

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA DE CIVIL DE INFRAESTRUTURA

PÉRSIDE DA ROSA SIVIERO

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE COMPRESSIBILIDADE E PERMEABILIDADE DE
REJEITO DE MINERAÇÃO BAUXITA**

Joinville

2019

PÉRSIDE DA ROSA SIVIERO

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE COMPRESSIBILIDADE E PERMEABILIDADE DE
REJEITO DE MINERAÇÃO BAUXITA**

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Helena Paula Nierwinski.

Joinville

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Siviero, Pérside da Rosa

Análise da variação de compressibilidade e permeabilidade nas etapas de alteamento de depósitos de rejeito de bauxita [monografia] / Pérside da Rosa Siviero ; orientadora, Helena Paula Nierwinski. Joinville, SC, 2019.

58 p.

Monografia (graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville. Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura.

Incluir referências

1. Rejeito de mineração de bauxita. 2. Caracterização. 3. Permeabilidade. 4. Compressibilidade. I. Nierwinski, Helena Paula. Universidade Federal de Santa Catarina. Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura.

PÉRSIDE DA ROSA SIVIERO

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE COMPRESSIBILIDADE E PERMEABILIDADE DE
REJEITO DE MINERAÇÃO BAUXITA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Local, 4 de Julho de 2019.

Prof. Dr. Marcelo Heidemann
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Dra. Helena Paula Nierwinski
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Marcelo Heidemann
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Msc. Valéria Bennack
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho ao meus queridos pais, que sempre estiveram comigo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pelo dom da vida e por ter renovado meu ânimo e forças a cada manhã, por ter preparado todo suprimento financeiro, emocional e espiritual, não me deixando faltar nada.

Agradeço aos meus pais, Ayeso e Simone, por todo suporte financeiro e emocional ao longo desses anos de luta. Sou grata por toda a paciência, compreensão, amor e carinho que tiveram comigo. Com vocês adquiri valores que são pilares da fundamentação de quem sou.

À minha orientadora Helena Paula Nierwinski meu muito obrigada pelo conhecimento compartilhado e por todo auxílio disponibilizado sempre que precisei. As colegas de laboratório que dispuseram do seu tempo para acompanhar e auxiliar nos ensaios experimentais, Amanda Reus e Bruna Sell.

Sou grata aos amigos que fiz e a família de coração, Chi Alpha, que fui presenteada durante a graduação, por compartilharem comigo essa árdua jornada e terem me dado força nas diversas vezes que pensei em desistir, sem vocês não teria chego até aqui.

No final, não são os anos de vida que contam. É a vida nos seus anos.

Abraham Lincoln

RESUMO

A economia brasileira sofre grande influência da atividade mineradora, que, por sua vez, contribui intensamente para o seu desenvolvimento. Com o crescimento da atividade, aumenta a produção de rejeitos e conseqüentemente a necessidade de armazenamento seguro dos mesmos. A forma como são destinados os rejeitos do beneficiamento dos minérios, suas características e a falta de previsibilidade do seu comportamento tem desencadeado tragédias irremediáveis, chamando atenção para a necessidade de se adquirir melhor entendimento e domínio sobre o assunto. O rejeito de mineração de bauxita, também conhecido como lama vermelha, é originado pelo processo de beneficiamento Bayer. Após a extração do minério, o material é comumente transportado por tubulações e despejado em estado aquoso em barragens de contenções, as quais são normalmente construídas por etapas. Os alteamentos das barragens podem ter diferentes disposições, na maioria das vezes são construídos pelos métodos de montante, de jusante e de linha de centro. O aumento das alturas de alteamento resulta num aumento da compactação das camadas inferiores de rejeito, produzindo uma distribuição heterogênea da taxa de vazios dos mesmos: quanto mais carregada estiver uma camada de rejeito, menor será o seu índice de vazios e a sua permeabilidade. Sendo assim, a análise de propriedades de comportamento destes materiais durante as etapas de alteamento é indispensável para o desenvolvimento de projetos seguros. No presente trabalho foi avaliado o comportamento de 3 amostras de rejeito de mineração de bauxita, reconstituídas com três índices de vazios iniciais distintos. Foram realizados ensaios de caracterização (granulometria com sedimentação, limites de Atterberg, densidade real dos grãos e compactação) e definição de parâmetros de permeabilidade e compressibilidade por meio de ensaios de adensamento com leitura da permeabilidade. Por meio dos ensaios laboratoriais pode-se avaliar o comportamento das amostras em relação à permeabilidade e compressibilidade de acordo com as etapas de carregamento, que simularam o alteamento de uma barragem de rejeito. Observou-se que quanto maior o índice de vazios do rejeito, maior é sua compressibilidade. Além disso, foi notória a influência que a aplicação de cargas crescentes tem na redução do coeficiente de permeabilidade, fato que pode afetar o desempenho das barragens ao longo das etapas de alteamento.

Palavras-chave: Rejeito de mineração de bauxita, caracterização, permeabilidade, compressibilidade

ABSTRACT

The Brazilian economy is heavily influenced by mining activity, which in turn contributes intensively to its development. With the growth of the activity, the production of tailings increases and so does the need for its safe storage. The manner in which the tailings of the beneficiation of the minerals are destined, their characteristics and the lack of predictability of their behavior have triggered irremediable tragedies, bringing attention to the need of acquiring better understanding and mastery over the subject. The bauxite mining tailings, also known as red mud, are originated by the Bayer beneficiation process. After the ore extraction, the material is commonly transported by pipelines and in aqueous state dumped into containment dams, which are usually constructed in stages. Dams elevations may have different arrangements, most of which are constructed by upstream, downstream and centerline methods. Resulting in a heterogeneous distribution of the void rate: the closer the tail layer is to the bottom of the tank, the lower the void index and its permeability. Therefore, the analysis of behavioral properties of these materials are indispensable for the development of safe projects. In the present work, the behavior of 3 samples of bauxite mining waste, reconstituted with variable voids index, were evaluated. Characterization tests (granulometry with sedimentation, Atterberg limits, real grain density and compaction) were carried out and parameters of permeability and compressibility were defined by densification tests with permeability reading. By the laboratory tests the behavior of the samples in relation to the permeability and compressibility can be evaluated according to the loading steps, which simulated the removal of a tailings dam. It was observed that the higher the void index of the tailings, the greater its compressibility. In addition, the influence that the application of increasing loads has on the reduction of the permeability coefficient was noticeable, a fact that can affect the performance of the dams during the elevation stages.

Keywords: Bauxite mining, characterization, permeability, compressibility

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração Processo Bayer	20
Figura 2 - Distribuição granulométrica para lama vermelha no Reino Unido	24
Figura 3 - Curva granulométrica dos rejeitos de bauxita (lama e areia vermelha) – Alumar/MA	25
Figura 4 - Lagoa de disposição de lama vermelha na região do Pará	26
Figura 5 - Método de alteamento à montante	27
Figura 6 - Método de alteamento à jusante.....	28
Figura 7 – Método de alteamento pela linha de centro.....	29
Figura 8 – Extrator utilizado para a retirada da amostra indeformada do amostrador Shelby.	38
Figura 9 - Proveta com material para o ensaio de sedimentação.....	39
Figura 10 – Sequência de peneiras utilizadas no ensaio de peneiramento fino.....	39
Figura 11 - Picnômetros utilizados na determinação do peso específico real dos grãos.....	40
Figura 12 - Determinação do limite de liquidez	41
Figura 13 - Aparelho de Casagrande	41
Figura 14 – Extração do material do cilindro de compactação	42
Figura 15- Célula de adensamento com a amostra de rejeito de bauxita	44
Figura 16 - Prensa de adensamento com leitura de permeabilidade.....	45
Figura 17 - Distribuição granulométrica do rejeito de bauxita, com classificação de solos pela ABNT NBR 6502 e AASHTO M145, respectivamente.....	48
Figura 18 – Curva de Compactação	49
Figura 19 – Limite de liquidez	50
Figura 20 – Curvas de adensamento das amostras de rejeito	53
Figura 21 – Curvas de adensamento com identificação do trecho recompressão e virgem.	54
Figura 22 – Linha de tendência linear para valores de (C_v) em relação ao índice de vazios para cada corpo de prova ensaiado, com equação gerada.	55
Figura 23 – Comparação entre os valores de (C_v) medidos e estimados obtidos por meio de uma equação dependente dos índices de vazios.....	56
Figura 24 - Linha de tendência linear para valores de (C_v) em relação a pressão aplicada para cada corpo de prova ensaiado, com equação gerada.....	57
Figura 25 – Comparação entre os valores de (C_v) medidos e estimados obtidos por meio de uma equação dependente da tensão aplicada.	58
Figura 26 – Variação do coeficiente de permeabilidade pelo índice de vazios.....	59

Figura 27 – Variação do coeficiente de permeabilidade pela pressão aplicada	60
Figura 28 – Linhas de tendência em potência com equação gerada para cada corpo de prova ensaiado.....	61
Figura 29 – Comparação entre a razão dos (k) medidos e estimados obtido em relação a tensão aplicada.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Química da Lama Vermelha.....	21
Tabela 2 - Composição Mineralógica da Lama Vermelha	22
Tabela 3 – Distribuição granulométrica e variação dos índices físicos para o rejeito de bauxita – Alumar/MA.....	25
Tabela 4 - Faixa de variação de parâmetros de compressibilidade da lama vermelha.....	33
Tabela 5 - Condutividade hidráulica do rejeito de bauxita.....	34
Tabela 6 - Condutividade hidráulica do rejeito de bauxita brasileiro.....	35
Tabela 7 - Dados das amostras	43
Tabela 8 - Índices físicos do rejeito de mineração de bauxita.....	50
Tabela 9 - Índices físicos das amostras.	51
Tabela 10 – Comparação entre tensão aplicada e peso específico natural do rejeito, para se determinar a altura de alteamento.....	52
Tabela 11 – Tensão de pré-adensamento e coeficientes de compressão e recompressão	54
Tabela 12 – Valores iniciais e finais de permeabilidade e índice de vazios.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes
DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração
IAI – International Aluminium Institute
AASHTO – Associação Americana de Rodovias do Estado e Funcionários de Transporte
NBR – Norma Brasileira
FOB – Free On Board
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
°C – Graus Celcius
mm – Milímetros
kN/m³ – Kilonewton por metro cúbico
g/cm³ – Grama por centímetro cúbico
kPa – KiloPascal
 γ_n – Peso específico Natural
 γ_d – Peso específico seco
G – Massa específica real dos grãos
e – Índice de vazios
 $e_{m\acute{a}x}$ – Índice de vazios máximo
 $e_{m\acute{i}n}$ – Índice de vazios mínimo
w – Teor de umidade
 C_c – Índice de compressão
 C_v – Coeficiente de adensamento
 C_r – Índice de Recompressão
 σ'_{vm} – Tensão de Pré-adensamento
LL – Limite de Liquidez
LP – Limite de plasticidade
IP – Índice de plasticidade
k – Coeficiente de Permeabilidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	REJEITO DE MINERAÇÃO DE BAUXITA	19
2.1.1	Processo de Lavra da Bauxita	19
2.1.2	Processo de Beneficiamento do Alumínio: Processo Bayer	20
2.1.3	Composição Mineralógica e Química da Lama Vermelha	21
2.1.4	Caracterização Geotécnica do Rejeito de Bauxita	23
2.1.5	Métodos de Disposição e Alteamento de Barragens	26
2.1.5.1	Métodos de Alteamento à Montante	27
2.1.5.2	Métodos de Alteamento à Jusante	28
2.1.5.3	Métodos de Alteamento pela Linha de Centro	29
2.2	COMPRESSIBILIDADE E ADENSAMENTO DE SOLOS	30
2.2.1	Teoria do Adensamento	30
2.2.2	Parâmetros de Compressibilidade	32
2.2.3	Fatores que Afetam a Compressibilidade do Solo	33
2.3	PERMEABILIDADE	34
2.3.1	Conceitos Gerais	34
2.3.2	Determinação da Permeabilidade em Laboratório	35
2.3.3	Fatores que Afetam a Permeabilidade de Solos	36
3	METODOLOGIA	37
3.2	ENSAIOS LABORATORIAIS	38
3.2.1	Caracterização Básica	38
3.2.2	Ensaio de adensamento	43
4	ANÁLISE DE RESULTADOS	47
4.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	47
4.1.1	Análise Granulométrica	47
4.1.2	Densidade Real dos Grãos, Limites de Atterberg e Ensaio de Compactação	49
4.2	ENSAIO DE ADENSAMENTO	51
4.2.1	Curva de Adensamento	51
4.2.2	Coefficiente de Adensamento	55
4.2.3	Coefficiente de Permeabilidade	58

5 CONCLUSÃO	
REFERÊNCIAS	

63
64

1 INTRODUÇÃO

A economia brasileira é dependente de produtos extraídos do setor de mineração, o qual é importante para o desenvolvimento social e econômico do país. A pauta dos bens minerais exportados pelo Brasil no ano de 2016 atingiu um volume de 394 milhões de toneladas e representou um US\$ FOB (*Free On Board*) de 21,6 bilhões, já na importação a atividade movimentou US\$ FOB 5,5 bilhões e cerca de 40 milhões de toneladas (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM, 2016).

O Brasil tem como uma de suas principais commodities de exportação o minério, e devido a essa influência, em 2017 o país bateu recorde de superávit na balança comercial. No primeiro semestre do ano de 2017, a balança comercial brasileira fechou com saldo positivo de US\$ 36,219 bilhões, melhor resultado desde 1989 e em junho obteve mais um recorde histórico, com US\$ 7,195 bilhões de saldo positivo (VALE, 2017a). Além disso, segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), a indústria extrativa junto com a indústria de transformação de minério empregava diretamente 663 mil trabalhadores ao final de 2016, mostrando também relevância na geração de empregos (IBRAM, 2017).

A mineração é um dos pilares financeiros e econômicos do Brasil devido ao potencial do solo, por sua riqueza e diversidade. Não há dúvida que os minerais são fundamentais no desenvolvimento de um país, especialmente com o excessivo crescimento demográfico, sendo necessária uma quantidade maior desse recurso natural para atender às crescentes demandas (LUZ; LINS, 2008).

O setor de mineração, ao mesmo tempo em que contribui com a economia do país, pode ser responsável por impactos ambientais consideráveis, e a excessiva geração de rejeitos provenientes do processo de extração do minério pode contaminar lençóis freáticos e mananciais. O rejeito é um produto de baixo valor econômico, podendo ou não reagir quimicamente, sendo considerado um material contaminante. A forma mais frequente atualmente de disposição desses rejeitos é por meio de reservatórios contidos por diques e barragens (SILVA, 2007).

Há uma grande preocupação dada a ocorrência de casos relacionados aos rompimentos de barragens, que ocorrem pela falta de cuidados no projeto e/ou armazenamento e controle das obras de contenção. O comportamento do rejeito tem mostrado ser circunstancial, gerando

condições específicas que contribuem com a ocorrência de instabilidades na barragem. A demanda global por produtos dependentes da extração de minérios é crescente, isto faz com que o volume de rejeitos produzido seja cada vez maior. O estudo do comportamento destes materiais quando armazenados torna-se imprescindível para o desenvolvimento de projetos seguros (BIAZON, 2018).

Os rejeitos de mineração constituem-se por um material de granulometria fina, com plasticidade influenciada pelos químicos adicionados durante o processo de beneficiamento de minérios e que possuem comportamentos variáveis dependentes da forma como são dispostos e o ponto em que se encontram no reservatório. Geralmente, os rejeitos são depositados hidraulicamente em áreas alteadas por etapas, de acordo com a demanda de produção. Para evitar instabilidades causadas por um excesso de poropressão, esse tipo de depósito normalmente utiliza um sistema de drenagem instalado no fundo dos tanques. Tal abordagem poderia resultar em uma distribuição heterogênea da taxa de vazios: quanto mais próxima a camada de rejeito estiver do fundo do tanque (bem como do sistema de drenagem), menor será o índice de vazios. Assim, à medida que as cargas das etapas de alteamento forem crescendo, a permeabilidade vai reduzindo.

Este trabalho trata da realização de ensaios laboratoriais de caracterização e ensaio de adensamento com leitura de permeabilidade por meio do permeâmetro de parede rígida com carga variável em um sistema aberto. Por meio destes ensaios pretende-se avaliar as características de compressibilidade e permeabilidade com a variação do índice de vazios do material, fato este que simula o aumento de cargas provocado pelas etapas de alteamento da barragem de rejeitos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a variação das características de permeabilidade e deformabilidade de um rejeito de mineração bauxita, com a variação do índice de vazios do material, simulando etapas de alteamento de uma barragem de rejeitos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar fisicamente o rejeito de minério de bauxita, através de ensaios laboratoriais como análise granulométrica, massa específica real dos grãos, limites de Atterberg e teor de umidade;
- Definir faixa de valores iniciais de índices de vazios do material para moldagem dos corpos de prova a ser ensaiados;
- Executar ensaios de adensamento com leitura de permeabilidade;
- Comparar as cargas aplicadas durante o adensamento com etapas de alteamento de reservatórios de rejeito.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 REJEITO DE MINERAÇÃO DE BAUXITA

2.1.1 Processo de Lavra da Bauxita

O alumínio é o metal mais abundante na natureza, representando cerca de 8% da crosta terrestre. Porém, não é encontrado puro, estando presentes na estrutura de rochas formadas por compostos oxidados por ter uma reatividade química muito alta, como é o caso da bauxita, criolita, granitos, etc (MASSARA, 2004). A maior parte das jazidas de bauxita são encontradas em zonas tropicais, e o fenômeno de laterização é o seu principal formador, fazendo com que tenham elevada concentração de óxidos de ferro e alumina hidratada (VILLAR, 2002).

