



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ  
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
DE BARRAGEM E GESTÃO AMBIENTAL – PEBGA

JOSÉ ROBERTO GUIMARÃES EÇA JUNIOR

**ESTUDO DE CASO DE EXECUÇÃO DE ATERROS COM MISTURAS DE ARGILA  
E REJEITO DE BAUXITA**

Tucuruí/PA  
2023

JOSÉ ROBERTO GUIMARÃES EÇA JUNIOR

**ESTUDO DE CASO DE EXECUÇÃO DE ATERROS COM MISTURAS DE ARGILA  
E REJEITO DE BAUXITA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental da Universidade Federal do Pará para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Júlio A. de Alencar Júnior

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

G963e    Guimarães Eça Junior, José Roberto.  
          ESTUDO DE CASO DE EXECUÇÃO DE ATERROS COM  
          MISTURAS DE ARGILA E REJEITO DE BAUXITA / José Roberto  
          Guimarães Eça Junior. — 2023.  
          78 f. : il. color.

          Orientador(a): Prof. Dr. Júlio Augusto de Alencar Júnior  
          Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
          Campus Universitário de Tucuruí, Programa de Pós-Graduação em  
          Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental, Tucuruí, 2023.

          1. Rejeito de bauxita. 2. Terraplenagem,. 3. Estabilização  
          de solos. I. Título.

CDD 624

---

JOSÉ ROBERTO GUIMARÃES EÇA JUNIOR


**ESTUDO DE CASO DE EXECUÇÃO DE ATERROS COM MISTURAS DE ARGILA  
E REJEITO DE BAUXITA**


Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental da Universidade Federal do Pará para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental.


Orientador: Prof. Dr. Júlio A. de Alencar Júnior

Tucuruí, 05 de junho de 2023.

Aprovado por:

DocuSigned by:  
  
97C2DB0A58C5498...  
**Prof. Dr. Júlio A. de Alencar Júnior**  
UFPA/NDAE/PEBGA  
Orientador

DocuSigned by:  
  
889DBF4273D6467...  
**Prof.a Dra Fernanda Pereira Gouveia**  
UFPA/NDAE/PEBGA  
Examinador interno

DocuSigned by:  
  
23B962B2A4244FE...  
**Prof. Dr. Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão**  
PUC/RJ  
Examinador externo

## AGRADECIMENTOS

Pela oportunidade da vida, que foi me dada por Deus;

Pela compreensão dos meus filhos, pelas minhas faltas;

A minha mãe e aos meus irmãos, sempre juntos comigo;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Júlio A. de Alencar Júnior, que me ajudou a construir o presente trabalho, dedicando seu tempo, e conhecimento;

A toda equipe do PEBGA, em especial a Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Fernanda Pereira Gouveia e ao Prof. Dr. Júnior Hiroyuki Ishihara, que colaboraram fortemente na estruturação do trabalho;

A toda turma da AC Parceria e Terraplenagem, pelo apoio nos arquivos técnicos utilizados neste trabalho, e na execução do aterro experimental;

A Bruna Almada, doutoranda de Eng. civil na UFOP/MG, por todo o suporte técnico dado durante a construção do trabalho;

A minha amada esposa, enviada por Deus, minha companheira nessa grande caminhada, e com certeza, nas que ainda virão;

Ao meu pai, que se ausentou da minha vida, a pedido de Deus, mas que continua vivo no meu coração, é a quem dedico este trabalho.

## RESUMO

A reutilização de rejeitos da mineração é uma demanda real devido à busca da exploração sustentável dos recursos. O Brasil é detentor de um dos maiores patrimônios minerais e, deste modo, torna-se um dos maiores produtores e exportadores de minérios do planeta. A busca por atender a demanda da produção e extração de minerais tem crescido a cada dia e, junto a este crescimento, também vem aumentando a busca pela diminuição do impacto ambiental, sem a perda da lucratividade. Atualmente, pesquisas com estes objetivos são extremamente necessárias na busca de soluções para essas problemáticas. Diversos estudos buscam alternativas para o reuso do rejeito em grande escala, uma das alternativas que viabiliza essa aplicação são aterros dentro do próprio empreendimento. Com a contínua atualização das normativas que regem as barragens, muitas vezes é necessário reforçar estruturas antigas, visando aumentar o fator de segurança. O presente trabalho buscou analisar a aplicabilidade da mistura de argila com o rejeito de bauxita, em diferentes proporções, para viabilidade de sua utilização em aterros controlados. Além disso, visou viabilizar análises quanto às pesquisas que evidenciaram o reuso dos rejeitos de minérios e adições de outros materiais de rejeitos. Foi realizado um estudo de caso numa mineração, coletando amostras de argila e rejeito, e após caracterizados, definiu-se um traço piloto e um auxiliar. Como resultados, a mistura de 50% de rejeito de bauxita com 50% de argila, resultou num material que atingiu valores de Índice de Suporte Califórnia (ISC) superiores aos exigidos pelas normas do Dnit 108 de 2009, além de melhorar consideravelmente as características geomecânicas quando comparados com o rejeito puro. Dessa forma, esta pesquisa contribuiu para avaliar a aplicabilidade de composições de argila e rejeito de bauxita em um aterro experimental na área de uma mineração

**Palavras-chave:** Rejeito de bauxita, terraplenagem, estabilização de solos.

## ABSTRACT

The reuse of mining tailings is a real demand due to the search for sustainable exploitation of resources. Brazil is the holder of one of the largest mineral assets and, as such, is one of the largest producers and exporters of minerals on the planet. The search to meet the demand for the production and extraction of minerals has been growing every day and, along with this growth, the search for the reduction of environmental impact without loss of profitability has also been increasing. Currently, research with these objectives is extremely necessary in the search for solutions to these problems. Several studies seek alternatives for the reuse of the waste on a large scale, and one of the alternatives that make this application feasible are landfills within the enterprise itself. With the continuous updating of the regulations that govern dams, it is often necessary to reinforce old structures in order to increase the safety factor. This paper sought to analyze the applicability of mixing clay with bauxite tailings, in different proportions, for feasibility of its use in controlled landfills. In addition, it aimed to make feasible analyses regarding the research that evidenced the reuse of ore tailings and additions of other tailings materials. A case study was carried out in a mining company, collecting clay and tailings samples, and after being characterized, a pilot and an auxiliary mix were defined. As results, the mixture of 50% bauxite tailings with 50% clay resulted in a material that achieved California Support Index (CSI) values higher than those required by the Dnit 108 of 2009 standards, besides considerably improving the geomechanical characteristics when compared to the pure tailings. Thus, this research contributed to evaluate the applicability of compositions of clay and bauxite tailings in an experimental embankment in a mining area.

**Keywords:** Bauxite tailings, earthworks, soil stabilization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Participação das principais substâncias metálicas no valor da produção mineral comercializada – 2021. ....	14
Figura 4.1 - Produção Mineral do Brasil. Exclui Petróleo & Gás, valores anunciados antes da pandemia do Corona Vírus no Brasil. ....	22
Figura 4.2 - Processo de beneficiamento simplificado da Bauxita.....	23
Figura 4.3 - Aterro industrial para disposição de material contaminado.....	28
Figura 4.4 - Aterro sanitário para disposição de lixo urbano. ....	29
Figura 4.5 - Aterro em obras de terraplenagem.....	31
Figura 4.6 - Relação de densidade seca e teor de água em solos. ....	34
Figura 4.7 - Classificação de solos – sistema rodoviário. ....	37
Figura 4.8 - Limites de plasticidade conforme Casagrande. ....	38
Figura 4.9 - Curva de Compactação. ....	39
Figura 5.1 - Mapa de localização da mineradora.....	43
Figura 5.2 - Depósito de argila proximidades das áreas de aterro.....	44
Figura 5.3 - Depósito de argila representativo da jazida local. ....	44
Figura 5.4 - Reservatório de rejeito adensado utilizado para coleta de material.....	45
Figura 5.5 - Processo de lavagem da bauxita. ....	46
Figura 5.6 - Rejeito após período de secagem.....	46
Figura 5.7 – Fluxograma etapas do trabalho. ....	47
Figura 5.8 - Lançamento dos materiais. ....	51
Figura 5.9 - Compactação da mistura de 50% de Rejeito / 50% de argila. ....	52
Figura 5.10 - Ensaio de compactação da camada de aterro.....	52
Figura 5.11 - Layout do aterro experimental - vista frontal. ....	55
Figura 5.12 - Layout do aterro experimental - vista lateral. ....	55
Figura 6.1 - Difractometria de raios-X da argila Belterra. ....	58
Figura 6.2 - Curva de distribuição granulométrica da argila. ....	59
Figura 6.3 - Curva de distribuição granulométrica do rejeito.....	59
Figura 6.4 - Curva de distribuição granulométrica da mistura de 50% de rejeito com 50% da argila. ....	60
Figura 6.5 - Curva de distribuição granulométrica da mistura de 60% de rejeito com 40% da argila. ....	60
Figura 6.6 - Relação umidade x número de golpes do ensaio de consistência do rejeito puro.	61



Figura 6.7 - Relação umidade x número de golpes do ensaio de consistência da argila. ....	61
Figura 6.8 - Relação umidade x número de golpes do ensaio de consistência da mistura de 50% de argila com 50% de rejeito. ....	62
Figura 6.9 - Relação umidade x número de golpes do ensaio de consistência da mistura de 40% de argila com 60% de rejeito. ....	62
Figura 6.10 - Carta de Plasticidade.....	63
Figura 6.11 - Curva de compactação do rejeito puro. ....	64
Figura 6.12 - Curva de compactação da argila. ....	64
Figura 6.13 - Curva de compactação da mistura de 50% de rejeito com 50% da argila. ....	65
Figura 6.14 - Curva de compactação da mistura de 40% de rejeito com 60% da argila. ....	65
Figura 6.15 - Resultado de ISC do rejeito puro.....	66
Figura 6.16 - Resultado de ISC da argila.....	66
Figura 6.17 - Resultado de ISC da mistura de 50% de rejeito e 50% de argila.....	67
Figura 6.18 - Resultado de ISC da mistura de 60% de rejeito e 40% de argila.....	67
Figura 6.19 - Grau de saturação do ensaio de compactação de campo. ....	68
Figura 6.20 - Resultado dos ensaios de umidade do aterro experimental. ....	69

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 4.1 - Fatores de impacto da mineração. ....	21
Tabela 4.2 - Brasil no ranking Internacional por produção e reservas de minérios – quadro resumo .....	22
Tabela 4.3 - Estimativas da quantidade de estéril e rejeitos gerados nas produções brasileiras das substâncias minerais discriminadas, no período de 2010 a 2019.....	24
Tabela 4.4 - Resultado dos valores para as aplicações. ....	26
Tabela 5.1 - Equipamentos para terraplenagem. ....	50
Tabela 5.2 - Equipamentos topografia.....	50
Tabela 6.1 - Composição química. ....	57
Tabela 6.2 - Comparativo dos percentuais de composição granulométrica dos materiais. ....	60
Tabela 6.3 - Limites de consistência dos materiais e das misturas. ....	62
Tabela 6.4 - Produtividade do Rolo.....	69
Tabela 6.5 - Produtividade do Rolo.....	69

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	13
2	JUSTIFICATIVA.....	16
3	OBJETIVOS.....	19
3.1	Objetivo geral .....	19
3.2	Objetivos específicos .....	19
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
4.1	Rejeitos de mineração .....	20
4.2	Aterros .....	27
4.2.1	Aterro industrial.....	27
4.2.2	Aterro sanitário.....	28
4.2.3	Aterro compactado .....	29
4.3	Estabilização de solos .....	31
4.4	Ensaio de Caracterização.....	35
4.4.1	Caracterização dos Solos .....	35
5	MATERIAIS E MÉTODOS .....	43
5.1	Materiais .....	43
5.1.1	Localização da mineradora.....	43
5.1.2	Depósitos de argila e reservatório de rejeito .....	44
5.2	Métodos .....	46
5.2.1	Coleta dos materiais .....	47
5.2.2	Caracterização física e mecânica dos materiais.....	48
5.3	Determinação das misturas .....	49
5.4	Caracterização física e mecânica das misturas .....	49
5.5	Aterro experimental .....	50
5.5.1	Equipamentos / Ferramentas .....	50

5.5.2	Execução de aterro experimental.....	51
5.5.3	Análise e apresentação dos resultados.....	55
6	RESULTADOS.....	57
6.1	Caracterização dos materiais e das misturas.....	57
6.1.1	Análise Química do Rejeito.....	57
6.1.2	Mineralogia Argila Belterra.....	58
6.1.3	Granulometria.....	58
6.1.4	Limites de Atterberg.....	61
6.1.5	Curva de compactação e peso específico .....	63
6.1.6	índice de Suporte Califórnia (ISC) .....	65
6.2	Ensaio <i>in situ</i> .....	68
6.2.1	Aterro Experimental .....	68
6.2.2	Ensaio de compactação e umidade.....	68
6.2.3	Produtividade do rolo compactador.....	69
6.3	Análise dos ganhos ambientais com reuso do rejeito. ....	70
7	CONCLUSÕES.....	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	72

## 1 INTRODUÇÃO

Tendo uma importância primordial para a economia do Brasil, a mineração e seus setores desempenham uma função central no processo de desenvolvimento do país, destacando-se sua contribuição social e econômica. Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2022), em 2021, o Brasil exportou 357,7 milhões de toneladas de minério de ferro, 16,1 milhões de toneladas a mais comparado ao ano anterior. Somados, minério de ferro, ouro e cobre correspondem a 91,8% das exportações em dólares (IBRAM, 2022).

Segundo a série estatísticas da ANM (2020), o Brasil possui um dos maiores patrimônios minerais e é um dos maiores produtores e exportadores de minérios do planeta, pesquisas nessa área são extremamente necessárias na busca de soluções para possíveis problemáticas, como impactos ao meio ambiente e necessidade de grandes áreas para estocagem, que podem ocorrer no processo minerário, desde a extração no meio ambiente, ao transporte e manipulação industrial do minério.

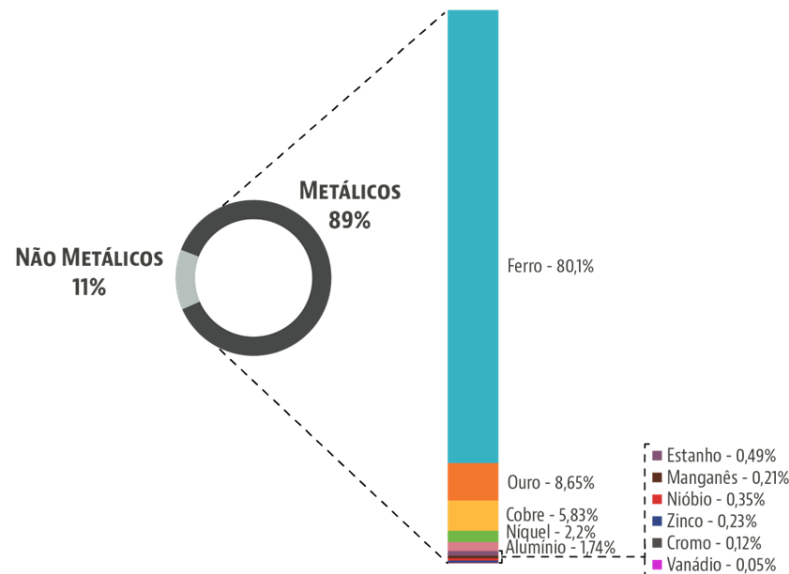
No ano de análise, o país produziu mais de 46 Mt de bauxita, e mais de 567 Mt de minério de ferro, sendo o último, equivalente a 80,1% do total da participação das principais substâncias metálicas no valor da produção mineral comercializada. Destaca-se que a produção de minério de ferro no ano de 2021 ocupou a 1ª classificação na lista de produtos que geraram as maiores rendas nas exportações no Brasil, conforme ilustra a figura 1.1 (ANM, 2023).

Dessa forma, pode-se perceber o quanto a mineração e suas atividades econômicas configuram um dos maiores setores de economia nacional e, como tal, utiliza os recursos naturais, comumente não renováveis. Assim, está associada a impactos ambientais negativos ao meio ambiente, principalmente nos espaços de extração da matéria prima. Nesses mesmos espaços, comumente é necessário dispor materiais resultantes do processo minerário conhecidos como rejeitos, materiais que não possuem valor econômico, e que geralmente são depositados em barragens.

A Agência Nacional de Mineração (ANM) apresenta uma série de parâmetros as quais as barragens devem atender. Assim, a construção e o gerenciamento de barragens requerem investimentos para controle de segurança. Nesse aspecto, além de todos os prejuízos ambientais que necessitam ser compensados como boas práticas pelas grandes corporações, as normativas exigem que as empresas invistam em estudos e soluções para mitigar impactos ambientais e

para suprimir quaisquer riscos de acidentes ambientais e/ou à sociedade que circundam essas áreas.

Figura 1.1 - Participação das principais substâncias metálicas no valor da produção mineral comercializada – 2021.



Fonte: ANM (2023).

Essas normas reguladoras estão cada vez mais exigentes, como por exemplo as atualizações da resolução nº 95 da ANM (2023). Essa resolução exige aos empreendedores a completa descaracterização das estruturas construídas nas proximidades de comunidades, ou o reassentamento da população e o resgate do patrimônio cultural, ou obras de reforço que garantam a estabilidade efetiva da estrutura.

Diante disso, a busca por alternativas viáveis que atendam às necessidades de cumprir com a legislação, associadas às necessidades produtivas das minerações, desafiam todo setor, sociedade e estudiosos.

Algumas alternativas para aplicação desses rejeitos são avaliadas a partir da sua caracterização tecnológica, processo esse imprescindível para otimização no aproveitamento desses materiais. Os resultados obtidos são utilizados para permitir o aproveitamento do rejeito como subproduto no próprio empreendimento, ou em outro segmento industrial. Uma vez viabilizado seu reuso, reduz-se o impacto ambiental. GOMES (2017)

Nesse sentido os empreendimentos minerários podem utilizar como alternativa para execução de obras de aterros e reforços além de outras atividades de terraplenagem com nesses projetos, o próprio rejeito gerado durante a extração do minério, após realizados estudos de caracterização e testes através por exemplo de aterros experimentais.

## 2 JUSTIFICATIVA

Com o atendimento à demanda do desenvolvimento cada vez mais acelerado, a indústria da mineração impacta de forma importante nos aspectos sociais e ambientais em busca da exploração de novas áreas. Deste modo, torna-se obrigatório o fomento de novas soluções técnicas, que sejam ambientalmente e economicamente viáveis e que, principalmente, viabilizem e permitam o avanço sustentável da mineração e o atendimento à demanda do desenvolvimento.

Sabe-se que, no processo de beneficiamento do minério, serão gerados subprodutos denominados rejeitos, que não possuem valor comercial/econômico. Esses materiais são gerados comumente sob a forma de polpa e armazenados em diques e barragens construídos para essa finalidade. De acordo com Wenbin *et al.* (2017), o descarte de rejeitos em poupa em barragens é considerado o método de disposição mais adotado pelas empresas.

Nesse contexto, a produção dos mais diversos produtos minerais resulta em um volume considerável de rejeito proveniente dos processos de lavra e beneficiamento. Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2022), a quantidade acumulada de rejeitos de mineração de 2000 a 2014, são de 4,86 bilhões de toneladas. Alguns minerais possuem um menor aproveitamento em função do baixo teor no minério ou pela complexidade do beneficiamento. Essa condição leva a um aumento expressivo do quantitativo de rejeitos produzidos. A disposição controlada dos rejeitos pode causar altos custos na produção sem trazer benefícios imediatos para a empresa mineradora (SOARES, 2010).

Na mesma medida que cresce a demanda pela produção mineral e, conseqüentemente, a produção desenfreada de rejeitos, também cresce a preocupação com as questões de impacto ambiental a ela associada. Com os últimos rompimentos de barragens e derramamento de rejeitos no Brasil, torna-se imprescindível a busca e o fomento de alternativas que viabilizem a prévia solução para a geração desses rejeitos.

Luz e Lins (2018) afirmam que a disposição dos rejeitos das usinas de beneficiamento resulta em um imenso impacto ambiental, se não for disposto adequadamente, como contaminação de lençóis freáticos e carreamento de materiais em mananciais. Ações preventivas ou corretivas são normalmente necessárias, especialmente, com rejeitos de minérios metálicos, sulfetados (Zn, Pb, Hg, Cd, Fe, Cu), sulfarseniato (arsenopirita), arseniato (escorodita), radioativos e carvões. Esses materiais podem oxidar, desencadeando a



acidificação de drenagens e a dissolução de metais, originando a drenagem ácida de mina (MUNIZ & FILHO, 2006).

