



UFOP



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Felipe Ruben Vieira Araújo

Análise do uso de rejeito de bauxita para execução de superfície de conformação de barragens em processo de descaracterização.

Ouro Preto

2023

Análise do uso de rejeito de bauxita para execução de superfície de conformação de barragens em processo de descaracterização.

Felipe Ruben Vieira Araújo

Trabalho Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. D.Sc. Felipe de Campos Loch – UFOP

Co-orientador: Eng. Fernando Gustavo Gonçalves Alves – Pimenta de Ávila Consultoria

Ouro Preto

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A663a Araujo, Felipe Ruben Vieira.

Análise do uso de rejeito de bauxita para execução de superfície de conformação de barragens em processo de descaracterização..

[manuscrito] / Felipe Ruben Vieira Araujo. - 2023.

57 f.

Orientador: Prof. Dr. Felipe de Campos Loch.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Rejeitos (Metalurgia) - Bauxita. 2. Aterros. 3. Sustentabilidade. I. Loch, Felipe de Campos. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Felipe Ruben Vieira Araújo

Análise do uso de rejeito de bauxita para execução de superfície de conformação de barragens em processo de descaracterização

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de engenheiro civil.

Aprovada em 30 de março de 2023

Membros da banca

Prof. Dr. Felipe de Campos Loch - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Eng. Fernando Gustavo Alves Gonçalves - Coorientador (Pimenta D'Ávila Consultoria)
Prof. Dr. Adilson do Lago Leite - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Eng.a Paula Marinho Ferreira - (Pimenta D'Ávila Consultoria)

Prof. Dr. Felipe de Campos Loch, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 04/04/2023



Documento assinado eletronicamente por **Felipe de Campos Loch, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/04/2023, às 16:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0504265** e o código CRC **A41F55FD**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família por todo apoio, suporte e carinho. Em especial, a meus pais Geraldo e Valéria por me proporcionarem a melhor educação e por sempre acreditarem e confiarem em mim, sem eles nada disso seria possível. Ao meu irmão Gustavo e minha namorada Luísa por todo apoio.

Agradeço a todos os professores e a Escola de Minas pelo ensino de excelência.

Agradeço a Pimenta de Ávila por desenvolver meu fascínio e atração pela geotecnia.

Agradeço ao professor Felipe Loch e ao Fernando Gonçalves pela orientação do trabalho.

A todos os amigos da graduação, de infância e de escola que me apoiaram de certa forma e contribuíram para essa conquista: Muito obrigado!

RESUMO

O rejeito de bauxita é um resíduo gerado durante o processo de extração e beneficiamento do minério, que é matéria-prima para produção de alumínio. Esse resíduo é constituído principalmente por argila, óxidos de ferro e dióxido de silício, e pode apresentar características físicas e químicas variáveis, dependendo do processo de beneficiamento e das características da bauxita original. Uma das possibilidades de uso do rejeito de bauxita é em obras de terraplenagem na superfície de conformação de barragens em fechamento. Esse trabalho é um estudo de caso, que busca apresentar e discutir a viabilidade dessa prática por meio da caracterização geotécnica do rejeito, análise de dados de controle tecnológico, análise estatística de aterros experimentais e monitoramento visual pós-obra. A aplicação desse método de utilização de rejeito é de grande importância econômica e ambiental, se mostrando um tópico importante a ser estudado no setor civil/minenário.

Palavras chave: Rejeito de bauxita. Material de construção. Aterro. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Bauxite waste is a residue generated during the processing of bauxite, which is a raw material for aluminum production. This residue consists mainly of clay, iron oxides and silicon dioxide, and may have variable physical and chemical characteristics, depending on the processing process and the characteristics of the original bauxite. One of the possibilities for using bauxite waste is in earthworks on the conformation surface of dams undergoing closure. This work is a case study, which seeks to present and discuss the feasibility of this practice through the geotechnical characterization of the tailings, analysis of technological control data, statistical analysis of experimental landfills and post-construction visual monitoring. The application of this method of using tailings is of great economic and environmental importance, proving to be an important topic to be studied in the civil/mining sector.

Keywords: Bauxite waste. Construction material. Landfill. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fases da vida de uma barragem	13
Figura 2 – Fluxograma de beneficiamento da bauxita	17
Figura 3 – Disposição em pilhas.....	23
Figura 4 – Processo de lavra em tiras	23
Figura 5 – Granulometria seguindo os padrões ASTM.....	27
Figura 6 – Carta de plasticidade de Casagrande.....	28
Figura 7 – Perfil morfológico da região de jazidas de bauxita.....	31
Figura 8 – Perfil estratigráfico das jazidas de bauxita do Porto de Trombetas	32
Figura 9 – Curvas de distribuição do tamanho dos grãos a partir de amostras perturbadas (ASTMD4212)	33
Figura 10 – Histograma de massa específica dos grãos (Gs)	34
Figura 11 – Carta de Plasticidade de Casagrande do rejeito estudado.....	35
Figura 12 – Comparativo entre a compactação com rolo (esquerda) e com trator esteira (direita)	37
Figura 13 – Histograma de frequência acumulada e incremental do grau de compactação.....	38
Figura 14 – Histograma de frequência acumulada e incremental do desvio de umidade	39
Figura 15 – GC em função do número de passadas para camada de 25 centímetros.....	41
Figura 16 – GC em função do número de passadas para camada de 30 centímetros.....	43
Figura 17 – GC em função do número de passadas para camada de 35 centímetros.....	44
Figura 18 – GC em função do número de passadas para camada de 40 centímetros.....	45
Figura 19 – GC em função do número de passadas para camada de 50 centímetros.....	46

