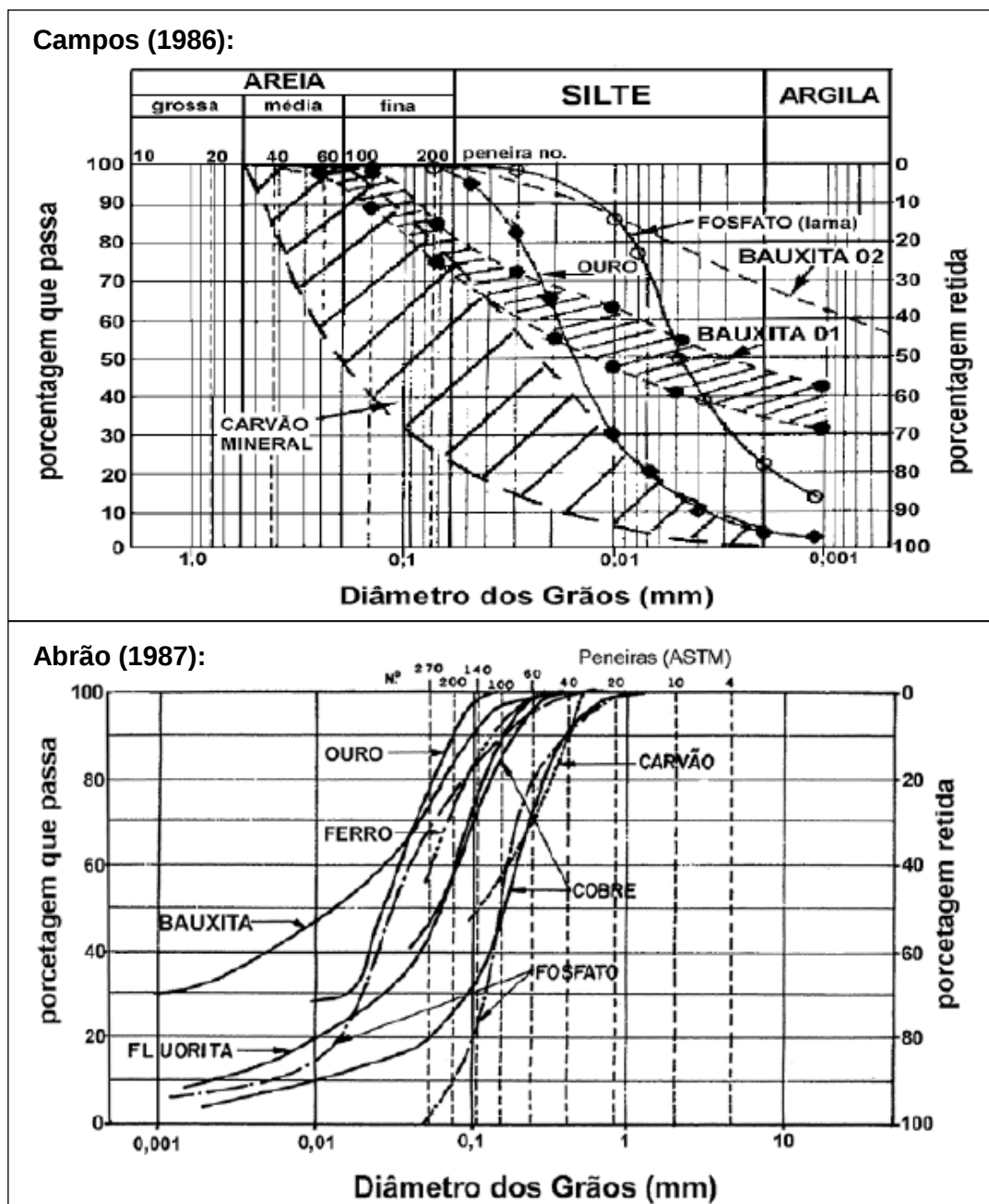


Figura 3.2 - Curvas granulométricas de vários rejeitos de mineração.
Fonte: Abrão (1987) e Campos (1986).

O padrão de comportamento granulométrico do resíduo é complexo (BEDIN, 2006). O autor caracterizou rejeitos de bauxita, o que o permitiu identificar a granulometria variável ao longo do ambiente de disposição do rejeito na mineradora. Nessa situação, o material areno-siltoso localiza-se mais próximo ao local de

lançamento hidráulico, e o material silto-argiloso no restante da pilha, com lentes arenosas intercaladas. Para o referido autor, o processo de seleção de partículas que ocorre na pilha é função da forma de deposição do resíduo, e ele ainda explica que, nas proximidades do local de despejo do material, ocorre a deposição dos grãos lançados hidraulicamente e a consequente seleção pelo tamanho dos grãos. Já as lentes arenosas, segundo o mesmo autor, estão relacionadas a mudanças nos pontos de descarga do resíduo.

A mineralogia da rocha e sua composição química influenciam na granulometria de resíduos de mineração e no comportamento geomecânico do material., assim como o teor de ferro influencia em diversas propriedades do material, alterando e modificando (BEDIN, 2010; HERNANDEZ,2002;LOPES, 2000).

Buscando correlacionar mineralogia e composição química de rejeitos de mineração com suas características mecânicas, Vick (1990) caracterizou rejeitos de mineração de ferro, bauxita e carvão mineral. No rejeito de ferro, o autor identificou que ainda havia alta quantidade de hematita, juntamente com argilominerais de baixa atividade. Este material apresenta alto peso específico e baixa permeabilidade. O rejeito de bauxita possuía alto teor de argilominerais amorfos, com granulometria fina, resultando, segundo o autor, em baixo limite de liquidez e igualmente baixo índice de plasticidade. No rejeito de carvão mineral, o mesmo autor identificou alta proporção de montmorilonita sódica, tendo como consequência um material de baixa densidade e alta plasticidade.

A composição química de rejeitos de bauxita, foi analisada por Bedin (2010), que atribuiu a presença de cálcio e sódio ao processo de beneficiamento com soda cáustica para a obtenção do alumínio.

Para buscar a possibilidade de extração do zinco metálico em rejeito de zinco, Silva (2008a), caracterizou esse rejeito quanto a sua composição química e mineralógica. Após analisar quimicamente várias amostras de rejeito de zinco, o autor definiu uma faixa de composição deste rejeito, caracterizada por altas concentrações de zinco (12% a 21%), de sílica (11% a 20%) e de alumínio (8% a 14%), assim como alto teor de enxofre na forma de sulfato (10%). Na Tabela 3.1 é apresentada a composição química de uma amostra de rejeito de zinco (SILVA, 2008a). Por difração de raios X, o referido autor analisou amostras do rejeito de zinco, e observou que este elemento está presente na forma de sulfato (Figura 3.3).

Tabela 3.1 Composição química de uma mostra de rejeito de 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 ₂	10,95

Fonte: Silva, 2008a.

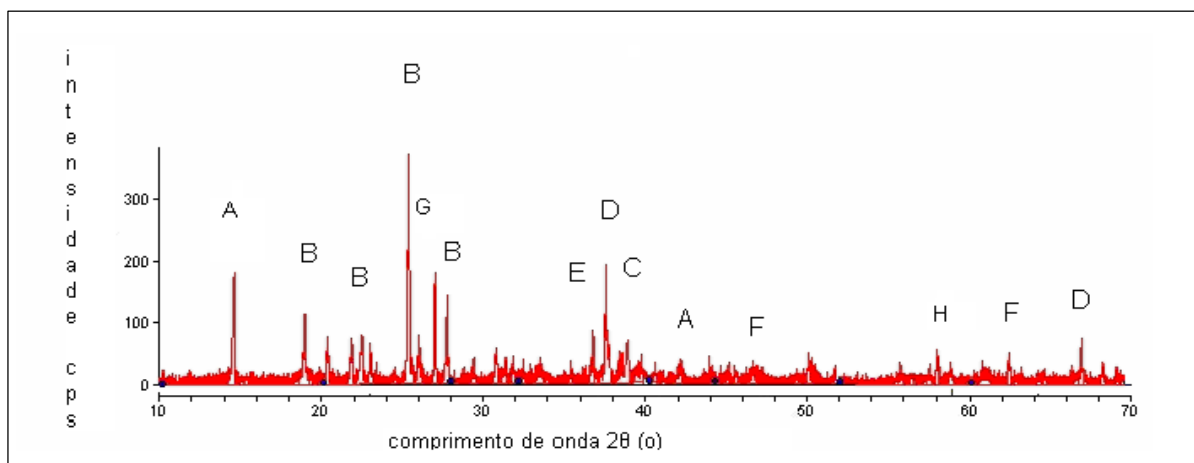


Figura 3.3 - Difratograma da amostra de rejeito de mineração de zinco: A-SiO₂, B-ZnSO₄.6H₂O, C-ZnO, D-Al₂S₃, E-SiS₃, F-Zn₄Al₂₂O₃₃, G-PbSO₄ e H-Fe₃Si.

Fonte: Silva, 2008a.