Há uma cobrança expressiva no setor mineral para que os rejeitos de beneficiamento sejam utilizados, por exemplo, para enchimento de cavas de minas (backfill), com o objetivo de restaurar áreas lavradas, ou que sejam dispostos de forma controlada em áreas projetadas para esse fim. Existe uma tendência para o estudo do reuso de rejeitos das atividades minerais como substituição a outros materiais, um exemplo disso é a utilização da areia artificial a partir do aproveitamento de finos de brita; a aplicação de rochas contendo potássio como fertilizante; utilização de rejeitos de beneficiamento de minério de ferro em sub-base de estradas; dentre outros casos. Notoriamente, essas soluções só poderão ser aplicadas com estudos sobre a solubilização ou biossolubilização de metais ou elementos nocivos presentes nesses materiais, de forma a não contaminar o lençol freático ou mananciais. (LUZ & LINS, 2018).

Muito se pesquisou com o passar dos anos sobre o que ser feito com rejeitos, como afirmam Liu e Naidu (2014) ao expor que muitas tentativas foram realizadas na busca de uma solução ambientalmente correta e economicamente viável para utilização do rejeito de bauxita. O estudo de Klauber *et al.* (2011) sugeriu o uso de filtros para remoção de poluentes, reaproveitamento como materiais de construção (tijolos, concreto, cimentos e materiais de fundação rodoviária), coagulantes, catalisadores e agentes para neutralizar resíduos ácidos. Essas foram algumas das opções encontradas na busca de reduzir o quantitativo de rejeito armazenado em reservatórios. No entanto, todas essas opções resolvem parte de uma fração muito pequena do quantitativo de rejeitos armazenados em barragens de mineração.

Nesse sentido, Lima *et al.* (2017) afirmam que o rejeito de bauxita ainda não possui uma aplicação em larga escala, uma vez que as opções analisadas não possuem atributos para valorização de resíduos, como a viabilidade ambiental e o baixo custo, além do desempenho mecânico, que deve ser igual ou melhor do que os métodos convencionais. Dessa forma, torna-se mais interessante para as empresas continuar com o armazenamento de rejeito do que utilizá-lo em outra aplicação. Essa cultura empresarial muito voltada para a lucratividade e diminuição dos custos de produção atrapalha fortemente projetos e boas práticas que visem a sustentabilidade e preservação ambiental.

No entanto, Shinomiya *et al.* (2015) apresentam algumas aplicações em grande escala da lama vermelha (resíduo da produção de bauxita), como por exemplo na construção de rodovias. Segundo os autores, isso se deve a grande quantidade de materiais que esse tipo de

projeto consome e que, com umidade adequada, podem ser compactados e misturados com outros materiais, formando um excelente material para a construção de estradas.

Outra opção viável é a tendência na prática de armazenamento de rejeito através do uso do contrapilhamento à seco, como cita Evans (2016). O autor afirma que muitas mineradoras usam equipamentos como filtros prensas na busca de auxiliar o desaguamento do rejeito, para facilitar a compactação do material em pilhas. Nesse sentido, com material suficiente e conhecendo suas propriedades, uma das possibilidades no reaproveitamento de alguns rejeitos é a construção de aterros dentro do próprio empreendimento. Assim, esses aterros possibilitam o aumento do coeficiente de segurança das estruturas quando utilizados para execução de reforço de bermas nas barragens já desativadas ou, até mesmo, em operação.

Além da secagem do rejeito, existem também outras técnicas como a retirada do rejeito consolidado das estruturas de barragens já construídas, permitindo aumento da sua capacidade de receber novos lançamentos do rejeito em poupa, e a construção de pequenas estruturas (bacias), para facilitar a secagem do rejeito.

As atualizações apresentadas na resolução nº 95 da ANM (2023) ressaltam a importância de se avaliar, de forma contínua, a segurança das barragens de mineração. Isso é feito a partir de análises de estabilidade da situação recente de cada estrutura, e elaborar medidas de correção dos problemas identificados. Além disso, o não cumprimento aos requisitos importantes para a segurança de barragens de mineração, como o fator de segurança, o sistema extravasor e a borda livre em concordância ao projeto, poderão levar essas estruturas a serem consideradas como em situação de emergência, o que não acontecia até então.

Essa mesma resolução veta a implantação de novas barragens próximas a comunidades inseridas na ZAS (Zona de Auto Salvamento) e para aquelas que iniciaram a instalação ou a operação antes da lei nº 14.066/2020, mas que foi identificada comunidade na ZAS, "...deverá ser feita a descaracterização da estrutura, ou o reassentamento da população e o resgate do patrimônio cultural, ou obras de reforço que garantam a estabilidade efetiva da estrutura." ANM (2022)

Nesse sentido, uma solução que poderia ser interessante para o aproveitamento mais eficiente de rejeitos de mineração, é utilizar o próprio material armazenados nas barragens para execução de bermas de reforço, aumentando sua geometria e, por conseguinte, o seu fator de segurança. Dessa forma, se possibilita uma borda livre maior, de modo a atender às exigências da ANM.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo geral**

Avaliar a aplicabilidade de composições de argila e rejeito de bauxita em um aterro experimental na área de uma mineração.

#### **3.2 Objetivos específicos**

Para o atendimento do objetivo geral, tem-se como objetivos específicos:

- analisar os parâmetros físicos e mecânicos de duas misturas compostas por argila e rejeito de bauxita;
- comparar os parâmetros das misturas analisadas com as especificações técnicas previstas para execução do corpo de aterro das obras do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT 108/2009), e
- apresentar através de tabela comparativa, o volume de argila substituído pelo rejeito durante a execução do aterro experimental.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Rejeitos de mineração

A mineração é responsável por uma parcela do rendimento e movimentação da economia no Brasil, tendo uma importância única para o desenvolvimento do país e da própria sociedade. Contudo, uma das maiores preocupações da atualidade, ao que se refere ao desempenho e manutenção ambiental, são as preocupações com as barragens e os rejeitos resultados do processo de mineração.

Juntamente com as pilhas de estéril, as barragens são as maiores estruturas geotécnicas construídas pelo homem. Barragens são construídas pela humanidade há milênios para diversos fins, como: armazenamento de água, controle de vazões, geração de energia hidrelétrica, entre outros. (CARDOZO, PIMENTA E ZINGANO, 2016).

A história da mineração no Brasil começa desde o período imperial, com a extração e produção do ferro. Nos dias atuais, o produto mineral está intensamente relacionado ao desenvolvimento econômico do país, representando cerca de 8% do produto interno bruto, segundo informações do IBRAM (2019).

Sendo estruturas de terra com a característica principal de armazenar água e resíduos vindos do processo de beneficiamento do minério, as barragens de resíduos têm como objeto estrutural beneficiar e separar a parte valiosa do mineral do chamado rejeito. Os rejeitos não possuem valor comercial e podem possuir grau de toxicidade e reagentes (GOMES, 2017).

Mesmo sabendo que o minério é um importante aliado para o desenvolvimento econômico do país, a preocupação com os rejeitos e seus impactos negativos ao meio ambiente são enormes. Segundo Ribeiro e Mendes (2013), essa atividade extrativista e seus impactos são abrangentes em várias áreas, com diversos graus de alteração, e isso irá impactar aos fatores bióticos e abióticos na natureza, produzindo interferências no campo ambiental e social, conforme apresenta a Tabela 4.1.

Devido aos impactos associados à mineração, o manuseio e a separação dos rejeitos devem ser uma grande preocupação atualmente. Além disso, o destino e a manutenção desses rejeitos tornam-se um importante ponto de discussão atual. De acordo com Santos (2013), esses impactos podem ser em três, a saber:

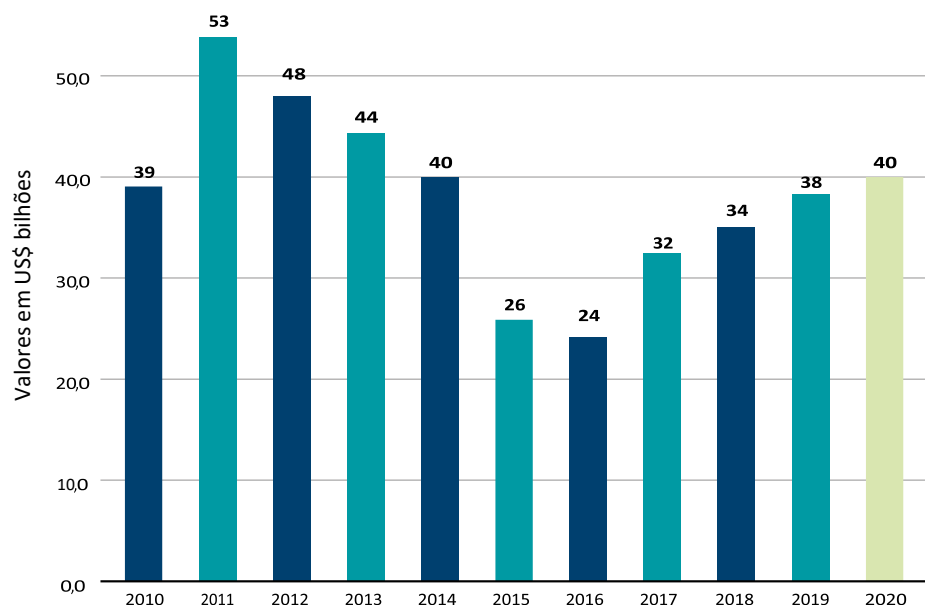
Tabela 4.1 - Fatores de impacto da mineração.

<b>Impactos Ambientais</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Destruição do habitat natural nas áreas de mineração e nas áreas de disposição de resíduos;</li> <li>• Destruição de habitats adjacentes como resultados de emissões e despejos;</li> <li>• Mudanças no regime dos rios e da ecologia devido ao assoreamento e modificações de fluxo;</li> <li>• Mudanças na paisagem;</li> <li>• Degradação do solo devido a reabilitação inadequada após o fechamento das minas;</li> <li>• Instabilidade do solo;</li> <li>• Perigo de falhas das estruturas e barragens;</li> <li>• Equipamentos e construções abandonados.</li> </ul>
<b>Impactos da Poluição</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Drenagem em áreas de mineração, incluindo drenagem ácida de mina e bombeamento de água de mina;</li> <li>• Escoamento de sedimentos de áreas de mineração;</li> <li>• Poluição de rios devido às operações de mineração;</li> <li>• Efluentes de operações de processamento de minerais;</li> <li>• Esgotos das áreas;</li> <li>• Derramamento de óleos e combustíveis;</li> <li>• A contaminação do solo a partir de resíduos de tratamento químico;</li> <li>• Emissões atmosféricas provenientes das operações de processamento de minerais;</li> <li>• Liberação de metano (minas de carvão).</li> </ul>
<b>Impactos Ocupacionais</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manuseio de produtos e resíduos químicos;</li> <li>• Inalação de poeira;</li> <li>• Emissões atmosférica em espaços confinados;</li> <li>• Exposição a calor, ruído e vibração;</li> <li>• Riscos físicos nas áreas de beneficiamento e processamento;</li> <li>• Condições insalubres de vida.</li> </ul>

Fonte: SANTOS, 2013.

A figura 4.1 mostra a evolução da produção mineral no Brasil nos últimos anos. Já a Tabela 4.2 apresenta a produção nacional de diferentes tipos de minerais e sua respectiva posição no ranking mundial de produção e de reservas minerárias, conforme dados do IBRAM (2020). Pode-se perceber, de forma bastante nítida, que alguns minerais possuem valores expressivos em produção anual, com destaque para o minério de ferro, tendo em vista a grande quantidade de minerações espalhadas por todo o país. De acordo com os valores expostos, observa-se que, em 2019, a produção do minério de ferro chegou a 410 milhões de toneladas e, da bauxita, 30 milhões de toneladas, ocupando o 5º lugar no ranking mundial de produção e 4º no de reservas minerárias.

Figura 4.1 - Produção Mineral do Brasil. Exclui Petróleo & Gás, valores anunciados antes da pandemia do Corona Vírus no Brasil.



Fonte: IBRAM (2020).

Tabela 4.2 - Brasil no ranking Internacional por produção e reservas de minérios – quadro resumo

Produto	Produção 2019		Reservas 2019	
	Ranking	toneladas	Ranking	toneladas
<b>Bauxita</b>	5°	30 milhões	4°	2,6 bilhões
<b>Cobre</b>	9°	360 mil	10°	11,8 milhões
<b>Nióbio</b>	1°	90 mil	1°	11 milhões
<b>Ferro</b>	2°	410 milhões	2°	29 bilhões
<b>Manganês</b>	3°	3,8 milhões	2°	140 milhões
<b>Ouro</b>	9°	100 toneladas	5°	2400 toneladas
<b>Níquel</b>	4°	415 mil	3°	11 milhões
<b>Zinco</b>	10°	410 mil	11°	1,8 milhão
<b>Magnesita</b>	3°	1,7 milhão	2°	390 milhões
<b>Chumbo</b>	10°	12 mil	10°	137 mil
<b>Fosfato</b>	6°	7 milhões	8°	315 milhões
<b>Potássio</b>	8°	200 mil	8°	24 milhões

Fonte: IBRAM (2020).

Se por um lado, o Brasil já ocupa os primeiros lugares no ranking mundial da produção mineral, o grande aumento do consumo de produtos, que na sua composição requerem utilização dos materiais minerais, incentiva o aumento dessa produção, e conforme descrito na Tabela 4.2, ainda há muito a se explorar nas reservas brasileiras.

Esse processo produtivo gera diversos tipos de resíduos que, por muitas vezes, não são aproveitados. Em ambientes de mineração, a jazida em processo produtivo dá origem a dois subprodutos: o agregado natural extraído, processado e vendido para obter-se lucro; e o estéril, material que deve ser retirado para possibilitar a lavra, considerado sem valor econômico.

Ao passo que o processo de extração pode gerar uma quantidade significativa de materiais estéreis, para que o minério agregue valor comercial, ele ainda necessita passar por mais uma fase de beneficiamento, também chamada de tratamento de minério.

A Norma Regulamentadora de Mineração número 18 (NRM, 2008) traz as seguintes definições:

18.1.1 Para efeito das NRM entende-se por beneficiamento de minérios ao tratamento visando preparar granulometricamente, concentrar ou purificar minérios por métodos físicos ou químicos sem alteração da constituição química dos minerais.

18.1.2 Todo projeto de beneficiamento de minérios deve:

- a) otimizar o processo para obter o máximo aproveitamento do minério e dos insumos, observadas as condições de economicidade e de mercado e;
- b) desenvolver a atividade com a observância dos aspectos de segurança, saúde ocupacional e proteção ao meio ambiente.

Nesse sentido, para a geração do produto final é necessário uma série de etapas produtivas. No caso da mineração da bauxita, esse processo pode ser ilustrado, conforme a Figura 4.2.

Figura 4.2 - Processo de beneficiamento simplificado da Bauxita.



Fonte: ABAL (2022).

Torna-se perceptível que a relação no quantitativo de rejeitos e estéril na produção do produto final pode ser significativa. Além disso, de acordo com os dados do Relatório Anual de Lavra (ANM, 2020), apresentados na Tabela 4.3, entre 2010 e 2019, o Brasil produziu um total de 3,4 bilhões de toneladas de rejeitos e 8,2 bilhões de toneladas de estéril pela atividade de mineração. Desses valores, os principais contribuintes foram: o ferro (40,87% do total de rejeitos), o ouro (20,45%), cobre (14,78%), fosfato (8,64%) e o alumínio (3,89%).

Tabela 4.3 - Estimativas da quantidade de estéril e rejeitos gerados nas produções brasileiras das substâncias minerais discriminadas, no período de 2010 a 2019.

<b>Substância</b>	<b>Estéril (Mt)</b>	<b>Estéril (%)</b>	<b>Rejeito (Mt)</b>	<b>Rejeito (%)</b>
<b>Ferro</b>	3.921	47,93	1.372	40,87
<b>Alumínio</b>	1.175	14,37	131	3,89
<b>Cobre</b>	1.092	13,35	497	14,78
<b>Ouro</b>	520	6,36	687	20,45
<b>Fosfato</b>	478	5,84	290	8,64
<b>Carvão</b>	415	5,07	58	1,72
<b>Níquel</b>	292	3,57	63	1,88
<b>Estanho</b>	122	1,50	223	6,64
<b>Manganês</b>	106	1,30	16	0,49
<b>Vanádio</b>	26	0,31	3	0,10
<b>Zinco</b>	19	0,23	10	0,28

Fonte: ANM (2020).

Ao passo que se intensifica a geração de rejeito, aumenta-se a necessidade do armazenamento desses materiais para diminuir os custos de gerenciamento e garantir a segurança operacional e ambiental desse armazenamento.

Esses locais para armazenamento são os principais fatores que as mineradoras devem considerar para cumprir as exigências ambientais, visto que a disposição dos resíduos é considerada como um custo adicional. A correta gestão dos resíduos implicará em despesas, uma vez que os volumes movimentados necessitam ser corretamente dispostos e monitorados de forma a evitar acidentes, como degradações dos mananciais aquíferos, assoreamento, turvamento dos cursos de água, ocupações de áreas produtivas, dentre outros (GRISA & CAPANEMA, 2018).



A busca por alternativas para redução nos custos envolvidos no armazenamento de rejeitos desafiou o setor mineral à busca de soluções para mitigação dos impactos ambientais. A utilização desses resíduos tende a ter vantagens econômicas e ambientais. A sua aplicação com materiais alternativos possibilita a redução do armazenamento, eliminando os riscos de disposição inadequada dos resíduos (SHINOMIYA, 2015).

As principais razões práticas estão intrinsecamente ligadas na busca por atender à demanda da carência de áreas de retenção do grande quantitativo de rejeitos de minério que são produzidos anualmente. Dentro desse contexto, existe a necessidade de se apresentar uma análise de viabilidade que busque um aproveitamento dos rejeitos de minério como um material a ser utilizado, que traga lucratividade e diminuição de gastos/custos e que ainda atenda às necessidades ambientais (ADIANSYAH *et al.*, 2015).

Um setor com grande potencial para consumir os resíduos das minerações é o da construção civil. Haibin e Zhenling (2010) afirmam que os materiais provenientes do rejeito de carvão podem ser utilizados como alternativas nos reforços das estruturas terrestres, agregados para concretos, base de pavimentos e matéria-prima para produtos. No entanto, várias minerações estão situadas em áreas remotas, o que dificulta a interação com o setor de construção civil, sendo necessário a busca de outras alternativas para o reuso do rejeito.

Alternativas simples podem ser utilizadas dentro do próprio empreendimento, visto a grande necessidade de investimentos em infraestrutura para a continuidade do processo de extração. Melhorias em acesso, estradas e outras obras civis são exemplos de atividades que requerem utilização de materiais diversos, como, por exemplo, solos para pavimentação.

De acordo com o Plano Nacional de Mineração, as minerações devem estabelecer claramente a diretriz quanto à reciclagem de metais e de outros minérios, considerando-se a entrada em vigor da Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010).

Encontra-se na literatura vários casos de reaproveitamento de materiais nos processos de lavra e processamento de minérios, um exemplo é o reaproveitamento dos rejeitos de minério de ferro depositados por longos períodos de tempo. Em algumas situações, tanto o estéril quanto os rejeitos, ainda contêm componentes valiosos com possibilidade de ser um excelente recurso futuro (WILLS, 2011). Nesse contexto de reuso, algumas mineradoras buscam alternativas para solucionar a falta de jazidas naturais (solos e agregados) cujas características atendem às especificações técnicas do DNIT 108 de 2009 para o uso em pavimentação, ampliações ou

criações de novos acessos para novas minas. Mesmo que, muitas vezes, seja possível encontrar áreas de empréstimo próximas ao empreendimento, a legislação ambiental mais rigorosa quanto à liberação de licenças ambientais para a utilização de jazidas naturais são também fatores contributivos para a busca e utilização de materiais alternativos.

Embora haja excelentes resultados referentes ao uso do rejeito de bauxita na indústria da construção civil, como em misturas para materiais cerâmicos, concreto e aditivos, ainda não possui uma alternativa para seu uso em larga escala, visto que diversas opções estudadas, não atendem todas as premissas para valorização de resíduos: viabilidade ambiental e orçamentária, além das características mecânicas, igual ou superior do que os métodos convencionais. Em virtude disso, ainda é menos custoso para as mineradoras deixar o armazenamento do rejeito em barragens, do que usá-lo de alguma forma (LIMA *et al.*, 2017).

No estudo de Shinomiya *et al.* (2015) foram levantados vários artigos referentes ao reuso de resíduos, considerando o trabalho necessário para tornar o resíduo aplicável. O resultado dos valores para as aplicações, apresentado na Tabela 4.4, demonstrou que a construção de estradas é uma excelente opção para o reaproveitamento do rejeito de bauxita numa quantidade expressiva.

Tabela 4.4 - Resultado dos valores para as aplicações.