Figura 20 – GC em função do número de passadas para camada de 50 centímetros.....	47
Figura 21 – Compilado de ajustes logarítmicos	49
Figura 22 - Superfície de reposta do GC em função de E e P.	51
Figura 23 – Projeção da superfície de reposta do GC em função de E e P. ..	51
Figura 24 – Reservatório 01 - compactação com controle tecnológico	52
Figura 25 – Reservatório 02 - compactação sem controle tecnológico	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição de tipos de bauxita	19
Tabela 2 - Representação dos níveis da fração 3 ²	25
Tabela 3 – Níveis do planejamento fatorial.....	30
Tabela 4 – Tabela resumo de percentuais granulométricos.	34
Tabela 5 – Primeira camada de 25 centímetros de rejeito.....	41
Tabela 6 – Segunda camada de 25 centímetros de rejeito.....	41
Tabela 7 – Primeira camada de 30 centímetros de rejeito.....	42
Tabela 8 – Segunda camada de 30 centímetros de rejeito.....	42
Tabela 9 – Primeira camada de 35 centímetros de rejeito.....	43
Tabela 10 – Segunda camada de 35 centímetros de rejeito.....	43
Tabela 11 – Terceira camada de 35 centímetros de rejeito.....	44
Tabela 12 – Quarta camada de 35 centímetros de rejeito.....	44
Tabela 13 – Camada de 40 centímetros de rejeito	45
Tabela 14 – Camada de 50 centímetros de rejeito	46
Tabela 15 – Camada de 60 centímetros de rejeito	47
Tabela 16 – Composições e resultados de Grau de Compactação.....	49
Tabela 17 – Análise de Variância (ANOVA).	50

LISTA DE SIGLAS

ANM – Agência Nacional de Mineração

CDA - Canadian Dam Association

ASTM - American Society for Testing and Materials

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira Regulatória

Gs – Massa específica dos grãos

E – Espessura da camada

P – Número de passadas

GC – Grau de compactação

SUMÁRIO

1	Introdução	11
1.1	Objetivo	12
1.1.1	Objetivos Específicos.....	12
2	Revisão Bibliográfica.....	13
2.1	Descaracterização e fechamento	13
2.2	Rejeitos da mineração de bauxita	15
2.2.1	Métodos de beneficiamento e extração metalúrgica	16
2.3	Métodos de disposição de rejeito	20
2.3.1	Disposição úmida.....	20
2.3.2	Disposição semi seca	21
2.3.3	Empilhamento	22
2.3.4	Preenchimento de áreas lavradas	23
2.4	Projeto e Análise de Experimentos	24
2.4.1	Planejamento Fatorial $3k$	25
2.4.2	Análise da Variância	25
2.4.3	Modelo de regressão	25
2.4.4	Superfície de Resposta.....	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	Caracterização da área	27
3.2	Caracterização geotécnica do rejeito	27
3.3	Superfície de conformação.....	28

3.4	Aterros experimentais.....	29
3.5	Planejamento Fatorial.....	30
4	Resultados e discussões.....	31
4.1	Dados sobre a caracterização da área.....	31
4.2	Caracterização geotécnica do rejeito	32
4.2.1	Curva de distribuição granulométrica.....	33
4.2.2	Limites de plasticidade.....	35
4.3	Dados de controle tecnológico	36
4.3.1	Superfície de conformação	36
4.3.2	Aterros experimentais	39
4.4	Análise estatística	49
4.5	Pós-obra.....	52
5	Conclusões	54
	Referências.....	55

1 INTRODUÇÃO

A indústria de mineração é forte e bastante presente no território brasileiro, a qual contribui significativamente para o desenvolvimento socioeconômico do país. Além disso, o Brasil é considerado um dos países de maior potencial mineral do mundo. A exploração desses recursos, no entanto, traz consigo a geração de altas quantidades de rejeitos resultantes do processo de beneficiamento do minério. Nesse sentido, há a necessidade de se construir estruturas capazes de armazenar esses rejeitos, dadas as legislações ambientais que proíbem o lançamento deste material no meio ambiente sem o devido tratamento.

O rompimento recente de barragens brasileiras como Fundão em 2015 (MORGENSTERN *et al.* 2016) e Brumadinho em 2019 (ROBERTSON *et al.* 2019) levantou a preocupação dos órgãos públicos e houve aumento das ações de fiscalização e criação de legislações acerca das barragens de rejeito. Dessa forma, expandiu-se a demanda por projetos e consultoria geotécnica, sendo a devolução da área de depósito de grande importância para os órgãos ambientais fiscalizadores.

Para uma barragem de rejeitos ser considerada descaracterizada, segundo Resolução 130/2023 da ANM, a estrutura não pode receber, permanentemente, aporte de rejeitos e/ou sedimentos oriundos de sua atividade fim, deve deixar de possuir características ou funções de uma barragem, ou seja, devem ser retirados todas as infraestruturas associadas, como por exemplo, tubulações, extravasores, espigotes, dentre outras. Além disso, essa estrutura deve sofrer medidas efetivas para reduzir ou eliminar o aporte e acúmulo de água no seu interior, deve estar estabilizada fisicamente e quimicamente, e deve ser monitorada continuamente a fim de se verificar a eficácia das medidas adotadas.

Nesse processo surge a oportunidade de se utilizar o próprio rejeito armazenado na estrutura para executar processos de conformação de superfície no reservatório a fim de garantir a drenagem superficial, seguindo as premissas da resolução da ANM.

Neste trabalho foi analisado o uso do rejeito de bauxita, após processo de secagem, como material de construção para aterros (terraplenagem) em superfícies de conformação de barragens de rejeito em processo de descaracterização.

1.1 Objetivo

Avaliar o uso de rejeito de bauxita em camadas de aterro para conformação da superfície de barragens de terra em processo de descaracterização.