O peso específico dos grãos dos solos varia pouco de solo para solo (PINTO, 2006). Em rejeitos, o peso específico dos grãos do material é influenciado pelo tipo de minério explorado e pelo processo de beneficiamento executado (HERNANDEZ, 2002; FILHO, 2004).

A permeabilidade de um solo é menor, quanto menor são o índice de vazios e, também, quanto menores são as partículas que compõem o solo ou o sedimento (PINTO, 2006). Assim, o coeficiente de permeabilidade será influenciado pela estrutura formada durante a deposição dos rejeitos; a forma da estrutura gerada durante a deposição hidráulica é condicionada à velocidade de lançamento, à forma

dos grãos, à granulometria, ao embricamento entre os grãos, à densidade, ao índice de vazios e ao grau de saturação (MENDES, 2007). Sendo assim, há uma grande faixa de valores de condutividade hidráulica para rejeitos, própria de cada tipo de resíduo e de cada reservatório de disposição.

Em rejeito de mineração de zinco, Silva (2008b) identificou valores de permeabilidade entre 10^{-5} e 10^{-7} m/s (Figura 3.4).

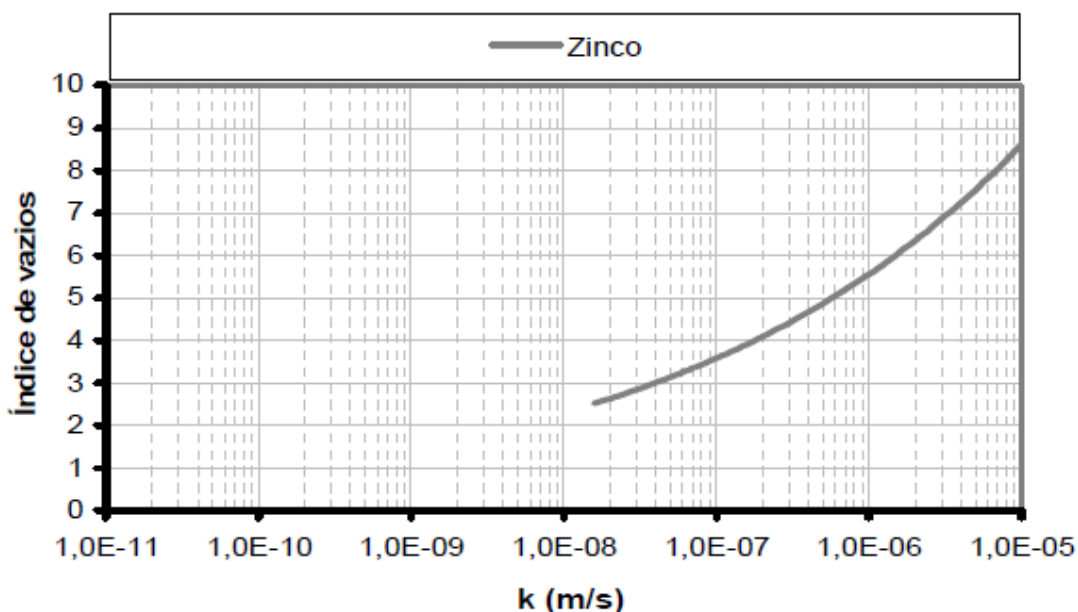


Figura 3.4 - Permeabilidade de rejeito de mineração de zinco.
Fonte: Silva, 2008b.

A resistência dos solos ao cisalhamento é função do atrito entre os grãos e da tensão efetiva. O ângulo de atrito interno varia com a pressão confinante, e será maior quanto melhor o embricamento entre as partículas, e também depende do formato e tamanho dos grãos, da distribuição granulométrica e do índice de vazios (PINTO, 2006). A quantidade de finos presentes também influencia na resistência ao cisalhamento de materiais granulares. Os finos reduzem os vazios e provocam melhor interação entre os grãos, abaixam os valores de índices de vazios máximo e mínimo e produzem curvas de tensão-deformação com picos maiores e mais definidos (MENDES, 2007).

O teor de ferro também tem influência sobre o ângulo de atrito, como estudado por Lopes (2000), Hernandez (2002) e outros. Há uma relação direta entre o teor de ferro e o ângulo de atrito: quanto maior o teor em ferro, maior o ângulo de

atrito, e essa relação é ainda mais acentuada para materiais de maior porosidade. (MENDES, 2007).

Ensaio de cisalhamento direto em rejeitos de mineração de ferro foram realizados por Hernandez (2002), que concluiu que o ângulo de atrito depende das características mineralógicas, da porosidade e da granulometria do material (Figura 3.5). Suas observações são semelhantes às de Mendes (2007) quanto à relação entre os teores e ângulo de atrito interno.

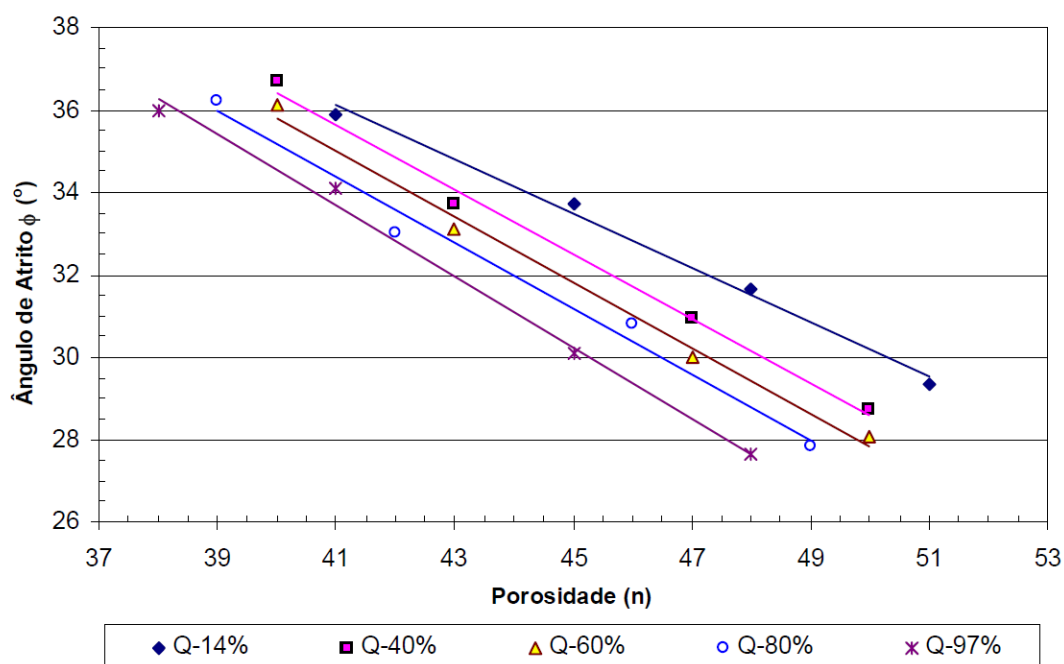


Figura 3.5 - Relação entre ângulo de atrito, porosidade e teor de ferro.
Fonte: Hernandez, 2002.

Rejeitos granulares de ferro possuem alta permeabilidade e baixa compressibilidade, com ângulos de atrito de 25° a 35° e coesão muito baixa ou até nula (FILHO, 2004).

O comportamento de rejeitos quando submetidos ao cisalhamento direto é o mesmo de areias, sendo também controlado pelo atrito entre os grãos (LOPES, 2000). O autor também afirma que, para uma mesma porosidade, com o aumento da granulometria aumenta o ângulo de atrito, e que também o teor de ferro contribui para aumentar o ângulo de atrito.

A aplicação de pressão em solo resulta em expulsão da água dos vazios, e consequente recalque. O coeficiente de adensamento reflete características do solo tais como permeabilidade, porosidade e compressibilidade. Através de ensaios

oedométricos em rejeitos de mineração de ferro, Mendes (2007) obteve coeficientes de adensamento com valores baixos para um material composto basicamente por areia (70%). Bedin (2010) obteve valores de coeficiente de adensamento dos resíduos de bauxita dentro da faixa encontrada na literatura. A Tabela 3.2 informa valores de coeficientes de adensamento para alguns rejeitos de mineração, compilados da literatura.

Tabela 3.2 - Valores de coeficientes de adensamento para alguns rejeitos de mineração.

Rejeitos de Mineração	Cv (cm²/s)	Autor
bauxita	1×10^{-2} a 1×10^{-4}	Bedin (2010)
bauxita	5×10^{-2} a 1×10^{-3}	Somogyi e Gray (1977)
ferro	$5,39 \times 10^{-3}$	Mendes (2007)
ouro	1×10^{-2} a 1×10^{-3}	Bedin (2010)

Mendes (2007), compilou as propriedades geotécnicas dos principais tipos de rejeitos de mineração gerados no Brasil. Alguns dos parâmetros desses rejeitos, como coeficiente de adensamento, índice de vazios e densidade dos grãos, podem ser observados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Alguns tipos de rejeitos e suas propriedades geotécnicas.