<b>Aplicação</b>	<b>Valor</b>
<b>Construção de estradas</b>	91,5
<b>Produção de cerâmica vermelha</b>	86,4
<b>Produção de cimento</b>	74,5
<b>Adsorventes</b>	50,9
<b>Imobilizador de rejeito nuclear</b>	44,3
<b>Melhoramento de solos</b>	34,9
<b>Catalisadores</b>	33,0
<b>Geopolímeros</b>	21,3
<b>Extração de elementos estratégicos</b>	8,5

Fonte: SHINOMIYA *et al.* (2015).

Nesse contexto, aplicações em aterros controlados podem ser uma alternativa para o uso em alta escala. No entanto, nem sempre é possível a utilização desse rejeito direto em atividades de terraplenagem visto que o material pode não possuir propriedades geotécnicas que atenda requisitos de projetos, como por exemplo os indicados pelo Dnit 108 de 2009. Para tanto, é necessário adicionar outros materiais na tentativa de torná-lo competente para esse tipo de

atividade. Sá (2004) verificou que adições de rejeitos de minério de ferro nas devidas proporções, em argamassas e concretos produziram melhorias no comportamento destas composições, além de proporcionar redução de custo.

A aplicação do rejeito, proveniente do processo de beneficiamento, para melhorar a resistência dos solos granulares é uma solução importante de ser analisada, posto que a aplicação destes solos na construção de estradas é intensa, permitindo uma vazão significativa para o rejeito produzido na mineração (SOUZA & GUEDES, 2017).

No estudo publicado por Fernandes (2005), o autor utilizou os materiais classificados como resíduos estéreis de itabiritos silicosos (EIS) e dolomíticos (EID), com característica granulométrica de areia e silte. O estudo avaliou a aplicação do rejeito de minério de ferro misturado com solo granular areno-siltoso, na infraestrutura ferroviária. Para demonstrar os resultados do seu trabalho, foram realizados os ensaios de Granulometria, Limites Físicos, Densidade Real dos Grãos (massa específica), Índice de Vazios, Permeabilidade, Compactação de Solos e ISC, Cisalhamento direto e Compressão Triaxial Dinâmica. O estudo constatou que o material resultante atendeu os parâmetros geomecânicos necessário para atendimento ao projeto.

## **4.2 Aterros**

### **4.2.1 Aterro industrial**

A Resolução nº 313 do CONAMA (2002) define o resíduo sólido industrial como material oriundo da atividade industrial seja ele sólido, semissólido, gasoso - quando contido, e líquido – quando suas características impossibilitem o seu descarte na rede de esgoto ou em corpos d'água. Essa resolução chama atenção sobre a obrigatoriedade do controle especial no processo de licenciamento ambiental, visto que esses resíduos possuem particularidades que podem ser nocivas à saúde humana e ao meio ambiente. Sobre a classificação desses resíduos, a NBR 10.004 (ABNT, 2004) diferencia a classe I e classe II como perigosos e não perigosos, respectivamente. Os resíduos classificados como perigosos geralmente possuem atributos de corrosividade, inflamabilidade, patogenicidade e reatividade (ROSINI *et al*, 2020).

Esses resíduos são perigosos e podem levar riscos à saúde pública, culminando em graves doenças além de aumentar os riscos ao meio ambiente. Quanto maior a produção desses

produtos, maior o quantitativo dessas substâncias perigosas, intensificando a exposição da população e do meio, visto a desinformação do que são compostos esses resíduos, e da sua correta de disposição (WENG, 2015).

Nesse sentido, o aterro industrial, ilustrado na Figura 4.3, é o local ideal para destinação dos resíduos supracitados. Essas áreas, necessitam ser ajustadas em conformidade com as normativas operacionais específicas de forma que a disposição final permita a segura confinação em relação ao controle da poluição ambiental e à proteção da saúde (ROSINI *et al.* 2020).

Figura 4.3 - Aterro industrial para disposição de material contaminado.



Fonte: Autor (2023)

#### 4.2.2 Aterro sanitário

O aterro sanitário é o sistema de destinação final dos resíduos sólidos domésticos mais utilizado no Brasil (Carvalho, 2006). Este aterro (Figura 4.4) é a metodologia de disposição mais utilizada no mundo, uma vez que se trata de uma solução mais viável economicamente quando comparada com outros processos, como o de compostagem e de incineração.

A NBR 8419 (ABNT, 1992) define aterro sanitário como um método de disposição de resíduos sólidos no solo, sem a ocorrência de danos à saúde e à segurança, aplicando o conhecimento de engenharia, de tal modo, a armazenar o lixo no menor volume possível, lançando uma cobertura de terra no final do trabalho de cada dia.

Geralmente, confundem-se os termos aterros sanitários, lixões ou depósitos de resíduos. Segundo Carvalho (2006), nos lixões ou depósitos não existem controles de engenharia ou normativas técnicas aplicadas durante a disposição do resíduo e, em virtude disso, recebe

críticas no ponto de vista sanitário. Já o aterro sanitário, é executado de forma controlada para não comprometer a qualidade das águas subterrâneas e do solo.

Figura 4.4 - Aterro sanitário para disposição de lixo urbano.



Fonte: Terra Orgânica, 2020

#### 4.2.3 Aterro compactado

Segundo o DNIT 108 (2009), aterro é definido como “segmentos de rodovia cuja implantação requer depósito de materiais provenientes de cortes e/ou de empréstimos no interior dos limites das seções de projeto (Off sets)”. De forma análoga, esse conceito pode ser aplicado para os demais projetos implantações geotécnicas, uma vez que há necessidade da aplicação desses materiais nos trechos do projeto onde serão executados aterros.

A terraplenagem por sua vez é a técnica utilizada para a construção desses aterros. O DNIT 108 de 2009 define terraplenagem como conjunto de operações de escavação, carga, transporte, descarga e compactação dos solos, utilizadas na construção de aterros e cortes, permitindo que o terreno atenda a geometria e especificação projetada.

Encontram-se relatos de que, há vários séculos, grandes movimentações são executadas pelo homem, os egípcios e os babilônicos, por exemplo, executavam gigantescas obras de terra, como, canais de irrigação às margens dos rios Nilo e Eufrates (FROTA *et al.* 2021).

Segundo Ribeiro (2008), os primeiros registros identificados da compactação são antes de 3500 AC. Nesse período histórico, os incas da América do Sul, executaram uma grande rede de estradas construídas com o uso do trabalho humano. Onde atualmente se encontra o México,

foi localizado um rolo de pedra com cerca de 5 toneladas e 65 cm de diâmetro, muito provavelmente utilizado para compactar as estradas na época, pavimentadas em terra e pedra.

Ainda segundo Ribeiro (2008), o avanço mais expressivo na execução de estradas ocorreu entre os anos 500 AC e 500 DC pelo povo romano. Nessa época, construiu-se uma grande rede de estradas projetadas na Europa. Essas vias foram projetadas com objetivos militares e estratégicos controlando a extensa área geográfica do império romano. Eles misturaram o solo argiloso e siltoso amortecendo entre a fundação em blocos de pedra e a camada mais superficial também em blocos de pedra (RIBEIRO, 2008).

Segundo a Encyclopedia Britannica (2022), na década de 30, surgiram os cilindros com rolo de pneus, para compactarem camadas finas e final de superfícies, o seu peso era entre 6 e 8 toneladas. Os cilindros pés de carneiro utilizados atualmente, foram concebidos nos anos 30 para aplicação em aterros rodoviários e barragens de terra com peso aproximado de 14 toneladas, e pressões de contato entre 2100 a 4100 KPa. A partir daí, desenvolveram-se cilindros na forma de pé de carneiro, com unidade propulsora (ENCYCLOPEDIA BRITANNICA, 2022).

O advento dos cilindros compactadores contribuiu para o desenvolvimento da mecânica dos solos. Vários pesquisadores voltados para os estudos da construção de estradas, trabalharam no desenvolvimento de documentos, classificações e teorias, que serviram de base para os projetos e algumas delas utilizadas na atualidade (França, 2000).

#### *4.2.3.1 Aterro em obras de terraplenagem*

Segundo o DNIT 108 de 2009, as execuções de aterro contemplam a carga, descarga, espalhamento, podendo necessitar ou não de outras correções para atendimento às especificações do projeto. A Figura 4.5 ilustra uma execução de aterro em obra de terraplenagem para construção de rodovia.

Figura 4.5 - Aterro em obras de terraplenagem.



Fonte: Autor (2023)

### 4.3 Estabilização de solos

Nos descritivos dos projetos para implantação de obras geotécnicas constam as especificações técnicas que incluem, dentre outras coisas, os parâmetros dos materiais que serão utilizados para execução da terraplenagem. No entanto, nem sempre é possível obter tais características dos materiais disponíveis nas proximidades do empreendimento, o que pode inviabilizar economicamente a obra, caso seja necessário transportar de longas distâncias os materiais que atendam esses parâmetros. Em função disso, são necessárias algumas ações para adequar os solos. Essas adequações são possíveis através da estabilização dos solos, que se trata de diversos métodos para atingir parâmetros geotécnicos que atendam os solicitados nos projetos.

Na opinião de Neves *et al.* (2009), a estabilização do solo beneficia suas características, alcançando assim as propriedades necessárias ao fim a que se destina. Salgado (2010), ressalta que:

As mais importantes propriedades do solo para uso na construção são: composição granulométrica, plasticidade, retração, umidade e grau de compactação (durante a sua execução). Por meio de procedimentos simples de laboratório, é possível conhecer a granulometria de determinado solo e aferir sobre a sua adequabilidade para a construção.



A análise granulométrica é o processo através do qual se determina os tamanhos das partículas existentes no solo (ARRUDA, 2020). Em função do tamanho dos grãos predominantes, o solo pode ser classificado granulometricamente como arenoso, siltoso ou argiloso. Em relação à mineralogia, alguns solos possuem minerais de argila, que são responsáveis por fornecer sua propriedade plástica. Bruschi (2020) afirma que:

Uma grande quantidade de finas partículas de rocha, cuja granulometria normalmente varia entre areia fina e argila, é produzida no decorrer do processo de beneficiamento. Essas partículas finas e ultrafinas, sem valor comercial, são denominadas de rejeitos de mineração.

Os minerais de argila são originados do intemperismo químico do feldspato, de minerais magnesianos e de micas, além de possuírem na sua composição duas unidades básicas: tetraedro de sílica e octaedro de alumina, que, ao combinarem, formam lâminas, decorrendo na estrutura lamelar das argilas (CARVALHO, 2011).

Uma vez caracterizados os materiais e confirmado o não atendimento aos requisitos técnicos do projeto, é necessário implementar alternativas e técnicas para modificar o material de forma que a nova caracterização atenda as exigências do empreendimento, como por exemplo a estabilização química.

A estabilização química do solo é uma técnica comum e eficaz que aumenta as propriedades físicas do solo. Cimento, cal, gesso, escória e cinzas de mosca são exemplos de aditivos químicos amplamente usados para otimizar as características de compressão e resistência do solo (TA'NEGONBADI & NOORZAD, 2017).

Bruschi (2020) elucida que os rejeitos da mineração são, de uma forma geral, misturas minerais com grande presença de água, e isso se deve à lavagem para a separação das partículas finas das partículas mais grossas. Em virtude disso, é necessário por muitas vezes misturar tais materiais de forma a melhorar suas características geotécnicas.

Nesse contexto, pode-se citar como exemplos a adição de asfalto natural ou palha na produção de adobes para reduzir a permeabilidade ou diminuir a retração, que é uma prática milenar. A compactação com a utilização de equipamentos de terraplenagem, a combinação com outros solos para melhorar suas propriedades granulométricas (denominada estabilização granulométrica) e a adição de aglomerantes, são exemplos de estabilizações bastante difundidas nos dias atuais. Os principais motivos para a realização da estabilização são: melhorar a durabilidade sob ação da água e otimizar sua resistência às ações mecânicas (CARVALHO, 2011).



Existem várias alternativas para o tratamento do solo, como remover o solo de baixa qualidade e substituí-lo por outro de qualidade superior, estruturar a obra para ser executada em um terreno com baixa capacidade de suporte, ou estabilizar o solo existente. No entanto, a escolha da alternativa também deve considerar bases econômicas e práticas, visando a qualidade e custo da obra (BRITO & PARANHOS, 2017).

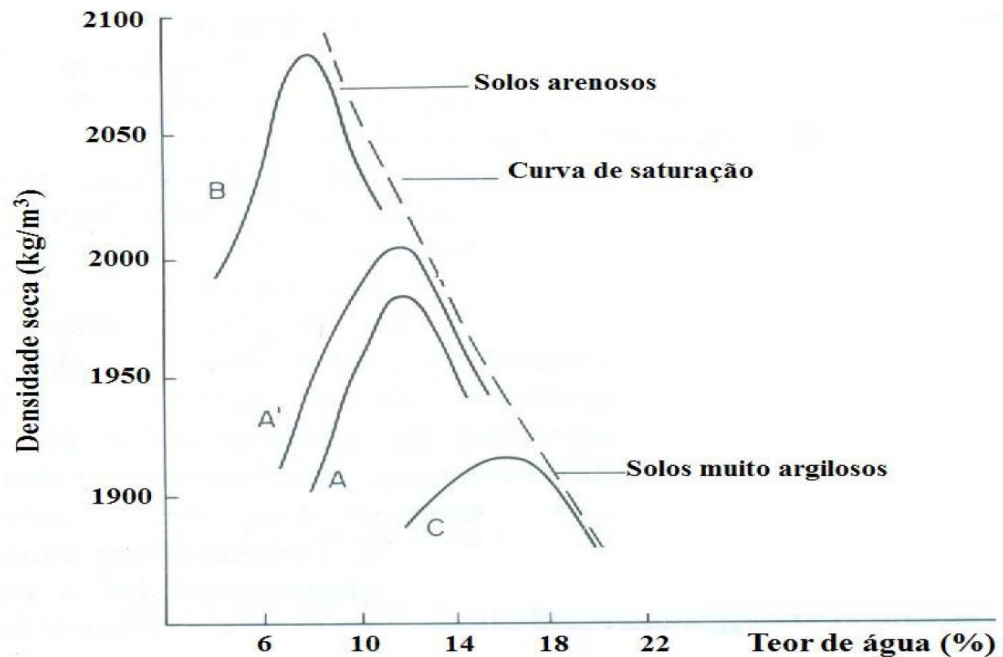
Nem sempre é necessário descartar solos caracterizados inicialmente como de baixa qualidade. Grande parte dele pode ser reutilizada, dando novas funcionalidades, transformando-a e incorporando-a em outros solos, de forma a produzir novos materiais que atendam às demandas de terraplenagem e que sejam mais economicamente viáveis e ambientalmente corretas (SILVA; BRITO; DHIR, 2019).

De acordo com Soliz (2007), uma outra forma de promover melhorias no solo é através da estabilização mecânica, que constitui na aplicação de uma carga ao solo, efetuando, assim, a sua compactação, o que nada mais é do que elevar a densidade do solo, atenuando concomitantemente a sua resistência. No entanto, para que a compactação alcance melhores resultados, são indicados solos constituídos de grãos de variados tamanhos e com uma menor quantidade de argila.

A Figura 4.6 ilustra a variação da densidade seca máxima e da umidade ótima de acordo ao tipo de solo. Solos muito argilosos (Curva C) tendem a possuir as menores densidades secas e as maiores umidades ótimas. Todavia, solos arenosos (Curva B) possuem maiores densidades secas e menores umidades ótimas. No caso de um mesmo solo, aumentando a energia de compactação, a curva desloca-se de A para A', ou seja, a densidade seca aumenta, mantendo-se o valor da umidade ótima.

Outra alternativa comumente utilizada é a correção granulométrica, que combina e mistura dois ou mais tipos de solos, em partes adequadas, resultando em um material homogeneizado. O objetivo final é a garantia da estabilidade do solo e o aumento da resistência através do preenchimento dos vazios pelos grãos das partículas mais finas. De acordo com Pinto (2008), na estabilização por meio da correção granulométrica, as propriedades do solo são alteradas, modificando-se a sua textura. Existem algumas técnicas de estabilização física do solo, das quais é possível citar a correção granulométrica ou a adição de fibras (metálicas, minerais, sintéticas ou vegetais).

Figura 4.6 - Relação de densidade seca e teor de água em solos.



Fonte: SPENSE E COOK (1983).

De outro ponto de vista, no processo de estabilização química do solo, a sua estrutura pode ser modificada, levando a uma maior resistência, menor permeabilidade e compressibilidade do que o solo natural. Essas reações químicas contribuem para que o solo natural possa atingir a umidade ótima e, por conseguinte, uma excelente compactação (MAKUSA, 2013).

Do mesmo modo que solos estabilizados com cimento apresentam modificações nas propriedades dos minerais argilosos, podendo se dar em curto prazo e longo prazo (BRITO & PARANHOS, 2017). Os resultados de curto prazo tendem a predominar no início da estabilização, com as reações dos constituintes anidros do cimento que, segundo Portelinha (2008), quando em presença suficiente de água, hidratam e endurecem devido à processos químicos complexos.

De acordo com Portelinha (2008), o hidróxido de cálcio, proveniente da hidratação do clínquer do cimento Portland, tem sobre os solos argilosos um efeito rápido e bem definido, constatado pelas modificações que ocorrem nos solos estabilizados com uso da cal. Essa melhoria ocasionada pode ser justificada pela ocorrência de fenômenos de troca catiônica, carbonatação, formação de cristais de hidróxido de cálcio e/ou a floculação.

Ferraz & Segantini (2004) afirmam que a ação do cimento em solos com propriedades mais argilosas produz menor estabilização na mistura, uma vez que os minerais argilosos, ao reagirem com o hidróxido de cálcio formado na hidratação dos compostos do cimento, geram a queda do pH, prejudicando a hidratação e o endurecimento do cimento.

No Brasil, a fabricação e a aplicação de solo-cimento é mais intensa em obras de pavimentação (cerca de 90% das bases das rodovias do país são de solo-cimento compactado), reforços e otimização de solos, além de barragens e contenções. No entanto, a principal desvantagem em relação ao solo-cimento é a grande variedade de solos existentes, pois o tipo de solo influencia as propriedades físicas e mecânicas da mistura de solo com cimento (KOLLING & MODOLO, 2012).

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), solos que possuam em sua composição 50% a 90% de areia tendem a produzir solo-cimento com maior durabilidade, sendo que solos argilosos apresentam maior consumo com cimento, além da complexidade na pulverização e estabilização da massa, devido ao baixo percentual de areia. Nas localidades onde os solos predominantes são argilosos, a utilização deste como elemento base de solo-cimento está propício a sua correção, que é possível ocorrer tanto pela mistura de diferentes tipos de solo como pela adição de areia. No entanto, quando é adicionada a areia, existem limites técnicos e econômicos (METZKER, 2019).

Makusa (2013) alerta para que sejam realizados diversos ensaios de laboratórios e testes práticos para avaliação da eficácia dos materiais utilizados na estabilização. A estabilidade, compressibilidade, permeabilidade e durabilidade do volume são as propriedades que devem ser consideradas nos estudos, sendo a compreensão destas características crucial para obter a estabilidade do solo.

## **4.4 Ensaios de Caracterização**

### **4.4.1 Caracterização dos Solos**

Ainda que utilizados os melhores meios de produção, equipamentos e mão-de-obra na execução de um aterro, se não houver uma boa caracterização do material que permita uma aplicação adequada durante a terraplenagem, a probabilidade de ocorrer baixa qualidade na execução, ou até mesmo graves problemas posteriores à construção, é alta. Dessa forma, o

material deve ser caracterizado corretamente, antes da sua aplicação. Assim, destaca-se a importância do Estudo Geológico e Geotécnico, que fornecerão dados e características importantes para concepção de um projeto de aterro.

Os estudos geotécnicos têm por objetivo identificar e determinar os aspectos geomorfológicos do solo e dos materiais utilizados nas obras de terraplenagem. A classificação desses materiais proverá importantes informações para a elaboração e implantação do projeto de terraplenagem, drenagem e demais dimensionamentos (DNIT, IS 101 1994).

Comumente, avalia-se um solo para aplicação em aterros por meio dos ensaios de compactação (Proctor), CBR ou ISC – Índice de Suporte Califórnia, expansibilidade, análise granulométrica por peneiramento ou sedimentação, ensaio físico para determinação dos limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP) e o índice de plasticidade. Braja (2013) reforça que a caracterização dos solos é dada através dos ensaios de granulometria, limites de consistência e densidade real do solo.

Nesse mesmo contexto, a Instrução de Serviço IS-206 (DNIT, 2009) recomenda nas indicações dos ensaios de laboratório a realização da análise granulométrica por peneiramento simples e sedimentação; Limite de Liquidez; Limite de Plasticidade; Ensaio de compactação e Ensaio ISC (índice de suporte califórnia) (DNIT 108, 2009).