1.1.1 Objetivos Específicos

Para o atendimento ao objetivo geral foi aplicado os seguintes objetivos específicos:

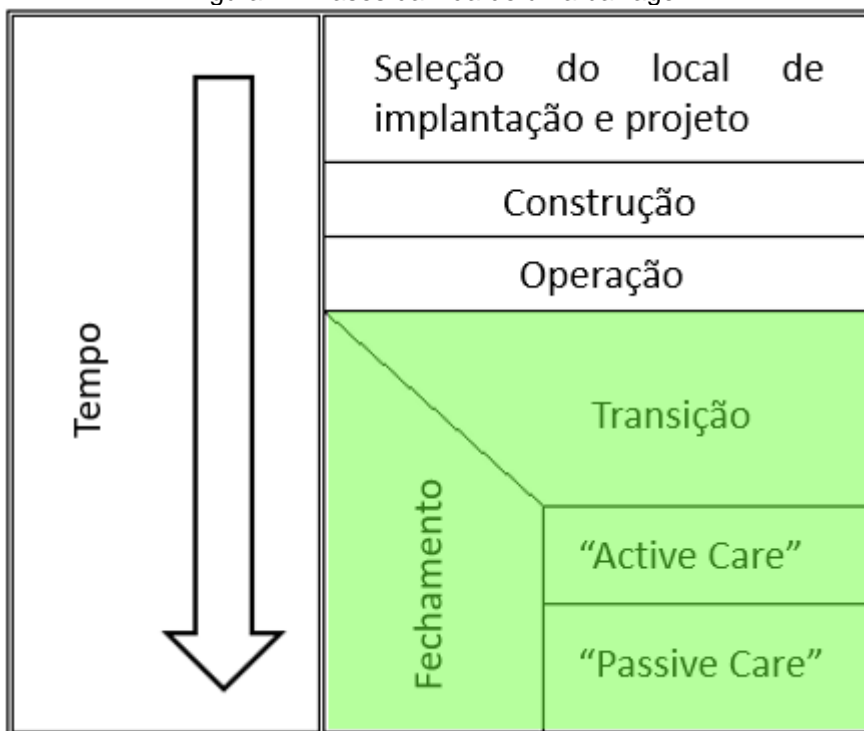
- Caracterização do rejeito de bauxita
- Análise de dados de controle tecnológico;
- Análise de aterros experimentais;
- Monitoramento pós-obra

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Descaracterização e fechamento

Uma barragem de rejeitos tem fases de vida e a durabilidade destas é diretamente proporcional ao tamanho e aporte de sedimentos dessa estrutura. A *Canadian Dam Association* (CDA) é um grupo de proprietários, operadores, reguladores, consultores, fornecedores e acadêmicos interessados em barragens e reservatórios com o objetivo de incentivar a cooperação, promover o conhecimento técnico e desenvolver competências relacionadas a barragens. A imagem adaptada de uma apresentação do comitê, define bem como se porta esse tipo de depósito durante o tempo.

Figura 1 – Fases da vida de uma barragem



Fonte: CDA (2014)

O período de fechamento é a fase final da vida de uma barragem e pode ser dividido em Transição, “*Active Care*” (cuidado ativo) e “*Passive Care*” (cuidado passivo).

No período de Transição a barragem de rejeitos já foi retirada do mapa de disposição de rejeitos de fato, ou seja, os rejeitos produzidos pela planta de beneficiamento não são destinados para aquela barragem. Nesse período também ocorre o descomissionamento das estruturas relacionadas à operação (como espigotes e tubulação) e a reconfiguração da superfície do reservatório, etapa objeto de estudo desse trabalho, a fim de direcionar a drenagem superficial para estruturas extravasoras.

A partir da etapa de transição, no cuidado ativo, são realizadas manutenções e inspeções visuais das condições físicas da estrutura, monitoramento de indicadores importantes como redução e estabilização de poropressão no interior do reservatório e verificar a formação de erosões na superfície de conformação.

A etapa de cuidado passivo se inicia quando alcançados valores estabilizados para os indicadores da etapa de cuidado ativo, diz respeito também ao decorrer do tempo e ganho de robustez estatísticas de dados de monitoramento que subsidiam análises mais assertivas da condição da barragem de rejeitos.

A Resolução ANM (Agência Nacional de Mineração) nº 130, de 24 de fevereiro de 2023, que consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração, dispõe de conceitos sobre os diversos estágios de vida de uma estrutura de contenção de rejeitos.

Segundo o documento uma barragem descaracterizada é uma “estrutura que não recebe, permanentemente, aporte de rejeitos e/ou sedimentos oriundos de sua atividade fim, a qual deixa de possuir características ou de exercer função de barragem, de acordo com projeto técnico”. A Resolução ainda exige que as etapas de descomissionamento, controle hidrológico e hidrogeológico, estabilização e monitoramento sejam concluídas para que a barragem seja considerada descaracterizada.

No que diz respeito às etapas citadas, o conceito de descomissionamento se baseia no encerramento das operações e retirada completa de estruturas de

funcionamento da barragem, com exceção daquelas que garantem a segurança do depósito.

O controle hidrológico e hidrogeológico tem como principal indicativo a redução ou extinção de água no interior do reservatório, sejam elas superficiais ou subterrâneas. Esse acúmulo de água pode gerar excesso de poropressão, causando um decréscimo na tensão efetiva entre as partículas de solo, que por sua vez ficam mais instáveis e sujeitas ao colapso dependendo da magnitude dessa redução.

O rejeito produzido pelas indústrias mineradoras, muitas vezes, é tóxico e deve ser tratado antes de ser incorporado novamente a natureza. O item que define estabilização, contemplado na Resolução, dispõe sobre este aspecto no que tange à estabilidade química. No caso do rejeito em questão, conforme descrito no item 4.2, por ser não perigoso e inerte, não serão desenvolvidas discussões a respeito de seus aspectos químicos durante o período de fechamento.

A respeito da aplicação específica do rejeito seco como material de construção da superfície de conformação, por seu caráter “não estrutural”, o monitoramento avalia, principalmente, aspectos referentes ao desempenho. Durante esta etapa, portanto, as principais características de interesse podem ser avaliadas, basicamente, por condições visuais quanto à formação de trincas (de grande ou pequena magnitudes) e por meio do monitoramento dos recalques ocorridos em função do adensamento do material.

Além disso, a Resolução 130 também exige um período mínimo de monitoramento da estrutura de 2 (dois) anos após a conclusão das obras de descaracterização, a fim de assegurar que as medidas de estabilização foram, de fato, efetivas. Nesse contexto, empresas de consultoria da área realizam monitoramento contínuo da estrutura, por meio do acompanhamento da instrumentação geotécnica, muitas vezes estendendo-se, até mesmo, após o período mínimo recomendado pela Resolução a fim de assegurar a segurança da estrutura, caso necessário.