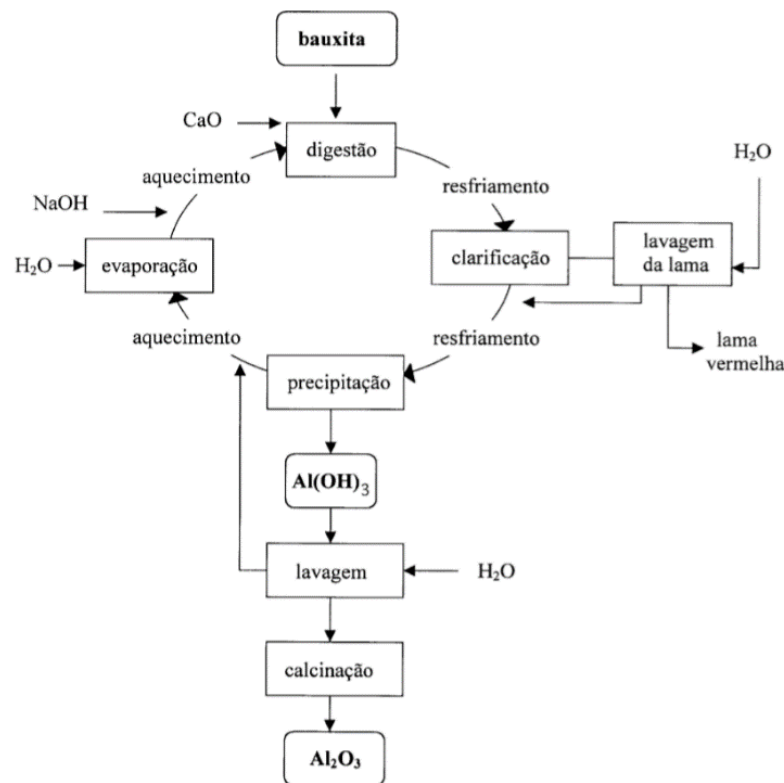
A laterita é um termo utilizado para designar solos que tem como principais componentes o hidróxido de alumínio e de ferro. A formação deste solo é resultado da decomposição de rochas alcalinas, provocado pelo intemperismo químico devido à infiltração da água das chuvas. Assim, as rochas provenientes do laterito são ricas em alumina, sendo as que apresentam de 2% a 4% de óxido de ferro são designadas de bauxita branca, enquanto aquelas que possuem até 25% de óxido de ferro chamam-se bauxita vermelha, o principal minério de onde se obtém o alumínio (SAMPAIO, 2005).

A extração do minério de bauxita é normalmente realizada a céu aberto, sendo que uma minoria é feita pelo método subterrâneo (RÖHRLICH *et al.*, 2001). O processo de lavra da bauxita é a etapa mais rápida do beneficiamento do alumínio, sendo que a extração do minério pode ser feita por escavação manual como, também, com a utilização de equipamentos mecânicos. Para a bauxita ser extraída, as camadas de rocha envoltas ao minério devem ser removidas com uma combinação de britagem, lavagem e triagem úmida de todo o solo escavado. Cerca de 50% do material escavado é separado como sendo o minério útil e o restante é descartado. Assim é obtido o produto final da lavra que pode ser usado tanto no processo de calcinação, bauxita para fins não metalúrgicos, quanto no processo Bayer, para extração de bauxita para fins metalúrgicos (SAMPAIO, 2005).

2.1.2 Processo de Beneficiamento do Alumínio: Processo Bayer

A alumina pode ser obtida por quatro diferentes processos: Bayer, Alum, Isopropóxido e Iwatani (SAMPAIO, 2005). Dos processos apresentados, o mais utilizado e conhecido é o processo Bayer, o qual será apresentado com detalhes no presente trabalho. Este processo de beneficiamento foi desenvolvido e patenteado por Karl Josef Bayer, em 1888, e se tornou a pedra angular da indústria de produção de alumínio em todo o mundo (HIND, 1999). Segundo a Hydro (2012), o processo Bayer é usado para purificar e refinar a bauxita e obter alumina fundida, o precursor do alumínio. As principais etapas do processo desde a entrada até a saída são: moagem, digestão, clarificação/filtragem, precipitação e calcinação. O processo de beneficiamento encontra-se esquematizado na figura 1.

Figura 1 - Ilustração Processo Bayer



Fonte: Constantino *et al.* (2002)

Inicialmente, a bauxita passa por um processo de moagem onde é triturada, então o material está preparado para iniciar o seu processo de transformação. Posteriormente é adicionado uma solução concentrada de hidróxido de sódio NaOH (soda cáustica) e o material é aquecido a temperaturas de até 270 ° C. Em seguida, o hidróxido de alumínio presente no

mineral é dissolvido e desta forma reduz o teor de sílica. Neste momento é gerado o aluminato de sódio, que passa pelo processo de clarificação, onde são separados os sólidos da solução líquida por meio de sedimentação e filtragem, podendo ter adição de químicos (floculantes). O material sem valor comercial gerado nesta etapa é denominado de “lama vermelha”, um rejeito de mineração de bauxita (HIND, 1999). Na precipitação, o aluminato de sódio é resfriado progressivamente, formando cristais de trihidroxita de alumínio $Al(OH)_3$. Na etapa final, na calcinação, o produto é aquecido em calcinadores, com temperaturas de até 1100°C , para eliminar qualquer umidade, produzindo sólidos de alumina puros, com aspecto arenoso e branco (HYDRO, 2018).

O rejeito de bauxita é também conhecido como lama vermelha, pois o minério apresenta uma coloração avermelhada devido à alta presença de ferro. Para produzir 1 tonelada de alumina, é necessário ter entre 2 e 3,6 toneladas de bauxita, sendo o restante (o dobro ou mais) constituído por rejeitos, ou seja, lama vermelha. Este fato corrobora com as altas quantidades de lama vermelha que são produzidas em todo o mundo a cada ano (HIND, 1999).

2.1.3 Composição Mineralógica e Química da Lama Vermelha

A composição química da lama vermelha varia extensamente e depende da natureza da bauxita e da técnica empregada no processo Bayer (INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE - IAI, 2013). Dentre os principais componentes e porcentagens presentes na composição química da lama vermelha podem-se apresentar os dados contidos na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição Química da Lama Vermelha

Elemento	Varição típica (%)
Fe_2O_3	20 - 45
Al_2O_3	10 - 22
TiO_2	4 - 20
CaO	0 - 14
SiO_2	5 - 30
Na_2O	2 - 8

Fonte: Adaptado de IAI (2013)

O rejeito de bauxita pode conter diferentes elementos mineralógicos em diferentes quantidades, dependendo de sua formação e outros fatores influentes. Algumas de suas

possíveis fases, juntamente com a variação da porcentagem de sua abundância são os elementos apresentados pela Tabela 2.

Tabela 2 - Composição Mineralógica da Lama Vermelha

Elemento	Variação típica (%)
Sodalita $\text{Na}_8(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})\text{Cl}_2$	4 - 40
Goethite $\text{FeO}(\text{OH})$	10 - 30
Hematita Fe_2O_3	10 - 30
Magnetita Fe_3O_4	0 - 8
Silica (Cristalina e Amorfa) SiO_2	3 - 20
Aluminato de Cálcio Al_2CaO_4	2 - 20
Boemite $\text{AlO}(\text{OH})$	0 - 20
Dióxido de Titânio TiO_2	2 - 15
Moscovita $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F},\text{OH})_2$	0 - 15
Calcita CaCO_3	2 - 20
Gibbsita $\text{Al}(\text{OH})_3$	0 - 5
Cancrinita $(\text{Na}_6[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}].2\text{CaCO}_3)$	0 - 50

Fonte: Adaptado de IAI (2013)

A lama vermelha é considerada com elevada alcalinidade, sendo esta uma de suas principais características, com pH entre 10 e 13 (PRADHAN et al., 1996; HIND et al., 1999). Segundo um estudo realizado pela Hungarian Academy of Sciences "Ao analisar amostras tomadas em diferentes locais, os reservatórios de rejeito possuem um pH com variação entre 11 a 14. Conseqüentemente, a lama vermelha deve ser considerada como substância perigosa" (ÁDÁM et al., 2011, p. 15).

Uma ampla variedade de outros componentes está presente no processo de beneficiamento da bauxita, especialmente óxidos metálicos tais como arsênio, cromo, cobre, chumbo, mercúrio, níquel, urânio e zinco, dentre outros. Alguns dos elementos permanecem não dissolvidos, sendo eliminados com o rejeito de bauxita, enquanto alguns são solúveis no processo de Bayer, acumulando no licor de Bayer, ou precipitam junto com o hidróxido de alumínio. Dependendo da temperatura usada no processo de extração, a concentração de alguns elementos poderá aumentar ou diminuir no rejeito de mineração de bauxita (IAI, 2013).

2.1.4 Caracterização Geotécnica do Rejeito de Bauxita

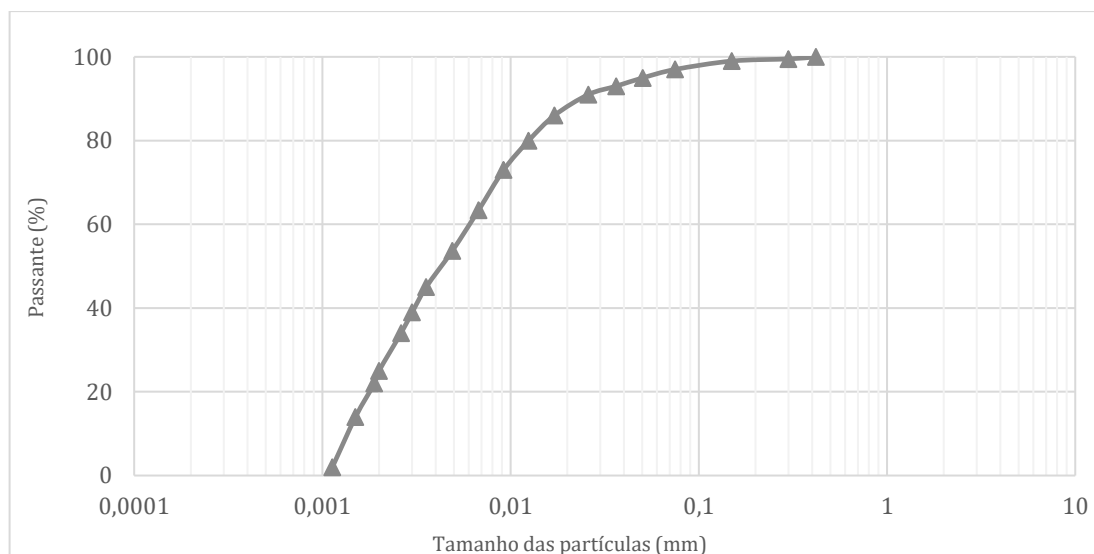
A granulometria do rejeito de mineração está intimamente ligada à mineralogia da rocha mãe e também ao processo utilizado para sua extração, separação e deposição. Não somente a caracterização do rejeito, mas também a associação da granulometria à sua composição química e mineralógica são informações necessárias para uma análise mais precisa de sua permeabilidade e compressibilidade (BEDIN, 2010).

As características geotécnicas dos rejeitos não são padronizadas, podendo variar conforme a região de onde foi extraída e também em função do método industrial utilizado para o seu processamento. Sendo assim, é difícil de se estabelecer uma curva granulométrica referencial para este tipo de material, o que se pode avaliar são os intervalos de variação da mesma, junto a pesquisas previamente realizados com este tipo de material.

O rejeito de mineração de bauxita constitui-se por uma pasta altamente alcalina formada por partículas muito finas, normalmente de caráter siltoso, e tamanho médio inferior a $10\ \mu\text{m}$, onde se pode encontrar mais de 90 % das partículas passantes pela peneira # 200 / $75\ \mu\text{m}$ (WANG, 2008). Em estudos realizados por Bedin (2006), a massa específica real dos grãos de amostras de rejeito de mineração de bauxita brasileiros, variaram entre $2,75$ à $3,15\ \text{g}/\text{cm}^{-3}$, sendo que, estes valores altos, de acordo com a autora, devem-se à presença de ferro na composição dos rejeitos. Uma maior quantidade de ferro irá gerar uma maior densidade dos grãos, fazendo com que a velocidade de sedimentação durante os ensaios de granulometria por sedimentação, seja alta.

Newson *et al.* (2006) discorre sobre um programa de ensaios de laboratório efetuado para investigar as propriedades mecânicas e físico-químicas do rejeito de mineração de bauxita (lama vermelha), no Reino Unido. Onde foram realizados ensaios para a determinação dos limites de Atterberg, sendo encontrados resultados de Limite de Liquidez (LL) igual a 54% e o Limite de Plasticidade (LP) igual a 40% e desta forma o índice de plasticidade foi de 14%.

Figura 2 - Distribuição granulométrica para lama vermelha no Reino Unido

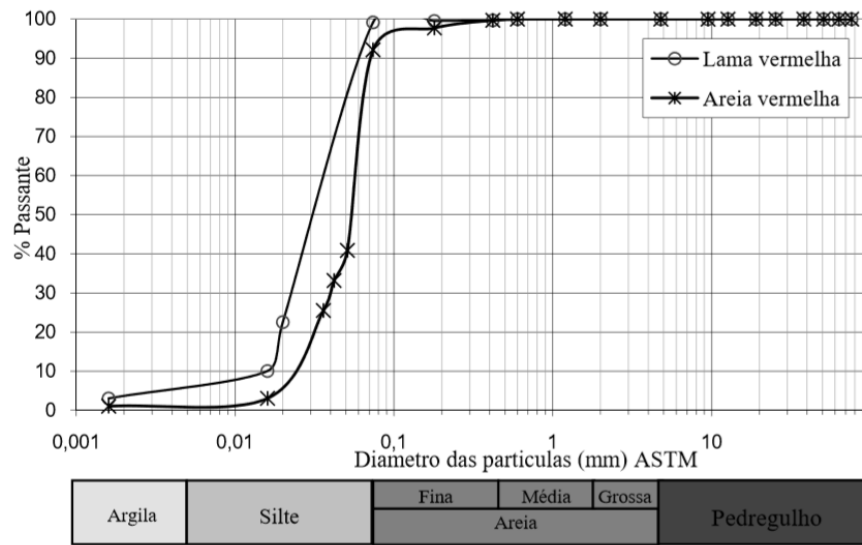


Fonte: Adaptado de Newson *et al.* (2006)

Através da figura 2 pode-se avaliar a curva granulométrica da lama vermelha no estudo de Newson *et al.* (2006), indicando que 20% do material possui partículas do tamanho de argila e o restante das partículas com tamanho correspondente à faixa do silte.

A Figura 3 mostra a curva granulométrica do rejeito de mineração de bauxita (lama vermelha e areia vermelha), obtidos da fábrica brasileira da Alumar. Em análise à distribuição granulométrica desta lama vermelha, a mesma foi classificada como um silte argiloso e a areia vermelha como um silte arenoso. Assim, pode-se verificar, mais uma vez, a predominância da característica siltosa nos rejeitos de minério de bauxita. A presença de partículas mais grosseiras é observada no rejeito denominado de areia vermelha, o qual geralmente é utilizado para compor as áreas próximas aos diques de alteamento das barragens, por permitirem uma drenagem mais rápida da água nestas regiões (BEDIN, 2010).

Figura 3 - Curva granulométrica dos rejeitos de bauxita (lama e areia vermelha) – Alumar/MA



Fonte: Bedin (2010)

Bedin (2010) também encontrou os índices físicos para esta mesma amostra de rejeito de mineração de bauxita, os quais estão apresentados na Tabela 3. Pode-se observar, que de forma geral, o rejeito de bauxita apresenta plasticidade mediana e valores altos para massa específica real dos grãos, variando neste estudo de 3,0 a 3,15 g/cm³, corroborando com as informações apresentadas anteriormente, no estudo referente ao rejeito de mineração de bauxita do Reino Unido.

Tabela 3 – Distribuição granulométrica e variação dos índices físicos para o rejeito de bauxita – Alumar/MA

Material	Posição	w (%)	ρ_s	γ_{nat} (KN/m ³)	e	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	LL	LP	IP
Areia vermelha	Superfície	55	3,00	17,8	1,6	1	91	8	30,8	25,7	5,1
	Profundidade	60	3,00	16,5	1,9						
Lama vermelha	Superfície	70	3,00	15,8	2,4	7	93	0	38,9	24,9	14
	Profundidade	55	3,15	17	1,7						

Fonte: Bedin (2010)

Através da tabela 3 que possui os valores obtidos por Bedin (2010), nota-se que a umidade da lama vermelha diminui consideravelmente com a profundidade, enquanto a areia vermelha não sofre grandes alterações, aumentando levemente. Esta condição pode ser interpretada como a redução da água no material mais fino, provocada pela redução dos vazios do material em profundidade. Já para o material mais granular, como a água escoava com

facilidade, a mesma tende a se concentrar mais na parte inferior, mesmo que com pequena variação em relação as profundidades mais próximas à superfície do reservatório.