Tipo de rejeito	Material	Densidade grãos (g/cm³)	Cv (cm²/s)	Índice de vazios (e)
Ferro	areia siltosa e silte argiloso	3,5 a 5,25	10^{-2} a 10^{-3}	0,61 a 1,35
Cobre	silte argiloso e areias (>45%)	2,6 a 2,8	$3 \cdot 10^{-1}$ a 10^{-3}	0,6 a 0,8 (areias) e 0,9 a 1,4
Bauxita	silte argiloso e areias (30%)	2,6 a 2,7	10^{-3} a $5 \cdot 10^{-2}$	8 (lamas)
Gesso (sulfato de cálcio hidratado)	silte	2,36 a 2,39	$2 \cdot 10^{-4}$	0,7 a 1,5

Fonte: Adaptado de Mendes, 2007.

A depender do argilomineral presente no solo, os Limites de Atterberg são influenciados pela variação da estrutura mineralógica desses filossilicatos e pelos cátions adsorvidos, o que leva a comportamentos diferentes do solo Pinto (2006).

Nos rejeitos de lavagem de bauxita, ácido fosfórico e zinco, há grande quantidade de argilas, o que lhes atribui limite de liquidez maior que 50%, o que indica comportamento plástico (SILVA, 2008b).

Curvas de compressibilidade e permeabilidade de diversos rejeitos de mineração foram apresentadas por Silva (2008b), e podem ser vistas nas Figuras 3.6 e 3.7. Segundo o mesmo autor, os rejeitos de ouro e níquel são os menos compressíveis e mais permeáveis, e apresentam menor variação do coeficiente de permeabilidade com o índice de vazios. O rejeito de monazita é indicado como o mais compressível, seguido dos rejeitos de bauxita e de zinco. As menores permeabilidades foram encontradas nos rejeitos de ferro. O rejeito de zinco apresenta compressibilidade mediana e grande variação no coeficiente de permeabilidade com o índice de vazios (SILVA, 2008b).

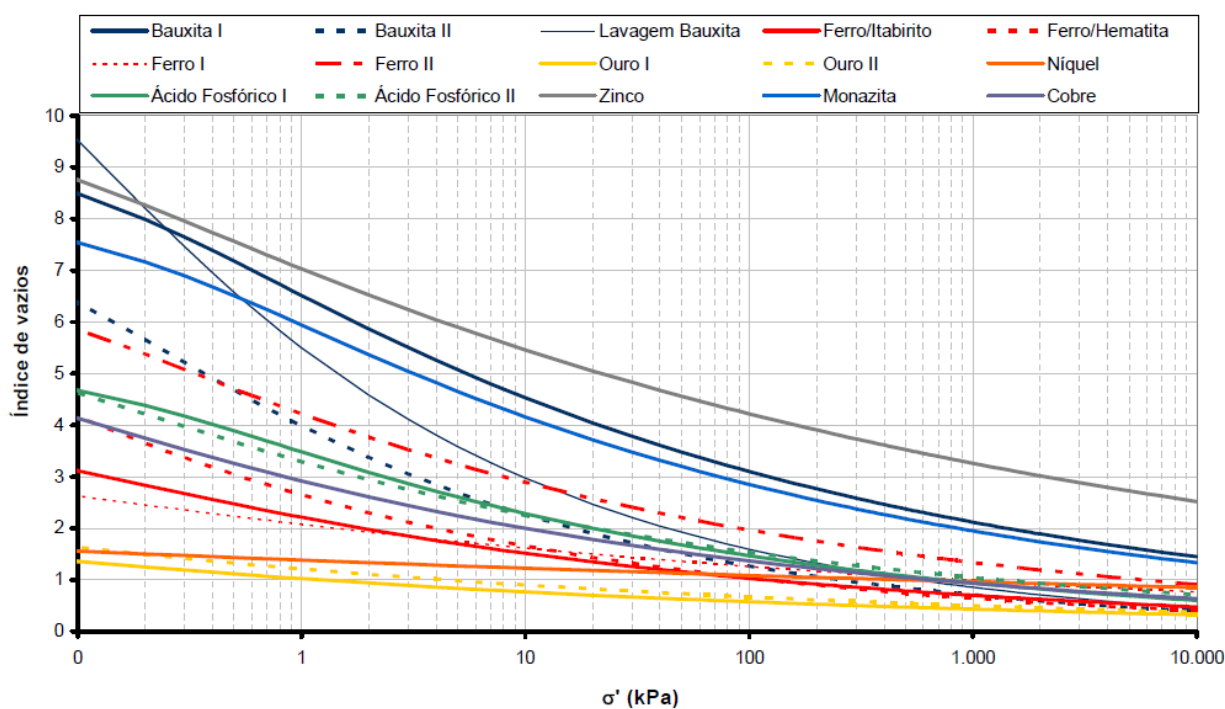


Figura 3.6 - Curvas de compressibilidade de diversos rejeitos de mineração.
Fonte: Silva, 2008b.

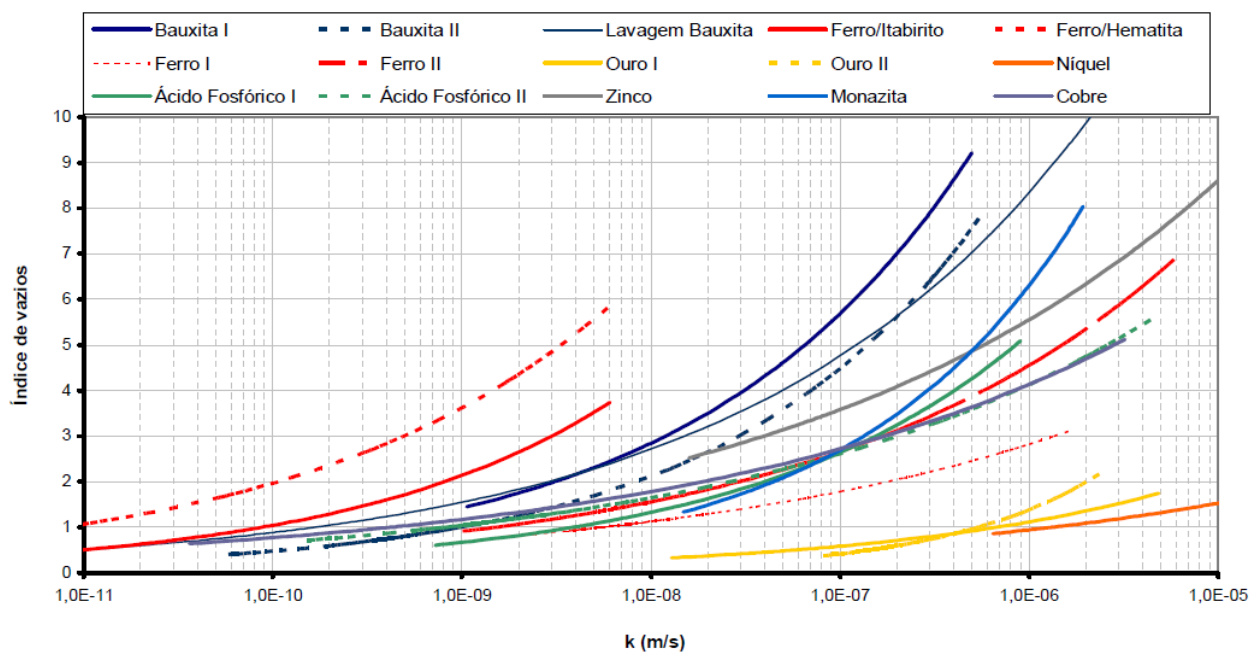


Figura 3.7 - Curvas de permeabilidade de diferentes rejeitos de mineração.
Fonte: Silva, 2008b.

4. ESTUDO DE CASO

4.1 DISPOSIÇÃO DO REJEITO

Na mina de Vazante, a mineralização é disposta em corpos de minério willemítico e corpos de minério calamínico associados a dolomitos.

O minério é levado para a planta de beneficiamento da Votorantim Metais, na usina Três Marias, onde, após o processo de beneficiamento, o rejeito de mineração de zinco é disposto hidraulicamente em barragem. A Votorantim Metais, buscando fazer uma pilha compactada deste rejeito, realizou ensaios para garantir os parâmetros geotécnicos do material para realizar o alteamento da pilha em uma geometria com condições de segurança adequadas.

Os resultados obtidos demonstraram que o rejeito de zinco apresentava granulometria silto-argilosa, com plasticidade média, limite de liquidez de 46% e teor de umidade ótima de compactação de 51,5%. Estes dados indicam, na mecânica de solos, que a amostra no estado de umidade ótima de compactação está compactada no estado líquido.

Os coeficientes de condutividade hidráulica desse material são de $6,0 \times 10^{-7}$ cm/s a $9,48 \times 10^{-7}$ cm/s para amostras deformadas. As envoltórias de resistência obtidas em ensaios triaxiais não drenados apontaram, em termos de tensões efetivas, um material com ângulo de atrito $\phi = 38^\circ$ e coesão $c = 7$ kPa (GEOCONSULTORIA, 2014).