2.2 Rejeitos da mineração de bauxita

A bauxita é a fonte natural do alumínio, o terceiro elemento em abundância na crosta terrestre, depois do oxigênio e do silício (Sampaio, Andrade, & Dutra, 2005). A

rocha é constituída essencialmente por um ou vários dos hidróxidos de alumínio, diásporo, gibsitita ou hidrargilita e bohemita, podendo também conter argilo minerais, hidróxidos de ferro, quartzo e outras impurezas (SANTOS P. S., 1989), logo a composição mineralógica da bauxita e de seus resíduos dependerá da jazida de origem.

Segundo Villar (1990), algumas jazidas de óxido de alumínio estão localizadas em zonas temperadas, mas a maior parte está situada em zonas tropicais e sua formação é em geral devida aos fenômenos de laterização.

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de alumina, com uma produção de aproximadamente 17,4 milhões de toneladas e sua extração acontece, com maior intensidade, no estado do Pará. As operações da indústria mineral seguem basicamente o fluxograma citado por Lottermoser (2007): lavra, beneficiamento e extração metalúrgica. A lavra é a etapa inicial, na qual ocorre a extração do minério do subsolo, com o objetivo de obter a fração valiosa do material retirado. O beneficiamento visa separar e concentrar os minérios por meios físicos. E a extração é um processo químico que destrói as ligações metálicas do minério de modo a extrair a bauxita, e nesse processo é produzido o rejeito, conjunto de partículas provenientes da trituração de rochas, que são depositados em forma de lama (VICK, 1990).

Devido ao processo de lavagem, que visa separar a porção fina (água e resíduos) da porção grosseira (porção de interesse), os rejeitos em geral são bem aquosos e são lançados em reservatórios com o objetivo de armazenagem e secagem desse material com o decorrer do tempo.

2.2.1 Métodos de beneficiamento e extração metalúrgica

Existem várias formas de se vender os produtos originários da bauxita. Nesse sentido, empresas do setor minerário produzem diferentes produtos. Algumas se restringem à produção da bauxita beneficiada, um produto mais primário resultante dos processos de lavra e beneficiamento e de bom valor comercial.

Por outro lado, existem companhias que produzem a alumina, a qual é um produto mais desenvolvido resultante da extração metalúrgica da bauxita beneficiada. Juntos, os dois materiais, formam os primeiros elos da cadeia de valor para produção do alumínio.

2.2.1.1 Circuito de beneficiamento

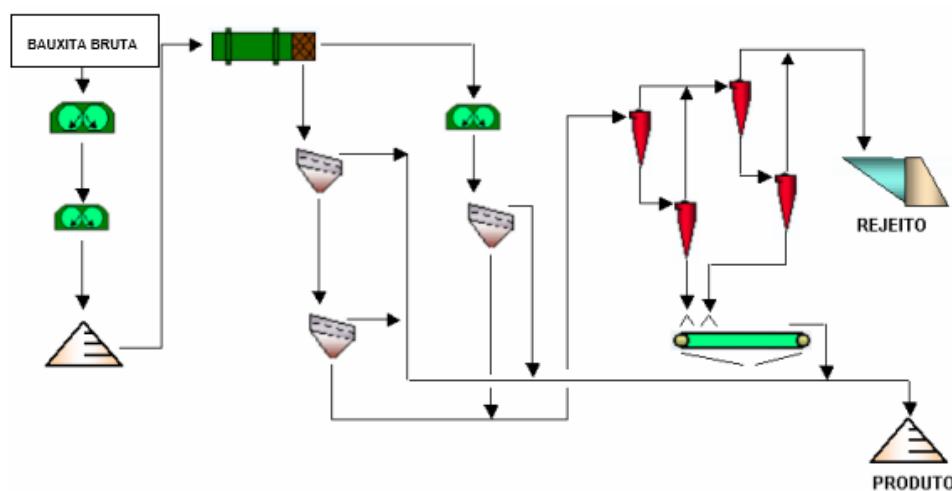
Nas usinas de beneficiamento o produto buscado é a fração mais grossa do minério, sendo descartado como rejeito a porção mais fina. As usinas de beneficiamento no Brasil seguem parcialmente o fluxo descrito por Lottermoser (2007), realizando o processo de lavra e beneficiamento.

No processo, o minério é fragmentado em britadores de rolos dentados, desagregado em lavadores rotativos, passa por peneiras e ciclones, a fim de se manter apenas a fração mais fina filtrada (FALCUCCI, 2007).

O minério bruto advindo da mina passa por etapas de britagem até atingir tamanho adequado para a etapa dos lavadores rotativos, na qual o material é desagregado. A partir daí o material é submetido à diversas peneiras, com o fim de se obter a fração mais grosseira, a porção passante das peneiras integra a etapa de ciclonação.

A ciclonação é um processo de classificação, na qual ocorre a separação de materiais finos e superfinos. O *overflow* representa o material mais fino que fica retido no equipamento, já o *underflow* a porção menos fina. Após dupla ciclonação o material *overflow* é descartado junto com o material passante no peneiramento e o *underflow* soma-se a porção que ficou retida no processo de peneiramento, formando a bauxita beneficiada. A Figura 2 representa o processo descrito.

Figura 2 – Fluxograma de beneficiamento da bauxita



Fonte: Adaptado de Falcucci (2007)

2.2.1.2 Processo Bayer

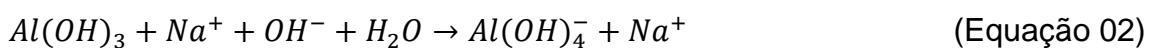
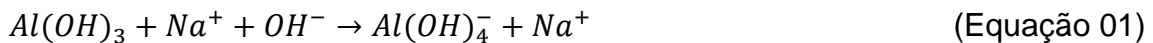
O processo Bayer vem de complemento ao processo de beneficiamento. Esse sistema foi desenvolvido pelo austríaco Karl Josef Bayer em 1888 e é o mais utilizado para se extrair a alumina calcinada da bauxita beneficiada.

O objetivo principal desse processo é extrair o componente de alumínio da bauxita beneficiada, por meio da dissolução em soda cáustica. O processo é formado basicamente por 3 (três) etapas, sendo elas a Digestão, Clarificação e a Calcinação.