2.1.5 Métodos de Disposição e Alçamento de Barragens

A lama vermelha é a denominação dada para o rejeito originado pelo processo de Bayer, durante a etapa de clarificação, sendo normalmente transportada por meio de dutos, em via aquosa. Este material é depositado em espécies de lagoas, contidas por barramentos feitos com rejeito ou material disponível na região, construídas especialmente para a disposição de rejeitos de mineração. A Figura 4 demonstra uma lagoa de disposição de rejeitos de mineração de bauxita, localizada no estado do Pará. Essas áreas de disposição de rejeito possuem a vida útil resumida de 4 a 7 anos, e o processo de recuperação é demorado, além dos riscos em relação a rompimentos (HIND, 1999).

Figura 4 - Lagoa de disposição de lama vermelha na região do Pará



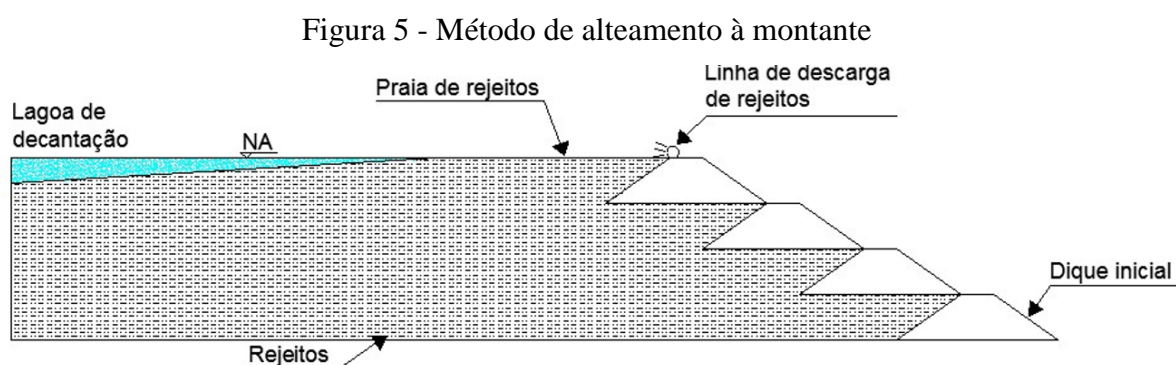
Fonte: Da Autora (2018)

Segundo Silva (2007), os métodos tradicionais de disposição de rejeitos de mineração, também são conhecidos como métodos úmidos, pois existe uma grande quantidade de água que segue misturada ao material sólido. A separação das fases ocorre devido à sedimentação já no local de disposição. Esta metodologia de disposição consiste numa operação simples e barata, porém os impactos ambientais são de grande significância. Os maiores custos em relação a este método de disposição de rejeitos, se dão pelo fato de o sistema precisar de grandes áreas para implantação e, também, da necessidade da instalação de projetos de segurança como, por exemplo, a impermeabilização da área ou a implantação de sistemas de drenagem efetivos.

Os depósitos de rejeito de mineração são normalmente construídos por etapas, sendo que os alteamentos podem ser realizados de maneiras distintas. Cada configuração possui características específicas, agregando vantagens e desvantagens ao processo. Cada método possui nomes que condizem com a direção em que os alteamentos são concebidos em relação ao primeiro dique, sendo os principais métodos de alteamento: à montante, à jusante e da linha de centro (LOZANO, 2006).

2.1.5.1 Métodos de Alteamento à Montante

Primeiramente é construído um dique de partida e, conforme o rejeito atingir a cota da crista no dique, são levantados novos diques em todo perímetro da bacia, por etapas de alteamento, conforme ilustrado na Figura 5. Neste processo o eixo da barragem se movimenta para a montante, ou seja, o novo dique apoia-se no próprio rejeito (NIERWINSKI, 2019). Segundo Araújo (2006) a preocupação neste método está na questão de que o novo dique é instalado sobre solos não consolidados, com condição saturada e com grandes chances de sofrer níveis de adensamento prejudiciais à estabilidade do mesmo, bem como diminuindo a efetividade do sistema de drenagem que só pode ser instalado ao fundo da barragem. Portanto, Vick (1983) destaca como método de prevenção, que os materiais próximos à praia de rejeito contêm pelo menos de 40 a 60% de partículas do tamanho de areias, garantindo a drenagem da região.



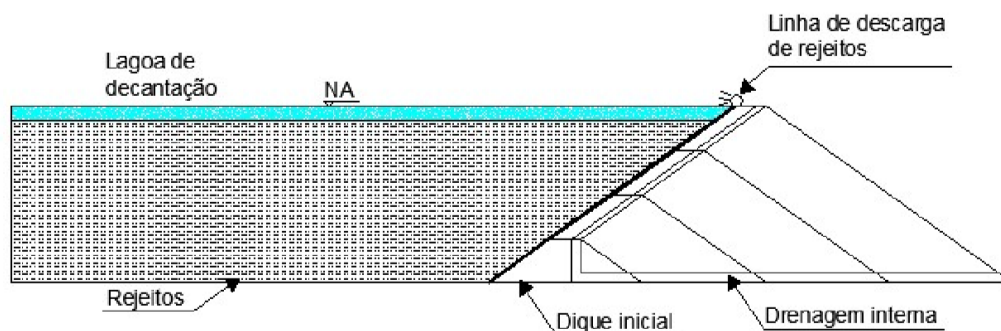
Este método acaba precisando de um volume menor de material para a execução dos diques de alteamento, sendo mais rápido e mais fácil na hora de sua constituição. Por esses motivos e também pelo fato de poder ser executado em topografias com elevada inclinação, é considerado o método mais barato e mais comum a ser escolhido. Porém, deve-se destacar que é um método com maior susceptibilidade à liquefação e à ocorrência do efeito “piping”, por ter

sua linha freática muito próxima ao talude da jusante, conferindo baixa segurança ao projeto (LOZANO, 2006).

2.1.5.2 Métodos de Alteamento à Jusante

A utilização deste método segue a mesma linha de construção de uma barragem padrão de armazenamento de água. Ele foi elaborado para providenciar melhorias na segurança que o método a montante não pode suprir. A sua execução também se inicia com a construção de um dique inicial, podendo este ser feito com material de empréstimo compactado, como pelo próprio rejeito (NIERWINSKI, 2019). Neste método de alteamento, a execução do talude de montante permite que sejam adicionados sistemas de drenagem interna, com filtros inclinados e filtros horizontais, o que contribui para a estabilidade dos mesmos, conforme mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Método de alteamento à jusante



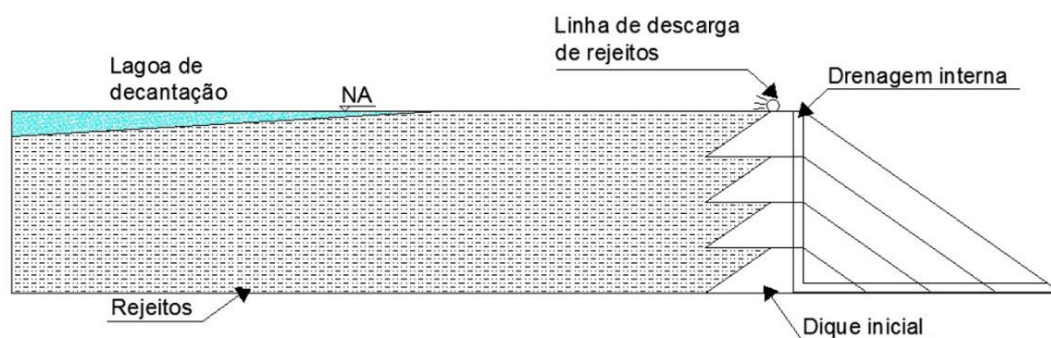
Fonte: Nierwinski (2019 *apud* Vick 1983)

O método exige que esteja liberada uma grande área ao pé da barragem, para a execução das etapas de alteamento. Para tanto é necessária uma grande quantia de material para a construção do aterro de contenção. Este fato e também a execução de sistema de drenagem para controle das superfícies freáticas, conferem um maior custo, no entanto, também uma maior segurança ao projeto (VICK, 1983).

2.1.5.3 Métodos de Alçamento pela Linha de Centro

Segundo o autor supracitado, neste método o eixo da barragem permanece na mesma posição de elevação, sendo uma saída intermediária entre o modo de montante e jusante, conforme apresentado na Figura 7. O rejeito é lançado perifericamente formando uma praia, sendo que os alteamentos subsequentes se apoiam sobre esta praia de rejeitos de um lado e do outro lado sobre o próprio dique. Este sistema de alteamento permite a instalação de sistemas de drenagem para o controle da superfície freática da parte à jusante dos diques, o que oferece uma maior segurança para a estrutura.

Figura 7 – Método de alteamento pela linha de centro



Fonte: Nierwinski (2019 *apud* Vick 1983)

De acordo com Vick (1983) este método tem por objetivo a redução das desvantagens que existem nos dois métodos citados anteriormente. Uma de suas vantagens é o fato da quantidade de material necessária para a construção dos diques de alteamento ser menor ao do método de jusante, e mesmo assim, seu comportamento estrutural se aproxima do mesmo, tendo, inclusive, uma boa resistência sísmica quando o método é executado corretamente. Por outro lado, o método possui maior complexidade em sua execução e precisa de uma quantidade de material maior que a do método de alteamento à montante. Tal necessidade em relação ao método de alteamento à montante, juntamente com o fato da necessidade de instalação de sistemas de drenagem, faz com que os custos dessa alternativa possam ser elevados quando comparado ao método de alteamento à montante.

2.2 COMPRESSIBILIDADE E ADENSAMENTO DE SOLOS

Todos os materiais deformam-se pela ação de uma carga aplicada, sendo a compressibilidade a representação da diminuição do volume sob a ação de tais cargas. O adensamento ocorre em solos saturados, quando o mesmo recebe uma pressão efetiva, fazendo com que a água, que está presa nos vazios do solo, sofra uma sobrepressão. Esta sobrepressão é tão elevada, a ponto de fazer a água escoar por meio dos poros, em direção à uma camada drenante. Esta condição causa uma redução no volume dos vazios do solo e, por consequência, a redução no volume do solo (CAPUTO, 1996).

De acordo com Pinto (2006), compressibilidade é a propriedade que um material tem de reduzir seu volume em relação a uma determinada pressão externa aplicada sobre o mesmo. Adensamento, por sua vez, é a característica de consolidação de um determinado solo, dada pela relação entre a variação do seu volume causado pelo escoamento da água existente entre seus poros.

2.2.1 Teoria do Adensamento

Segundo Nogueira (2010), a teoria de adensamento unidimensional foi apresentada por Terzaghi e Frolich (1936) e baseia-se nas hipóteses de que o solo é totalmente saturado e homogêneo, recebendo compressão unidimensional e que o trajeto que o fluxo de água faz, ao se deslocar dos poros, ocorre em apenas uma direção. Tem como objetivo a determinar o grau de adensamento de uma camada de solo para uma dada profundidade e instante de tempo. Assim, pode-se obter as informações de quanto o solo deformou, a alteração dos índices de vazios, as tensões efetivas e as pressões neutras para cada momento analisado.

O processo de adensamento ocorre de forma gradativa, onde o solo sofre uma redução de volume devido a uma lenta movimentação da água que está entre os poros do solo, iniciando um processo de drenagem. Esta situação é desencadeada pelo aumento progressivo da tensão efetiva aplicada no solo, fazendo com que ocorra a compressão do solo (NOGUEIRA, 2010). Segundo Pinto (2006) para a dedução da teoria, Terzaghi definiu algumas hipóteses que devem ser ponderadas:

1. Solo homogêneo;
2. Solo saturado;
3. A compressão é unidimensional;
4. O fluxo de água é unidirecional;
5. Compressibilidade das partículas sólidas e da água são desprezíveis em relação à compressibilidade do solo;
6. Fluxo obedece a lei de Darcy;
7. Apesar do solo ser constituído por vazios e partículas, é estudado como sendo elemento infinitesimal;
8. Durante o processo de adensamento, o índice de vazios e a tensão vertical efetiva, possuem uma relação linear;
9. Alguns parâmetros físicos são admitidos constantes durante o processo de adensamento;

A hipótese (1) considera que o solo é uniforme em sua estrutura, não havendo mudanças em uma característica ao longo do seu corpo, as (2) a (4) aplicam-se diretamente ao processo de compressão edométrica. Dentre a hipótese a (8) é questionável, pois a medida que o solo adensa, muitos parâmetros do solo variam, como é o caso da compressibilidade e permeabilidade. Conforme é aplicado diferentes tensões sobre um solo, a variação do índice de vazios ocorre de forma não linear, portanto a hipótese (9) é apenas uma aproximação da realidade para facilitar a solução matemática deste problema (NOGUEIRA, 2010; PINTO, 2006).

Segundo Pinto (2006), uma forma ilustrativa de se explicar o que acontece no processo de adensamento é a seguinte: Quando é aplicado uma carga sobre um solo saturado, no momento inicial, a água é o componente que suporta toda a carga, ou seja, a poropressão é igual a pressão exercida e a pressão nos grãos é nula. Conforme ocorre a drenagem da água por meio dos poros devido a tensão distribuída, acontece uma transferência da carga suportada pela água, passando a ser suportada pelo solo. Com o tempo o solo vai sofrendo recalques, esse processo é chamado de adensamento. O fim do adensamento ocorre quando toda água existente entre os vazios é drenada, fazendo com que o solo suporte toda a carga sozinho.

2.2.2 Parâmetros de Compressibilidade

Os aparelhos êdometros, usados em laboratório, utilizam o princípio de Terzaghi para determinar as características de adensamento e compressibilidade do solo. Uma amostra indeformada ou reconstituída é confinada lateralmente e recebe cargas verticais que são aplicadas gradualmente em sua superfície, causando uma redução na altura da amostra. A partir deste ensaio são obtidos parâmetros de compressibilidade, os quais são: a pressão de pré-adensamento (σ'_{vm}), o coeficiente de adensamento (c_v), coeficiente de variação volumétrica (m_v), coeficiente de compressibilidade (a_v), Índice de compressão (c_c), coeficiente de recompressão (c_r), coeficiente de adensamento secundário (c_s) (MARANGON, 2018). Além desses, o coeficiente de permeabilidade (k) pode ser determinado durante um ensaio de adensamento, caso equipamento possua um sistema acoplado, que permita a sua análise manual ou automática.

A NBR 12007 (1990) era a norma que discorria sobre a execução do ensaio de adensamento, porém ela foi cancelada, por isso utilizou-se como diretriz a norma da DNER-IE 005 (1994). A mesma recomenda dois métodos a serem realizados para a obtenção da Tensão de pré-Adensamento e os parâmetros citados, que são o método de Casagrande e o método de Pacheco Silva. Para realizá-los traça-se a curva do índice de vazios em função do logaritmo da pressão aplicada. A tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}) é definida como uma tensão que corresponde ao maior carregamento em que o solo já esteve submetido ao longo de sua formação, porém sabe-se que o rejeito é um material que provém de um processo químico, sendo assim, pode não apresentar o mesmo comportamento de uma argila pré-adensada em relação ao seu histórico de tensões (NIERWINSKI, 2019). O coeficiente de compressibilidade (a_v) é a variação do índice de vazios em relação a profundidade, o coeficiente de recompressão (c_r), é representado pelo trecho da curva onde o solo comprime até alcançar a sua tensão máxima já sofrida, já o índice de compressão (c_c) pelo trecho que o solo passa a se comprimir após a sua tensão característica, chamado de trecho virgem (PINTO, 2006; SILVA, 2013).

A velocidade com que a água é conduzida para fora dos vazios entre as partículas, ou seja, a velocidade na qual ocorrerá o adensamento, é dada pelo coeficiente de adensamento (c_v). Este parâmetro pode ser obtido através da interpretação dos resultados do ensaio de adensamento, por meio do Método da raiz do tempo, elaborado por Taylor (1948) ou pelo Método do logaritmo do tempo, criado por Casagrande e Fadum (1940). Os valores de (c_v) são definidos em cada estágio de carregamento do ensaio, por meio do monitoramento da variação da altura do corpo de prova ao longo do tempo.

Para o caso dos rejeitos de mineração, Nierwinski (2019) afirma que o método de disposição dos mesmos influencia diretamente nas características físicas do material, fazendo com que apresentem baixa densidade, alta angularidade dos grãos e uma compressibilidade maior que a dos materiais naturais similares. A Tabela 4 apresenta a faixa de variação dos parâmetros (c_v) e (c_c) para rejeitos de mineração de bauxita, definidos por diferentes autores.

Tabela 4 - Faixa de variação de parâmetros de compressibilidade da lama vermelha

c_v (cm ² /s)	c_c	Autores
3×10^{-2} a 9×10^{-2}	0,194	Nierwinski (2019)
5×10^{-2} a 1×10^{-1}	0.14 a 0.25	Bedin (2010)
10^{-2} a 10^{-4}	0.20 a 0.30	Vick (1983)

Fonte: Da Autora, 2019

Verifica-se uma variabilidade elevada, principalmente nos valores de (c_v), o que evidencia a heterogeneidade destes materiais. Sendo seus parâmetros influenciados pelo local e profundidade de onde são coletados, bem como dos químicos utilizados no processo de beneficiamento.