#### *4.4.1.1 Granulometria*

De acordo com a NBR 7181 (ABNT, 1988), a análise granulométrica determina o percentual em peso por limite de faixa indicada através do diâmetro máximo das partículas (D<sub>max</sub>), em relação a massa total. Conhecendo o diâmetro máximo, é possível avaliar a espessura das camadas de material e condições para eventual mistura com ligante. Os resultados do ensaio possibilitam a construção da curva granulométrica.

No estudo de Arruda (2020), o autor cita que a análise da dimensão das partículas do solo é executada de duas formas, por peneiramento, quando o solo for composto de partículas visíveis, ou por sedimentação quando for muito fino. O peso da fração de solo que passa em cada peneira é denominado de porcentagem que passa, e apresentado através de gráfico em função da abertura da peneira correspondente. A abertura de cada peneira, então, define o diâmetro equivalente das partículas, visto que não são esféricas. Comumente a menor peneira

utilizada nos laboratórios para esse tipo de ensaio é a de n° 200, que corresponde a abertura de 0,075 mm.

Em posse das informações fornecidas após o ensaio de granulometria, categoriza-se o solo através do sistema de classificação dos solos. Pinto (2006) comenta sobre os dois sistemas de classificação mais utilizados no mundo, o sistema de classificação unificada e o sistema rodoviário de classificação. Eles utilizam os dados da granulometria e os limites de Atterberg para classificar os solos.

Na classificação rodoviária (Figura 4.7), os solos que possuem mais de 35% em massa de suas partículas retidas na peneira n° 200 são classificados como materiais siltosos e argilosos. Aqueles menos de 35% são considerados materiais mais granulares, classificados como excelentes a bons para aplicação por exemplo em subleito.

Figura 4.7 - Classificação de solos – sistema rodoviário.

**CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS: Sugestão do Highway Research Board-HRB adotada pela AASHTO**

Classificação Geral	Materiais granulares (35% ou menos passando na peneira n° 200)							Materiais siltosos e argilosos (mais de 35% passando na peneira n° 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Peneiração: % que passa: N° 10 N° 40 N° 200 (p)	50 máx. 30 máx. 15 máx.	50 máx. 25 máx.	51 mín. 10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração que passa n° 40 Limite de Liquidez - LL (%) Índice de Plasticidade IP (%)	6 máx.		NP	40 máx. 10 máx.	41 mín. 10 máx.	40 máx. 11 mín.	41 mín. 11 mín.	40 máx. 10 máx.	41 mín. 10 máx.	40 máx. 11 mín.	41 mín. 11 mín.
Índice de Grupo	0		0	0		4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais que predominam	Pedra Britada pedregulho e areia		Areia fina	Areia e areia silosa ou argilosa				Solos Siltosos		Solos argilosos	
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom							Fraco a pobre			

Fonte: Manual de Técnicas de Pavimentação (2001).

#### 4.4.1.2 Limites de Atterberg

Compreender as relações entre os limites de Atterberg e a granulometria, possibilita a caracterização dos solos de forma a contribuir para o planejamento da terraplenagem mecanizada prevenindo os efeitos adversos da compactação. Uma das propriedades físicas mais importantes do solo é a granulometria, uma vez que apresenta os quantitativos de areia, silte e argila presentes em sua composição. Solos que possuem grande quantidade de finos, recebem forte influência pela umidade, apresentando variações expressivas nas suas propriedades plásticas. Nesse sentido, a simples avaliação granulométrica não é suficiente para caracterizá-

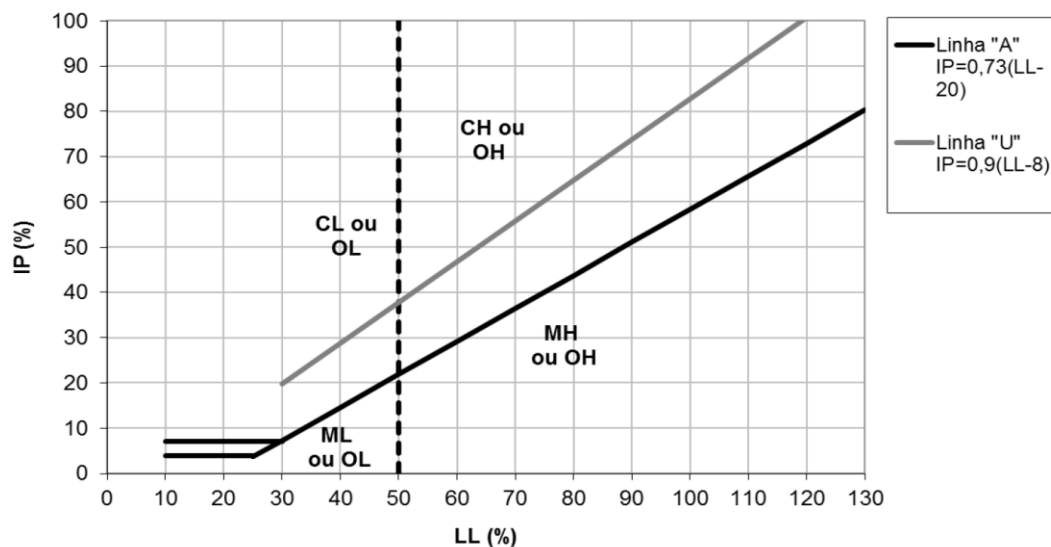
los, recomendando-se a caracterização granulométrica juntamente com a da consistência (RIBEIRO & SOUZA, 2018).

Em função da quantidade de água presentes no solo, eles possuem diferentes tipos de consistência, podendo ser sólida, semissólida, plástica ou a de um fluido denso. Esses valores de teor de umidade diferem esses estados, conhecidos como limites de consistência. Estes limites são encontrados experimentalmente e são usados nos sistemas de classificação do solo (GRECO, 2015).

Em 1948, Casagrande incluiu em seu trabalho o gráfico de plasticidade, cujo índice de plasticidade (IP) é apresentado em função do limite de liquidez (LL). O gráfico é dividido em duas zonas distintas pela linha A [ $IP = 0,73 (LL-20)$ ], permitindo a distinção dos pontos localizados acima da linha A (argilas, representadas pela letra C) e os pontos localizados abaixo da linha (siltes, representados pela letra M). Conforme a ASTM (D2487-17), os siltes e as argilas são classificadas como de baixa (L) plasticidade se  $LL < 50\%$  e alta (H) plasticidades caso  $LL > 50\%$ . Por fim, argilas siltosas de baixa plasticidade, grupo (CL-ML), são determinadas por valores de índice de plasticidade entre 4 e 7 (CREVELIN, 2002).

No gráfico de plasticidade (ASTM, 1990), ilustrado na Figura 4.8, a linha A separa o silte das argilas, nas situações cujo solos são inorgânicos. Os siltes são representados na parte inferior à linha A e as argilas são representadas na parte superior à linha A. A linha U, determinada experimentalmente, determina o limite superior aproximado para solos naturais. Nesse caso, quaisquer resultados de ensaio apresentados acima (ou à esquerda) desta linha U, necessitam ser avaliados (CREVELIN, 2018).

Figura 4.8 - Limites de plasticidade conforme Casagrande.



Fonte: ASTM (1990)

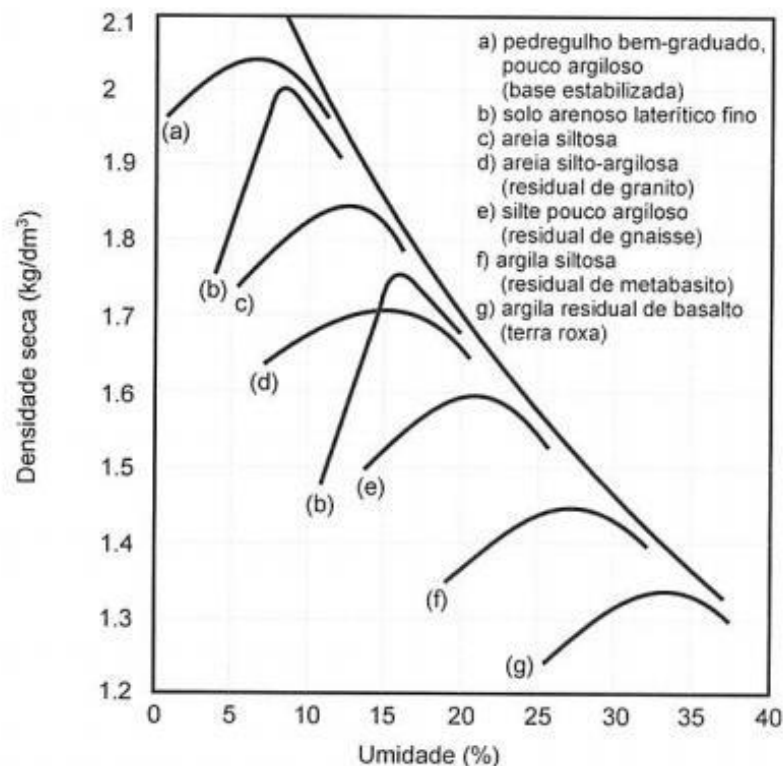
#### 4.4.1.3 Ensaios de compactação

A compactação de um solo é um método geralmente mecânico que tem por objetivo reduzir o volume de seus vazios, ou seja, aumentar sua densidade. Essa densificação do solo pode ser alcançada por meio de equipamento mecânico, como o rolo compactador. Contudo, em alguns casos, como em pequenas valetas, soquetes manuais podem ser utilizados visando aumentar o contato entre as partículas e tornar o aterro mais homogêneo (ARRUDA, 2020).

Velázquez (2016) comenta que a densidade de compactação é um dos aspectos de maior influência na resistência do solo, assim como a permeabilidade. Com o aumento da compactação, a resistência é elevada até um limite máximo e a permeabilidade é reduzida até um valor mínimo aproximado do teor de umidade e, em seguida, começa a aumentar.

Braja & Khaled (2014) definem o grau de compactação como a razão entre a densidade seca e a densidade seca máxima, que aumenta durante a adição de água até um determinado valor ótimo de umidade, a partir do qual começa a reduzir em virtude do excedente de água que começa a ocupar os vazios do solo, afetando a eficiência da compactação. A umidade ótima e a densidade máxima de um solo compõem uma curva de compactação que representa os tipos de solo, assim como mostra a Figura 4.9.

Figura 4.9 - Curva de Compactação.



Fonte: SOUSA PINTO (2006).

Conforme observado por Arruda (2020), densidades secas máximas da ordem de 2 kg/dm<sup>3</sup> a 2,1 kg/dm<sup>3</sup> e umidades ótimas baixas, de aproximadamente 9% a 10%, representam areias com pedregulhos, bem graduadas e pouco argilosas. Enquanto que as areias finas lateríticas, ainda que parte da areia seja mal graduada, chegam a apresentar umidades ótimas de 12% a 14% com pesos específicos secos máximas de 1,9 kg/dm<sup>3</sup>.

#### 4.4.1.4 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

O Índice de Suporte Califórnia (ISC) é definido pela relação entre a resistência a penetração de um cilindro padrão em uma amostra do solo compactado e a resistência a penetração do mesmo cilindro em uma pedra britada padronizada (MALANCONI, 2013). Através desse ensaio é possível conhecer o índice de expansão do solo durante o período de saturação por imersão do corpo de prova. O ensaio é amplamente aplicado no meio rodoviário, normatizado pelo DNER-ME 049/94.

De acordo com Bernucci *et al.* (2008), as etapas para realização desse ensaio são as seguintes:

- a) modelagem do corpo-de-prova: material que passa na peneira ¾", compactado na massa específica e umidade definida no projeto, em um molde cilíndrico de 150 mm de diâmetro e 125 mm de altura, contendo um anel complementar de extensão com 50 mm de altura;
- b) submersão do corpo-de-prova: afunda-se o cilindro contendo a amostra compactada, em um recipiente contendo água, durante quatro dias. Nesse período de imersão é aplicada uma sobrecarga de 4,536 kg sobre o corpo-de-prova, correspondendo a 2,5 polegadas (6,35 cm) de espessura de pavimento sobre o material. É realizado as leituras através de um extensômetro a cada 24 horas, calculando-se a expansão axial do material em relação à altura inicial do corpo-de-prova.
- c) penetração do corpo-de-prova: É realizada o punctionamento na parte superior da amostra por um pistão com aproximadamente 50 mm de diâmetro, sob uma velocidade de 1,25mm/min. Registram-se as pressões do pistão e os deslocamentos correspondentes, permitindo a plotagem de uma curva pressão versus penetração, cujo valores de pressão correspondente a 2,54 mm (P0,1") e 5,08 mm (P0,2"). Estas curvas de pressão versus penetração devem possuir um primeiro trecho basicamente retilíneo, característico de fase elástica, seguido de um trecho curvo, característico da fase plástica.



Segundo Santos, 2009, a granulometria do solo e a constituição mineral de suas partículas afetam fortemente nos resultados dos ensaios. Geralmente, os siltes e os solos com expansão alta apresentam ISC baixo, inferiores a 6%, ao passo que solos finos, arenosos, possuem valores de ISC entre 8% e 20%. Solos com fração de partículas grossas, como pedregulhos e britas, atingem valores para o ISC entre 50% e 100%, podendo ser até maiores.

Nas especificações técnicas DNIT 108 (2009), no que diz respeito a execução do corpo de aterro, os materiais utilizados devem apresentar capacidade de suporte ( $ISC \geq 2\%$ ) e expansão menor ou igual a 4%. A norma prevê ainda que pisos e pavimentos rígidos exigem  $ISC > 8\%$ , enquanto que os pavimentos flexíveis necessitam de valores de  $ISC > 12\%$  (DNIT 108, 2009).

A avaliação da expansão é um parâmetro muito importante, uma vez que se um solo expandir excessivamente, provavelmente ocorrerão graves manifestações patológicas. Sobre os valores adequados para cada etapa de um projeto de terraplenagem, o manual do DNIT 108, 2009 classifica da seguinte forma:

- Sub-base: Expansão  $< 1\%$ ,
- Subleito: Expansão  $< 2\%$ , e
- Reforço do subleito: Expansão  $< 2\%$ .

### 1.3 Mineralogia

Segundo Silva & Marques (2018), a mineralogia é um fator controlador da granulometria, características superficiais das partículas do solo, da mesma forma que influencia na sua resistência e na interação com a fase fluida. Esses aspectos determinam a plasticidade, a expansão, a resistência à compressão e a condutividade da água presente no solo.

Nesse sentido, a mineralogia é imprescindível para o entendimento das propriedades geotécnicas, possibilitando analisar solos pertencentes a locais distintos, mas de mesma mineralogia. Mesmo que não seja possível executar ensaios de laboratório, conhecida a mineralogia, é possível entender os fatores que influenciam na composição e nas propriedades dos materiais, a exemplo dos Limites de Atterberg e Granulometria do solo.

Silva & Marques (2018), fazem uma analogia entre o concreto e a mineralogia, afirmando que esta está relacionada às propriedades do solo, assim como a composição e a estrutura do cimento e dos agregados estão relacionadas ao concreto.

Os materiais argilosos são formados pela decomposição de feldspatos ou de outros minerais aluminossilicatados. Suguio (2003) comenta sobre a existência de três mecanismos de

formação dos minerais de argila, a saber: Herança Detrítica ou Total, cuja formação do argilomineral se dá através de reações ocorridas em outras regiões e, após concluída, é transportado para outros locais, onde mantém-se inerte; Neoformação ou Autigênese, em que o material argiloso é formado pela reação do material amorfo; e Herança por Transformação, em que o material que foi transportado passa por reações químicas.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

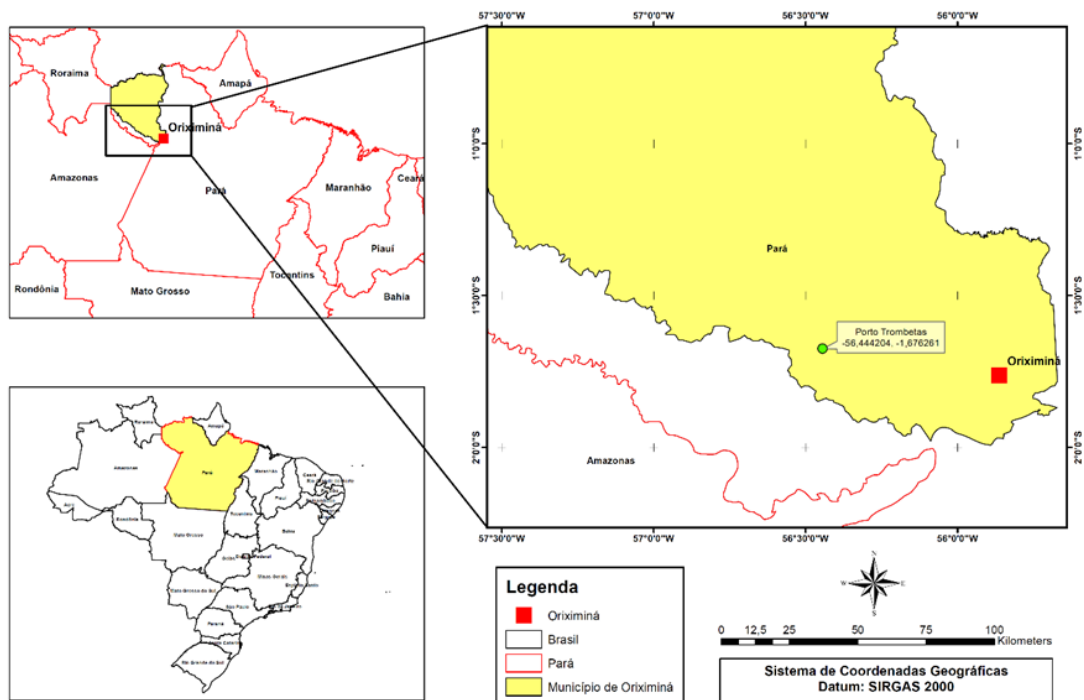
Para a execução do aterro experimental deste trabalho, foram utilizados como materiais argila e rejeito de bauxita de uma mineradora. O programa experimental foi dividido em três etapas: (1) caracterização física e mecânica dos materiais separadamente, (2) determinação e caracterização física e mecânica das misturas de argila e rejeito, e (3) execução do aterro experimental. Nos itens a seguir essas etapas são detalhadas.

### 5.1 Materiais

#### 5.1.1 Localização da mineradora

Este trabalho foi realizado em uma mineradora atuante na cidade de Porto Trombetas - PA, na qual existem diversos reservatórios com rejeito de bauxita já consolidados. A Figura 5.1 mostra a localização da cidade onde foram coletadas as amostras de rejeito utilizadas no trabalho.

Figura 5.1 - Mapa de localização da mineradora.



Fonte: SIRGAS 2000 (adaptado).

### 5.1.2 Depósitos de argila e reservatório de rejeito

As argilas foram coletadas de depósitos na área do terreno da mineradora (áreas 1, 2 e 3), cuja localização e a vista geral estão apresentadas nas Figuras 5.2 e 5.3.

Figura 5.2 - Depósito de argila proximidades das áreas de aterro.



Fonte: Autor (2023).

Figura 5.3 - Depósito de argila representativo da jazida local.



Fonte: Autor (2023).

As bauxitas da região onde está localizada a mineradora são cobertas por argilas que atingem até 20 m de espessura. Essa cobertura argilosa é chamada de Belterra Clay (Argila de Belterra). Durante o processo de lavra, essa camada de argila é retirada de forma a permitir a extração da bauxita e, logo depois, parte dessa argila retornam para as cavas para regularizar a área. No entanto, outra parte desses materiais costumam ser acumulados em áreas diversas dentro do empreendimento e são reaproveitados para construção de diques e outros aterros controlados. O material que compõe estes estoques, a “Argila de Belterra”, possuem coloração predominantemente amarela classificada como argila-siltosa (TRUCKENBRODT E KOTSCHOUBEY, 1981).

O rejeito de bauxita estudado estava localizado em reservatório de secagem desativado, conforme ilustra Figura 5.4.

Figura 5.4 - Reservatório de rejeito adensado utilizado para coleta de material.



Fonte: Mineração Rio do Norte (2022).

O rejeito é composto apenas pelo solo que estava misturado com a bauxita, formado por argila e areia muito fina (silte), que são separadas da bauxita com água sob pressão. Esse processo trata-se de uma lavagem simples, sem uso de produtos químicos.



Figura 5.5 - Processo de lavagem da bauxita.



Fonte: Autor (2023).

Os lançamentos dos rejeitos ocorrem na forma de polpa (água + sólidos), em camadas de 50 cm, com períodos de secagens de 30 dias no período de estiagem e 60 dias no período chuvoso. Após o período de secagem, o material torna-se seco e firme conforme mostra a Figura 5.6.

Figura 5.6 - Rejeito após período de secagem.