2.2.1.2.1 Digestão

Nessa etapa o minério de bauxita é colocado em uma solução quente de soda cáustica (NaOH) sob condições de temperatura, pressão e concentração de soda, e isso forma inicialmente uma solução supersaturada de aluminato de sódio (NaAl₂). (PALOMINO, 2017).

As dissoluções variam de acordo com os hidratos constituintes da alumina, podendo ser representadas para a gibbsita (Equação 01) e boehmita e diásporo (Equação 02).



Segundo Villar (2002) a distinção dos hidratos constituintes da alumina é de fundamental importância econômica e de qualidade. Essa diferenciação fornece, também, a temperatura necessária para solubilização de cada um dos tipos de bauxita, o trihidrato (gibbsita) é muito solúvel a temperaturas próximas a 100°C. Já os monohidratos necessitam de uma maior temperatura para uma solubilidade efetiva, por volta de 180°C para a boehmita e 250°C para o diásporo. A Tabela 1, mostra as características dos diversos tipos de hidratos constituintes da bauxita.

Tabela 1 – Composição de tipos de bauxita

	Unidade	Gibbsita	Bohemita	Diásporo
Composição		Al ₂ O ₃ .3H ₂ O	Al ₂ O ₃ .H ₂ O	Al ₂ O ₃ .H ₂ O
Teor de Alumina Máximo	%	65.4	85.0	85.0
Sistema de cristalização		Monoclinico	Orthorhombico	Orthorhombico
Densidade dos grãos	g/cm ⁻³	2.42	3.01	3.44
Temperatura para desidratação rápida	°C	150	350	450

Fonte: VILLAR (2002)

O território brasileiro contém majoritariamente bauxitas formadas pela gibbsita, dada a formação laterítica do minério brasileiro, o que implica no uso de menores temperaturas no processo de extração.

2.2.1.2.2 Clarificação

No processo de clarificação são adicionados floculantes à solução com o objetivo de separar os sólidos insolúveis no processo de digestão do aluminato de sódio em solução.

Por meio da sedimentação os resíduos sólidos se depositam no fundo e são separados da solução. Esse processo de separação ocorre por meio de filtros de segurança que garantem que a solução não contém impurezas dos resíduos.

O resíduo retirado desse processo é a lama vermelha, resíduo insolúvel, tem como principal característica elevada alcalinidade (pH 10-13) e é formada normalmente por metais pesados como ferro, titânio, sílica, além de óxidos formados no processo de digestão. (SILVA FILHO, ALVES, & DA MOTTA, 2007).

2.2.1.2.3 Calcinação

Por fim, no processo de calcinação, a intenção é retirar qualquer impureza presente na alumina. Dessa forma a alumina hidratada é submetida a temperaturas de até 1100°C para eliminar a água de hidratação, após esse processo têm-se como

produto a alumina pura em forma de pó branco. (SILVA FILHO, ALVES, & DA MOTTA, 2007). São utilizados diversos tipos de calcinadores para essa etapa.

A Equação 03, descreve como ocorre a reação de calcinação da alumina hidratada decorrente da etapa de clarificação:



Todo esse processo gera uma quantidade considerável de rejeitos. Para produção de 02 toneladas de alumina, segundo Palomino (2017) são necessárias de 4 a 7 toneladas de minério de bauxita beneficiado, enquanto são geradas de 40 a 70 toneladas de rejeito. Nesse sentido, o uso do rejeito em processos de conformação de superfície de reservatórios em fechamento se torna uma alternativa econômica e ambientalmente viável, tendo em vista a enorme disponibilidade desse material na matriz de beneficiamento.

2.3 Métodos de disposição de rejeito

O método de disposição de rejeitos mais utilizado nos dias de hoje consiste em lançar o rejeito em forma de polpa, esse material tem como principais características o baixo teor de sólidos e alto teor de umidade. Esses atributos fazem com que se necessite de vastas áreas para disposição do material e que em caso de ruptura da estrutura um alto potencial de destruição, dada sua similaridade com um fluido viscoso, o que facilita a percolação no meio. (BASTO, 2021)

Com a crescente exploração dos minérios brasileiros, restam à algumas empresas explorarem jazidas com menor teor metálico, o que acarreta na geração de ainda mais rejeitos no processo de beneficiamento. Nesse sentido, há a necessidade de utilização de métodos de disposição de rejeitos alternativos que favoreçam a otimização da disposição, de modo a dispor maiores quantidades em menores áreas.

2.3.1 Disposição úmida

A disposição úmida é resumida como sendo o lançamento da polpa de rejeito em uma região de barramento, tem como principal vantagem o baixo custo de

operação, outro ponto importante desse tipo de disposição é a existência de somente um reservatório, diferentemente dos outros métodos tratados nesse capítulo.

Por outro lado, nesse tipo de disposição existe uma lâmina de água sobre o rejeito que não permite que este resseque por meio da evaporação, isso faz com que a barragem sempre tenha a presença de água no seu interior se não forem usados outros métodos para ressecamento, implicando em mais uma despesa para o fechamento do depósito. Nesse sentido, outro fator que dificulta a descaracterização de barragens que utilizam esse método de disposição é a existência de áreas com material muito fino e pouco adensado, o que dificulta a realização da superfície de conformação e posterior recuperação ambiental (VAN DEURSEN, 2016).

2.3.2 Disposição semi seca

Análoga à disposição úmida, a semi seca tem como principal diferença o ciclo de disposição do rejeito. Enquanto na úmida o rejeito é lançado sem nenhum controle de camadas, na semi seca existe um planejamento de qual volume dispor dentro de um determinado período de tempo, a fim de que a altura de rejeito lançado não desfavoreça o ressecamento por evaporação. Nesse sentido, para se ter um lançamento coordenado e temporizado é necessário que se tenha muitos reservatórios, de forma que enquanto um está com a camada superior em fase de ressecamento, outro possa receber o aporte de rejeitos que não para de ser produzido na matriz de beneficiamento.

Além do ressecamento por evaporação, neste método o rejeito lançado também perde água para a camada inferior por meio de infiltração. Para evitar o processo de erosão e preservar a homogeneidade do reservatório, nesse método o rejeito deve ser lançado por vários espigotes dispostos ao longo da crista do reservatório. A secagem traz como consequências um aumento de densidade e resistência ao cisalhamento, fatores que são buscados quando se trata da estabilidade um reservatório de rejeitos.