2.2.3 Fatores que Afetam a Compressibilidade do Solo

A compressibilidade é uma propriedade que dependerá de fatores como o tipo de material, a composição do solo, as tensões recebidas e o grau de saturação. O processo de adensamento está intimamente associado ao coeficiente de permeabilidade do solo, que depende do tempo em que as deformações acontecem, sendo então, um processo associado à solos saturados (NIERWINSKI, 2019 *apud* TERZAGHI, 1943).

Segundo Pinto (2006), um dos primeiros fatores a se observar ao estudar a compressibilidade é o tipo de solo. O contato entre as partículas de um solo fino é dado por meio de ligações elétricas e pelo contato entre as camadas de água, enquanto nos solos mais grosseiros, os esforços ocorrem entre as próprias partículas, tal fato faz com que os solos finos sejam mais compressíveis. O arranjo, a forma, o tamanho e a textura das partículas influenciam no índice de vazios existente nos solos, sendo este índice físico, juntamente com a plasticidade do material, ligados ao parâmetro da compressibilidade do solo.

As tensões que o solo sofre durante o tempo acarreta na movimentação entre as partículas. Esta movimentação torna o corpo cada vez mais denso, diminuindo seus vazios e

também a sua compressibilidade. As tensões exercidas entre os grãos também podem causar uma quebra ou esmagamento dos grãos, fazendo com que sua compressibilidade aumente levemente (PINTO, 2006).

2.3 PERMEABILIDADE

2.3.1 Conceitos Gerais

De acordo com Gonçalves (2013), condutividade hidráulica de um solo tem como objetivo expressar a facilidade com que a água percola por ele. Para se obter a mesma é necessário ter o conhecimento de propriedades como sua porosidade, tamanho dos grãos, morfologia, orientação dos poros, teor de umidade, grau de saturação. A condutividade hidráulica pode ser mensurada com a realização de ensaios de adensamento com permeâmetro de parede flexível, permeâmetro de parede rígida e ensaios triaxiais.

Gore (2010) analisou a condutividade hidráulica de um rejeito de mineração de bauxita em três locais diferentes, onde mais de 60% dos grãos das amostras passavam pela peneira #200. O autor verificou que as amostras foram compactadas com teor de umidade ótimo de 32% e não sofreram tensão de confinamento e tensão nos poros. A Tabela 5 mostra os valores encontrados para a condutividade hidráulica (k) de cada amostra.

Tabela 5 - Condutividade hidráulica do rejeito de bauxita

Amostra	% que passa na peneira #200	Ensaio em permeametro de parede rígida (k) cm/s	Ensaio em permeametro de parede flexível (k) cm/s
1	62	1.2E-06	1.5E-06
2	72	4.2E-07	-
3	96	6.3E-07	1.4E-06

Fonte: Adaptado de Gore (2010)

Kolencsik-Tóth et al. (2014) mediu a condutividade hidráulica de duas amostras de lama vermelha por meio de permeâmetro de parede flexível com pressão de consolidação variando de 100 a 300 kPa. O valor mínimo encontrado foi de 10^{-9} m / s, enquanto o máximo foi 10^{-8} m / s. As amostras ensaiadas foram retiradas de profundidades a 1,5 m e 0,5 m de

profundidade, respectivamente. A baixa permeabilidade do material indicou que a percolação da água pelo material foi muito lenta.

Os rejeitos de mineração não são produtos da natureza, são produzidos industrialmente tendo a sua composição alterada tanto fisicamente como quimicamente pelo processamento. Sendo assim, as características do mesmo podem variar significativamente, dependendo de aspectos relacionados ao método de disposição dos rejeitos de mineração, teor de finos e profundidade (NIERWINSKI, 2019). Na literatura se encontra a condutividade hidráulica, para o rejeito de mineração de bauxita brasileiro, para lamas bem consolidadas, variando na ordem de grandeza de 10^{-9} à 10^{-5} (m/s), conforme pode-se observar na tabela 6.

Tabela 6 - Condutividade hidráulica do rejeito de bauxita brasileiro

Villar (1998;2002)	Bedin (2006)	Mello (1985)	Vick (1983)
10^{-7} à 10^{-5} (m/s)	10^{-8} à 10^{-5} (m/s)	10^{-9} à 10^{-6} (m/s)	5×10^{-9} à 10^{-7} (m/s)

Fonte: Da Autora, 2019

2.3.2 Determinação da Permeabilidade em Laboratório

A determinação do coeficiente de permeabilidade por meio de ensaios de laboratório pode ser feita com permeâmetro a carga constante, carga variável e ensaios edométricos, com a expulsão de água através do solo. Para a realização destes ensaios podem ser utilizadas amostras indeformadas ou reconstituídas (moldadas). O permeâmetro de carga constante é uma repetição da experiência de Darcy, que consiste em medir a quantidade de água que passa através do corpo-de-prova, ao longo de um período. É mais empregado em solos granulares e solos argilosos no estado natural, os quais apresentam valores de permeabilidade elevados. A utilização da carga variável é melhor para solos com coeficiente de permeabilidade muito baixo. Neste último caso, a carga hidráulica varia durante o processo e é feita a leitura de uma bureta graduada, em intervalos de tempo, onde é adicionado água, implicando em um potencial hidráulico, gerando infiltração da água por meio do solo (NBR 14545, 2000; NBR 13292, 1995; PINTO, 2006).

2.3.3 Fatores que Afetam a Permeabilidade de Solos

Pinto (2006) afirma que de forma semelhante à compressibilidade, as propriedades do solo influenciam na sua permeabilidade. Fatores como a estrutura dos grãos, distribuição granulométrica, índice de vazios, composição mineralógica, temperatura e grau de saturação, são de extrema importância para a permeabilidade. Cada um desses aspectos causam um efeito que de certa forma está interligado um ao outro, isto é a estruturação depende da granulometria, índice de vazios e composição mineralógica.

Solos mais finos possuem uma menor macroporosidade e maior microporosidade, causando assim uma maior capacidade de adsorção de água. Os macroporos são responsáveis pela drenagem da água por serem maiores a ponto da água não aderir ao poro, enquanto os microporos tem características retentoras onde a água adere ao poro. Então quanto mais fino e menor o índice de vazios do solo mais difícil será a penetração da água. Quanto menor forem os vazios do solo e menores as suas partículas, menor será o coeficiente de permeabilidade. (KIEHL, 1979).

Lambe e Whitman (1969) e Souza Pinto (2000) averiguaram que a condutividade hidráulica também varia com o teor de umidade, observado pela curva de compactação. Segundo estes autores, quando a amostra é moldada com uma umidade que se encontra abaixo da umidade ótima, ou seja, no ramo seco da curva, ela forma uma disposição floclada da estrutura dos grãos, facilitando a passagem de água, enquanto que no ramo úmido forma uma estrutura dispersa, criando um caminho maior para a água percorrer.

De acordo com Gerscovich (2011), a intervenção que a saturação causa em um solo se dá pelo fato de que quanto mais ele for saturado maior será sua capacidade de percolação, conseqüentemente, maior será o coeficiente de permeabilidade. Também é importante destacar o formato e estruturação dos grãos, pois grãos mais redondos e equidistantes facilitam o caminho que a água irá percorrer. A temperatura é uma propriedade que influencia a viscosidade e o peso específico do fluido entre os poros, conseqüentemente influenciará na velocidade em que o mesmo escoará pelos poros do solo. Por fim, solos com maior capacidade de troca de íons e reações químicas, dificultam a transposição da água, como é o caso das argilas.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os ensaios realizados para que os objetivos desta pesquisa fossem atingidos. Inicialmente é apresentada uma breve descrição do tipo de amostra utilizada e na sequência são descritas as metodologias de ensaio utilizadas para caracterização do rejeito e avaliação das propriedades de compressibilidade e permeabilidade do mesmo.

3.1 DESCRIÇÃO DO MATERIAL DE PESQUISA

O material utilizado nesta pesquisa é um rejeito de mineração de bauxita, mais especificamente uma amostra do rejeito denominado de “lama vermelha”, como foi descrito no referencial teórico deste trabalho. Este rejeito é proveniente de um depósito brasileiro, cuja localização e nome da empresa responsável não serão divulgados por questões de sigilo.

A amostra do material avaliada foi coletada com o auxílio de um amostrador do tipo Shelby, numa profundidade aproximada de 3 m dentro do depósito. Esta amostra foi trazida até o laboratório de Mecânica dos Solos, da Universidade Federal de Santa Catarina, campus de Joinville, onde foram realizados os ensaios para este estudo. A lama vermelha foi classificada de forma tátil-visual como um silte-argiloso de coloração avermelhada e cuja umidade natural, no interior do tubo shelby, foi identificada como sendo igual a 33%.

Embora a amostra do material tenha sido coletada por meio de um amostrador Shelby, em condições indeformadas, neste estudo trabalhou-se com a reconstituição da amostra em índice de vazios distintos, para a avaliação da variação da compressibilidade e permeabilidade do material nestas condições. A figura 8 mostra a retirada do rejeito de mineração de bauxita do interior do tubo Shelby, obtendo-se, assim, o material utilizado para a realização dos ensaios contidos nesta pesquisa.

Figura 8 – Extrator utilizado para a retirada da amostra indeformada do amostrador Shelby.



Fonte: Da Autora (2018)

3.2 ENSAIOS LABORATORIAIS

Para a execução dos ensaios desta pesquisa, as amostras foram devidamente preparadas de acordo com as diretrizes da NBR 6457 (ABNT, 2016). A metodologia adotada em cada um dos ensaios realizados é descrita nos itens a seguir.

3.2.1 Caracterização Básica

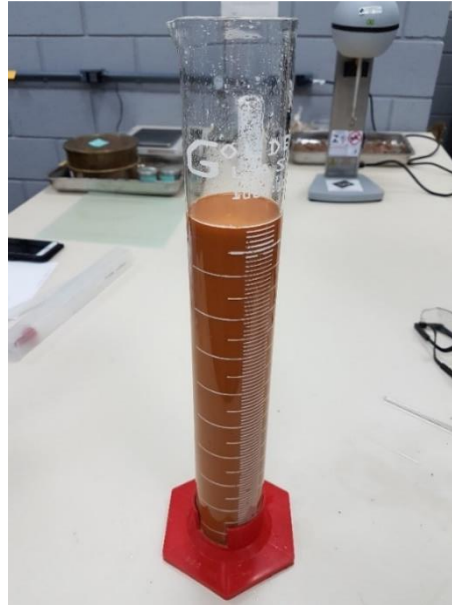
Tendo em vista a avaliação das propriedades físicas do rejeito de mineração de bauxita, procedeu-se a execução de ensaios de caracterização básica, contemplando os ensaios de granulometria, densidade real dos grãos, limites de Atterberg e compactação. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica do Solos da UFSC.

3.2.1.1 Análise Granulométrica

Após a preparação da amostra de rejeito, de acordo com a norma já citada, iniciou-se a execução do ensaio de granulometria conforme as diretrizes da NBR 7181 (ABNT, 2017). A

figura 9 mostra a proveta utilizada para o ensaio de sedimentação e a figura 10 mostra a sequência de peneiras utilizadas para o peneiramento fino.

Figura 9 - Proveta com material para o ensaio de sedimentação



Fonte: Da Autora (2018)

Figura 10 – Sequência de peneiras utilizadas no ensaio de peneiramento fino



Fonte: Da Autora (2018)

3.2.1.2 Densidade Real dos Grãos (G)

O método para a obtenção da massa específica dos grãos pode respeitar os procedimentos previstos na NBR 6508 (ABNT, 2017) ou a norma DNER – ME 093/94 – Densidade real dos solos. Para execução do ensaio respeitou-se a norma do DNER que

recomenda a utilização de um picnômetro de 50 cm³ com uma quantidade aproximada de 10 g de solo e a retirada de ar por meio do aquecimento do picnômetro. Para determinação deste índice físico do rejeito de bauxita avaliado, foram feitos cinco ensaios. A figura 11 mostra os picnômetros utilizados no ensaio.

Figura 11 - Picnômetros utilizados na determinação do peso específico real dos grãos



Fonte: Da Autora (2018)

Os picnômetros utilizados para o ensaio possuem uma média de peso entre 14,55 a 17,43 gramas e volume de 25 mL. O volume de solo inserido em cada recipiente foi controlado, com o uso de uma balança, para que seu valor ficasse aproximado a 10g em cada picnômetro. O conjunto picnômetro + solo + água teve uma variação nos pesos obtidos de 48,78 a 51,29. O volume do conjunto picnômetro + água variou com pesos entre 41,89 a 44,42 gramas. Com esses valores foi encontrado um peso específico real dos grãos, o qual foi corrigido em função da temperatura, já que durante o ensaio mediu-se uma temperatura de 21,25 °C, e a norma orienta que estes valores sejam fornecidos para uma temperatura de 20°C.

3.2.1.3 Limites de Atterberg

O procedimento laboratorial para a realização deste ensaio respeitou as diretrizes da norma NBR 7180 (ABNT, 2016). Para este ensaio foram realizadas 5 tentativas, a fim de se obter a média delas para definir o limite de liquidez do rejeito avaliado. A figura 12 ilustra um dos testes realizados para a obtenção do limite de liquidez.

Figura 12 - Determinação do limite de liquidez



Fonte: Da Autora (2018)

O ensaio para a obtenção do limite de plasticidade é normatizado pela NBR 6459 (ABNT, 2017), sendo estas diretrizes seguidas neste trabalho. Utilizou-se o aparelho de Casagrande, composto por uma espécie de concha, onde esta mistura foi disposta, conforme mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Aparelho de Casagrande



Fonte: Da Autora (2018)

A operação foi executada cinco vezes, transferindo o material que ficou na concha de volta para o recipiente de porcelana e homogeneizando uma nova mistura, adicionando-se água destilada, gerando uma variação no teor de umidade da amostra. Com o número de golpes e o teor de umidade de cada ensaio obtiveram-se os dados necessários para a definição do limite de liquidez do rejeito de mineração de bauxita estudado.

3.2.1.4 Compactação

O ensaio de compactação é usado, em geral, para relacionar o teor de umidade e a massa específica aparente seca dos solos. O ensaio é realizado com a compactação do solo em níveis crescentes de umidade em um molde cilíndrico com dimensões específicas. Basicamente, o ensaio tem como objetivo a determinação da umidade ótima para uma dada energia de compactação e a determinação do peso específico aparente seco máximo, que está relacionado com o primeiro item encontrado (PINTO, 2006). O ensaio de compactação é normalizado pela NBR 7182 (2016).

Para a realização deste ensaio, primeiramente foi feita a preparação da amostra, conforme a NBR 6457 (ABNT, 2016) e em seguida a montagem do cilindro de compactação (Figura 14), conforme diretrizes da norma do ensaio.

Figura 14 – Extração do material do cilindro de compactação



Fonte: Autora (2019)

Esse ensaio de compactação foi realizado 5 vezes, variando-se o teor de umidade da amostra compactada. Para este ensaio utilizou-se um cilindro metálico de volume igual a $1017,61 \text{ cm}^3$, onde cada amostra foi compactada em três camadas, cada uma delas por meio de 26 golpes (Energia Proctor Normal, para cilindro pequeno). As camadas foram compactadas de forma distribuída, conferindo uma mesma energia de compactação em cada região, resultando em uma camada superficial o mais nivelada possível. Em seguida, com o auxílio de um extrator, retirou-se o corpo-de-prova do cilindro e do centro do molde foi separado uma pequena amostra para a determinação da umidade.

Pesando-se o conjunto (cilindro + rejeito compactado) para cada um dos 5 ensaios, foi possível traçar a curva de compactação, possibilitando a obtenção do ponto correspondente à umidade ótima e ao peso específico aparente seco máximo que a amostra pode atingir. Com esses valores traçou-se a curva de compactação, diferenciando o ramo seco do ramo úmido e obtendo-se, assim, o ponto de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima.

3.2.2 Ensaio de adensamento

Para se obter as propriedades de permeabilidade e compressibilidade foram realizados ensaios de adensamento, com leitura de permeabilidade, em amostras de rejeitos moldadas com diferentes índices de vazios. As diretrizes do método de realização do ensaio de adensamento unidimensional foram seguidas pela norma DNER-IE 005 (1994), pois a norma NBR 12007 MB 3336 (ABNT, 1990) que era normalmente utilizada para a realização deste ensaio, foi cancelada. Esta norma descreve o método de determinação das propriedades de adensamento, definidas pela velocidade e magnitude da deformação do solo quando o mesmo se encontra confinado lateralmente e axialmente carregado e drenado.

Para esta pesquisa buscou-se reconstituir três amostras de rejeito de bauxita com diferentes índices de vazios. Os índices de vazios escolhidos para a moldagem dos corpos de prova foram de 1,00, 1,10 e 1,20. O valor mais alto de índice de vazios é o que mais se aproxima da condição real dos reservatórios, de acordo com as informações obtidas por meio da amostragem do tubo Shelby. Os valores mais baixos de índice de vazios têm por objetivo simular uma condição mais compactada do rejeito em maiores profundidades no interior dos depósitos, após algumas etapas de alteamento. Na Tabela 7 são apresentadas as nomenclaturas utilizadas para denominar os corpos de prova, juntamente com os índices de vazios iniciais desejado para cada amostra reconstituída utilizada nos ensaios de adensamento.