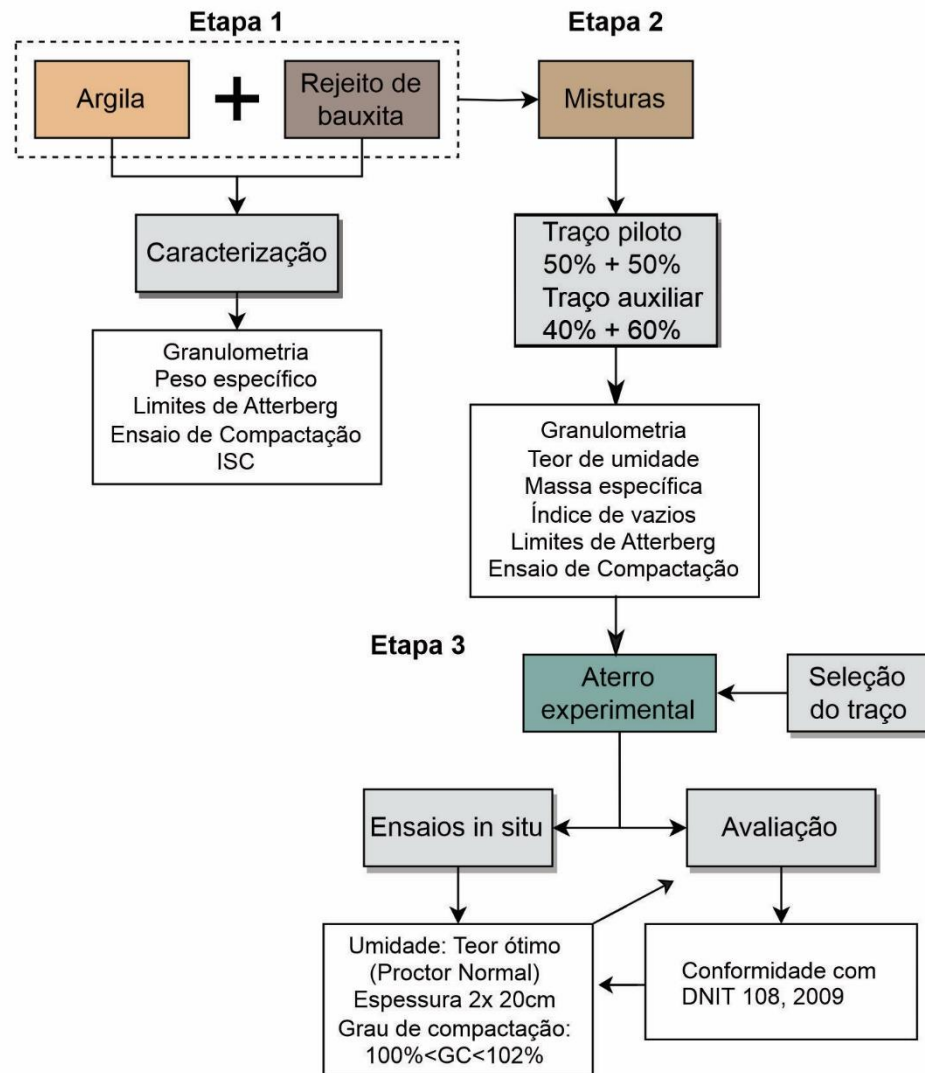


Fonte: Autor (2023).

## 5.2 Métodos

As etapas do projeto estão representadas conforme fluxograma abaixo.

Figura 5.7 – Fluxograma etapas do trabalho.



Fonte: Autor (2023).

### 5.2.1 Coleta dos materiais

Os materiais argilosos foram coletados em depósitos dentro do empreendimento mineral, em amostra representativa da jazida local, para os ensaios tecnológicos de caracterização física e mecânica.

A retirada das amostras de argila obedeceu às seguintes etapas:

1. Limpeza superficial de uma área aproximada de 4 m<sup>2</sup> e profundidade de 20 cm, evitando assim possíveis contaminações;

2. Escavação de aproximadamente 50 cm de profundidade e armazenamento do material em sacos;
3. As etapas anteriores foram replicadas em 4 pontos aleatórios da jazida de argila disponibilizada para esse estudo.

As amostras de rejeito foram coletadas utilizando-se pá e picareta.

## 5.2.2 Caracterização física e mecânica dos materiais

Executou-se uma série de ensaios tecnológicos de caracterização física e mecânica nos rejeitos e também nas argilas coletadas, conforme ensaios descritos a seguir.

### 5.2.2.1 *Análise granulométrica e peso específico dos grãos*

A análise granulométrica dos materiais foi obtida mediante pesquisa em relatórios técnicos do empreendimento, realizados de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2018). Os pesos específicos dos grãos foram determinados seguindo o procedimento apresentado na NBR 6458 (ABNT, 2016).

### 5.2.2.2 *Consistência - Limites de Atterberg*

Os limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP) foram determinados de acordo com as normas NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente.

### 5.2.2.3 *Ensaio de compactação*

Os ensaios de compactação foram realizados na energia do ensaio Proctor normal, conforme descrito na NBR 7182 (ABNT, 2016), para determinação do peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) e da umidade ótima ( $W_{ot}$ ) do rejeito.

### 5.2.2.4 *Ensaio do ISC (Índice de Suporte Califórnia)*

A norma NBR 9895 (ABNT, 2017) foi aplicada para determinar o valor do ISC e da expansão das amostras coletadas.



### 5.3 Determinação das misturas

Em posse dos resultados de caracterização, desenvolveram-se misturas de várias proporções de argila e rejeito de bauxita no laboratório que, posteriormente, foram ensaiadas de modo a identificar as melhores condições geomecânicas do material resultante. Foram analisados parâmetros físicos e mecânicos de um traço piloto de 50% rejeito + 50% de argila amarela. Observando o comportamento do material resultante, a proporção dos materiais foi alterada sempre visando o maior aproveitamento possível do rejeito, mas que atendessem os parâmetros do DNIT 108, 2009, nesse sentido os resultados laboratoriais foram comparados com os indicados para as obras de terra do DNIT108, 2009.

A adoção da proporção da mistura para o aterro o aterro experimental se baseou nas premissas da norma 108 do DNIT 2009, em que o material deverá evidenciar por meio de ensaios de laboratório, capacidade de suporte ( $ISC \geq 2\%$ ) e expansão menor ou igual a 4% (DNIT 108/2009).

### 5.4 Caracterização física e mecânica das misturas

Para avaliação do comportamento geotécnico das misturas de argila e rejeito, a equipe de laboratório realizou os ensaios de caracterização física e mecânica, conforme itens a seguir:

- Análise granulométrica completa (peneiramento e sedimentação), conforme norma NBR 7181 (ABNT, 2018);
- Determinação da umidade natural dos solos ao longo das distintas etapas, ou seja, na sua chegada e após passadas do rolo compactador, conforme (NBR1 6097 ABNT, 2012);
- Determinação da massa específica real dos grãos do solo; (NBR 6458 ABNT, 2016)
- Determinação de índice de vazios máximo e mínimo dos solos não coesivos, conforme NBR 16843 (ABNT, 2020);
- Determinação dos limites de liquidez, conforme norma NBR 6459 (ABNT, 2016);
- Determinação dos limites de plasticidade, conforme norma NBR 7180 (ABNT, 2016);

- Ensaio de compactação na energia do Proctor Normal, conforme norma NBR 7182 (ABNT, 2016).

## 5.5 Aterro experimental

Após concluídas as etapas de ensaios laboratoriais e definida a proporção da mistura ideal, foi realizado um aterro experimental a fim de verificar, na prática, a aplicabilidade do que se definiu no laboratório.

### 5.5.1 Equipamentos / Ferramentas

Os equipamentos utilizados para essa execução, foram fornecidos por uma empresa contratada que realiza serviços de infraestrutura no empreendimento. A Tabela 5.1 e Tabela 5.2 apresentam o detalhamento do tipo e quantidade dos equipamentos utilizados nesta etapa.

O laboratório para liberação de camadas em campo e para coleta dos materiais durante a construção do aterro experimental já estavam mobilizados no projeto.

Tabela 5.1 - Equipamentos para terraplenagem.

Equipamento	Qtd	Modelo	Peso Operacional
Trator de Esteira	1	D6 Cat / D61 Komatsu	20t
Caminhão	3	6x4 bascula 18m3 Scania / Mercedes	40t carregado
Escavadeira	1	Komatsu PC200 / CAT 320	20t
Motoniveladora	1	Cat 140k	15t
Trator Agrícola c/ grade	1	MF7415 – 215cv	12t
Rolo Compactador	1	CA 25 / CA 250	12t

Fonte: Autor (2023).

Tabela 5.2 - Equipamentos topografia.

Equipamento	Quantidade
Tripé	2
Ombrela	1
Bastão	1
Estação total	1
RTK Trimble	2

Fonte: Autor (2023).

### 5.5.2 Execução de aterro experimental

Os aterros experimentais compactados são geralmente executados no intuito de se avaliar a melhor metodologia construtiva, objetivando obter materiais compactados com características geomecânicas que atendam as especificações e estudos de projeto. Essa experimentação permite definir a melhor espessura de camada lançada, tal que se obtenha a densidade desejada do material na faixa de umidade pré-estabelecida, após a compactação. Assim, são selecionados o equipamento de compactação, seu número de passadas, assim como sua velocidade de translação, visando a otimização do serviço. O aterro experimental permite ainda a observação visual do material compactado, identificando eventuais problemas de laminação ou trincas, além de possibilitar a separação de camadas, com o objetivo de investigar a existência de gradiente de compactação.

Nesse sentido, alguns parâmetros do DNIT 108, 2009 foram adotados para avaliação da metodologia construtiva do aterro, conforme tópicos a seguir. As Figuras 5.8 a 5.10 ilustram algumas das etapas executadas no aterro experimental.

Durante a execução não utilizou-se instrumentações visto que o foco desse trabalho é a testagem da aplicabilidade do material, avaliando o atendimento às normas DNIT 108 de 2009.

Figura 5.8 - Lançamento dos materiais.



Fonte: Autor (2023).

Figura 5.9 - Compactação da mistura de 50% de Rejeito / 50% de argila.



Fonte: Autor (2023).

Figura 5.10 - Ensaio de compactação da camada de aterro.



Fonte: Autor (2023).

#### 5.5.2.1 Equipe Técnica

Para o acompanhamento técnico da execução do aterro experimental, e sua posterior análise, foram utilizados os seguintes profissionais:

- Engenheiro de terraplenagem;
- Engenheiro Geotécnico;

- Técnico (Encarregado de terraplenagem) e equipe;
- Técnico de laboratório e equipe;
- Topógrafo e equipe.

#### 5.5.2.2 Variáveis de execução e ensaios in situ

As variáveis analisadas durante a execução do aterro experimental foram as informadas a seguir, conforme prescrições do DNIT (2009):

- Umidade da mistura: identificado o teor de umidade ótima do material verificado no ensaio de compactação na energia do Proctor Normal, o aterro foi executado variando-se o teor de umidade em torno da ótima compreendidos entre  $W_{ot} - 2\%$  e  $W_{ot} + 2\%$ .
- Avaliou-se a eficiência do rolo compactador tipo pé de carneiro (CA25), definindo o número de passadas necessárias para atingir no mínimo 100% de Grau de Compactação (GC).
- Espessura das camadas: foram executadas 2 camadas com 20 cm de espessura cada.
- Grau de Compactação (GC) NBR5681, 2015: Para cada espessura de camada foi avaliado o GC, sendo que GC deve ser entre 100% e menor que 102%. Se porventura ocorresse resultado de alguma camada apresentando  $GC < 95\%$ , mas com desvio de umidade dentro da faixa especificada, serão aplicadas mais passadas do rolo compactador. Na ocorrência de camadas supercompactadas ( $GC > 102\%$ ), ou com desvio de umidade fora da faixa, o trecho será aberto e reiniciado o processo de tratamento do material. (DNIT 108/2009).

#### 5.5.2.3 Planejamento da execução

O aterro experimental foi executado nas proximidades das jazidas de argila e do reservatório que contém o rejeito consolidado. O local é plano com base composta predominante de argila. Durante a execução do aterro, foram avaliados os seguintes pontos:

- Adequação da fundação: remoção de materiais contaminados, solos soltos ou inadequados e regularização de pedras.

- Área: suficiente e que permitiu movimentação segura dos equipamentos, incluindo manobras e acesso seguros para a equipe técnica.
- Área de manobras dos equipamentos: fora da zona de trabalho do aterro.
- Acessos operacionais às áreas de empréstimos: adequação antes do início do aterro experimental.
- Sinalizações de segurança: foram implantadas sinalizações de segurança em todas as áreas e acessos envolvidos no projeto.
- Área de apoio: foi implantada área de apoio aos profissionais envolvidos no projeto.

#### 5.5.2.4 Controle da Construção

Para acompanhamento da execução do aterro experimental, foram executados os controles a seguir:

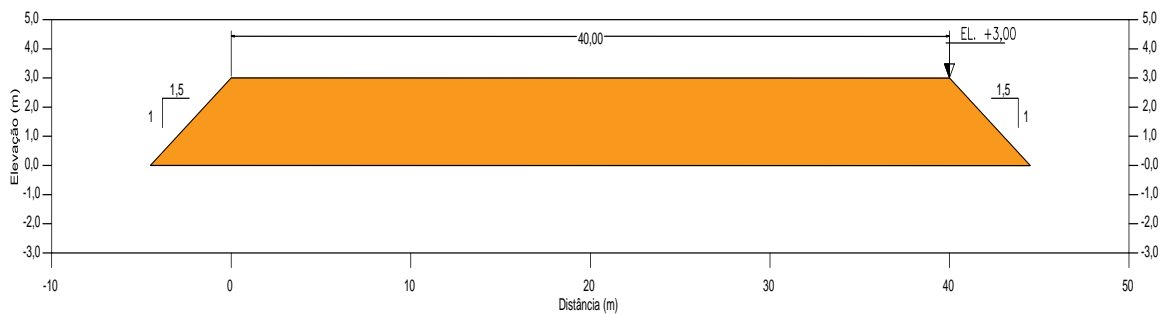
- Verificação da umidade do material nas áreas de empréstimos, tanto no reservatório onde foi extraído o rejeito seco, quanto nas jazidas que dos materiais argilosos.
- Checagem da homogeneidade do material, destorroamento e verificação da umidade após a realização das misturas em campo.
- Verificação da espessura da camada lançada, em pelo menos 5 pontos distribuídos ao longo da pista.
- Verificação do grau de compactação, utilizando o cilindro padrão de ensaio de massa específica aparente “in situ”, conforme norma NBR 9813 (ABNT, 2016).
- Compactação do material misturado nas mesmas proporções do laboratório, em relação ao ensaio Proctor Normal, de modo a obter um grau de compactação médio de 100%.
- Determinação da umidade do material compactado, para avaliação do desvio de umidade. A determinação da umidade foi executada através da frigideira para otimizar os trabalhos no campo. Esse procedimento compreende em secar uma amostra de solo em uma frigideira através de um fogareiro. As grandes vantagens do método são a importante redução no tempo de secagem e a possibilidade de ser empregado

diretamente no campo (TAV|EIRA, 2010). Além disso, para cada unidade determinada no campo uma amostra foi enviada ao laboratório para determinação da umidade em estufa.

#### 5.5.2.5 Layout do aterro experimental

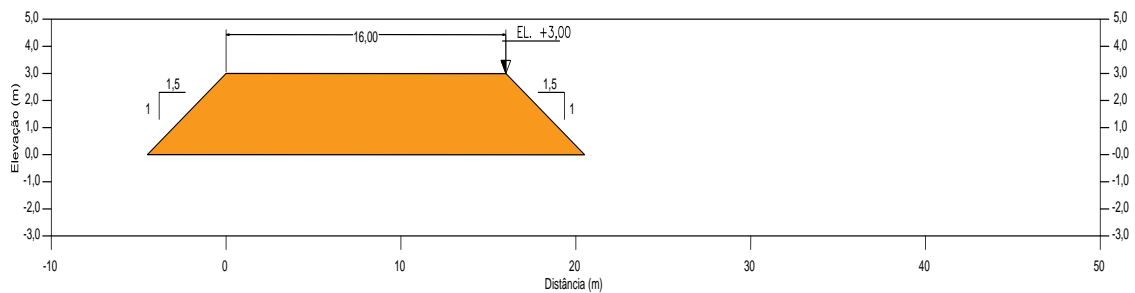
A área disponibilizada no empreendimento é plana, e de área aproximada de 5ha, no entanto foi executado um aterro experimental conforme esquema a seguir. O aterro experimental terá o layout conforme ilustrado na Figura 5.11 e Figura 5.12.

Figura 5.11 - Layout do aterro experimental - vista frontal.



Fonte: Autor (2023).

Figura 5.12 - Layout do aterro experimental - vista lateral.



Fonte: Autor (2023).

#### 5.5.3 Análise e apresentação dos resultados

A avaliação dos resultados foi feita a partir das observações visuais e ensaios executados, permitindo, assim, obter os parâmetros adequados à compactação do material para utilização em aterros, quais sejam:

- Especificação do rolo compactador;
- Velocidade de movimentação do rolo;
- Espessura da camada;
- Número de passadas do rolo compactador;
- Massa específica aparente seca máxima e umidade ótima, e
- Limites seco e úmido para umidade de compactação.



## 6 RESULTADOS

### 6.1 Caracterização dos materiais e das misturas

Os resultados das propriedades físicas e mecânicas do rejeito de bauxita e da argila estudados, bem como das misturas, estão apresentados a seguir, analisados de forma associada, para melhor visualização dos parâmetros geotécnicos investigados.

#### 6.1.1 Análise Química do Rejeito

Apesar de não ser o objetivo do trabalho apresentar a mineralogia dos materiais propostos no estudo, estes foram apresentados como informações complementares, conforme Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Composição química.

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>MgO</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CuO</b>	<b>ZrO<sub>2</sub></b>	<b>*PPC</b>	<b>Total</b>
26,07	16,7	3,62	36,56	0,01	0,03	0,05	0,03	0,01	0,16	16,76	100

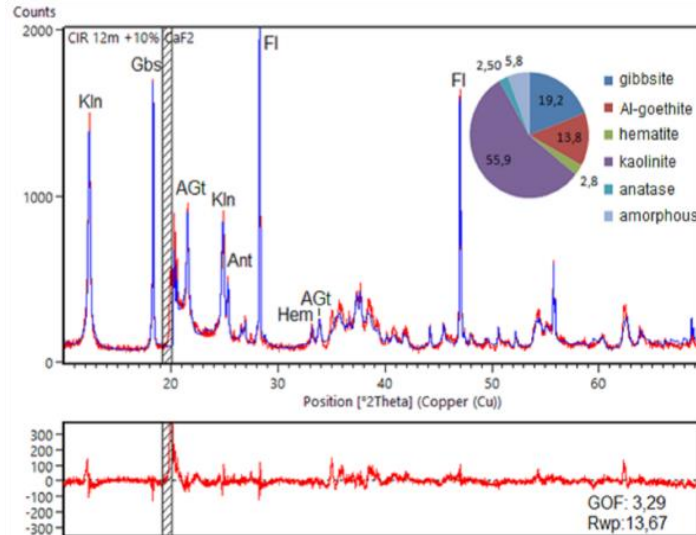
\*PPC = perda por calcinação

Fonte: MRN

A composição química apresentada na tabela acima, mostra o predomínio de aluminossilicatos, uma vez que grande parte da composição do rejeito produzido na mineração objeto desse estudo, é formado por 37% de óxido de alumínio, 26% de dióxido de silício (sílica) e 17% de óxido de ferro.

### 6.1.2 Mineralogia Argila Belterra

Figura 6.1 - Difratomia de raios-X da argila Belterra.



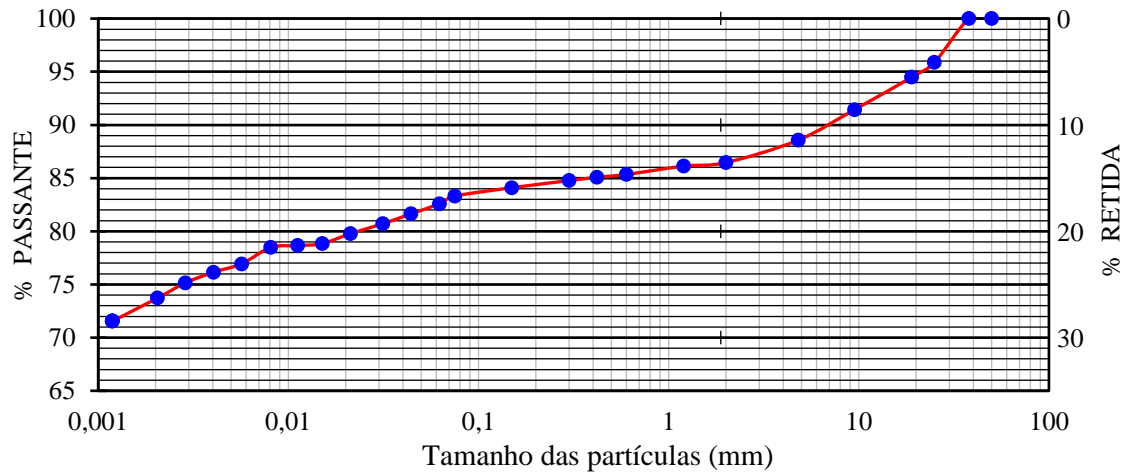
Fonte: Negrão *et al.* (2018)

Conforme indicado na figura 6.1, a argila amarela possui constituição de aproximadamente 55,9% de caulinita, e uma fração considerada de gibbsita com 19,2%. Geralmente os perfis bauxísticos, são constituídos em grande parte de caulinita e quartzo, com maior espessura no meio do platô, reduzindo quando aproximado às suas extremidades.