Outro fator importante desse método de disposição é a boa ocupação específica, ou seja, quantidade de rejeito armazenada por unidade de área, tendo em visto que o rejeito resultante da disposição semi seca apresenta menores teores de umidade se comparado ao método descrito anteriormente, o método se mostra bem

eficaz e rentável nesse sentido. Esse fato também implica na superfície de conformação a ser realizada no processo de descaracterização do reservatório, dado que com esse tipo de disposição o rejeito, pelo menos que nas camadas superficiais, encontra-se drenado permitindo assim a realização de obras de terraplenagem e execução da camada superior de conformação.

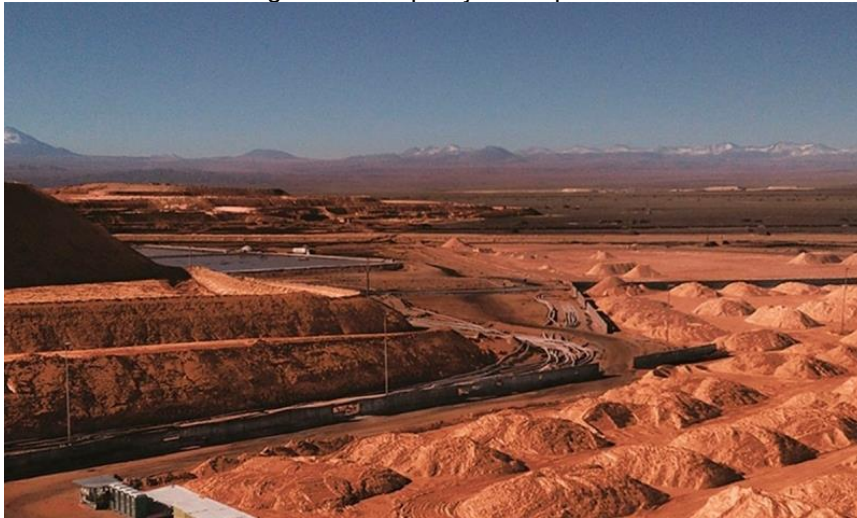
Por outro lado, em períodos de chuva esse método pode não ser tão exequível, dado seu principal artifício que é o ressecamento por evaporação, a presença de cargas d'água adicionais impactariam negativamente no planejamento para a disposição de rejeitos.

2.3.3 Empilhamento

No que diz respeito à ocupação específica o método de empilhamento se mostra o mais eficiente dentre os métodos de disposição tratados nesse trabalho. O rejeito precisa ser anteriormente desaguado de forma que as partículas desse material tenham coesão suficientes para se sustentar em forma de pilha e serem compactadas nesse processo.

Nesse processo as características geotécnicas do rejeito são de fundamental importância para a disposição em pilhas, visto que para uma maior economia as pilhas devem ter taludes o mais verticais possível, dessa forma precisa haver uma compatibilidade entre os atributos geotécnicos e a geometria de disposição das pilhas. (VAN DEURSEN, 2016). Essa compatibilização adicionada a ensaios de caracterização tecnológica promoverão uma boa disposição pelo método de empilhamento. A Figura 3 demonstra como funciona a distribuição em pilhas.

Figura 3 – Disposição em pilhas



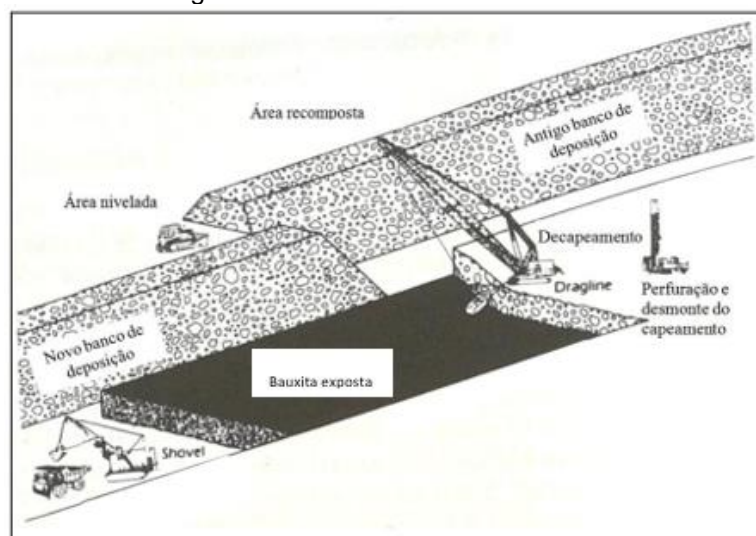
Fonte: (MINERE, 2023)

2.3.4 Preenchimento de áreas lavradas

O método de lavra mais utilizado em depósitos com grandes dimensões laterais é o método de lavra por tiras. O uso desse método gera grandes buracos em forma de tiras nos locais de lavra.

O método consiste em abrir o solo até a profundidade do minério, escarificar e extrair o minério grosseiro. Essas cavas formadas no processo podem ser utilizadas como local para disposição do rejeito desaguado. Isso traz algumas vantagens como a disposição em camadas de menor espessura, se comparadas às pilhas, o que favorece o desempenho geotécnico do material. A Figura 4 mostra como funciona o processo de lavra citado.

Figura 4 – Processo de lavra em tiras



Fonte: Adaptado de (ABREU, 2017)

No entanto, é válido lembrar que para uso desse método é necessária uma grande frota de caminhões para transportar e dispor o rejeito quando as tiras forem retiradas, de modo que basicamente metade desses caminhões atendem aos métodos hidráulicos de disposição.

2.4 Projeto e Análise de Experimentos

O planejamento experimental é uma metodologia que busca maximizar a eficiência na obtenção de informações por meio de experimentos. Ele permite controlar variáveis e minimizar erros, aumentando a precisão e confiabilidade dos resultados. É utilizado em diversas áreas, como pesquisa científica, desenvolvimento de produtos e processos industriais. Existem diferentes tipos de planejamento experimental, cada um com suas características e objetivos específicos. É importante realizar uma análise prévia dos dados e definir uma estratégia de experimentação antes de iniciar o processo. O planejamento experimental também envolve a seleção cuidadosa dos métodos de análise estatística para os resultados obtidos.