Com esses parâmetros, o rejeito de zinco disposto em barragem, foi drenado e secado, a fim de reduzir seu teor de umidade. Na sequência, foi compactado em uma pilha com piezômetros.

A pilha foi alteada, e chegou a atingir 20 m de altura. Durante o processo de alteamento, foram observadas deformações com deslocamentos horizontais máximos de 1,7 metros e recalques máximos de 0,8 metros em um dos diques.

O monitoramento feito pela unidade de Vazante apontou que as poro-pressões geradas no interior da pilha não apresentaram tendência de dissipação, e que os níveis piezométricos são estáveis e não variam com a pluviosidade diária. Foram, então, realizados novos ensaios na pilha compactada. O rejeito de zinco

compactado apresentava granulometria silto-arenosa, com limite de liquidez de 44,3% e umidade ótima de compactação de 42,9%, indicando o mesmo comportamento apresentado anteriormente pelo material ainda não compactado. Os ensaios triaxiais não drenados indicaram em termos de tensões efetivas, ângulo de atrito $\Phi = 33,7^\circ$ e coesão $c = 17,4\text{kPa}$ (GEOCONSULTORIA, 2014).

Com o objetivo de entender o comportamento atípico do rejeito de mineração de zinco, a unidade Vazante da Votorantim cedeu amostras deste material, visando estudar a variação nos parâmetros geotécnicos ao longo do processo de beneficiamento. Então, foram coletadas amostras deformadas de diferentes etapas deste processo, ensacadas e numeradas. As amostras cedidas foram: 01 - Minério bruto. 02 - Minério concentrado, 03 - Minério autoclavado, 04 – Material retido nos filtros – rejeito novo, 05 - Pilha – rejeito antigo.

Para a caracterização desse material, Ribeiro (2015) realizou ensaios de granulometria, limites de Atterberg, composição química e mineralógica, curvas características de sucção e de compactação, e resistência não drenada, avaliando a variação dos parâmetros geotécnicos ao longo do processo de beneficiamento.

Para contribuir com o estudo de rejeito de minério de zinco, foram realizados ensaios de adensamento e de compressão simples nas amostras de cinco etapas do processo de beneficiamento. Os ensaios foram realizados no Laboratório Didático de Solos, situado nas dependências do Centro de Pesquisas em Engenharia Civil – CESEC/UFPR.

4.2 ESTUDOS PRÉVIOS DO MATERIAL

As amostras de diferentes etapas do processo de beneficiamento de minério de zinco da unidade Vazante foram caracterizadas por Ribeiro (2015) quanto à granulometria, aos limites de Atterberg, às composições química e mineralógica, às curvas características de sucção e de compactação e à resistência não drenada.

A caracterização básica das amostras realizada por Ribeiro (2015) é sintetizada na Tabela 4.1, na qual é possível observar a variação no limite de liquidez e de plasticidade, que segundo o referido autor, é devido a modificações na granulometria e na mineralogia das amostras. Na mesma tabela, o autor também mostra a umidade higroscópica dos rejeitos, indicando compostos com alta

capacidade de retenção de água. Vale aqui lembrar que as mesmas amostras foram utilizadas para o presente trabalho.

Tabela 4.1 - Caracterização básica das amostras utilizadas nos ensaios.

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
Massa específica dos grãos (ρ_s) (g/cm ³)	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

Fonte: Ribeiro, 2015.

O autor identificou que o minério bruto moído apresenta granulometria areno-siltosa, e que havia uma diminuição da granulometria ao longo do processo de beneficiamento devido à quebra e à destruição de grãos, em razão dos processos químicos e físicos aos quais o minério foi submetido, o que leva ao aumento da porcentagem de finos (75-90%). Na pilha de rejeito antigo, é encontrada também areia que, segundo o mesmo autor, é justificado por variações no processo de beneficiamento ou por diferenças na frente de lavra de onde o minério foi extraído.

Na caracterização das amostras quanto à compactação, Ribeiro (2015) observou que as amostras de minério apresentaram teores de umidade ótima compatíveis com solos siltosos, e que o minério bruto se apresentava com grau de saturação de 73%, em umidade ótima de compactação e massa específica seca máxima (Figura 4.1). Por outro lado, para o rejeito novo, a massa específica seca máxima é de 70% e, para o rejeito antigo, a umidade ótima de compactação é 58%. O autor afirma que o grau de saturação aumenta à medida que o material evolui no processo de beneficiamento.

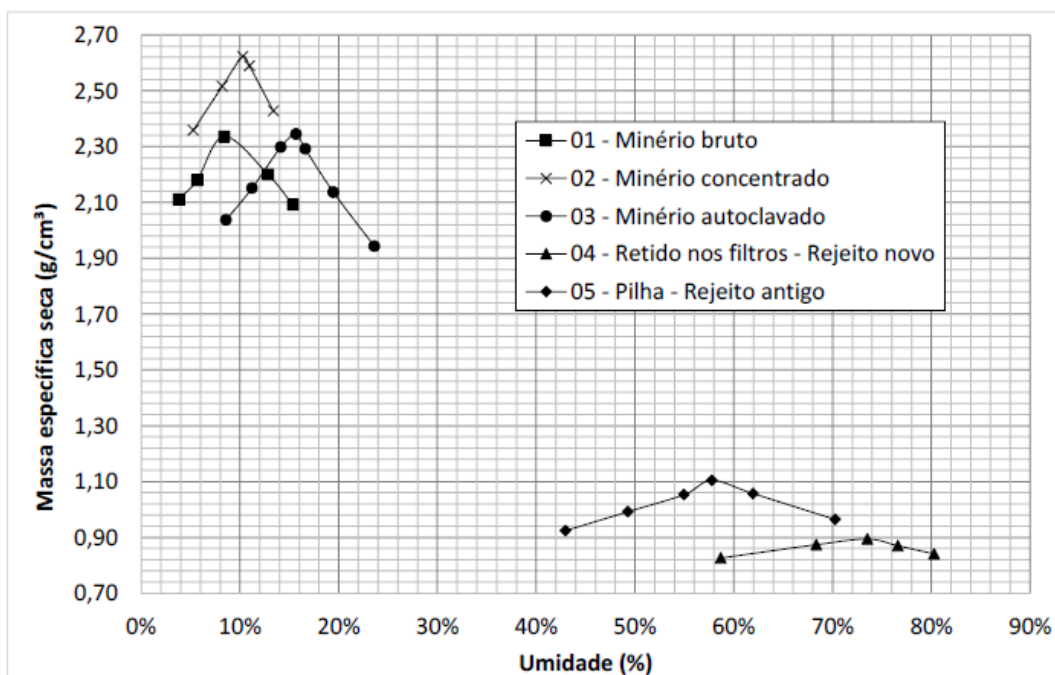


Figura 4.1 - Comparação entre as curvas de compactação de todas as amostras.
Fonte: Ribeiro, 2015.

Por meio de fluorescência e difratometria de raios-x, Ribeiro (2015) determinou a composição química e a mineralogia das amostras em estudo. Suas observações indicam a influência do processo de beneficiamento na composição do material. Os processos de beneficiamento do minério de zinco visam reduzir os teores de óxidos de cálcio e magnésio, bem como aumentar o teor de zinco contido. Sendo assim, no minério concentrado há aumento no teor de óxido de zinco e diminuição dos teores de óxido de cálcio e magnésio. Ocorre também aumento no teor de dióxido de silício devido à composição do minério de zinco que está sendo concentrado (willemita).

O referido autor também observou que, após as etapas iniciais do processo de beneficiamento, há redução dos materiais contaminantes (óxidos de Ca e Mg) e aumento dos teores de zinco, e que, no rejeito novo há, consequentemente, baixo teor de zinco e aumento no teor de dióxido de silício.

Através de difratogramas, Ribeiro (2015) ainda observou, no minério bruto, cristais de dolomita e willemita, representados por picos intensos no difratograma (Figura 4.2). O autor afirma que a variação dos picos obtidos pelos difratogramas das amostras de minério bruto, minério concentrado e minério autoclavado indicam que os compostos de Ca e Mg são degradados pelos processos químicos do

beneficiamento. No minério concentrado, os cristais de clinoclóro e calcita foram removidos e ocorre aumento de intensidade dos picos de willemita. No final do processo de autoclavagem, há grande redução nos picos de dolomita e surgimento de picos muito intensos de willemita.