### 6.1.3 Granulometria

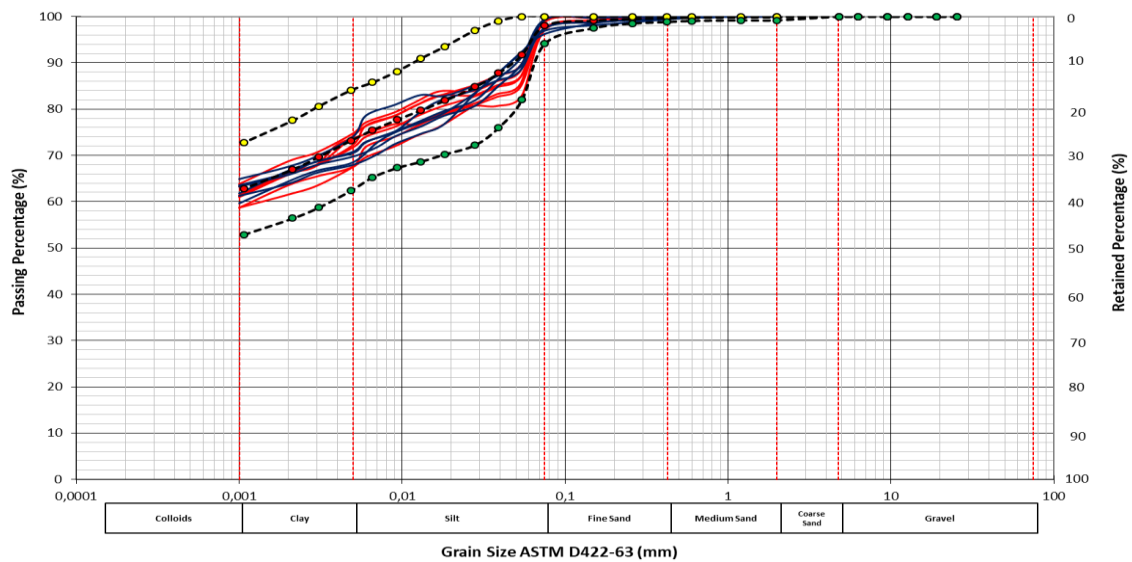
A Figura 6.2 apresenta a curva granulométrica característica da argila coletada na área de empréstimo. As partículas estão distribuídas em 8,9% de silte, 73,6% de argila, 2,6% de areia fina, 1,4% de areia média e 13,5% de pedregulhos. Esse material é classificado como argila de alta plasticidade. A granulometria do rejeito de bauxita é mostrada na Figura 6.3. O rejeito estudado é composto em média por 21,7% de areia, 12,7% de silte e 65,5% de argila. O material é classificado como uma argila arenosa.

Figura 6.2 - Curva de distribuição granulométrica da argila.



Fonte: Autor (2023).

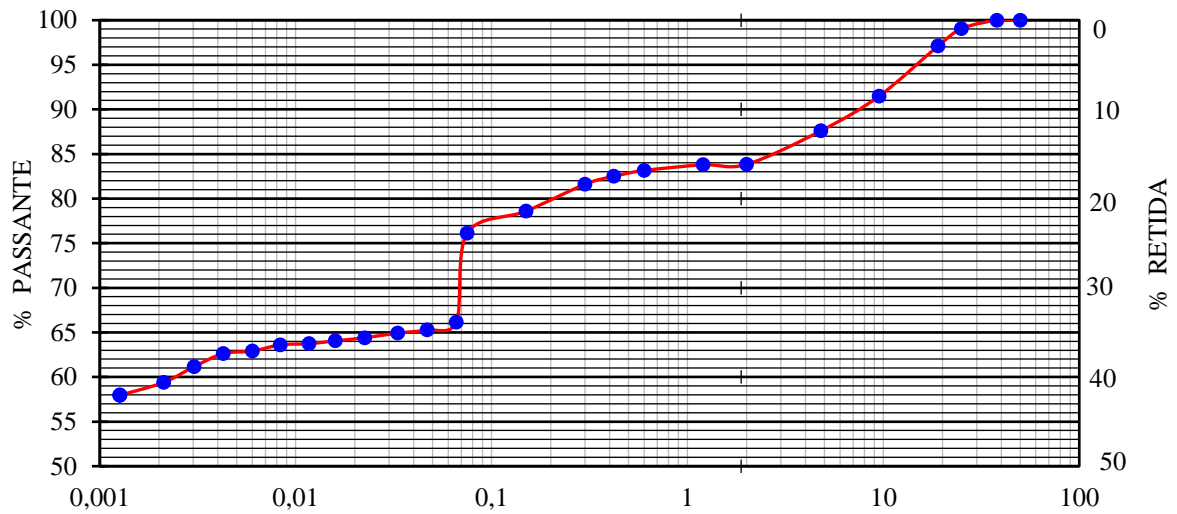
Figura 6.3 - Curva de distribuição granulométrica do rejeito.



Fonte: Autor (2023).

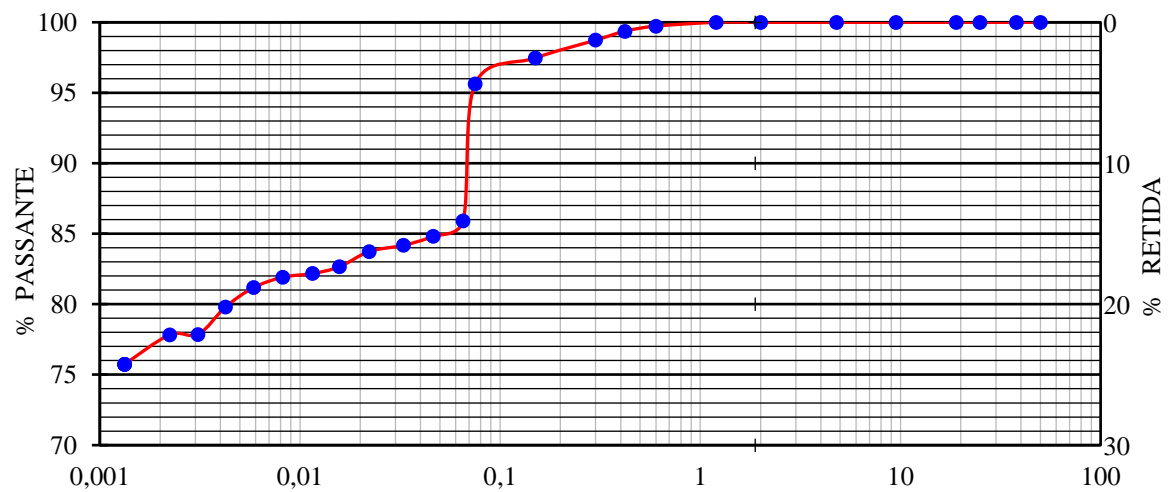
A distribuição granulométrica das misturas é apresentada nas Figuras 6.4 e 6.5. A Tabela 6.2 apresenta o resultado comparativo da composição granulométrica por classificação dos materiais puros e das misturas. Observa-se que com o aumento da quantidade de rejeito, aumentou-se também os percentuais de silte e argila quando comparadas as misturas resultantes.

Figura 6.4 - Curva de distribuição granulométrica da mistura de 50% de rejeito com 50% da argila.



Fonte: Autor (2023).

Figura 6.5 - Curva de distribuição granulométrica da mistura de 60% de rejeito com 40% da argila.



Fonte: Autor (2023).

Tabela 6.2 - Comparativo dos percentuais de composição granulométrica dos materiais.

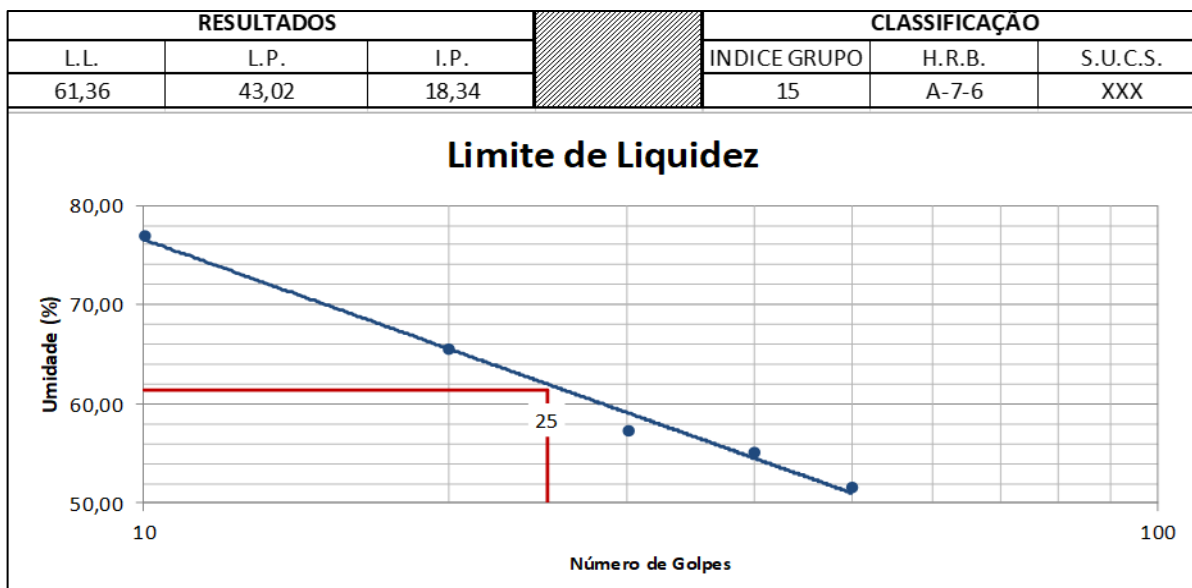
Material	% Pedregulhos	% Areia Fina	% Areia Média	% Silte	% Argila
Rejeito	0	21	0,7	12,7	65,5
Argila	13,5	2,6	1,4	8,9	73,6
50% de rejeito 50% da argila	16,2	16,6	1,3	6,7	59,2
60% de rejeito 40% da argila	0	13,8	0,6	8,3	77,3

Fonte: Autor (2023).

### 6.1.4 Limites de Atterberg

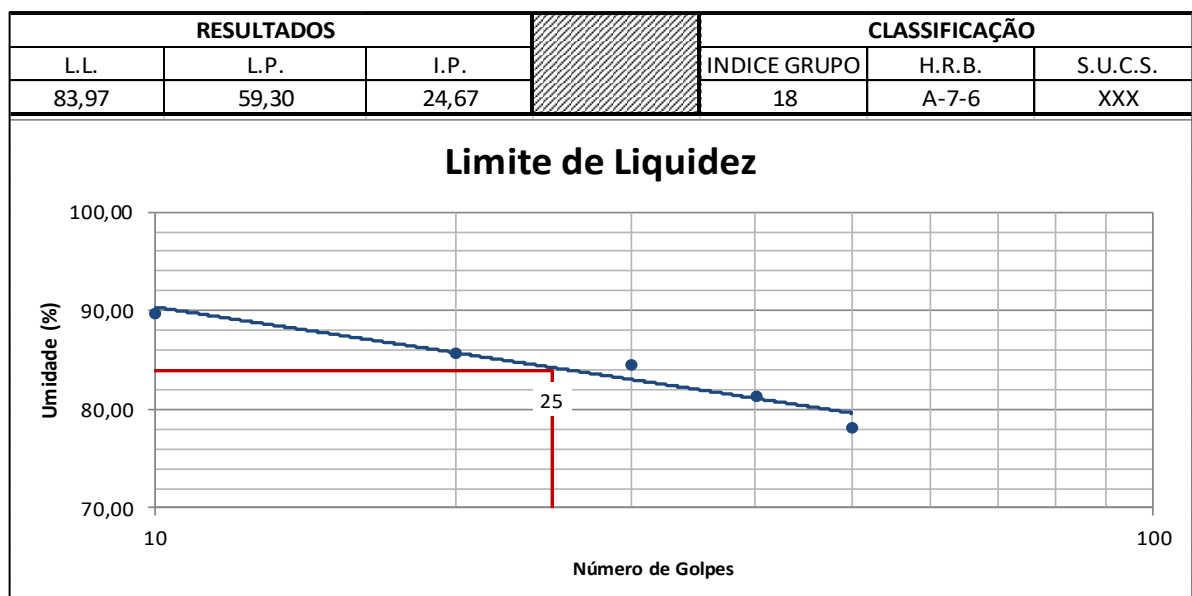
As curvas que relacionam umidade e número de golpes no ensaio de consistência pelos limites de Atterberg são apresentadas nas Figuras 6.6 a 6.9. Os resultados para os limites de liquidez, plasticidade, bem como o índice de plasticidade são mostrados na Tabela 6.3.

Figura 6.6 - Relação umidade x número de golpes do ensaio de consistência do rejeito puro.



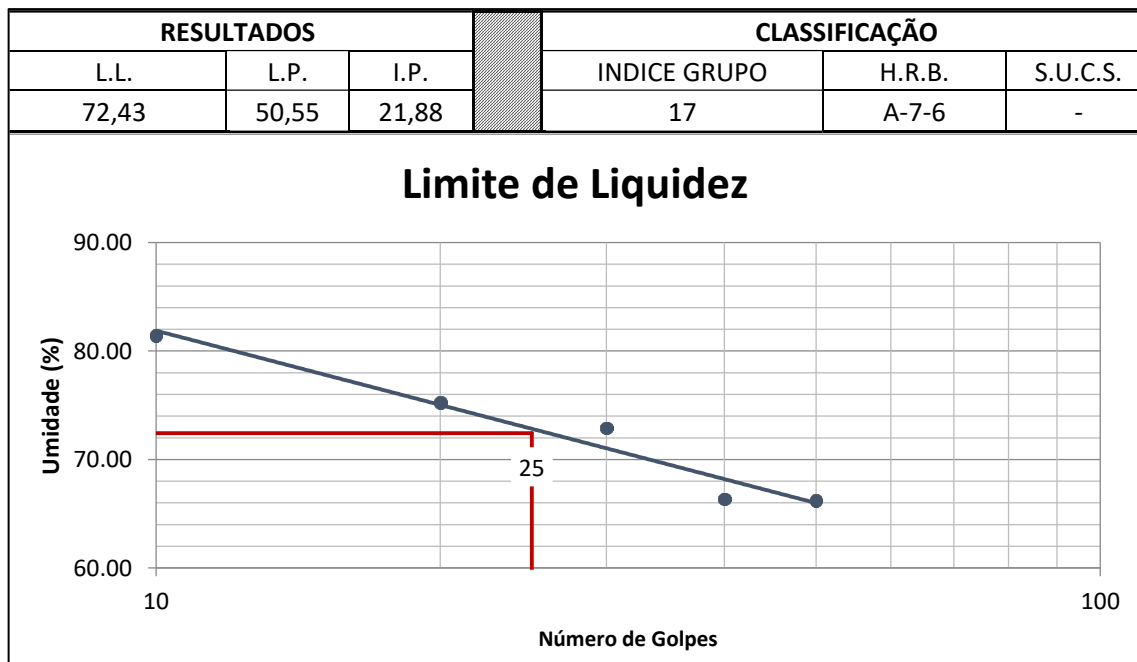
Fonte: Autor (2023).

Figura 6.7 - Relação umidade x número de golpes do ensaio de consistência da argila.



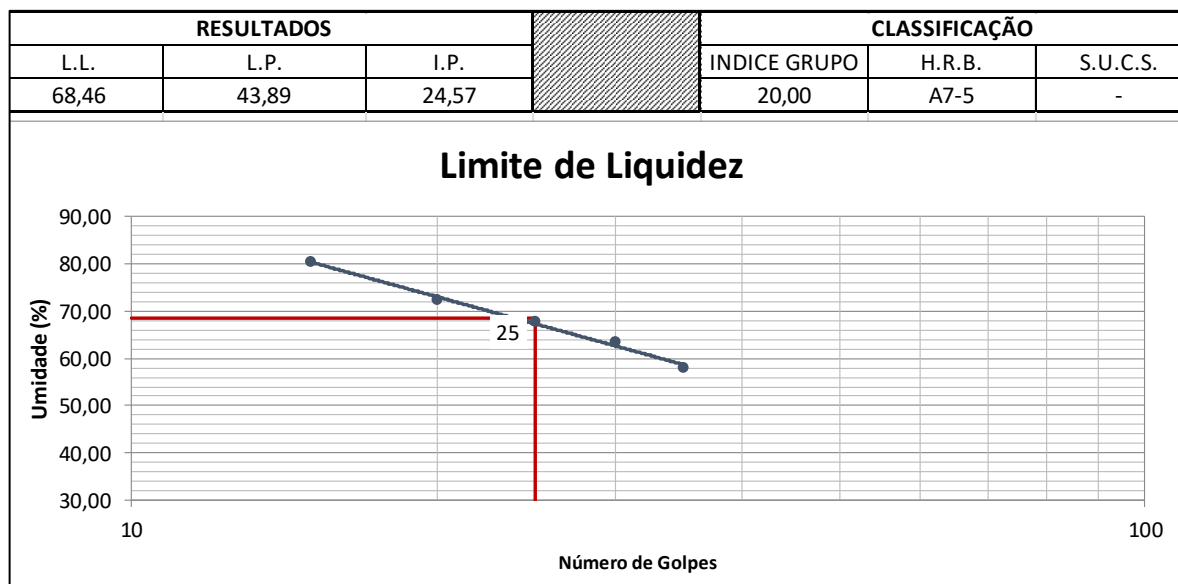
Fonte: Autor (2023).

Figura 6.8 - Relação umidade x número de golpes do ensaio de consistência da mistura de 50% de argila com 50% de rejeito.



Fonte: Autor (2023).

Figura 6.9 - Relação umidade x número de golpes do ensaio de consistência da mistura de 40% de argila com 60% de rejeito.



Fonte: Autor (2023).

Tabela 6.3 - Limites de consistência dos materiais e das misturas.

Material	LL	LP	IP
Rejeito	61,36	43,02	18,34
Argila	83,97	59,30	24,67

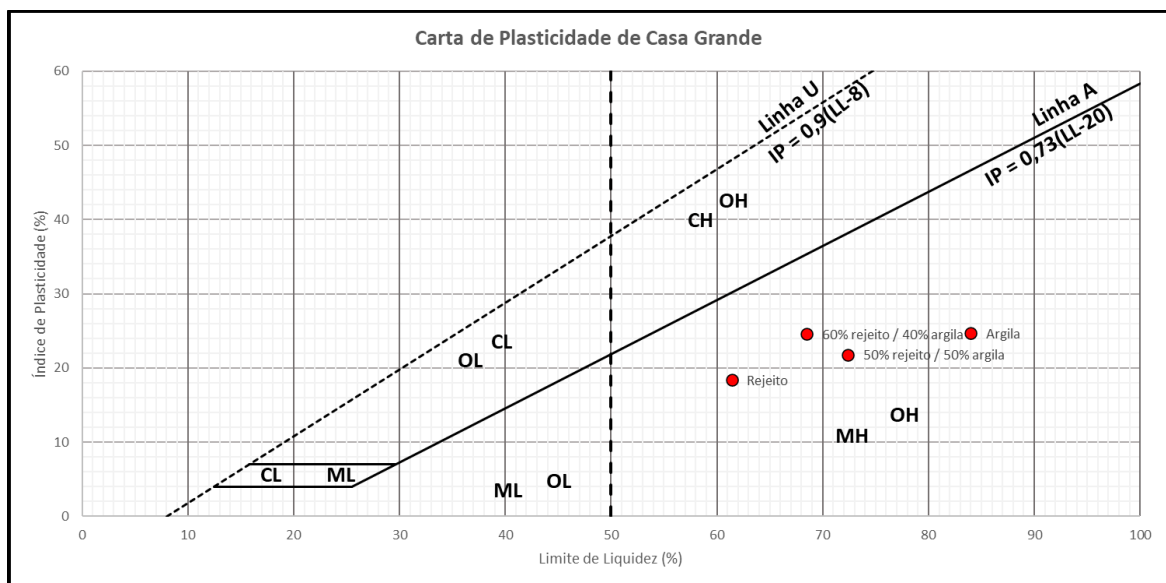
50% de rejeito 50% da argila	72,43	50,55	21,88
60% de rejeito 40% da argila	68,46	43,89	24,57

Fonte: Autor (2023).