A aplicação das técnicas de planejamento experimental estatístico possibilita uma diminuição da quantidade de experimentos realizados sem comprometer a precisão das informações; analisar múltiplas variáveis de forma simultânea e identificar seus efeitos individuais; avaliar a confiabilidade dos resultados obtidos; selecionar as variáveis relevantes para o processo com um número limitado de experimentos; e descrever o processo estudado por meio de equações matemáticas. (MONTGOMERY & RUNGER, 2003; MONTGOMERY, 2009).

Montgomery (2009) define como os princípios básicos para o design de experimentos: Reconhecimento e definição do problema, seleção da variável de resposta, escolha dos fatores ou variáveis independentes, delineamento do experimento, execução dos ensaios e monitoramento, análise estatística dos dados e conclusões.

2.4.1 Planejamento Fatorial 3^k

Os experimentos fatoriais são conhecidos como projetos do tipo 3^K , em que K é o número de fatores investigados em três níveis distintos. Por exemplo, se um experimento fatorial envolve dois fatores analisados em três níveis cada, então serão necessários 9 ensaios no total. (MONTGOMERY, 2009). A Tabela 2 demonstra as combinações entre os níveis de dois fatores genéricos.

Tabela 2 - Representação dos níveis da fração 3^2 .

		Fator B		
		b ₁	b ₂	b ₃
Fator A	a ₁	a ₁ b ₁	a ₁ b ₂	a ₁ b ₃
	a ₂	a ₂ b ₁	a ₂ b ₂	a ₂ b ₃
	a ₃	a ₃ b ₁	a ₃ b ₂	a ₃ b ₃

Fonte: Montgomery (2009).

O planejamento fatorial é uma técnica valiosa quando se pretende examinar os efeitos de múltiplos fatores em um processo. Para alcançar essa informação, todas as combinações possíveis dos diferentes níveis das variáveis são analisadas. Em suma, é possível identificar a influência de cada fator no resultado final (HINKELMANN & KEMPTHORNE, 2008).

2.4.2 Análise da Variância

A Análise de Variância (ANOVA) é o método estatístico mais adequado para comparar e analisar grupos distintos, possibilitando uma avaliação abrangente dos dados. Esse procedimento é empregado para avaliar quantitativamente a qualidade do ajuste do modelo utilizado. (BARBETTA, REIS e BORNIA, 2004).

2.4.3 Modelo de regressão

A análise de regressão é utilizada para identificar a relação entre as variáveis independentes de entrada e a variável dependente de saída, descrevendo essa relação por meio de uma equação matemática. Com isso, é possível determinar o valor da variável dependente para todas as combinações possíveis de valores das variáveis independentes dentro dos intervalos estudados. A equação de regressão

também pode quantificar os valores das variáveis independentes necessárias para alcançar a solução ideal. (MONTGOMERY & RUNGER, 2003). Matematicamente, uma equação de regressão para um projeto fatorial 3^2 , sem interações entre os fatores, pode ser descrita pela Equação 4.

$$Y = \beta_1 x_1 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_2 x_2 + \beta_{22} x_2^2 + \varepsilon \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

Y = variável dependente (resposta do experimento)

x_1, x_2 = variáveis independentes na forma linear

x_1^2, x_2^2 = variáveis independentes na forma quadrática

$\beta_1, \beta_2, \beta_{11}, \beta_{22}$ = são coeficientes de regressão

ε = componente de erro aleatório

Ao utilizar a técnica de regressão para analisar os dados coletados em um experimento, pode haver variáveis que não apresentam significância estatística para o projeto. Nesses casos, apenas as variáveis que apresentam significância estatística devem ser incluídas na equação matemática que representa a superfície de resposta do experimento. (MATTOS, 2004).

2.4.4 Superfície de Resposta

A técnica de Superfície de Resposta envolve o uso de métodos matemáticos e estatísticos para modelar e analisar problemas empíricos que são afetados por várias variáveis e suas interações. Com um delineamento adequado, é possível estabelecer uma relação entre a variável dependente de resposta e as variáveis independentes de entrada. O objetivo é mapear a resposta dentro do intervalo de estudo das variáveis, otimizar essa resposta e identificar a influência de cada uma das variáveis independentes sobre a resposta. (MONTGOMERY, 2009; BOX & DRAPPER, 2007; MYERS, MONTGOMERY & ANDERSON-COOK, 2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia desse trabalho se baseará em um estudo de caso, no qual será avaliado o desempenho de um rejeito de bauxita como material de aterro não estrutural para o fechamento de barragens de mineração. Para tal, esse trabalho caracteriza a área de lavra do rejeito de bauxita estudado, define as características geotécnicas do material, avalia o grau de compactação e desvio de umidade empregados na realização da superfície de conformação, além de comparar com aterros experimentais realizados com outros atributos de compactação.

3.1 Caracterização da área

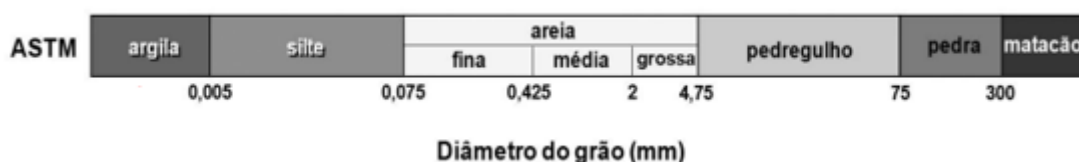
A geologia local foi o fator preponderante na caracterização da área, dada que essa interfere diretamente nas propriedades do rejeito produzido.

A caracterização da área levou em conta também a análise do clima, que pode interferir no processo de descaracterização, no que diz respeito ao aporte de águas pluviais.

3.2 Caracterização geotécnica do rejeito

A caracterização do rejeito se deu primeiramente por meio de análises granulométricas, seguindo os padrões da ASTM D422, conforme os limites apresentados na Figura 5.