Tabela 7 - Dados das amostras

Caracterização das amostras	
Amostra	e
CDP-1	1,00
CDP-2	1,10
CDP-3	1,20

Fonte: Da Autora (2019)

Para a reconstituição da amostra foi utilizada a metodologia proposta por Lade (1978), moldando-se corpos de prova em camadas de solo com peso pré-definido, a fim de obter o índice de vazios almejado para o ensaio. Por meio de cálculos estipulou-se a quantidade de material necessário para compor cada camada, onde o índice de vazios inicial do corpo de prova foi obtido a partir do peso de material que compunha uma camada de altura definida. Primeiramente, demarcou-se a altura de cada camada e colocou-se a quantidade de material estipulada para a primeira linha, em seguida foi realizada a compactação manual até que se atingisse a altura demarcada. Ao término da compactação efetuou-se a escarificação da superfície desta camada, dispondo o material pertencente a segunda camada, repetindo o procedimento da primeira camada até se completarem as três camadas estipuladas. Finalizando o procedimento de moldagem, com o auxílio do anel de adensamento, extrai-se um corpo de prova do interior do cilindro moldado, que em seguida foi acoplado à célula de adensamento, conforme a figura 15.

Figura 15- Célula de adensamento com a amostra de rejeito de bauxita



Fonte: Da Autora (2018)

O teor de umidade adotado para a moldagem foi a umidade ótima, obtida através do ensaio de compactação. A umidade ótima ficou muito próxima da umidade natural do material, sendo que a utilização deste valor gera uma boa concordância para as amostras remoldadas em relação ao estado natural do rejeito. Além disso, a adoção deste valor de umidade permite uma boa qualidade da compactação e homogeneidade do corpo de prova.

O método de determinação das propriedades de adensamento do solo, consiste na compressão das amostras de rejeito, devido a imposição de uma pressão vertical. É observado a velocidade e magnitude das deformações, sendo o solo mantido lateralmente confinado, recebendo uma aplicação de força axial por etapas, onde a força é mantida constante em um

determinado período de tempo para cada etapa (MARANGON, 2018). Para a realização desta pesquisa, o estudo de compressibilidade se deu com a utilização do aparelho edométrico do laboratório de mecânica dos solos da UFSC, conforme Figura 16.

Figura 16 - Prensa de adensamento com leitura de permeabilidade.



Fonte: Da Autora (2018)

Para a execução do ensaio, primeiramente, foram definidas as dimensões do anel de adensamento (diâmetro e altura) e sua massa. Na montagem da célula foram utilizadas pedras porosas na parte inferior e superior da amostra, com papel filtro entre as pedras e o material de modo a impedir a infiltração do solo e facilitar a limpeza, apresentando uma permeabilidade suficiente para não retardar a drenagem do corpo-de-prova. Por último foi instalado o cabeçote metálico de aplicação de carga. A célula de adensamento contém o corpo-de-prova saturado e possui uma área para receber cargas verticais, causando uma alteração na altura do corpo.

O ensaio foi realizado em etapas, onde as cargas eram dobradas a cada 24 horas, estes estágios de carga foram divididos em 8 etapas, onde as cargas aplicadas variaram de 0,250 a 32 kg, correspondentes à tensões de 12 a 1400 kPa na amostra. A cada estágio de carregamento foram efetuadas leituras do extensômetro, em período de tempos padronizados pela norma do ensaio. Após a finalização do processo de carregamento, realizou-se o descarregamento, em 5 etapas, monitorando as deformações até a sua total estabilização. Para este ensaio utilizaram-se corpos de prova com diâmetro de 5 cm, e altura de 2 cm.

Finalizados os procedimentos do ensaio, desmontou-se a célula de adensamento e pequenas amostras do corpo de prova foram levadas à estufa, para verificação do teor de umidade ao final do ensaio. Após 24 horas as amostras foram retiradas da estufa e pesadas novamente para que se obtivesse a umidade final.

Para a determinação da permeabilidade foi utilizado o método do permeâmetro de carga variável com sistema aberto, que é mais usado para solos finos, onde o volume d'água que percola através da amostra é de pequena quantidade. Para isto, foram realizadas leituras, em cada estágio de carregamento, do nível de água na bureta graduada acoplada à célula de adensamento e da temperatura da água do dispositivo de adensamento.

A célula de adensamento possui um registro de fechamento, onde permite o bloqueio da circulação de água entre a amostra e a bureta que está acoplada a célula. Para a realização do procedimento de ensaio, primeiramente adicionou-se água ao permeâmetro até atingir o seu nível máximo, que é o equivalente ao topo da amostra, observando a área para garantir que não houvesse presença de ar em seu interior, então realizou-se o fechamento do registro. Em seguida, foi adicionado água a bureta graduado até atingir uma altura de coluna d'água desejada. Para finalizar, o registro foi aberto, o ensaio de adensamento iniciado, e então, por meio da graduação da bureta, leu-se as alturas de coluna d'água para os tempos estipulados de cada etapa do adensamento. De posse dos tempos obtidos no ensaio, foi possível determinar da condutividade hidráulica da amostra.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Este tópico tem como finalidade apresentar as análises realizadas com base nos resultados obtidas por meio dos ensaios laboratoriais. A sua apresentação tem como objetivo compreender e avaliar o comportamento do rejeito de mineração de bauxita. Algumas análises foram feitas utilizando os dados obtidos por meio das amostras reconstituídas, bem como de uma amostra indeformada que não está no escopo de estudo desta pesquisa, mas algumas informações foram utilizadas para aprimorar a compreensão de certas análises. Também são apresentados equacionamentos, baseados nos valores encontrados nos ensaios, que podem ser utilizados para futuras estimativas dos valores de coeficiente de adensamento e da permeabilidade.

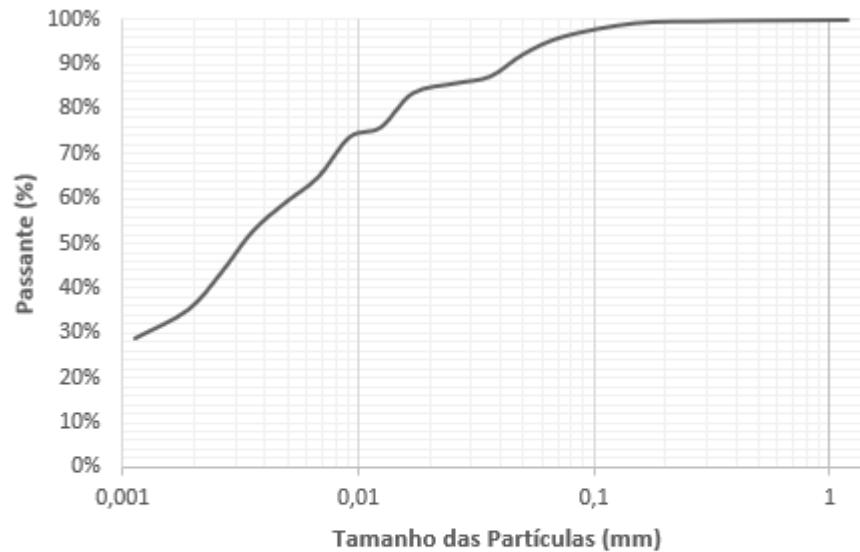
4.1 Ensaio de Caracterização

São apresentadas discussões relacionadas à caracterização e classificação do rejeito de minério de bauxita, por meio da análise granulométrica. Bem como a influência que o processamento de beneficiamento do minério tem sobre a densidade real dos grãos e sua plasticidade.

4.1.1 Análise Granulométrica

A curva de distribuição granulométrica do rejeito de mineração de bauxita, obtida por meio de peneiramento e sedimentação pode ser observada na Figura 17. O rejeito de bauxita apresenta uma concentração de partículas do tamanho silte de 60% e 38%, argila de 35% e 58% e areia fina de 5% e 4%, valores estes obtidos através das faixas granulométricas definidas pelas normas da ABNT NBR 6502 (1995) e AASHTO M145 (1973), respectivamente.

Figura 17 - Distribuição granulométrica do rejeito de bauxita, com classificação de solos pela ABNT NBR 6502 e AASHTO M145, respectivamente.



Argila (<0,002)	Silte (0,002-0,06)	Fina (0,06-0,2)	Média (0,2-0,6)	Grossa (0,6-2)
		Areia		
Argila (<0,005)	Silte (0,005-0,075)	Fina (0,075-0,425)		Média (0,425-2)
		Areia		

Fonte: Da Autora (2019).

O sistema de classificação unificada dos solos SUCS ou (U.S.C.) é o aprimoramento da classificação de Casagrande, que foi adaptado para uso em laboratório e no campo, sendo simplificado para permitir uma classificação sistemática. A classificação é feita por meio de um símbolo e de um nome, obtidos pela avaliação da curva granulométrica do material, do limite de liquidez e o seu índice de plasticidade, definindo assim, o tipo de solo analisado. O rejeito de mineração de bauxita estudado foi definido, por este sistema, como silte de baixa compressibilidade (ML), L para *low* (baixa compressibilidade) e M para *mo* (silte em sueco).

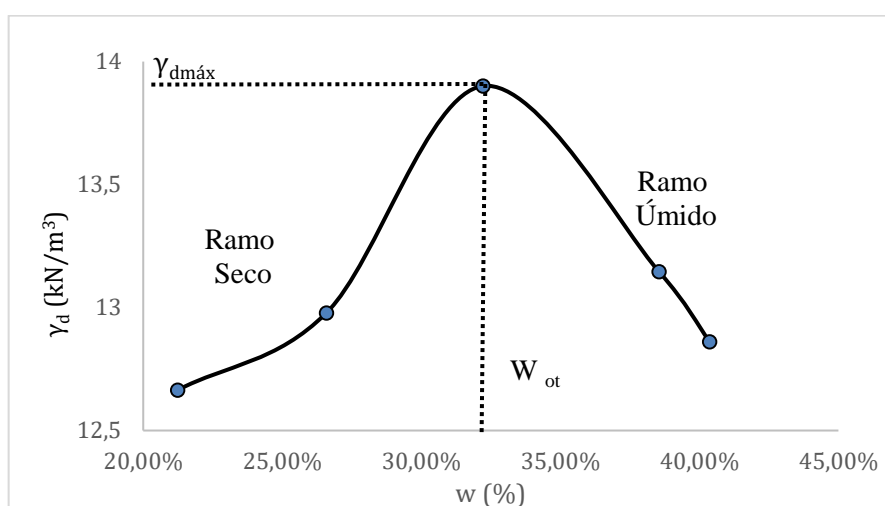
O sistema rodoviário de classificação foi proposto nos Estados Unidos, criado com objetivo de uso para classificação dos subleitos em rodoviária, para uso em específico dos engenheiros rodoviários. Os solos são classificados em grupos, de A-1 a A-7, onde os solos que contem grande quantidade de finos são classificados entre A-4 a A-7. Este sistema é normatizado pela AASHTO M145 (1973) e também toma como base a granulometria e os limites de Atterberg. Por meio deste, o rejeito foi classificado como silte não plástico ou moderadamente plástico (A-4).

4.1.2 Densidade Real dos Grãos, Limites de Atterberg e Ensaio de Compactação

O rejeito de bauxita estudado apresentou massa específica real dos grãos (G) de 2,878. A densidade real considera apenas o volume dos grãos do material, desconsiderando os vazios entre eles. A densidade real dos grãos de rejeito de bauxita brasileiro possui valores médios altos e variam que variam em torno de 2,75 a 3,5, valores encontrados em estudo feito por Bedin (2006), como descrito no referencial teórico deste trabalho. O valor encontrado para a bauxita em estudo se enquadra nos padrões da literatura, típico de solos com presença de minérios metálicos, como o alumínio.

O ensaio de compactação realizado no rejeito de mineração de bauxita usou a energia Proctor Normal, onde obteve-se a correlação entre o teor de umidade e o peso específico seco do rejeito. Os valores de umidade variaram de 21,24% a 37,5% e os pesos específicos aparentes secos de 1,291 a 1,417 (g/cm^3). Com dois testes no ramo seco e dois no ramo úmido, identificou-se um valor de $\gamma_{\text{dmáx}}$ igual a 13,89 kN/m^3 e uma umidade ótima de 32,22%, conforme mostrado na figura 18. O valor da umidade ótima do rejeito está bastante próximo ao valor da umidade natural do rejeito, presente dentro do material do tubo Shelby coletado.

Figura 18 – Curva de Compactação



Fonte: Da Autora (2019)

Em comparação com dados da literatura, os solos argilosos apresentam densidades secas baixas e umidades ótimas elevadas, assim como solos siltosos. Segundo Sousa Pinto (2006) os valores de umidade ótima de 25% a 30% correspondem a pesos específicos aparentes secos máximos de 15 a 14 (kN/m^3). O rejeito de bauxita avaliado, mesmo sendo um produto industrial, apresentou valores dentro desta faixa, típica de solos argilosos e siltosos. Os resultados dos ensaios de densidade real dos grãos e compactação são resumidos na Tabela 8.

Tabela 8 - Índices físicos do rejeito de mineração de bauxita

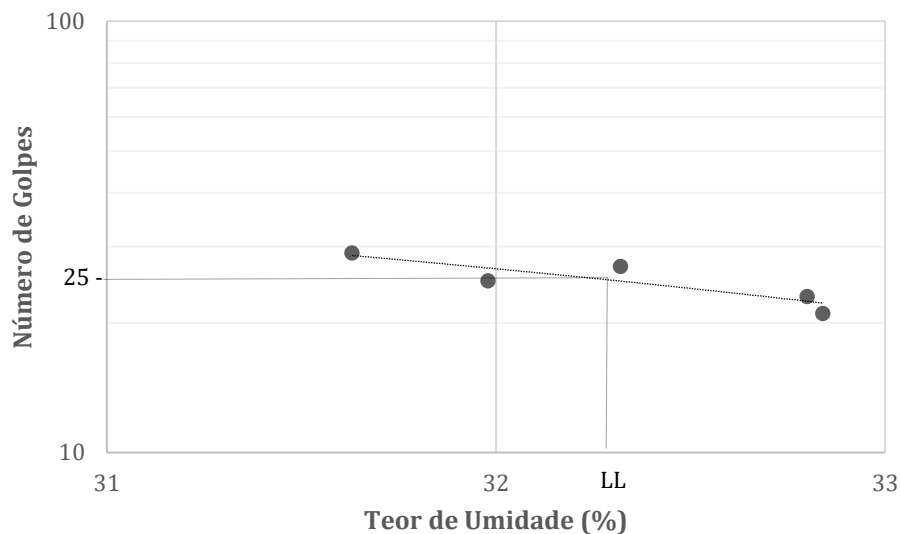
G	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	W _{ótima} (%)
2,878	13,89	32,22

Fonte: Da Autora (2019)

Segundo Kolencsik-Tóth *et al.* (2014) a variação no índice de plasticidade da lama gira em torno de 4 a 27%, porém nos ensaios de caracterização realizados na amostra indeformada do rejeito mostram que o índice de plasticidade se caracteriza como sendo de pouca plasticidade, de 2,61%.

Em relação à avaliação das propriedades de plasticidade do rejeito de mineração de bauxita, os ensaios de limite de Atterberg permitiram definir os valores para o limite de liquidez de 32% e para o limite de plasticidade de 29%. O Gráfico da Figura 19 apresenta os resultados do ensaio de limite de liquidez, com a indicação do valor de LL.

Figura 19 – Limite de liquidez



Fonte: Da Autora (2019)

Este resultado pode ocorrer devido ao processamento industrial que o material é submetido, em que recebe adições de elementos químicos. Durante o processo de beneficiamento, diferentes produtos podem ser adicionados para a separação e obtenção do minério, alterando a composição química do rejeito. A presença dos mesmos nos rejeitos de mineração de bauxita, podem provocar interferências na determinação dos limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP). Durante o ensaio foram obtidos valores próximos de limites de

liquidez e plasticidade, sendo que a adição de pequenas quantidades de água causava grandes mudanças nas características do material, dificultando a realização do ensaio.

O índice de plasticidade encontrado para o rejeito de bauxita estudo diverge um pouco em relação aos valores disponibilizados na literatura, como cita Vick (1983) e Bedin (2010). Também se observa que tanto na literatura como nesta pesquisa obtiveram-se valores com considerável variação, porém altos para a densidade real dos grãos, isto ocorre devido a presença de elementos metálicos em sua composição. A comparação feita com os valores encontrados em pesquisas, bem como neste estudo, confirma a grande influência que a adição de produtos químicos tem sobre a alteração das características do rejeito.

4.2 Ensaio de Adensamento

4.2.1 Curva de Adensamento

Para cada amostra reconstituídas de rejeito de mineração de bauxita foram obtidos os valores dos pesos específicos naturais, relacionando o peso do material de cada amostra contida no anel de ensaio com o volume do anel. Como a umidade ótima ficou muito próxima da natural, a utilização deste valor gera uma boa concordância para as amostras remoldadas em relação ao estado natural do rejeito. Os valores dos pesos específicos naturais são apresentados na Tabela 9, juntamente com os valores dos índices de vazios iniciais das amostras ensaiadas.

Tabela 9 - Índices físicos das amostras.

Amostra	γ_n (g/cm ³)	e
CDP - 1	1,91	0,989
CDP - 2	1,816	1,10
CDP - 3	1,727	1,202

Fonte: Da Autora (2019).