A classificação de plasticidade dos materiais em função dos limites de Atterberg, de acordo com a carta de Plasticidade de Casa Grande, são mostrados na Figura 6.10. Os materiais estão situados abaixo da linha A e à direita do limite de liquidez de 50%, o que os caracteriza como Siltes inorgânicos de alta compressibilidade e argilas orgânicas.

A argila utilizada presente no local apresentou alta plasticidade, e influenciou fortemente no resultado do limite de plasticidade do material resultante, principalmente na proporção de 50% de rejeito de bauxita com 50% de argila amarela.

Figura 6.10 - Carta de Plasticidade.



Fonte: Autor (2023).

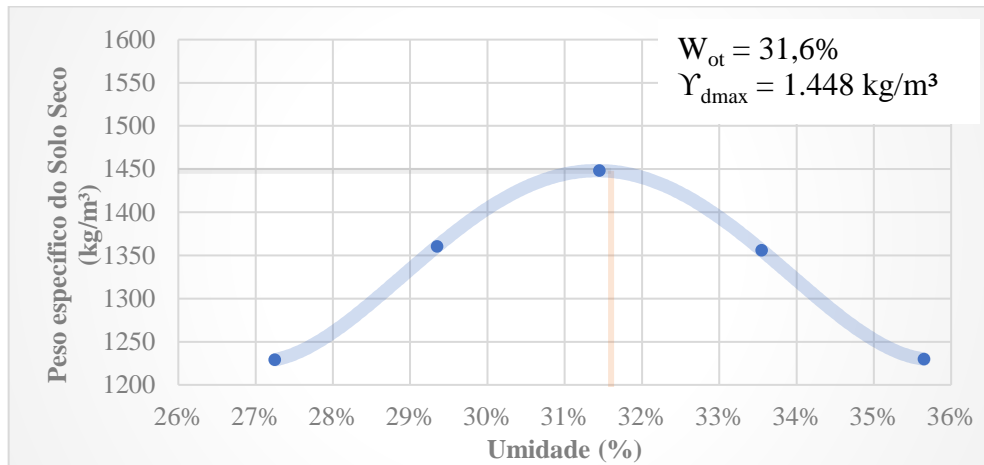
### 6.1.5 Curva de compactação e peso específico

As Figuras 6.11 a 6.14 apresentam o resultado da curva de compactação para o rejeito e para a argila, respectivamente. O rejeito puro da bauxita apresentou, em todas as amostras analisadas, um valor médio de 1.450 kg/m<sup>3</sup> de peso específico dos sólidos seco ( $\gamma_s$ ). Foi possível observar que as amostras são homogêneas, com pouca variação, independente do ponto de coleta.

As amostras de argila analisadas obtiveram um valor médio de  $1.340 \text{ kg/m}^3$  de peso específico dos sólidos seco ( $\gamma_s$ ). As amostras são homogêneas, com pouca variação, independente do ponto de coleta para os materiais provenientes das jazidas naturais. No local, existem também argilas armazenadas, porém, como havia presença de matérias orgânicas e pedriscos, estas não foram objetos de estudo deste trabalho.

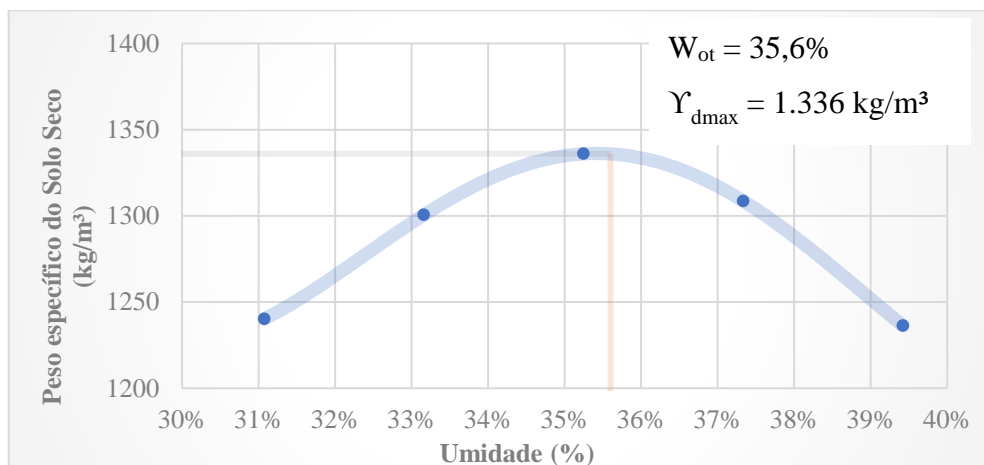
Os resultados extraídos das curvas de compactação foram utilizados como parâmetros para liberação de camadas pela equipe de laboratório durante a execução do aterro experimental.

Figura 6.11 - Curva de compactação do rejeito puro.



Fonte: Autor (2023).

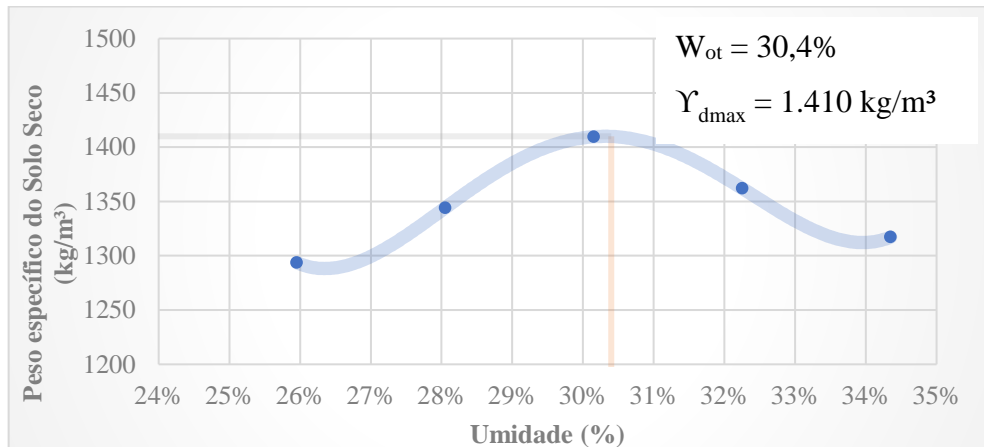
Figura 6.12 - Curva de compactação da argila.



Fonte: Autor (2023).

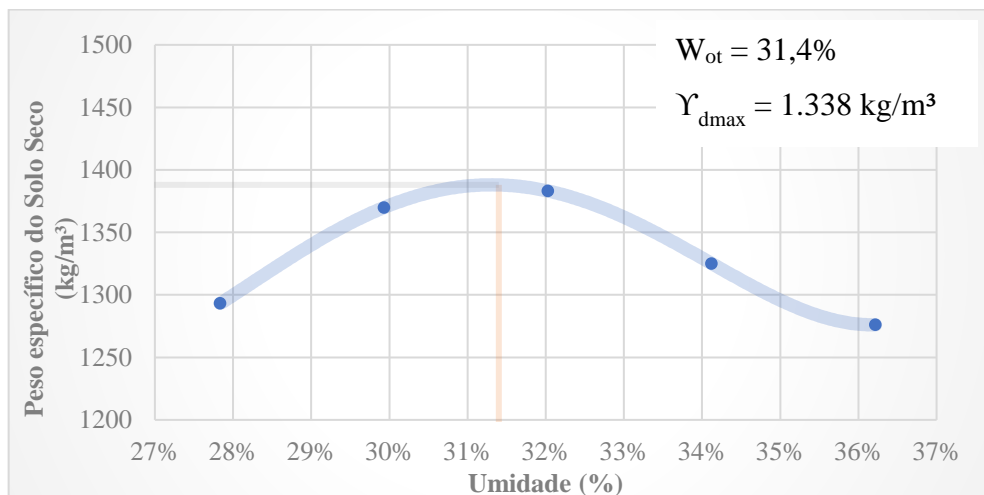


Figura 6.13 - Curva de compactação da mistura de 50% de rejeito com 50% da argila.



Fonte: Autor (2023).

Figura 6.14 - Curva de compactação da mistura de 40% de rejeito com 60% da argila.

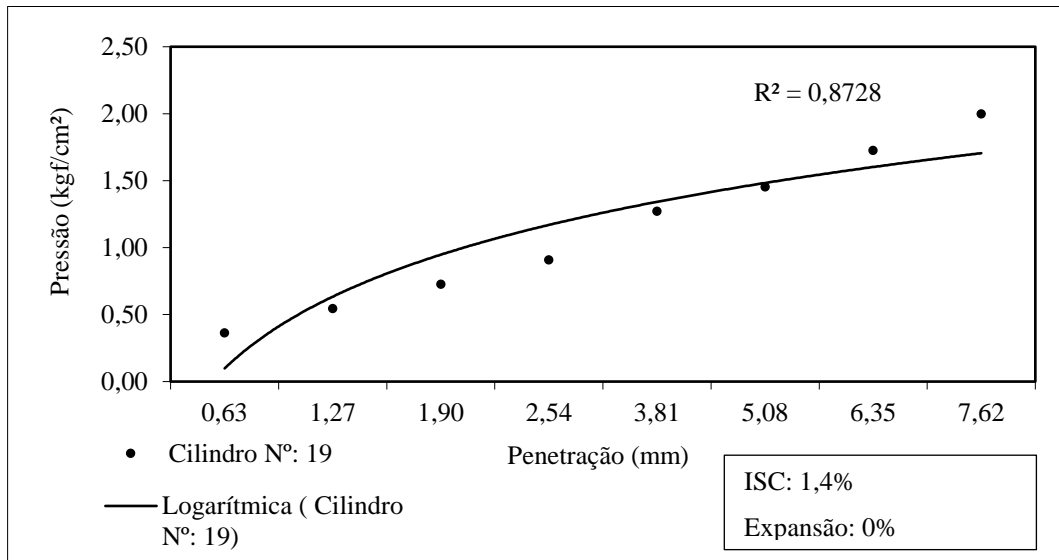


Fonte: Autor (2023).

### 6.1.6 índice de Suporte Califórnia (ISC)

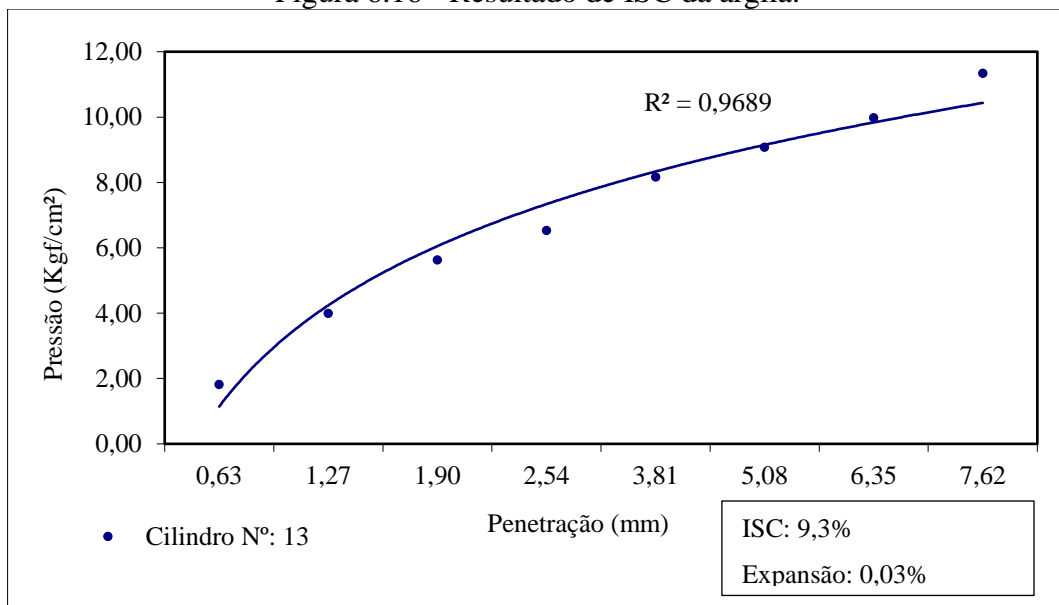
Os resultados do ISC para o rejeito puro e para a argila estão apresentados na Figura 6.15 e Figura 6.16, respectivamente. O rejeito puro apresentou um ISC de 1,7%, e expansão 0%. Muito aquém do que é necessário para utilização em estradas por exemplo. Por outro lado, a argila apresentou ISC de 9,3% e expansão 0,03%, o que por si só já atenderia as premissas de projeto de rodovias para execução do corpo de aterro, inclusive para as camadas finais, uma vez que seu ISC é maior que 6% e sua expansão abaixo de 2%. Nesse sentido o material já possui características geotécnicas favoráveis para atendimento a norma DNIT 108 de 2009.

Figura 6.15 - Resultado de ISC do rejeito puro.



Fonte: Autor (2023).

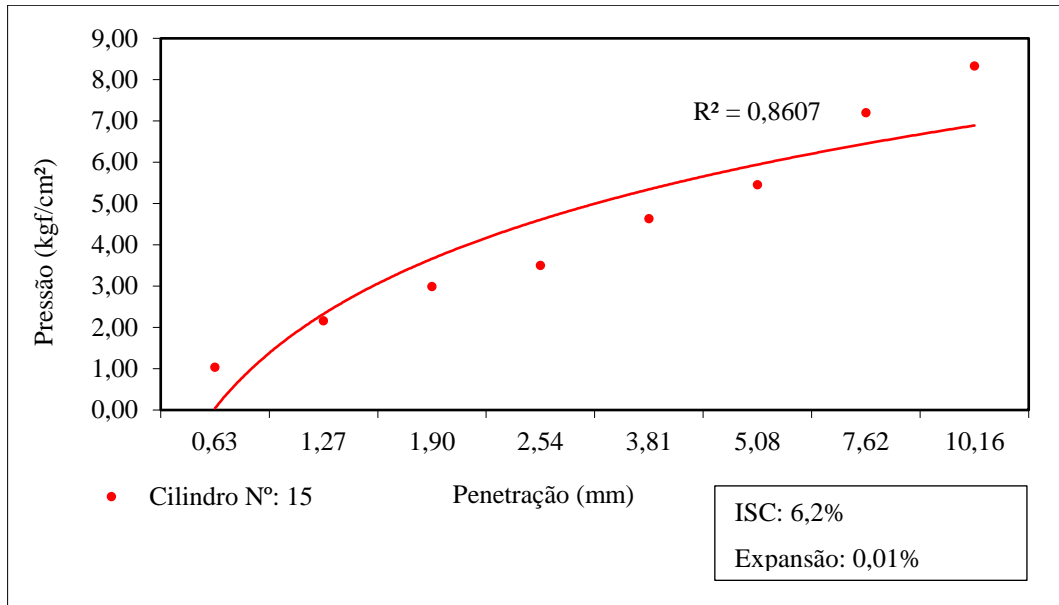
Figura 6.16 - Resultado de ISC da argila.



Fonte: Autor (2023).

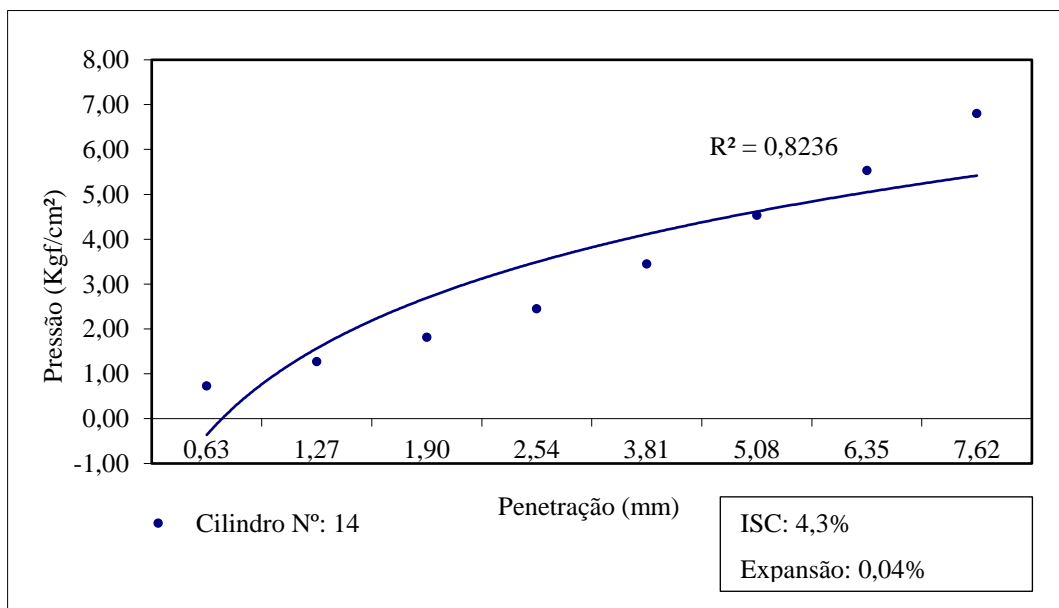
O ISC e a expansão para as misturas são apresentados na Figura 6.17 e Figura 6.18. A Tabela 6.4 resume os valores encontrados para cada material e cada mistura.

Figura 6.17 - Resultado de ISC da mistura de 50% de rejeito e 50% de argila.



Fonte: Autor (2023).

Figura 6.18 - Resultado de ISC da mistura de 60% de rejeito e 40% de argila.



Fonte: Autor (2023).

Tabela 6.4 - Resultados dos ensaios do Índice de Suporte Califórnia.

Material	ISC	Expansão
Rejeito	1,4%	0%
Argila	9,3%	0,03%
50% de rejeito 50% da argila	6,2%	0,01%
60% de rejeito 40% da argila	4,3%	0,04%

Fonte: Autor (2023).

Uma vez que a argila possui índice de suporte maior que o rejeito quando comparado os dois materiais distintamente, esperava-se que quanto maior a adição do rejeito menor o ISC da mistura, o que foi comprovado pelos resultados. As proporções de 50% de argila com 50% de rejeito e 60% de rejeito com 40% de argila, tiveram valores satisfatórios de ISC e expansão para execução do corpo de aterro, uma vez que atenderam o critério DNIT 108, 2009 para material utilizado em corpo de aterro. No entanto, somente a proporção de 50% de rejeito com 50% de argila alcançou valor superior ou igual a 6%, critério exigido pelo DNIT 108, 2009 para as camadas finais do corpo de aterro.

## 6.2 Ensaios *in situ*

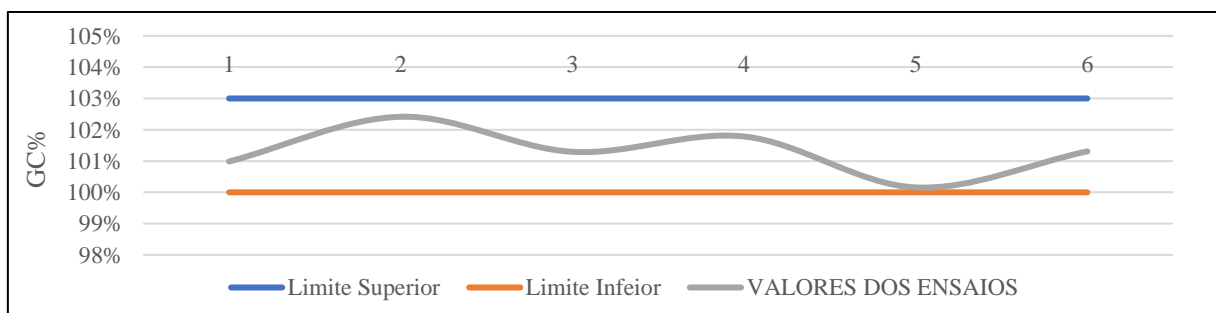
### 6.2.1 Aterro Experimental

A mistura utilizada para execução do aterro experimental foi a proporção de 50% de rejeito com 50% de argila, uma vez que os valores dos ensaios preliminares realizados em laboratório, mostraram que o material resultante atende as especificações da norma 108 do DNIT (2009).