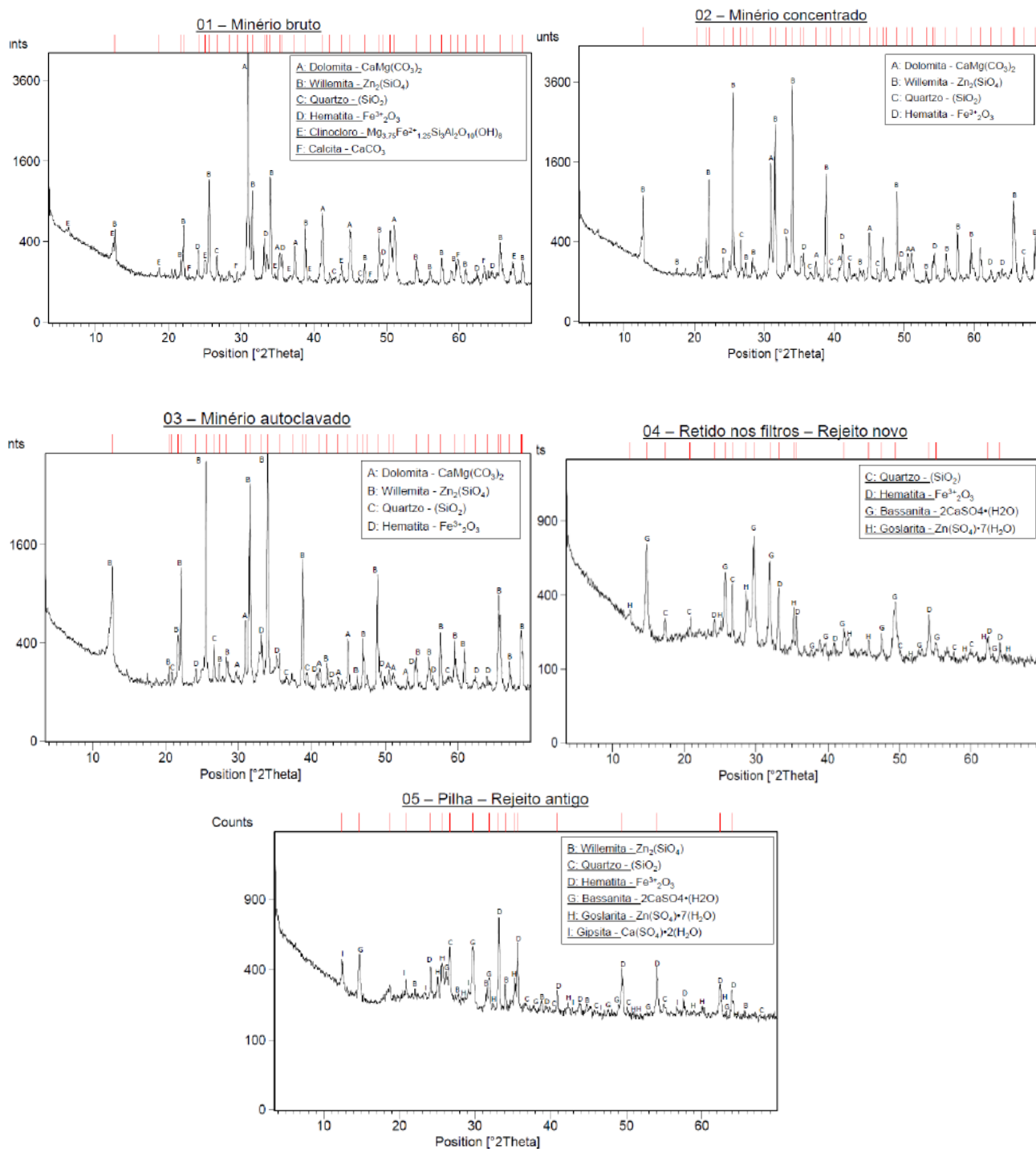


Figura 4.2 - Difrátogramas das amostras.

Fonte: Ribeiro, 2015.

Na mineralogia dos rejeitos, há cristais de bassanita ($2\text{CaSO}_4 \cdot (\text{H}_2\text{O})$), goslarita ($\text{Zn}(\text{SO}_4) \cdot 7(\text{H}_2\text{O})$) e gipsita ($\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$), com formação de um halo no difratograma, que, segundo Ribeiro (2015), indica material amorfo, interpretado como sílica gel. Esse material seria o responsável pelos altos índices de plasticidade, devido ao seu caráter hidrofílico (RIBEIRO, 2015), juntamente com os sulfetos de cálcio hidratados (MENDES, 2007).

As curvas características das amostras foram determinadas por Ribeiro (2015), por meio de sucções em função da umidade volumétrica, em amostras compactadas na umidade ótima e densidade seca máxima. O autor identificou que a presença de sílica gel nos rejeitos aumenta a sucção do material devido a sua característica hidrofílica. E que, ao longo do processo de beneficiamento, aumenta o teor de umidade volumétrica saturada das amostras devido ao aumento de finos e à presença da sílica gel.

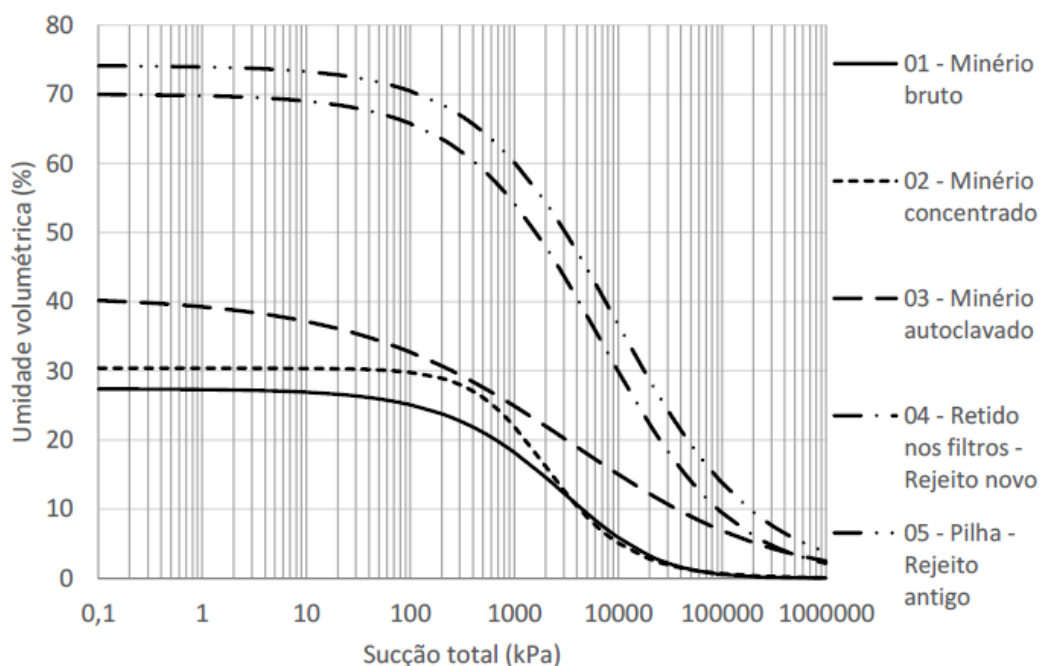


Figura 4.2 - Curvas características das amostras.
Fonte: Ribeiro, 2015.

O mesmo autor também estimou a resistência não drenada das amostras para os teores de umidade do limite de liquidez e umidade ótima de compactação (Figura 4.4), em amostras não compactadas. Conforme o processo de beneficiamento evolui, o minério perde resistência, e no rejeito novo ocorre um

aumento significativo na resistência em relação ao minério autoclavado, resultante da alta sucção da amostra e da presença de minerais que apresentam alta resistência mecânica, como o sulfato de cálcio hemihidratado (bassanita) e o sulfato de cálcio hidratado (gipsita).

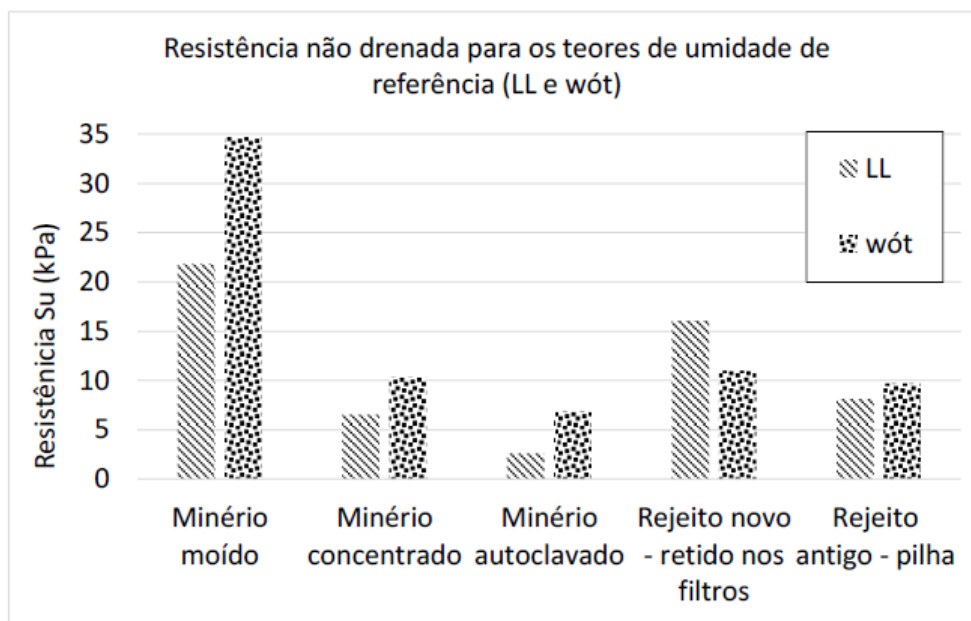


Figura 3.4 - Estimativa da resistência não drenada das amostras.
Fonte: Ribeiro, 2015.