É possível fazer uma relação entre as alturas de alteamento dos depósitos e a tensão aplicada durante os ensaios de adensamento. Assim, é possível obter um valor em metros que corresponde à altura de alteamento de rejeito, com um determinado valor de (γ_n), correspondente a um determinado valor de tensão avaliado. Por exemplo, considerando que a tensão máxima aplicada no ensaio foi de aproximadamente 1400 kPa, caso considerado um peso específico natural do rejeito de 1,727 (g/cm³), corresponderia a uma altura de barragem de

81 metros. Foi feita uma média dos valores de (γ_n) das amostras reconstituídas, bem como da amostra indeformada, obtendo-se assim um valor de 1,80 (g/cm^3). Então fez-se uma relação entre uma tensão aplicada em (kg) no ensaio, resultado em uma tensão em (kPa) imposta na amostra, e o peso específico natural escolhido, correspondendo a uma dada altura de alteamento. Esta relação pode ser observada na tabela 10.

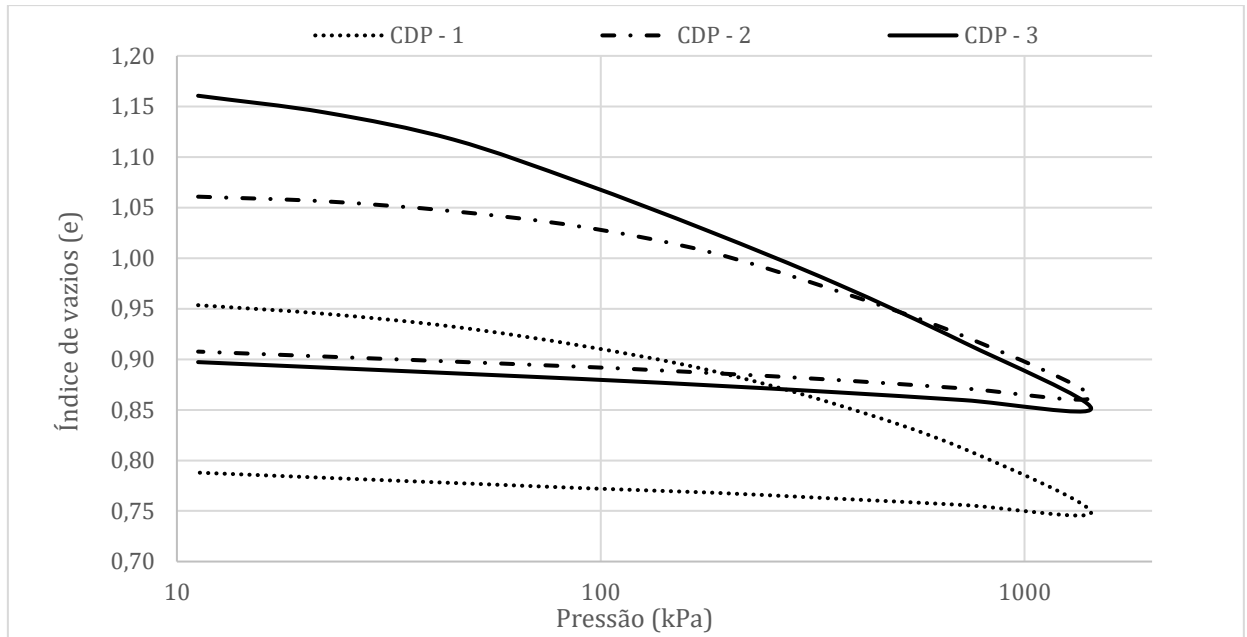
Tabela 10 – Comparação entre tensão aplicada e peso específico natural do rejeito, para se determinar a altura de alteamento.

Tensão (kg)	0,2	0,5	1,1	2,2	4,5	8,9	17,8	31,2	γ_n (kg/m^3)
Tensão (kPa)	10	20	50	100	200	400	800	1400	
Altura de Alteamento (metros)	0,6	1	3	6	11	22	44	78	18

Fonte: Da Autora (2019)

Os valores de índices de vazios iniciais de CDP - 1 e CDP - 2 foram designados para serem menores que o valor encontrado para a amostra indeformada, justamente para poder correlaciona-los a uma etapa mais avançada de alteamento, onde o rejeito encontra-se mais comprimido. Desta forma, com a realização do ensaio de adensamento, pode-se traçar a curva de variação do índice de vazios das amostras de acordo com a carga aplicada. A Figura 20 apresenta as curvas de adensamento das amostras de rejeito de mineração de bauxita reconstituídas.

Figura 20 – Curvas de adensamento das amostras de rejeito



Fonte: Da Autora (2019)

Foi realizado uma comparação entre as três amostras reconstituídas com índices de vazios iniciais diferentes. Nota-se que quanto maior é o índice de vazios inicial, maior é a deformação sofrida pelo corpo-de-prova ao longo do ensaio. Pode-se observar que a variação do índice de vazios, que ocorre do início ao final do ensaio, das amostras CDP - 1 e CDP - 2 são próximas, onde as mesmas reduzem 0,2 do seu índice de vazios ao final do ensaio. Apesar da CDP - 2 possuir um índice de vazios inicial superior a CDP - 1, elas reduzem de forma similar, isso indica o rejeito continua a comprimir-se com o aumento de cargas aplicadas.

Também pode-se observar que as curvas de adensamento das amostras possuem formatos similares, com a principal diferença na inclinação de suas retas virgens. Tal reta apresenta um coeficiente angular denominado índice de compressão (C_c). Nota-se que para amostras com índices de vazios inicial menores, a inclinação da reta virgem será sensivelmente menor, acarretando no resultado de um (C_c) menor. Conclui-se com esta observação que quanto menor for o índice de vazios inicial, menor vai se tornando a diferença entre o índice de vazios inicial e final após as etapas de carregamento, pela redução de seu índice de compressão.

Ultrapassando o trecho de recompressão, o corpo de prova começa a comprimir-se de forma mais significativa. O trecho da reta virgem de adensamento representa estas deformações, notando-se que as reduções no índice de vazios deste trecho são mais significativa. Tanto os índices de compressão (C_c) quanto os de recompressão (C_r) são menores quanto menor for o índice de vazios inicial, pois eles indicam o quanto o material é suscetível à compressão até

alcançar sua máxima tensão sofrida e após atingir a reta virgem, respectivamente, conforme mostrado na figura 21. Portanto, quando um mesmo material dispõe de um menor espaço entre seus vazios, a tendência é que comprima menos com a aplicação de carregamentos. A tensão de pré-adensamento, foi obtida pelo método de Pacheco e Silva. Os valores dos parâmetros C_c , C_r e σ'_{vm} estão apresentados na Tabela 11.

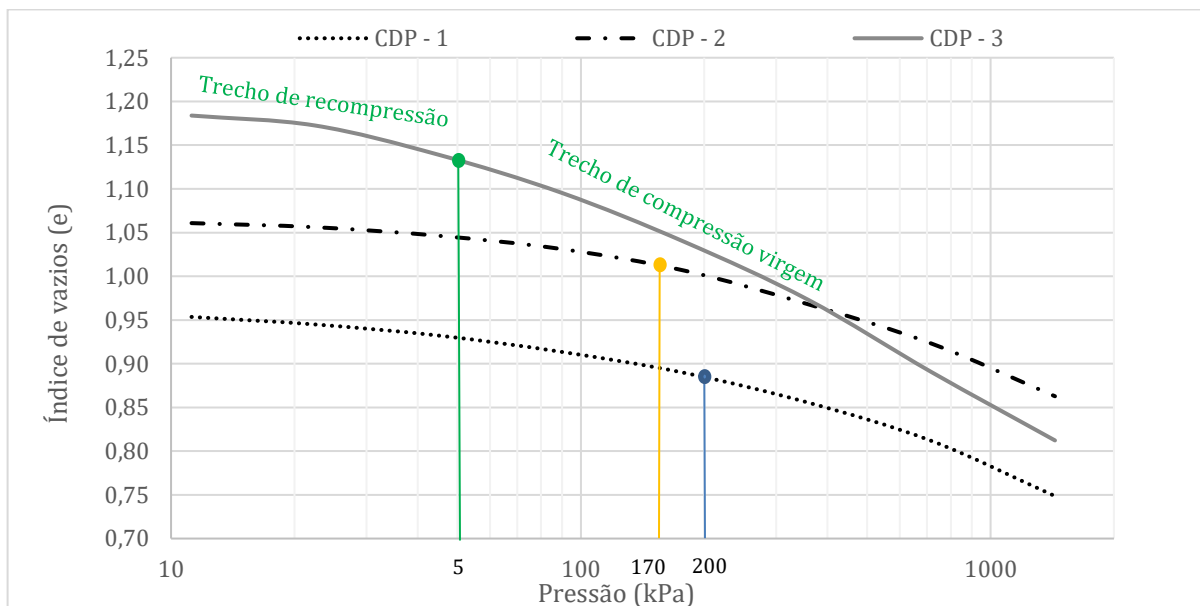
Tabela 11 – Tensão de pré-adensamento e coeficientes de compressão e recompressão

Amostra	σ'_{vm} (kPa)	C_c	C_r
CDP - 1	200	0,131	0,045
CDP - 2	170	0,142	0,057
CDP - 3	51	0,173	0,090

Fonte: Da Autora (2019)

Pode-se observar que quanto menor o índice de vazios inicial da amostra, maior é o trecho de recompressão observado na curva de adensamento. Sendo assim, caso definido o valor de tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}) para as amostras, quanto menor o índice de vazios inicial, maior será o valor definido para σ'_{vm} . Salienta-se que por se tratar de um material reconstituído, não há histórico de tensões e o valor definido para σ'_{vm} está diretamente relacionado ao processo de compactação utilizado na moldagem dos corpos de prova.

Figura 21 – Curvas de adensamento com identificação do trecho recompressão e virgem.



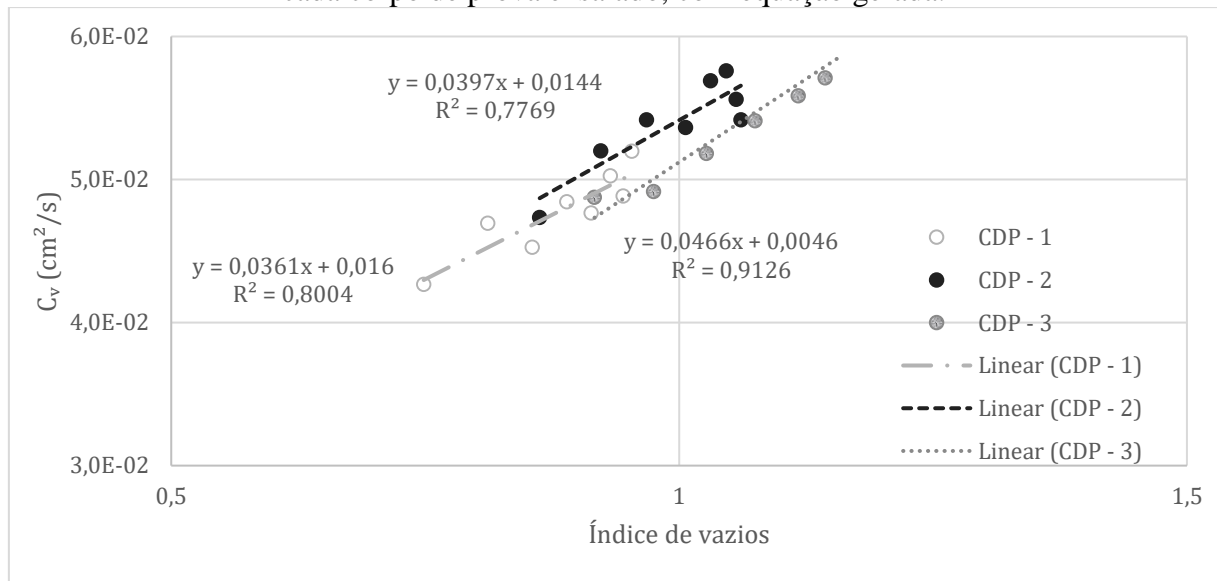
Fonte: Da Autora (2019)

4.2.2 Coeficiente de Adensamento

Com a realização do ensaio de adensamento, obteve-se todos os valores das leituras feitas no extensômetro, utilizando estes dados, juntamente com o tempo em que cada um foi coletado, elaborou-se o gráfico da altura do corpo de prova em relação à raiz do tempo, para se calcular o (C_v) pelo método de Taylor, pois foi o método que melhor se adequou para a análise dos dados obtidos nas amostras de rejeito.

Na Figura 22 pode-se observar a variação do coeficiente de adensamento em função do índice de vazios, para todos corpos-de-prova. Pode-se observar que conforme a tensão aplicada aumenta, os espaços entre os grãos reduzem, tornando o material mais compacto. Este fato provoca a redução do coeficiente de adensamento.

Figura 22 – Linha de tendência linear para valores de (C_v) em relação ao índice de vazios para cada corpo de prova ensaiado, com equação gerada.



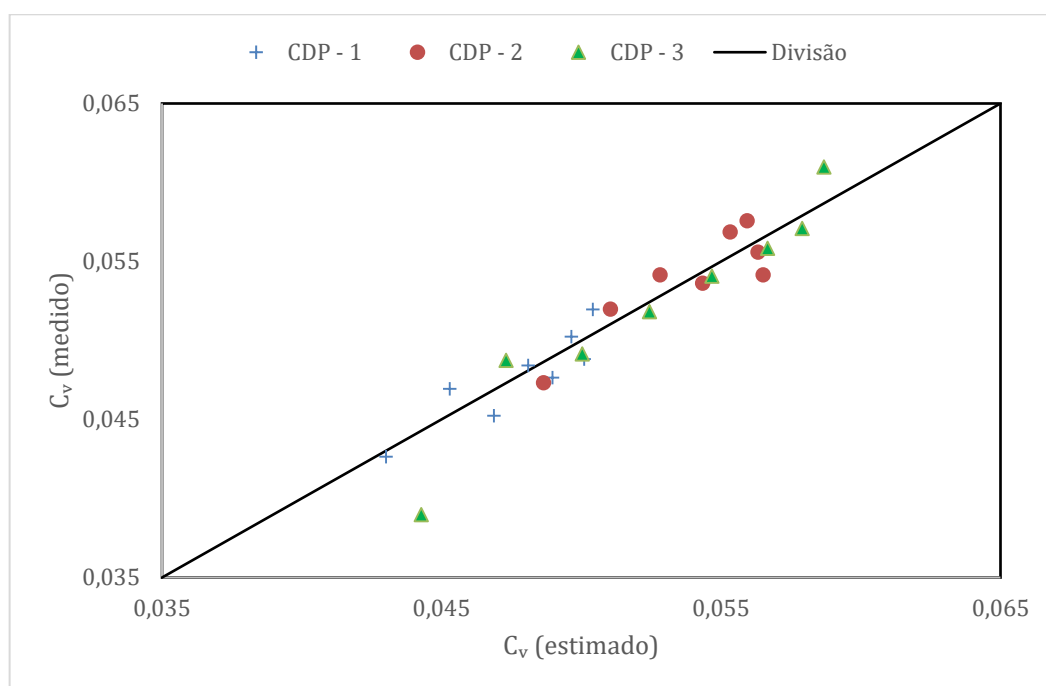
Fonte: Da Autora (2019)

Por meio de uma linha de tendência linear, foi gerado uma equação para cada amostra onde pode-se encontrar o valor de (C_v) para um determinado índice de vazios. As equações possuem um R-quadrado variando de 80% a 90% de certeza, o que é um ajuste consideravelmente bom considerando a ordem de grandeza dos valores e a volatilidade do material analisado.

Com as equações obtidas para cada corpo de prova, foi calculado os valores do coeficiente de adensamento para cada índice de vazios encontrado durante as etapas de carregamento. Sendo assim estabeleceu-se uma relação de 1:1 entre os valores de coeficientes

medidos durante o ensaio e os encontrados por meio da equação, como se pode observar na figura 23. Observa-se que 88% dos pontos encontram-se muito próximos da linha divisória, o que quer dizer que nestes pontos os valores de (C_v) estimados são muito similares aos medidos no ensaio, conferindo um fator de segurança aos resultados estimados através do equacionamento proposto.

Figura 23 – Comparação entre os valores de (C_v) medidos e estimados obtidos por meio de uma equação dependente dos índices de vazios.