### 6.2.2 Ensaios de compactação e umidade

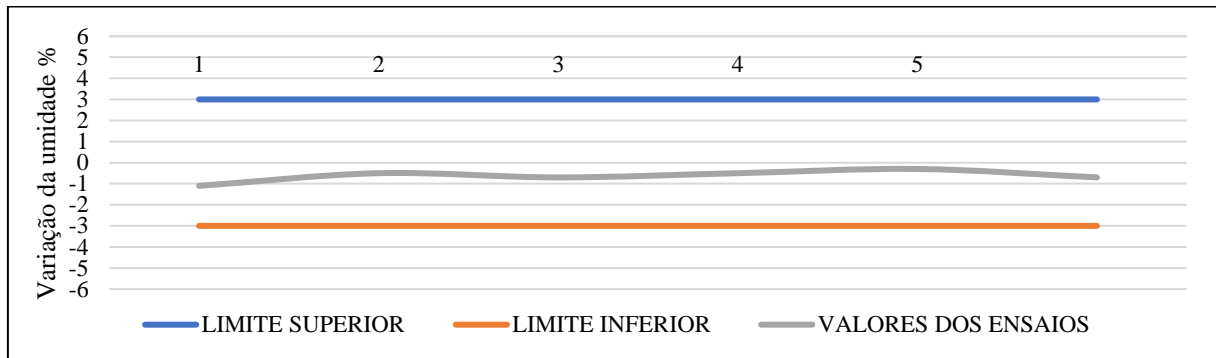
Foram realizados 6 ensaios de compactação (GC) pelo método Hilf para liberação das camadas, como apresentado na Figura 6.19. Todos os ensaios atingiram valores superiores a 100% do grau de compactação, com desvio de umidade atendendo a premissa do DNIT 108, 2009, sendo de  $\pm 3\%$  em relação à umidade ótima, como mostra a Figura 6.20.

Figura 6.19 - Grau de saturação do ensaio de compactação de campo.



Fonte: Autor (2023).

Figura 6.20 - Resultado dos ensaios de umidade do aterro experimental.



Fonte: Autor (2023).

### 6.2.3 Produtividade do rolo compactador

Os dados de produtividade do rolo compactador pé de carneiro modelo CA250 estão apresentados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 - Produtividade do Rolo.

ITEM	REG.	Data	ESTACA	Camada	Espessura (m)	Volume Acumulado (m <sup>3</sup> )	$W_{ot}$	$h$ In Situ	GC%	Dh
1	RG-1	28/10/2022	1+05	0	0,0	0	24,6	23,5	101,0%	-1,1
2	RG-2	28/10/2022	1+00	1	0,20	150	31,8	31,3	102,4%	-0,5
3	RG-3	28/10/2022	0+15	1	0,20	150	26,4	25,7	101,3%	-0,7
4	RG-4	29/10/2022	0+05	2	0,20	300	28,2	27,7	101,8%	-0,5
5	RG-5	29/10/2022	1+00	2	0,20	300	27,5	27,2	100,2%	-0,3
6	RG-6	31/10/2022	0+10	3	0,20	300	27,2	26,5	101,3%	-0,7

Fonte: Autor (2023).

Foram realizadas 2 camadas de aterro nas dimensões de 40 x 16 m, camadas de 20 cm e realizado ensaios para liberação, sendo 2 nas extremidades e um no eixo. A Tabela 6.5 apresenta os resultados de grau de compactação e produção apurada média por número de passadas realizadas pelo compactador.

Tabela 6.5 - Produtividade do Rolo.

Camada	Número de Passadas	Grau de Compactação Média	Produção hora média
01	10	102%	60m <sup>3</sup> /h
02	8	101%	65m <sup>3</sup> /h

Fonte: Autor (2023).

### 6.3 Análise dos ganhos ambientais com reuso do rejeito.

Considerando que para a execução do aterro experimental e/ou outros aterros dentro do empreendimento minerário, ocorre a necessidade de licenciar áreas para obtenção de novas jazidas de argila para o atendimento de execução de obras de terraplenagem. Logo, com a utilização do rejeito de bauxita foi possível estimar, conforme apresentado na Tabela 6.6, que para cada 1 milhão de metros cúbicos de aterro executados, na proporção (50% de argila e 50% de rejeito), deixa-se de suprimir mais de setenta mil metros quadrados de área com cobertura vegetal. Considerou-se o perfil médio de camada de argila, igual a 7m.

Analisando o volume de argila que deixaria de ser consumida, estimou-se um volume total de que quinhentos mil metros cúbicos, implicando diretamente no aumento da vida útil das jazidas disponíveis no local. Ainda, em função do rejeito ser reaproveitado de barragens, o volume retirado converte-se em novos espaços para novas deposições de rejeitos em polpa, ou seja, o uso de rejeitos possibilita a liberação de espaços dentro dos reservatórios.

Tabela 6.6 – Estimativa de benefícios ambientais com a utilização de rejeitos de bauxita na proporção de estudo.

<b>Material</b>	<b>Qtd utilizada Aterro Experimental (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Qtd estimada para cada 1Mm3</b>	<b>Estimativa de ganhos Ambientais</b>
<b>Rejeito</b>	960,00	500.000,00	71.428,57 m <sup>2</sup> de área não desmatada
<b>Argila</b>	960,00	500.000,00	500.000,00 m <sup>3</sup> de argila que deixam de ser consumido.

Fonte: Autor (2023).

## 7 CONCLUSÕES

A partir das análises físico mecânicas dos materiais isolados, observou-se que o rejeito resultante da lavagem da bauxita, com as características apresentada nesse trabalho, quando utilizado em corpos de aterro sem adição de outros materiais, possui propriedades geomecânicas inadequadas quando comparado com as exigências das normas do departamento nacional de infraestrutura de transporte (DNIT). No entanto, ao misturar 50% desse mesmo rejeito, com 50% da argila siltosa de características semelhantes à usada no presente trabalho, ele tende a melhorar suas propriedades geomecânicas.

A partir dos resultados, constatou-se que a mistura atingiu valores para o ISC e expansão dentro da faixa aceitável, conforme orientações do DNIT 108 (2009), possibilitando a sua aplicação em grande escala em corpos de aterro, como por exemplo em preenchimento de cavas, reforços de subleito e reforços de berma nas barragens existentes no empreendimento.

Vale ressaltar que este trabalho utilizou os materiais presentes dentro de um empreendimento específico de forma a possibilitar o reuso do seu rejeito. Os resultados foram apresentados à mineradora que mostrou intenção em utilizar a mistura nos reforços das suas estruturas de aterros compactados, como barragens, estradas, taludes dentre outros. Assim, o presente trabalho atingiu os seus objetivos de melhoria e aplicação em grande escala.

O processo de investigação e avaliação utilizados nesse trabalho, poderão ser aplicados em outros empreendimentos utilizando a mesma metodologia, objetivando o reuso de rejeitos.

Pode-se considerar essas análises preliminares uma vez que demais ensaios complementares não foram realizados, dessa forma, é recomendado como continuidade do estudo, a coleta de amostras indeformadas nos aterros experimentais para ensaios especiais em laboratórios, como os triaxiais e de adensamento, por exemplo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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.** Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_ **NBR 7180: Solo-Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_ **NBR 7181: Solo - Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_ **NBR 7.182: Solo – Ensaio de compactação – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_ **NBR 8419: Apresentação de Projetos de Aterros de Resíduos Sólidos urbanos.** Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_ **NBR 9813: Solo - Determinação da massa específica CIL BIS.** Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_ **NBR 9895: Solo – Índice de Suporte Califórnia.** Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_ **NBR 10.004: Resíduos sólidos - Classificação.** Rio de Janeiro, 2013.

ADIANSYAH, J. S.; ROSANO, R.; VINK, S.; KEIR, G. A framework for a sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies. **Journal of Cleaner Production**, v. 108, p. 1050 – 1062, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Análise de Impacto Regulatório – AIR, ANM, 2020. Disponível em: [https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/regulacao/analise-do-impacto-regulatorio-air/air\\_aproveitamento-de-esteril-rejeitos\\_02-2.pdf](https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/regulacao/analise-do-impacto-regulatorio-air/air_aproveitamento-de-esteril-rejeitos_02-2.pdf). Acesso em 09 de maio de 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas. ANM, Brasília, 2023.

ARRUDA, M. S. Z. J. **Caracterização do Material Proveniente de Usinas de Beneficiamento de Materiais de Construção para Análise de sua Influência na**



**Estabilização de Solos Lateríticos.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO (ABAL). **Cadeia Primária.** Disponível em: <<http://abal.org.br/aluminio/cadeia-primaria/>>. Acesso em 08 de maio de 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Dosagem das misturas de solo-cimento – normas de dosagem.** São Paulo: ABCP, Estudo Técnico ET - 35, 1986. 51p.

BERNUCCI, L.B., MOTTA, L.M., CERATTI, J.A., CERATTI, J.A. **Pavimentação asfáltica – formação básica para engenheiros.** 4ª reimpressão, ed. ABEDA, Rio de Janeiro, 2008.

BRAJA, M. D.; KHALED S. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica.** Tradução da 8ª edição norte-americana. ed. Cengage Learning Nacional, São Paulo, 2014.

BRASIL - Plano Nacional De Mineração. **Ministério de Minas e Energia (MME).** Brasília, 2010. Disponível em: <http://antigo.mme.gov.br/web/guest/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/destaques-do-setor-de-energia/plano-nacional-de-mineracao-2030>. Acesso em 09 de maio de 2022.

BRITO, L. C; PARANHOS, H. S. Estabilização de Solos. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento.** Ed. 6, n 2, v. 1. P. 425-438, 2017.

BRUSCHI, G. J. **Estabilização de rejeitos de mineração de bauxita por meio de um sistema ligante álcali-ativado de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e cal de carbureto.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2020.

CARVALHO, A. L. Análise do Efeito da Estabilização Mecânica e Física em Matrizes de Terra. **Relatório Final de Iniciação Científica** – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro 2011.

CARVALHO, A. R. **Desenvolvimento de um Equipamento para a Determinação de Parâmetros Geotécnicos de Resíduos Sólidos.** 2006. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução n° 307 de 05 de julho de 2002**. Ministério das Cidades - Secretaria Nacional da Habitação. Diário Oficial da União, 2002. Disponível em: [http://conama.mma.gov.br/index.php?option=com\\_sisconama&task=documento.download&iid=19132](http://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=documento.download&iid=19132). Acesso em 28 de julho de 2022.

CREVELIN, L. G. **Comparação entre os valores de Limite De Liquidez obtidos pelos métodos de Casagrande e Cone para diferentes Solos Argilosos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, 2018.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT): **NORMA DNIT 108: Terraplenagem – Aterros – Especificação de Serviço**. Espírito Santo, 2009.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT): Manual de Implantação Básica de Rodovias. **Publicação IPR- 742**, 3ª edição 618p., Rio de Janeiro. 2010.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Diretrizes Básicas para Estudos e Projetos Rodoviários. **Publicação IPR- 717**, 2ª edição, 489p., Rio de Janeiro. 2005.

Encyclopedia Britannica. Disponível em: [www.original.britannica.com](http://www.original.britannica.com). Acesso em: 23 julho 2022.

EVANS, K. The History, Challenges, and New Developments in the Management and Use of Bauxite Residue. **Journal of Sustainable Metallurgy**, v. 2, p. 316–331, 2016.

FERNANDES, Gilberto. **Comportamento de estruturas de pavimentos ferroviários com utilização de solos finos e/ou resíduos de mineração de ferro associados à geossintéticos**. 2005. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

FERRAZ, A. L. N.; SEGANTINI, A. A. S. Estudo da adição de resíduos de argamassa de cimento nas propriedades do solo-cimento. I Conferência latino-americana de construção sustentável, X encontro nacional de tecnologia do ambiente construído, **HOLOS Environment**, v.4, n.1, p. 23-37, 2004.

FRANÇA, A. **Sebenta de Vias de Comunicação II**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto/Portugal 2000.

FROTA, A. G. SANCHES A. E. PINHEIRO E. C. N. M. Execution of earthworking - case study: branch Sulivan Portela in the Municipality of Rio Preto da Eva. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.7, n.12, p. 114106-114123, 2021

GOMES, A. C. F. **Estudo de Aproveitamento de Rejeito de Mineração**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas. Belo Horizonte) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2017.

GRECO, J. A. S. **Solos – conceitos e ensaios da mecânica dos solos: classificação dos solos para fins rodoviários**. 2015. Disponível em: <etg.ufmg.br >. Acesso em 28 outubro. 2022.

GRISA, D. C. e CAPANEMA, L. **VISÃO 2035: Brasil, país desenvolvido Agendas setoriais para o desenvolvimento, Resíduos Sólidos Urbanos**. BNDES, 1ª ed., p. 415-438, 2018.

HAIBIN, L; ZHENLING, L. Recycling Utilization Patterns of Coal Mining Waste in China. **Resources, Conservation and Recycling**, n° 54, p.1331-1340, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (BRAM). **IBRAM afirma que produção mineral, excluindo óleo e gás, cresceu 11% em 2019 (em US\$)**. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/ibram-afirma-que-producao-mineral-excluindo-oleo-e-gas-cresceu-11-em-2019-em-us/>. Acesso em 30 de julho de 2022.

\_\_\_\_\_. **SETOR MINERAL 1º TRIMESTRE 2020**. Disponível em: [https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/PDF\\_DADOS\\_1oTRIM20\\_16ABR20\\_FINAL-1.pdf/](https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/PDF_DADOS_1oTRIM20_16ABR20_FINAL-1.pdf/). Acesso em 01 de agosto de 2022.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **IPT afirma que no período de 2000 a 2014 foram acumulados cerca de 4,86 bilhões de toneladas de rejeitos**. Disponível em: [https://www.ipt.br/noticias\\_interna.php?id\\_noticia=1739](https://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=1739). Acesso em 15 de junho de 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: **ISO 13320**: Particle size analysis - Laser diffraction methods. International Organization for Standardization, [s. l.], 2020.

KOLLING, E. M. TROGELLO, E. MODOLO, A. J. Avaliação da resistência mecânica de diferentes traços de solo-cimento estabilizados com areia. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.7, n. 3, p.185 –191, 2012.

LIMA, M. S. S.; THIVES, L. P.; HARITONOV, V.; BAJARS, K. Red mud application in construction industry: review of benefits and possibilities. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**, v. 251, 2017.

LIU, Y.; NAIDU, R. Hidden values in bauxite residue (red mud): **Recovery of metals. Waste Management**. V. 34, n. 12, p. 2662-2673, 2014.

LUZ, A.B. e LINS, F.F. **Tratamento de Minérios. Introdução ao Tratamento de Minérios**. 6ª edição, CETEM/MCT, cap. 1, p. 3-20, Rio de Janeiro, 2018.

MAKUSA, G. P. **Soil stabilization methods and materials in engineering practice: State of the art review**. Sweden: Lulea University of Technology, 2013. Disponível em: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:997144/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em 01 de agosto de 2022.

MALANCONI, M. **Considerações Sobre Misturas de Solos Tropicais Estabilizados Quimicamente para Uso como Camada de Pavimento Urbano**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 2013.

METZKER, S. L. O. **Qualidade de Tijolos Solo-Cimento com a Inclusão de Resíduos Vegetais e Urbanos**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Biomateriais) - Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG, 2019.

MINERAÇÃO RIO DO NORTE. Disponível em: <http://https://www.mrn.com.br/index.php/pt/>. Acesso em: 23 julho 2022.

MUNIZ, D.H.F.; OLIVEIRA-FILHO, E.C. Metais pesados provenientes de rejeitos de mineração e seus efeitos sobre a saúde e o meio ambiente. **Universitas: Ciências da Saúde**, v. 4, n. 1 / 2, p. 83-100, 2006.

NEGRÃO, L. B. COSTA, M. L. PÖLLMANN, H. The Belterra Clay on the bauxite deposits of Rondon do Pará, Eastern Amazon. **Brazilian Journal of Geology**, v. 48, n. 3, p. 473-484, 2018.

NEVES, C. M. M.; FARIA, O. B.; ROTONDARO, R.; SALAS, P. C.; HOFFMANN. **Seleção de Solos e Métodos de Controle em Construção com Terra – Práticas de Campo**. Rede

Ibero-americana PROTERRA. Disponível em: <<http://www.redproterra.org>>. Acesso em 28 de maio de 2022.

PINTO, A.R.A.G., **Fibras de Carauá e Sisal como Reforço em Matrizes de Solo**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2008.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3ª edição, Editora Oficina de Textos, São Paulo, 2006.

PORTELINHA, F. H. M, **Efeitos da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários: mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2008.

POWER, G., GRAFE, M., KLAUBER, C. Bauxite residues issues: Current management, Disposal and Storage practices. **Hydrometallurgy**, v. 108, p. 33-45, 2011.

RIBEIRO, J. C. J; MENDES, S. F. A participação no fechamento de mina no direito comparado. **Revista Veredas do Direito**, v. 10, n. 20, p. 23-54, 2013.

RIBEIRO, K. D. SOUZA, L. K. Limites de Atterberg e sua Correlação com a Granulometria e Matéria Orgânica dos Solos. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 12, n. 2, p. 185-196, 2018.

RIBEIRO, S. P. T. **Terraplenagem - Metodologia e técnicas de compactação**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto – Portugal, 2008.

ROSINI, D. N. BITTAR, B. D. SIMIONI F. J. BECEGATO V. A. XAVIER J. A. DALALIBERA A. CARDOSO D. C. C. Análise da Viabilidade Econômica e de Risco para Implantação de Um Aterro Industrial para Resíduos Perigosos na Região Serrana de Santa Catarina. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, p. 164-181, 2020.

SÁ, J.A.G. **Análise de Valor e Evolução de Ciclo de Vida: Base para um Modelo de Apoio a Decisão para Aproveitar Rejeitos de Pedreira**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2004.

SALGADO, F. A. **Análise Macro-mecânica do Comportamento da Terra como Revestimento Externo, com ou sem Reforço de Fibras Vegetais**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), PUC-Rio, Brasil, 2010.

SANTOS, O. de S. H. **Reciclagem de um resíduo proveniente do beneficiamento de minério de manganês**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

SENÇO, W. D. E. **Manual de técnicas de pavimentação**. 1ª edição, Editora Pini, volume 2, São Paulo, SP, 2001.

SHINOMIYA, L. D. **Planejamento de Cenários para uso de Resíduos Industriais: aplicação para Lama Vermelha**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos – SP, 2015.

SHINOMIYA, L. D.; GOMES, J. O.; ALVES, J. O. Planejamento de cenários para uso de resíduos industriais: aplicação para lama vermelha. **Revista Gestão em Engenharia**. v. 2, p. 43-66, 2015.

SILVA JUNIOR, F. V.; MARQUES, M. E. S. Caracterização mineralógica de argilas moles presentes nos arredores da reserva natural de Guaratiba: zona oeste do município do Rio de Janeiro. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.9, n.7, p.12-24, 2018.

SILVA, R. V.; BRITO, J. De; DHIR, R. K. Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 236, p. 117629, 2019.

SIRGAS **Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas**, 2000.

SOARES, L, **Tratamento de Minérios. Barragem de Rejeitos**. 5ª Edição, CETEM/MCT, cap. 19, pág. 831–896, Rio de Janeiro, 2010.

SOLIZ, V. V. P. **Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SOUZA, J. V. S. e GUEDES, J. S. M. **O Rejeito de Minério de Ferro d Suas Aplicações na Construção Civil**. *In*: IX Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental, XV Encontro

Nacional de Estudantes de Engenharia Ambiental e III Fórum Latino-Americano de Engenharia e Sustentabilidade, 2017.

SPENCE, R.J.S E COOK, D.J., 1983. **Building Materials in Developing Countries**. 1ª ed., John Wiley & Sons editors, Nova Iorque - EUA, 1983.

SUGUIO, K. **Geologia Sedimentar**. 1ª ed., Blucher, São Paulo, 2003.

TA'NEGONBADI, B. NOORZAD, R. Stabilization of clayey soil using lignosulfonate. **Transportation Geotechnics**, v. 12, p. 45–55, 2017.

TAVEIRA, M. R. SANTOS, M. TAVARES, A. C. S. ALVES JUNIOR, EVANGELISTA, A. W. P. **Determinação do Conteúdo de Água de Solo Pelo Método da Frigideira em um Latossolo Vermelho Escuro**. Disponível em: <http://www.sbpcnet.org.br/livro/63ra/conpeex/mestrado/trabalhos-mestrado/mestrado-marcio-rodrigues.pdf>. Acesso em: Acesso em 28 de maio de 2022.

TRUCKENBRODT, W., KOTSCHOUBEY B. Argila de Belterra - Cobertura Terciária das Bauxitas Amazônicas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 11, n. 3, São Paulo, 1981.

VELÁZQUEZ, L. E. G. **A Influência da Umidade de Compactação na Durabilidade, Rigidez e Resistência de um Solo Fino Artificialmente Cimentado**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

WENBIN, M. A.; SCHOTT, D.; LODEWIJKS, G. A New Procedure for Deep Sea Mining Tailings Disposal, **Minerals**, v. 7, n. 4, 2017.

WENG, Y.-C., FUJIWARA, T., HOUNG, H.J., SUN, C.-H., Li, W.-Y. KUO, Y.-W. Management of Landfill Reclamation with Regard to Biodiversity Preservation, Global Warming Mitigation and Landfill Mining: Experiences from the Asia Pacific Region. **Journal of Cleaner Production**, v. 104, p. 364-373, 2015.

WILLS, B. A. **Mineral Processing Technology – An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery**. Ed. Butterworth-Heinemann, UK, 2011.