5. ENSAIOS

Como anteriormente informado, este trabalho levou a efeito ensaios de adensamento e compressão simples nos mesmos materiais estudados por Ribeiro (2015).

5.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras recebidas já haviam sido destorroadas previamente. Assim, a preparação das amostras envolveu a determinação do teor de umidade de cada amostra e, em seguida, a adição de água para atingir a umidade ótima de compactação para cada material. Após essa etapa, passou-se à compactação Proctor normal com energia de 26 golpes, seguindo os mesmos parâmetros adotados por Ribeiro (2015).

5.2 ENSAIO DE ADENSAMENTO

O ensaio de Adensamento, também chamado de ensaio de compressão oedométrica, consiste na compressão de uma amostra de solo contido dentro de um molde que impede qualquer deformação lateral. Este ensaio é realizado com o objetivo de mostrar o comportamento do solo quando ele é comprimido pelo peso de camadas sobrejacentes (PINTO, 2006).

Para o ensaio, uma amostra saturada é colocada em uma célula de adensamento, que consiste de uma base rígida, de um anel para conter o corpo de prova, de um cabeçote rígido de carregamento e de pedras porosas localizadas na base e no topo do corpo de prova a fim de permitirem a drenagem da água, conforme mostrado na Figura 5.1.

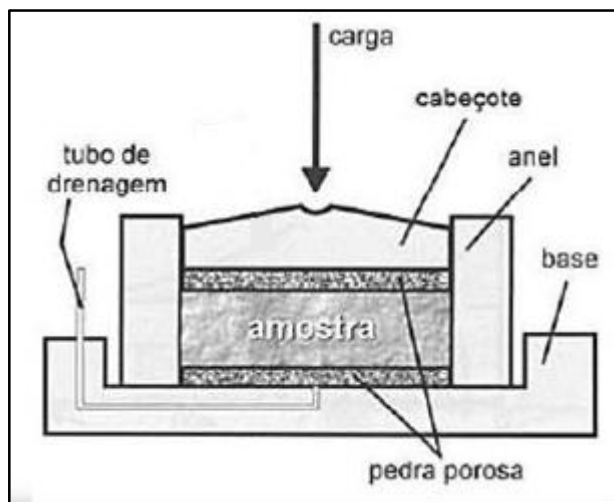


Figura 4.1 - Esquema da célula de adensamento.
Fonte: Pinto, 2006.

Um extensômetro é instalado no cabeçote, que permite a leitura de deslocamentos verticais derivados da aplicação, por etapas, de cargas axiais impostas no topo da amostra a diversos intervalos de tempo, até que as deformações tenham praticamente cessado.

Os procedimentos usados para a realização do ensaio seguem as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 12007 MB 3336, que indicam as leituras de 1/8 min, 1/4 min, 1/2 min, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1h, 2h, 4h, 8h e 24h contados a partir do instante de aplicação do incremento de carga, e as sequências usuais de cargas em kPa: 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640. Com os resultados das leituras, foram plotados gráficos de altura do corpo de prova pelo tempo para cada incremento de carga e, a partir desses, foi calculado o coeficiente de adensamento.

Os corpos-de-prova foram moldados utilizando-se anel de diâmetro 7,90 cm e altura de 2,0 cm e, posteriormente, saturados em água dentro da célula de adensamento, conforme proposto pela NBR 12007. A prensa usada no ensaio é do tipo Bishop (Figura 5.2).



Figura 5.2 - Prensa de adensamento usada no laboratório.

Pela redução da altura, causada em virtude das tensões verticais aplicadas, e do índice de vazios inicial do corpo de prova, obtém-se o índice de vazios final de cada estágio de carregamento. Ao término do ensaio, a amostra é pesada e enviada para a estufa para secagem e, em seguida, novamente pesada, obtendo-se, assim, o teor de umidade final da amostra (Figura 5.3).



Figura 5.3 - Amostras 2 e 3 após ensaio de adensamento.

Os principais resultados obtidos no ensaio de adensamento são os parâmetros de deformabilidade, expressos pelo coeficiente de adensamento (C_v) e pelo índice de compressão (C_c), que são obtidos pela construção gráfica das curvas com base nas leituras realizadas durante a execução do ensaio.

5.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES

O ensaio de compressão simples consiste em aplicar uma pressão vertical σ_1 na amostra, por meio de uma prensa aberta lateralmente, sem aplicação de pressões laterais, sendo assim, σ_2 e σ_3 são iguais a zero. Objetiva identificar a resistência à compressão, ou seja, identificar a pressão mínima necessária para o rompimento do corpo-de-prova.

Este ensaio foi realizado conforme a norma ABNT NBR-12770, com a utilização da prensa de marca EMIC. A compressão realizou-se em velocidade constante de 0,9 mm/s, e as leituras das tensões aplicadas e suas respectivas deformações são compiladas pelo software TESC versão 3.04. O corpo-de-prova foi moldado de forma cilíndrica, com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, e colocado sobre o prato inferior da prensa. Inicia-se a compressão do corpo-de-prova até que seja atingida a ruptura, medindo-se o ângulo de ruptura. O resultado é apresentado em gráfico de tensão aplicada x deformação vertical, com base no qual a resistência ao cisalhamento da amostra é calculada.



Figura 5.4 - Corpo-de-prova moldado sobre a prensa EMIC.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

As amostras de diferentes etapas do processo de beneficiamento de minério de zinco foram ensaiadas para se obterem os parâmetros de deformabilidade e de resistência ao cisalhamento, e poder compará-los entre si e tentar entender como é a sua variação ao longo do processo.

6.1 ADENSAMENTO

Através das leituras realizadas no ensaio de adensamento, foram elaborados gráficos da altura do corpo-de-prova pela raiz quadrada do tempo necessário para cada incremento de carga, obtendo-se a curva de adensamento, conforme método proposto por Taylor (1948).

Determinou-se o ponto correspondente a 0% de adensamento (H_0) e traçou-se uma reta pelos pontos iniciais da curva de adensamento, a partir da qual foi criada outra reta com coeficiente angular de 1,15 vezes. O ponto da curva que interceptar esta reta, definirá o ponto correspondente a 90% do adensamento primário.

Com os valores de tempo (T_{90}) e altura do corpo-de-prova (H_{90}), é calculado o coeficiente de adensamento (C_v) e a altura do corpo-de-prova que corresponde a 50% do adensamento primário (H_{50}), conforme as expressões abaixo:

$$\text{Equação 1: } C_v = \frac{0,848(0,5H_{50})^2}{T_{90}}$$

$$\text{Equação 2: } H_{50} = H_0 - \frac{5}{9}(H_0 - H_{90})$$

Os coeficientes de adensamento obtidos variam de 0,0015 a 0,0035 cm²/s (Tabela 5), valores estes adequados para argilas adensadas, o que nesse caso não coincide com a granulometria siltosa das amostras. Há variações nos valores de C_v de acordo com as pressões aplicadas, como no rejeito antigo, valores muito baixos de C_v , 0,0001 e 0,0009 cm²/s, para pressões 320 e 40 kPa, respectivamente. Já

para o rejeito novo, ocorrem valores de C_v altos, 0,0068 e 0,0059 cm^2/s , para pressões de 20 e 160 kPa. Na amostra de minério autoclavado, há também C_v alto: 0,0068 e 0,0060 cm^2/s , para 40 e 640 kPa, respectivamente.

Tabela 6.1 - Coeficientes de adensamento das amostras para cada carga aplicada.

Amostras		01 - Minério bruto	02- Minério concentrado	03 - Minério autoclavado	04 - Rejeito novo	05 - Rejeito antigo
Pressão (kPa)	10	0,00353	0,00175	0,00176	0,00351	0,00350
	20	0,00350	0,00344	0,00346	0,00679	0,00169
	40	0,00348	0,00336	0,00676	0,00324	0,00086
	80	0,00343	0,00331	0,00656	0,00306	0,00153
	160	0,00338	0,00326	0,00318	0,00587	0,00287
	320	0,00333	0,00322	0,00154	0,00273	0,00009
	640	0,00163	0,00319	0,00600	0,00127	0,00249
Granulometria		areia siltosa	silte com areia	silte arenoso	silte	silte com areia

O coeficiente de adensamento é relacionado à velocidade com que o material adensará sob a carga aplicada, ou seja, quantifica a velocidade de dissipação da poropressão. Nas amostras de minério bruto e minério concentrado, é possível observar, nos gráficos de coeficiente de adensamento x pressão, que a velocidade do processo de adensamento é quase que constante para as diferentes cargas aplicadas (Figura 6.1).

Já nas amostras de minério autoclavado e rejeito novo, ocorre um aumento na velocidade de dissipação da poropressão, atingindo $6,8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ em 20 kPa e 40 kPa, para o rejeito novo e minério autoclavado, respectivamente. No rejeito antigo, há uma diminuição na velocidade do processo de adensamento nas pressões 40 kPa e 320 kPa.