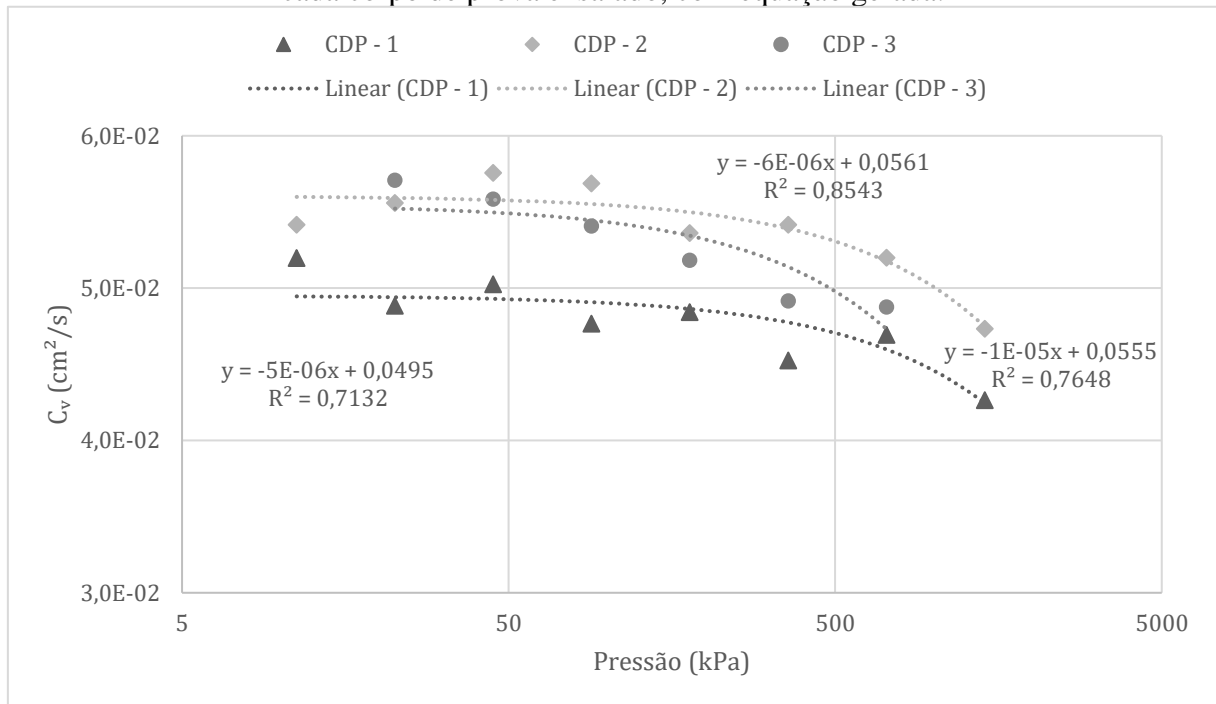


Fonte: Da Autora (2019)

Pode-se observar na figura (24) a variação do coeficiente de adensamento em função da tensão aplicada em cada etapa de carregamento, para todos corpos-de-prova. Nota-se que conforme a tensão aplicada aumenta, o coeficiente de adensamento reduz, diminuindo a velocidade da deformação do rejeito.

Comparando-se a amostra de menor índice de vazios inicial com a de maior, observa-se que o rejeito não apresenta valores do coeficiente de adensamento muito distintos, ou seja, os valores são próximos um do outro para cada condição imposta, permanecendo dentro da mesma ordem de grandeza (10^{-2} cm²/s). Pode-se notar também que as alterações do (C_v) ocorrem de forma quase que constante, reduzindo com o aumento de cargas. Tal condição poderia ser uma preocupação durante as etapas de alteamento de barragens de rejeito, uma vez que, os materiais que ficam nas camadas mais inferiores, com maior carregamento imposto, demorariam mais para dissipar eventuais poropressões existentes.

Figura 24 - Linha de tendência linear para valores de (C_v) em relação a pressão aplicada para cada corpo de prova ensaiado, com equação gerada.

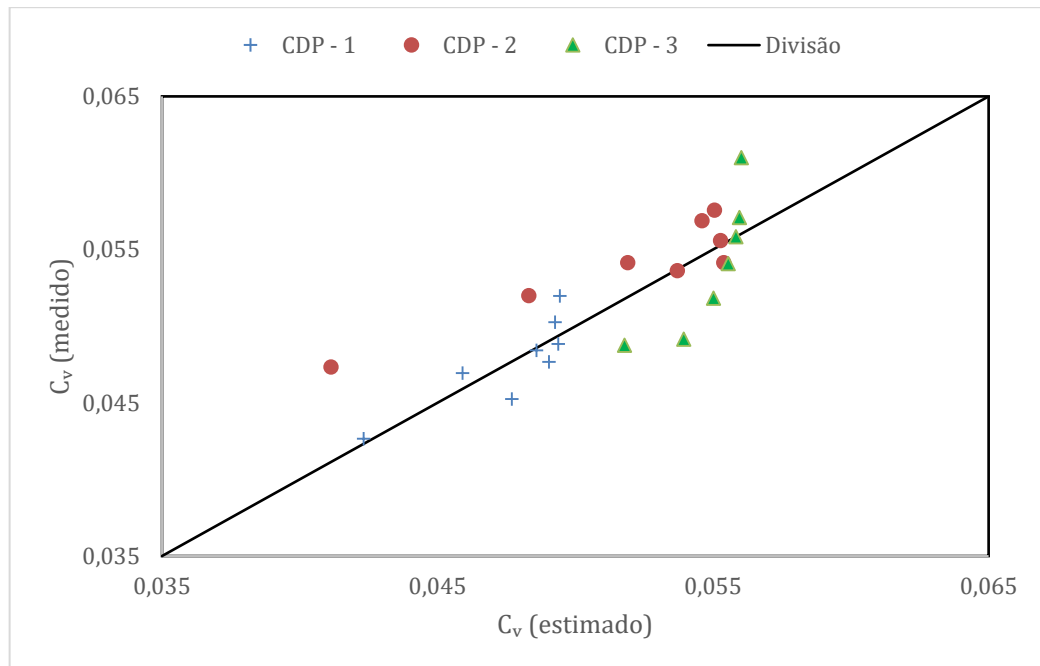


Fonte: Da Autora (2019)

Também se gerou equações por meio de uma linha de tendência linear, para cada amostra, possibilitando calcular o valor de (C_v) para uma determinada tensão aplicada. As equações possuem um R-quadrado variando de 70% a 85% de certeza.

Calculou-se por meio das equações os valores do coeficiente de adensamento para cada tensão aplicada durante as etapas de carregamento. Mais uma vez estabeleceu-se uma relação de 1:1 entre os valores de coeficientes medidos durante o ensaio e os encontrados por meio da equação, para realizar a análise de confiabilidade como se pode observar na figura 25. Desta vez os pontos encontram-se sutilmente dispersos, um pouco mais distante da linha divisória do que o observado para os cálculos em relação aos índices de vazios. Ainda assim, os valores calculados não estão bruscamente distantes dos reais encontrados em laboratório.

Figura 25 – Comparação entre os valores de (C_v) medidos e estimados obtidos por meio de uma equação dependente da tensão aplicada.

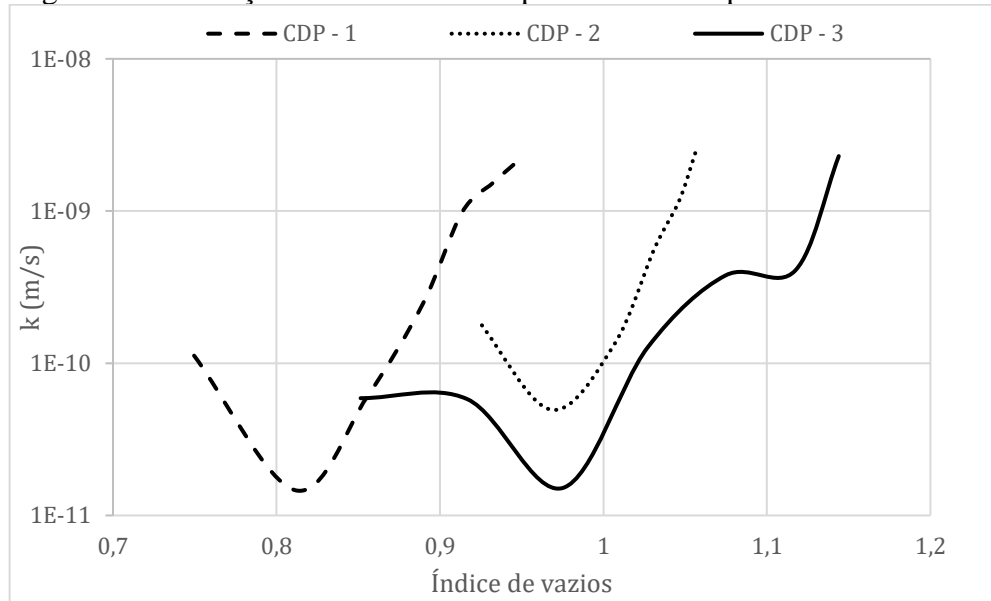


Fonte: Da Autora (2019)

4.2.3 Coeficiente de Permeabilidade

A Figura 26 mostra a variação dos valores do coeficiente de permeabilidade com o índice de vazios. Pode-se observar que logo no início do ensaio, com pequenas variações dos índices de vazios, a redução da permeabilidade ocorre de forma mais significativa. Isto mostra que no início da compressão, mesmo que ainda não tenha sofrido uma grande redução de volume, o rejeito já sofre alterações significativas na permeabilidade.

Figura 26 – Variação do coeficiente de permeabilidade pelo índice de vazios

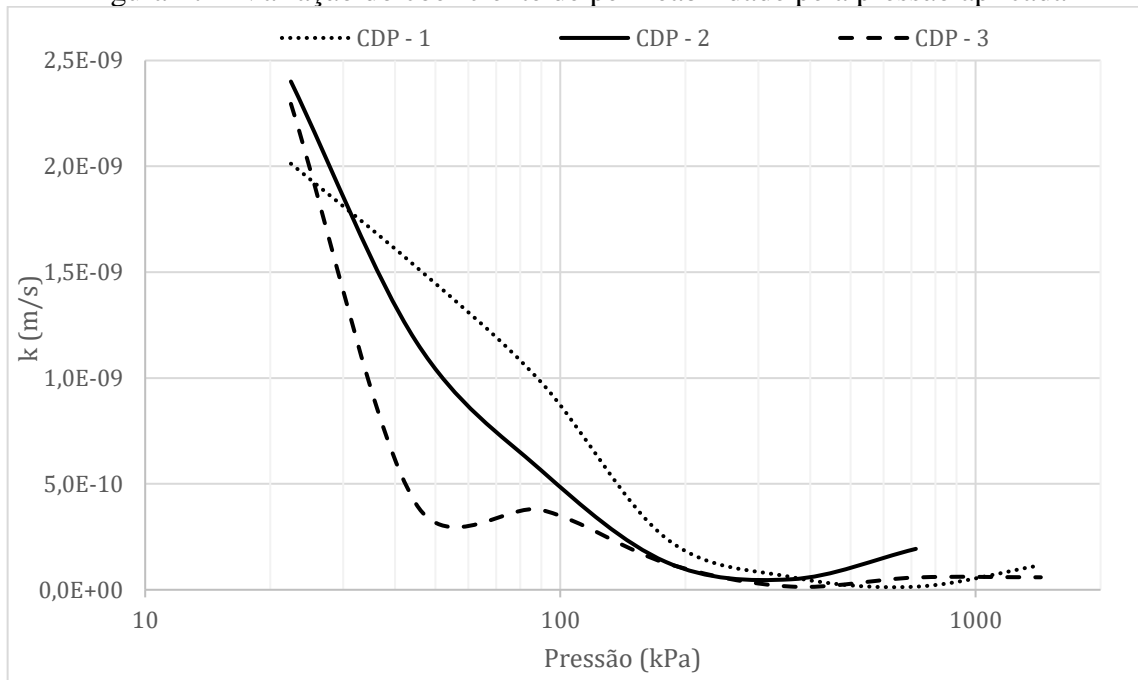


Fonte: Da Autora (2019)

A variação do coeficiente de permeabilidade em relação à pressão vertical aplicada nas amostras, está representada na figura 27. Observa-se que o coeficiente de permeabilidade inicia com um valor mais elevado para todas as amostras, reduzindo com o aumento dos carregamentos. Verifica-se também que os valores do coeficiente de permeabilidade de todas as amostras ensaiadas tendem a apresentar valores similares com o aumento das cargas, indicando que o comportamento dos rejeitos quanto a permeabilidade, sob altas cargas, tende a não depender do índice de vazios inicial da amostra.

Pode-se observar que nas primeiras aplicações de cargas é que ocorre a redução mais significativa de (k), isto mostra que mesmo que o rejeito receba aplicações de cargas modestas, a redução do coeficiente de permeabilidade é alterada forma significativa. A variação de (k) em cada etapa de carregamento tende a diminuir, quanto maior for a carga aplicada menor será a condutividade hidráulica. Ou seja, quanto mais profunda for a camada que se encontra o rejeito, maiores serão as cargas impostas, logo o seu (k) reduz dificultando a percolação de água encontrada ao fundo dos depósitos de rejeito.

Figura 27 – Variação do coeficiente de permeabilidade pela pressão aplicada



Fonte: Da Autora (2019)

Ao final do ensaio o coeficiente de permeabilidade chega a ser em torno de 100 vezes menor que o valor inicial. Na tabela 12 encontram-se os valores iniciais e finais dos índices de vazios (antes e após a aplicação das cargas) e do coeficiente de permeabilidade inicial e final, para efeitos de comparação. Observa-se que a condutividade para todas as amostras inicia e termina com valores próximos, corroborando com a hipótese de que (k) tende a não depender do índice de vazios inicial e sem da tensão aplicada.

Tabela 12 – Valores iniciais e finais de permeabilidade e índice de vazios

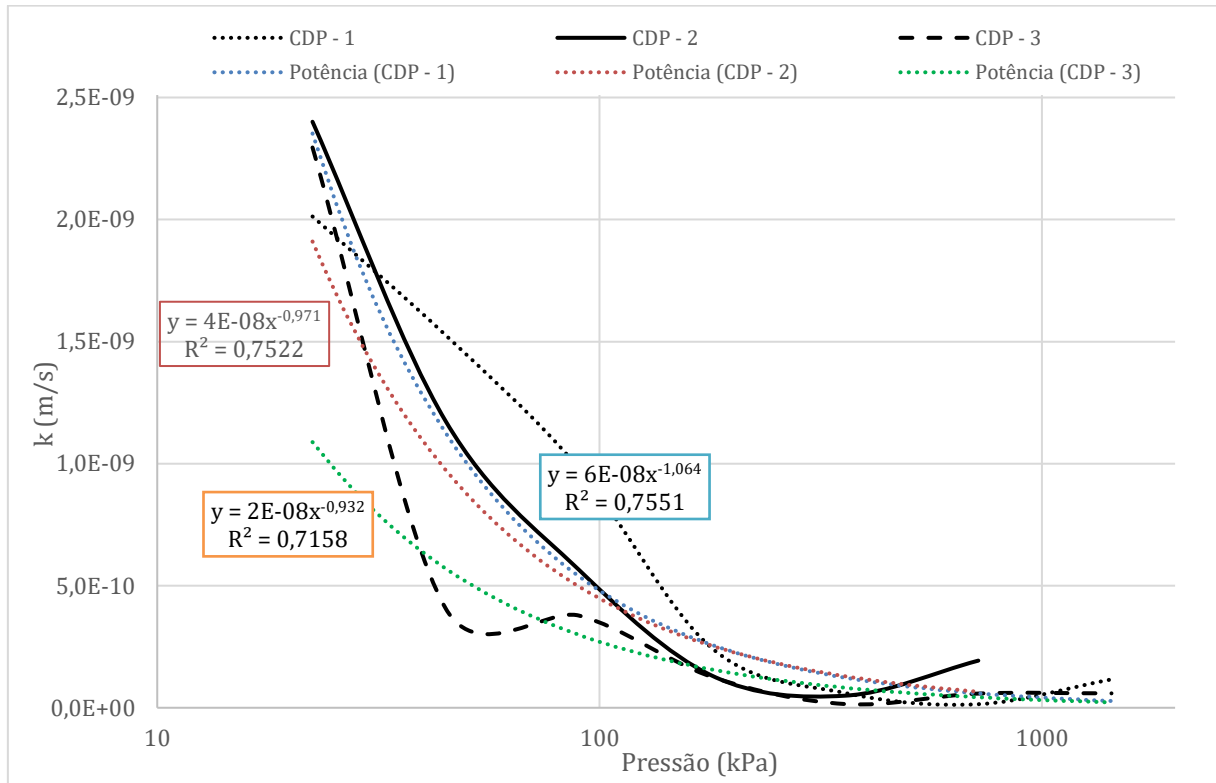
Amostra	e_i	e_f	k_i (m/s)	k_f (m/s)
CDP - 1	0,989	0,749	$1,1 \times 10^{-8}$	$1,4 \times 10^{-11}$
CDP - 2	1,10	0,863	$2,4 \times 10^{-9}$	$4,9 \times 10^{-11}$
CDP - 3	1,202	0,851	$2,3 \times 10^{-9}$	$5,8 \times 10^{-11}$

Fonte: Da Autora (2019)

Foi estimado um equacionamento para definir o comportamento de variação do coeficiente de permeabilidade em função das cargas impostas, permitindo que se obtenha uma estimativa do coeficiente de permeabilidade para uma carga qualquer desejada, conforme mostrado na figura 28. As equações apresentaram um R-quadrado variando de 70% a 75% de confiabilidade no ajuste de suas linhas. Considerando a heterogeneidade do material e a alta variabilidade do coeficiente de permeabilidade, pode-se dizer que a estimativa proposta é

razoável para obtenção de uma ordem de grandeza de variação da permeabilidade com o acréscimo de tensões.

Figura 28 – Linhas de tendência em potência com equação gerada para cada corpo de prova ensaiado

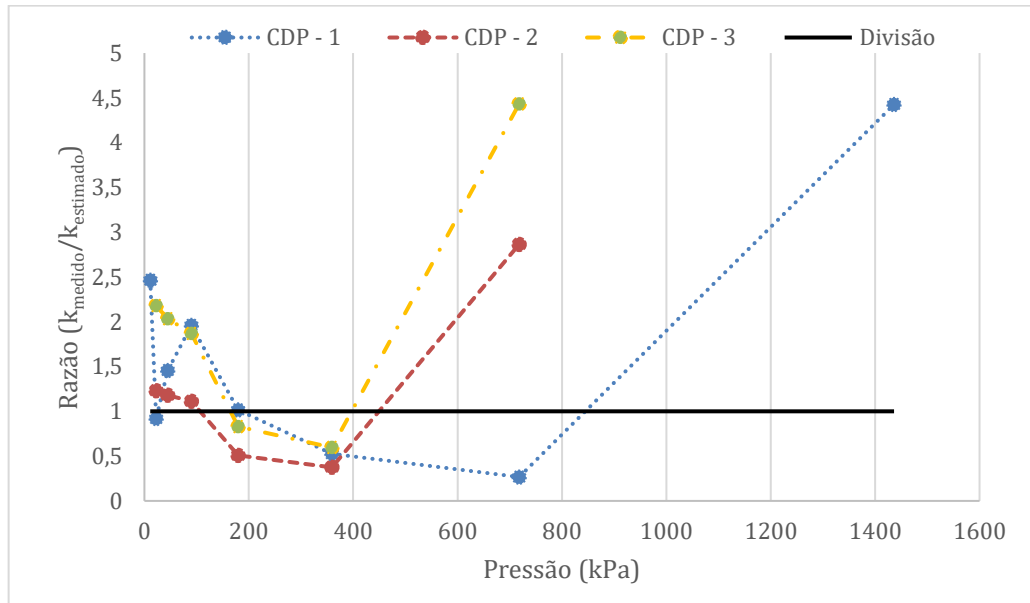


Fonte: Da Autora (2019)

Utilizando as equações geradas, foram obtidos os valores do coeficiente de permeabilidade para as tensões aplicadas em cada etapa do ensaio. Estabelecendo-se a razão entre as condutividades hidráulicas medidas no ensaio e as estimadas por meio das equações, montou-se um gráfico da razão encontrada para cada pressão imposta, conforme mostrado na figura 29. Foi estipulado uma linha divisória no ponto 1 do eixo y, os pontos que estiverem acima da linha indicam que os valores de (k) calculados são menores que os valores obtidos por meio do ensaio, conferindo ao resultado uma folga de segurança. Para a amostra CDP - 1 obteve-se 5 pontos acima da linha de referência e 3 abaixo, tendo uma confiabilidade para resultados seguros de 63%, para CDP - 2 foram 4 pontos acima da linha de e 2 abaixo, com confiabilidade de 67% e para CDP - 3 foram 4 pontos acima da linha e 2 abaixo, com confiabilidade de 67%. É relevante notar que os pontos abaixo, estão consideravelmente próximos à linha e considerando a ordem de grandeza de (k) e a condição de heterogeneidade

do rejeito, a equação fornece valores razoáveis para uma estimativa preliminar da variação de permeabilidade no interior de depósitos de rejeitos de mineração alteados.

Figura 29 – Comparação entre a razão dos (k) medidos e estimados obtido em relação a tensão aplicada.



Fonte: Da Autora (2019)

Tendo em vista a variação na permeabilidade dos rejeitos com o acréscimo de cargas, pode-se dizer que durante o ciclo de vida de depósitos de rejeitos é muito importante considerar este fato, uma vez que, dispositivos de drenagem que são colocados na parte inferior destes depósitos podem ter sua capacidade de escoamento reduzida pela existência de camadas menos permeáveis nas proximidades dos mesmos.

5 CONCLUSÃO

Os rejeitos de mineração são materiais que devem estar em constante estudo, pois são produzidos de forma não natural e não necessariamente possuem um comportamento padronizado. Por sofrerem alteração química e física no processo de beneficiamento, são materiais inconstantes, dificultando a previsão de seu comportamento.

Neste trabalho avaliou-se a variação do comportamento da permeabilidade e compressibilidade do rejeito de mineração de bauxita, conforme ocorria o aumento, por etapas, da tensão vertical aplicada sobre as amostras.

Inicialmente o material foi caracterizado por meio de análise granulométrica por sedimentação e índices físicos, sendo classificado como um material siltoso de baixa plasticidade. A plasticidade do rejeito de mineração é afetada pelos elementos químicos provenientes do processo de beneficiamento, por este motivo o índice varia em diferentes estudos disponibilizados na literatura. A densidade real dos grãos do rejeito está acima de valores normalmente encontrados para solos como a argila e o silte, este fato ocorre devido a presença de minérios metálicos.

Obtidos os valores de peso específico natural das amostras reconstituídas, bem como da indeformada, foi estimado um valor médio para (γ_n). Correlacionou-se este valor com o arredondamento das tensões aplicadas no ensaio de adensamento, obtendo assim, a representação da altura de alteamento que a tensão está impondo sobre a amostra. Sendo assim, a tensão máxima aplicada representou uma altura de barragem próxima aos 80 metros, é interessante lembrar que quando a barragem de Brumadinho e Fundão romperam, elas tinham 90 e 150 metros de altura.

Com base nos resultados obtidos por meio de ensaios de adensamento com leitura de permeabilidade, realizados em três corpos-de-prova reconstituídos, com índices de vazios diferentes, verificou-se que as tensões de pré-adensamento são maiores para índices de vazios iniciais menores, tornando o trecho de compressão virgem menor, bem como menor é a inclinação de sua reta virgem. Sendo assim, mesmo que as curvas de adensamento para os corpos-de-prova reconstituídos, possuam um decaimento semelhante, a compressibilidade reduz com a redução do índice de vazios inicial do corpo de prova. É importante destacar que as tensões de pré-adensamento encontradas não dizem respeito a um histórico de tensões sofrida

pelo rejeito, pois são ensaios realizados em amostras reconstituídas, portanto este parâmetro é influenciado pela compressão sofrida pelas amostras durante o processo de moldagem.

Já o coeficiente de permeabilidade iniciou com valores elevados em todas as amostras, notou-se que conforme o (k) reduz com o aumento de carga, o mesmo, tende a adquirir valores aproximados entre as amostras. Sendo assim, para um determinado nível de tensões, as amostras tendem a ter valores similares de condutividade hidráulica, mostrando que este parâmetro tende a depender da tensão aplicada. A redução da condutividade hidráulica ocorreu de forma mais expressiva logo nas primeiras aplicações de carga, indicando que baixas tensões podem alterar de forma significativa este índice. O mesmo reduz significativamente quando submetido a uma carga crescente, externando que o aumento da carga pode modificar esta propriedade consideravelmente e, portanto, afetar a segurança de barragens de rejeitos de mineração, após várias etapas de alteamento.

Por meio dos valores encontrados para o coeficiente de adensamento, correlacionou-se com os índices de vazios, bem como com a pressão aplicada em cada etapa do ensaio de adensamento. Estabeleceu-se equações por meio de uma linha de tendência dada por uma função linear, para todos os corpos de provas, onde é possível encontrar os valores de (C_v) em função do índice de vazios ou de uma tensão determinada. Os valores obtidos mostram coerência com os valores estimados em ensaio, sendo muito próximos dos mesmos ou menores, o que confere confiabilidade aos resultados.

Com os valores do coeficiente de permeabilidade e das tensões aplicadas em cada etapa ensaiada, estipulou-se equações por meio de uma linha de tendência dada por uma função potencial, para todos os corpos de provas. Foi possível calcular valores para (k) em função de uma tensão desejada. Comparou-se os valores obtidos no ensaio com os valores calculados por meio da equação, os resultados não foram exatos, porém em sua maioria foram muito próximos ou abaixo dos valores ensaiados. Considerando a ordem de grandeza em que se encontra (k) e a condição circunstancial do material, o equacionamento é válido para ser utilizado.

Pode-se destacar que as propriedades de compressibilidade do rejeito avaliado e o valor do coeficiente de permeabilidade são de extrema importância para o desenvolvimento de um projeto de uma barragem de rejeito de mineração. Por meio dos resultados obtidos através deste trabalho, pode-se afirmar que as propriedades do rejeito sofrem mudanças durante as etapas de alteamento das barragens deste material. Sendo que a alta redução do coeficiente de permeabilidade é um dos aspectos de maior preocupação, uma vez que, pode comprometer a efetiva drenagem dos rejeitos, provocando um acúmulo de água no interior das barragens, que pode afetar a segurança das mesmas. Salienta-se a necessidade de considerar a variação do

coeficiente de permeabilidade dos rejeitos nas etapas de alteamento, a fim de se garantir o desenvolvimento de projetos seguros e o bom desempenho das estruturas ao longo de sua vida útil.

REFERÊNCIAS

ÁDÁM, J. et al. **The Kolontár Report: Causes and Lessons From the Red Mud Disaster.** Benedek Jávor, 2011.

ALT, V. Violações de direitos humanos também são frequentes em países em desenvolvimento. **Mineração é a maior responsável por mortes no trabalho ao redor do mundo.** Politike. 2015. Disponível em: <<http://politike.cartacapital.com.br/mineracao-e-a-maior-responsavel-por-mortes-no-trabalho-ao-redor-do-mundo>> Acesso em: 09 mai. 2018.

ASGARI, M. R.; BAYAT, M.; DEZFULI, A. B. Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with cement/lime. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 8, n. 3, p.1439-1452, 2013. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s12517-013-1173-1>>. Acesso em: 09 mai. 2018.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO M 145: Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes.** 1973.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solo preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** São Paulo, 2016.

_____. **NBR 13292: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga constante.** Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

_____. **NBR 6502: Rochas e Solos.** Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 14545: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável.** São Paulo: ABNT, 2000.

_____. **NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez,** 2016.

_____. **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade,** 2016.

_____. **NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica,** 2016.

BEDIN, J. **Interpretação de Ensaios de Piezocone em Resíduos de Bauxita.** M.Sc. Dissertação – de Mestrado do Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, 2006, 150, 2006.

BEDIN, J. **Estudo do Comportamento Geomecânico de Resíduos de Mineração.** Tese de Doutorado em Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2010.

BIAZON, T. **O Desastre Ambiental.** Cientistas analisam os impactos ambientais, entre os quais os resultantes da devastação de ecossistemas. *Jornal da Unicamp.* Set, 2018.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 6ª edição, vol. 1, 1996.

CONSTANTINO, Vera R. Leopoldo; et al. **Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático**. Química Nova. v. 25, n. 3, p. 490-498, 2002.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER – ME 093: **Determinação da densidade real**. São Paulo: DNER, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER – PRO IE 005: **Determinação da densidade real**. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DOURADO, K. A. (2003). **Condutividade Hidráulica de Materiais de Baixa Permeabilidade: Desenvolvimento, Construção e Teste de um Sistema de Medida**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

GONÇALVES, A. D. M. A; LIBARDI, P. L. **Análise da determinação da Condutividade Hidráulica do Solo pelo Método do perfil Instantâneo**. Comissão 2.2 - Física do solo. R. Bras. Ci. Solo, 37:1174-1184, 2013.

GERSCOVICH, D. M. S. **Fluxo em Solos Saturados**. Faculdade de Engenharia. Departamento de Estruturas e Fundações, UERJ, Rio de Janeiro, 2011.

GORE, M. S. **Geotechnical Characterization of Bauxite Residue (Red Mud)**. University of Texas at Austin. 2015.

HYDRO. **Aluminium, Environment and Society**. p. 24-27, 2012. Disponível em: <https://www.hydro.com/globalassets/1-english/about-aluminium/files/aluminium_environment-and-society.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2018.

HYDRO. **Refino da Alumina**. Disponível em: <<https://www.hydro.com/pt-BR/a-hydro-no-brasil/sobre-o-aluminio/ciclo-de-vida-do-aluminio/refino-da-alumina/>>. Acesso em: 19 jun. 2018.

HIND, R. A., BHARGAVA, S. K., GROCCOTT, S. C. “**The surface chemistry of Bayer process solids: a review**”, **Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects**. n. 146, pp.359-374, 1999

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. "**Bauxite Residue Management: Best Practice**" - European Aluminum Association. 32 pg; IAI, 2013.

IBRAM, INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Sistemas de Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira**. Brasília: IBRAM, 2012. 7. ed. 28 p. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002806.pdf>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

_____. **Relatório anual de atividades** (junho de 2016 a junho de 2017). Disponível em: <http://portaldaminerao.com.br/ibram/wp-content/uploads/2017/08/WEB_REL_IBRAM_2017.pdf> Acesso em: 20 mar. 2018.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Ceres, 1979. 262 p.

KOLENCSIK-TÓTH, A. et al. **Physical and chemical characterization of red mud in terms of its environmental effects.** University of Miskolc. Geosciences and Engineering, Vol. 3, No. 5 (2014), pp. 129–137.

KORMANN, A. C. M. **Ensaio de Compactação e Caracterização.** Universidade Federal do Paraná. 1997.

KUMAR, S., KUMAR, R., BANDOPADHYAY, A., 2006. “**Innovative methodologies for the utilization of wastes from metallurgical and allied industries.**” Resour. Conserv. Recycl. 48, 301–314.

LAMBE, T.W.; WHITMAN, R.V.. Soil Mechanics. John Wiley & Sons, New York. 1969.

LOZANO, F. A. E. **Seleção de Locais para Barragens de Rejeitos Usando o Método de Análise Hierárquica.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2006.

LUZ, Adão Benvido da; LINS, Fernando Antonio Freitas. **Rochas e Minerais Industriais: usos e especificações.** 2.Ed. - Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. 990 p. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/522>>. Acesso em: 20 mai. 2019.

MASSARA, V.M. **Produção do Alumínio do Ponte de Vista do Consumo de Energia.** Instituto de Eletrotécnica e Energia Energia - Universidade de São Paulo. 2004.

MARANGON, M. **Compressibilidade e Adensamento dos Solos.** Faculdade de Engenharia – NuGeo/Núcleo de Geotecnia, 2018.

NERY, K. D. **Caracterização Geotécnica e Avaliação da Compactação de um Resíduo da Produção de Alumina (Lama Vermelha) Desaguado por Filtro Prensa.** Universidade Federal de Minas Gerais – Curso de Mestrado em Geotecnia e Transporte. 2013.

NEWSON, T. et al. **Effect of Structure on the Geotechnical Properties of Bauxite Residue.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 132, No. 2, February 1, 2006.

NIERWINSKI, H. P. **Utilização do ensaio de cone sísmico na prospecção geotécnica.** Trabalho de Conclusão de curso de Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil, UDESC/ CCT, Joinville, 2010.

NIERWINSKI, H. P. **Caracterização e Comportamento Geomecânico de Rejeitos de Mineração.** 2019. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Civil) Programa de PósGraduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

NOGUEIRA, G. E. **Estudo de Algumas Soluções de Tratamento de Solos Moles para Construção de Aterros no Trecho Sul do Rodoanel – SP.** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

PACIONE, J. L. “**Chemical Stabilisation of Red Mud.**” 2012. University of New South Wales at the Australian Defence Force Academy.

PRADHAN, J., DAS, S. N., DAS, J., RAO, S. B., THAKUR, R.S. “**Characterization of Indian red muds and recovery of their metal values**”, *Light Metals*. pp. 87-92, 1996.

PINTO, S. C. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. 363p. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RÖHRLICH, M.; MISTRY, M.; RUHRBERG, M. e MARTENS, P. N. **Bauxite mining in Brazil, different viewpoints concerning environmental and sustainable development**. VI SMMT/XVIII ENTMM – Rio de Janeiro, 2001. p.507-513.

SAMPAIO, J.A.; ANDRADE, M.C.; DUTRA, A.J.B. **Bauxita. In: Rochas & Minerais Industriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005.

SILVA, P. S. J. **“Impactos ambientais causados por mineração.”** 2007. Revista Espaço da Sophia. Nº 08, mensal, Ano I.

TERZAGHI, K; FROLICH, O. K. **Theorie der Setzung von Tonschichten**. Vienna: Deuticke, 1936.

TERZAGHI, K. e PECK, R. B., **Soil Mechanics in Engineering Practice**, John Wiley and Sons, New York. The second edition by Ralph B. Peck, 1948.

TERZAGHI, K., PECK, R.B. e MERSI, G. **Soil Mechanics in Engineering Practice**, 3rd edn., John Wiley & Sons, New York, 549 pp. 1996.

VALE. **Minério de ferro contribui para recorde de superávit da balança comercial brasileira**. jul. 2017a. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/news/paginas/minerio-de-ferro-contribui-para-recorde-de-superavit-da-balanca-comercial-brasileira.aspx>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

_____. **Qual a importância da mineração para a economia do país?** jul. 2017b. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/news/paginas/qual-a-importancia-da-mineracao-para-a-economia-do-pais.aspx>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

VILLAR, L. F. S. **Estudo do Adensamento e Ressecamento de Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita**. Rio de Janeiro. 2002. Pontifícia Universidade Católica.

VICK, S. G. **Planning, Design and Analysis of Tailings Dams**. John Wiley and Sons, Inc., 369 p, 1983.

WANG, S; ANG, H.M; TADÉ, M.O., 2008. **“Novel applications of red mud as coagulant, adsorbent and catalyst for environmentally benign processes”** Chemosphere 72, 1621-1635.