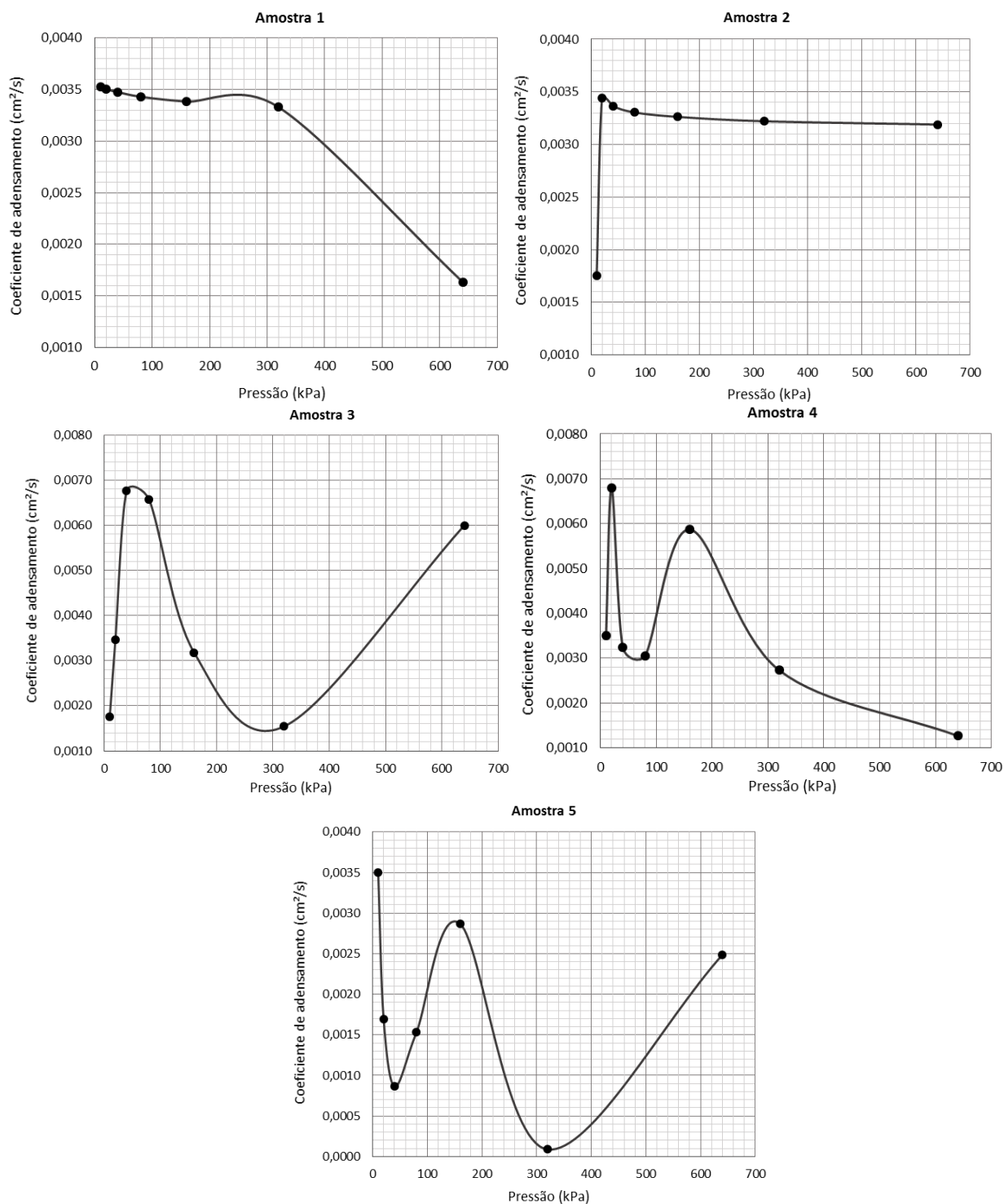


Figura 6.1 - Coeficientes de adensamento de todas as amostras.

O índice de compressão (C_c) também foi calculado, utilizando-se a curva índice de vazios em função do logaritmo da pressão aplicada (Figura 6.2). Este índice é dado por:

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log p_2 - \log p_1}$$

Neste cálculo, e_1 e e_2 são índices de vazios de dois pontos quaisquer da curva, e p_1 e p_2 são as pressões correspondentes a esses índices de vazios.

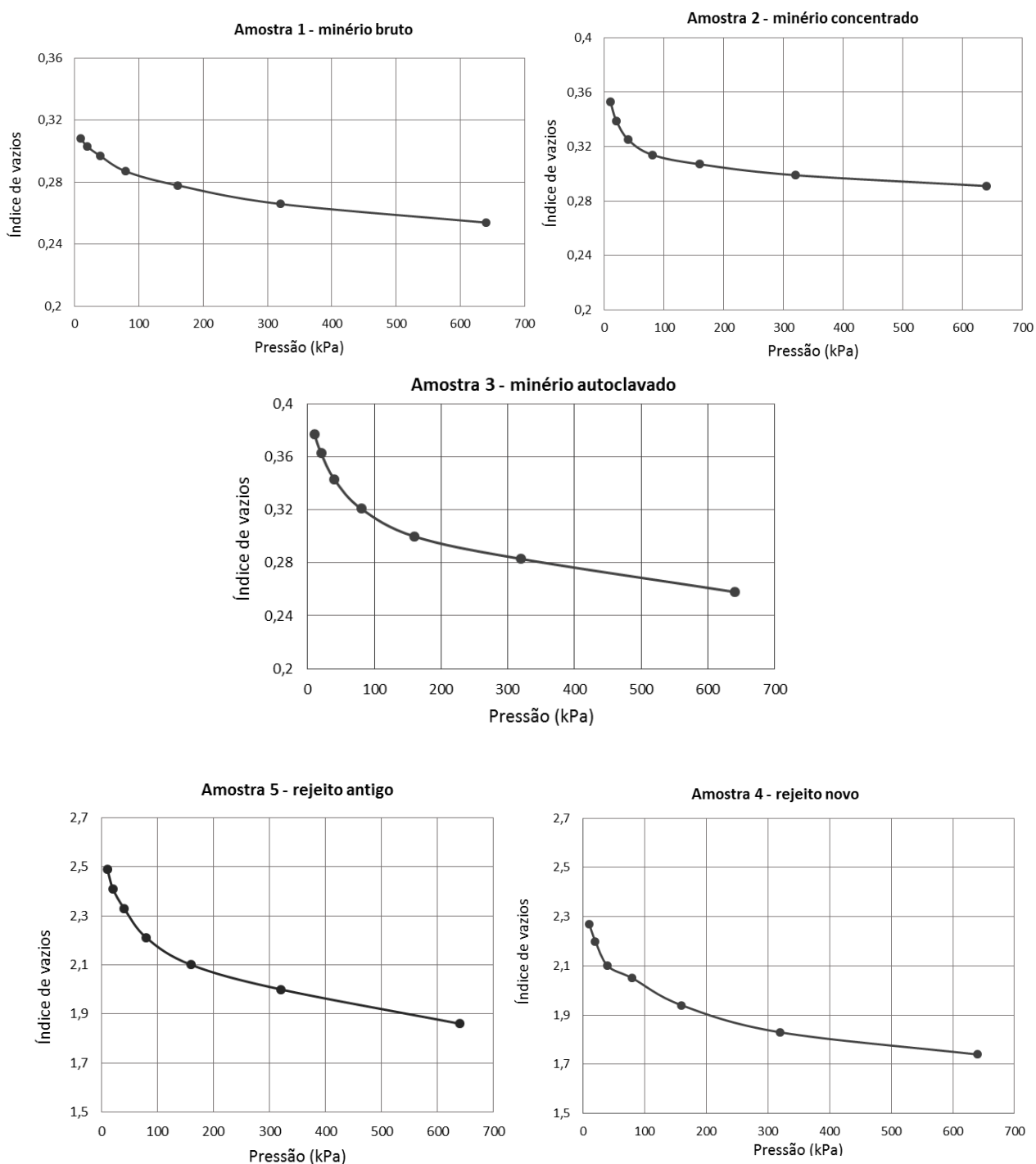


Figura 6.2 – Curvas de índice de vazios x pressão aplicada.

As amostras de rejeito apresentam altos índices de compressão: 0,33 no rejeito novo e 0,40 no rejeito antigo; e, para as amostras de minério, este índice é

baixo, 0,03 e 0,04 e 0,007. Sendo assim, à medida em que o processo de beneficiamento evolui, a amostra torna-se cada vez mais compressível, e essa compressibilidade torna-se ainda mais elevada nos rejeitos.

6.2 COMPRESSÃO

A resistência ao cisalhamento das amostras foi estabelecida através do ensaio de compressão simples, no qual foi determinado o ângulo de atrito interno por meio da análise da ruptura do corpo-de-prova. Com o ângulo α que a superfície de ruptura do corpo-de-prova forma com a horizontal, é calculado o ângulo de atrito, $\Phi = 2.(\alpha - 45^\circ)$. Nas amostras de minério, o ângulo de atrito varia de 14° a 18° , para o rejeito novo $\Phi = 40^\circ$ e $\Phi = 30^\circ$ para o rejeito antigo.

A tensão aplicada e a deformação resultante podem ser observadas no gráfico da Figura 6.3, onde a ordenada máxima da curva de compressão corresponde à resistência à compressão (R) da amostra. Para as amostras de minério autoclavado e concentrado, a pressão necessária para atingir a ruptura é de 1,5 e 2,0 kgf/cm², respectivamente. Já para os rejeitos, a tensão aplicada é 0,5 a 0,6 kgf/cm², valores de resistência à compressão muito inferiores aos observados nas amostras de minério.

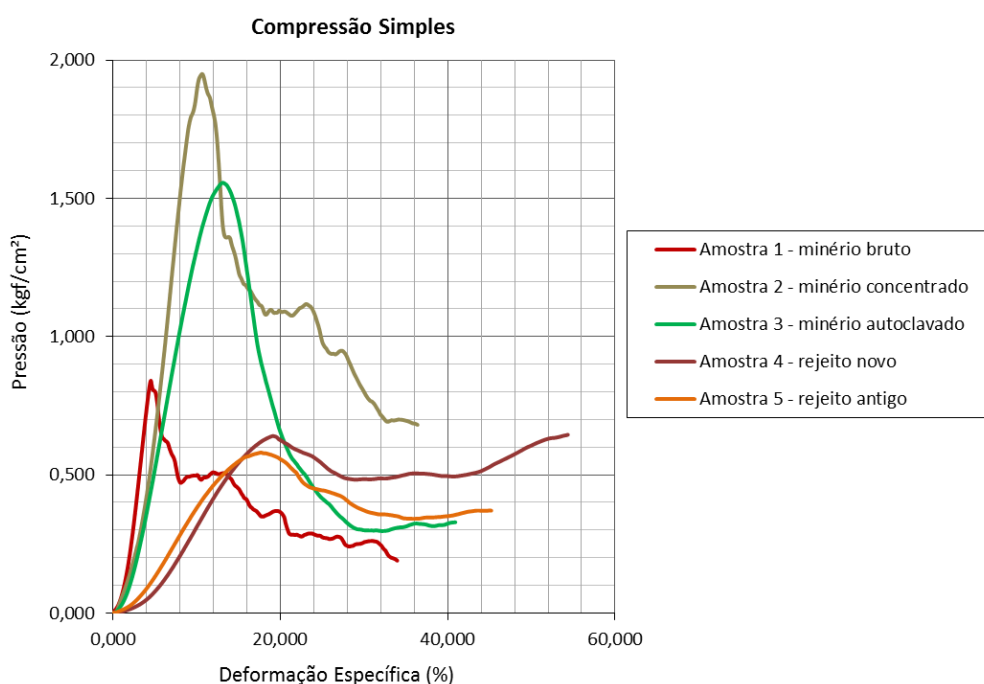


Figura 6.3 - Curvas de tensão x deformação das amostras.

A coesão (c) das amostras pode ser estimada através dos parâmetros de resistência à compressão (R), do ângulo α e do ângulo de atrito, por meio da expressão:

$$c = R \frac{\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \phi}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}$$

Os valores de coesão para minério bruto, minério concentrado e minério autoclavado são, respectivamente, 7,0 kPa, 8,3 kPa e 6,7 kPa. Para o rejeito novo, $c = 14,6$ kPa e, para o rejeito antigo, $c = 16,3$ kPa.

Tabela 6.2 – Coesão, ângulo de atrito interno e tensão efetiva das amostras.

Amostras	Granulometria	C (kPa)	Φ	Pressões efetivas (kgf/cm ²)
01 - Minério bruto	areia siltosa	7,00	16°	0,80
02- Minério concentrado	silte com areia	8,30	18°	2,00
03 - Minério autoclavado	silte arenoso	6,70	14°	1,50
04 - Rejeito novo	silte	14,60	40°	0,60
05 - Rejeito antigo	silte com areia	16,30	30°	0,50

7. CONCLUSÃO

As amostras de diferentes etapas do processo de beneficiamento de minério de zinco foram caracterizadas quanto a sua compressibilidade e resistência ao cisalhamento, com o objetivo de identificar como este processo industrial influencia no comportamento geotécnico desse tipo de material. Os principais resultados da caracterização das amostras pelos ensaios de adensamento e de compressão simples seguem listados abaixo:

- Foram obtidos os coeficientes de adensamento (C_v) através de leituras do ensaio de adensamento, que variam de $1,5 \times 10^{-3}$ a $3,5 \times 10^{-3}$ cm²/s, valores estes que de acordo com a mecânica dos solos seriam adequados para argilas, o que não coincidem com a granulometria das amostras.
- À medida que o processo de beneficiamento evolui, a amostra torna-se cada vez mais compressível, e ainda mais compressíveis são os rejeitos, conforme índices de compressão (C_c) obtidos nos rejeitos de 0,33 no rejeito novo e 0,40 no rejeito antigo. Para as amostras de minério, este índice é baixo: 0,03 a 0,007. Tais valores são compatíveis com solos siltsos. Os rejeitos apresentam-se mais compressíveis do que solos naturais na mesma consistência.
- As envoltórias de resistência obtidas em ensaio de compressão simples, indicam tensões efetivas de $\phi = 14^\circ$ a 18° e $c = 6,7$ a $8,3$ kPa, para as amostras de minério, e para o rejeito novo $\phi = 40^\circ$ e $c = 14,6$ kPa, e no rejeito antigo $\phi = 30^\circ$ e $c = 16,3$ kPa.
- Para as amostras de minério autoclavado e concentrado, a pressão necessária para atingir a ruptura é de 1,5 e 2,0 kgf/cm², respectivamente. Já para os rejeitos, a tensão aplicada é de 0,5 a 0,6 kgf/cm², valores de resistência à compressão muito inferiores aos observados nas amostras de minério.

A análise de compressibilidade e resistência ao cisalhamento das amostras, por meio de ensaios de adensamento e compressão simples, apontam comportamento de argilas adensadas ao longo de todo o processo de beneficiamento. Essas argilas são mais adensadas nos rejeitos do que no minério, e apresentam baixa resistência ao cisalhamento, que se reduz à medida que o processo de beneficiamento evolui.

Devido aos resultados dos ensaios de adensamento e compressão simples apontarem para materiais argilosos, e as amostras de rejeito não possuírem tal granulometria, é válido afirmar que a caracterização geomecânica adequada para os rejeitos ainda é uma problemática para a mecânica dos solos. Ainda não é possível entender porque materiais apresentam teores de umidade ótima de compactação acima do teor de umidade do limite de liquidez.

Como sugestão, estudos que abordem a natureza química desses materiais se fazem necessários a fim de investigar qual a influência eletroquímica exercida pelas partículas no conjunto, com base nos compostos adicionados durante os processos do beneficiamento e no comportamento mecânico dos materiais estudados. Apenas ensaios mecânicos não possibilitam o perfeito entendimento da dinâmica dessas partículas. Essa compreensão se faz extremamente necessária e urgente, haja vista o risco que os depósitos de rejeito em barragens, principalmente, oferecem à sociedade e ao ambiente natural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, C. B.. **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.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12007 MB 3336:** informação e documentação – referência – elaboração. Rio de Janeiro, 1990.

BEDIN, J. Interpretação de Ensaio de Piezocone em Resíduos de Bauxita. 150f. Msc. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil – Departamento de Geotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

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

BIONDI, J. C. **Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros.** São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

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.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). Neves, C. A. R. **Economia Mineral do Brasil: Zinco.** Brasília, 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). Neves, C. A. R. **Sumário Mineral 2014: Zinco**. v. 34. Brasília, 2015.

FEIJÓ, F. D. **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.

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

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

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.

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.

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.

PINTO, C. S. Deformações devidas a carregamentos verticais. In. **Curso Básico de Mecânica dos solos em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. p. 183-204.

PINTO, C. S. Estado de tensões e critérios de ruptura. In. **Curso Básico de Mecânica dos solos em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. p. 253-274.

RIBEIRO, C. C. **Estudo sobre o comportamento geomecânico de rejeito de mineração de zinco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

RUSSO, M. L. C. **Beneficiamento de rejeito de minério de zinco**. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

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.

SIMOGYI, Frank.; GRAY, Donald H. Engineering Properties Affecting Disposal of Red Muds. In: Conference On Geotechnical Practice For Disposal Of Solid Wastes Materials. 1977, Michigan. **Proceedings**. New York: ASCE, 1977. p. 1 – 22.

SOUZA, A. D. -colocar os demais autores. *Kinetics of sulphuric acid leaching of a zinc silicate calcine*. **Hydrometallurgy**. v. 89. p. 337 – 345, 2007.

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

SOUZA, A. D.. **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, A. D.. **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.

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

U. S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Tolcim, A. C. **Mineral Commodity Summaries 2014: Zinc**. Washington, 2014. p. 186-187. Disponível em: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2014/mcs2014.pdf>. Acesso em: 13/06/2015.