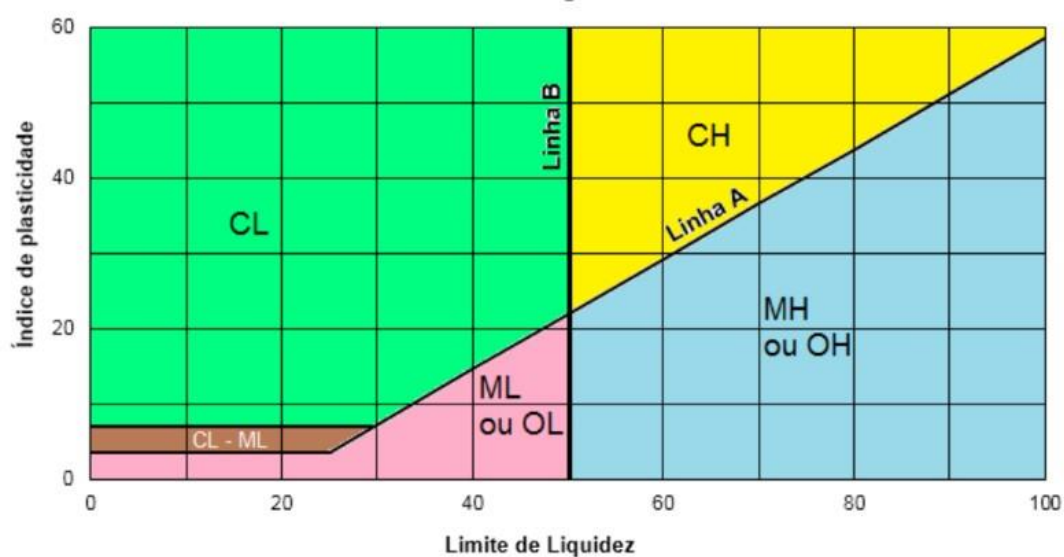
Figura 5 – Granulometria seguindo os padrões ASTM



Fonte: ASTM D422 (1998)

Por se tratar de um solo de granulometria fina segundo a classificação ASTM D422 foi empregada a carta de plasticidade de Casagrande, e os Limites de Atterberg foram avaliados conforme ABNT NBR 6459 e ABNT NBR 7180, a Figura 6 representa a classificação utilizada, na qual a linha A divide os solos em argila (C) e silte (M) ou matéria orgânica (O), o trecho inicial (marrom claro) representa uma faixa onde as amostras têm características de mais de um tipo de solo, já a linha B divide os solos em categoria de alta (H) e baixa compressibilidade (L), conforme o Limite de Liquidez.

Figura 6 – Carta de plasticidade de Casagrande



Fonte: MARINHO (2023)

3.3 Superfície de conformação

Para análise da superfície de conformação foram utilizados dados de controle tecnológico de ensaios de Hilf realizados no local de estudo, a fim de retratar e fazer uma análise crítica de quais os melhores valores de desvio de umidade e grau de compactação a serem utilizados na conformação da superfície do reservatório com rejeito ressecado.

Para execução do método de Hilf a norma utilizada como referência foi a NBR 12102, a qual descreve a obtenção do grau de compactação e desvio de umidade por meio das Equação 05 e Equação 06:

$$GC = \frac{\gamma_{sa}}{\gamma_s^{m\acute{a}x}} \quad (\text{Equa\c{c}\~{a}o 05})$$

$$\Delta h = h_a - h_{ot} \quad (\text{Equa\c{c}\~{a}o 06})$$

Onde:

GC = grau de compacta\c{c}\~{a}o no ponto ou local de controle

γ_{sa} = massa espec\i{f}ica aparente seca do solo compactado

$\gamma_s^{m\acute{a}x}$ = massa espec\i{f}ica aparente seca m\acute{a}xima, obtida no ensaio de compacta\c{c}\~{a}o

h_a = teor de umidade do solo compactado

h_{ot} = umidade \c{o}tima, obtida no ensaio de compacta\c{c}\~{a}o

3.4 Aterros experimentais

Para melhor entendimento e possibilidade de compara\c{c}\~{a}o foram apresentados nesse trabalho dados de controle de compacta\c{c}\~{a}o realizado em aterros experimentais em que foram utilizadas especifica\c{c}\~{o}es diferentes da \c{a}rea foco desse trabalho. O material que foi caracterizado nesse trabalho foi exposto \c{a} condi\c{c}\~{o}es distintas de compacta\c{c}\~{a}o, no que diz respeito ao n\~{u}mero de passadas do rolo compactador e espessura das camadas.

Esses aterros experimentais utilizaram-se de espessuras de camada de 25, 30, 35, 40, 50 e 60 cent\i{m}etros. Foi realizada a compacta\c{c}\~{a}o com rolo compactador CA-25 e obtidos o grau de compacta\c{c}\~{a}o e desvio de umidade pelo m\acute{e}todo de Hilf.

Ademais, no sistema de rejeitos em quest\~{a}o, foi realizada uma outra obra de terraplenagem sem controle de compacta\c{c}\~{a}o, conhecendo os riscos de desempenho. O objetivo era a avalia\c{c}\~{a}o do comportamento do material e, posteriormente, avaliar se seriam poss\i{v}eis a indica\c{c}\~{a}o de controles menos rigorosos para estes tipos de obras, por serem aterros n\~{a}o estruturais.

3.5 Planejamento Fatorial

Neste trabalho foi empregado o uso do planejamento fatorial de experimentos 3^k , onde k representa a quantidade de variáveis independentes com três níveis de variação cada, respectivamente.

A partir dos dados dos aterros experimentais foram escolhidas as variáveis: espessura da camada (E), em cm, e o número de passadas do rolo compactador (P). Foram selecionados os níveis apresentados na Tabela 3. A seleção destes níveis foi determinada de modo que permitisse a realização planejamento fatorial de experimentos 3^k a partir do banco de dados existente. Foi utilizado o software Statistica 11 (STATSOFT, 20120) para o planejamento experimental, análise estatística e apresentação dos dados.

Tabela 3 – Níveis do planejamento fatorial.

Nível	Espessura da camada (E)	Número de passadas (P)
Baixo	25	4
Médio	30	6
Alto	35	8

Fonte: do autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Dados sobre a caracterização da área

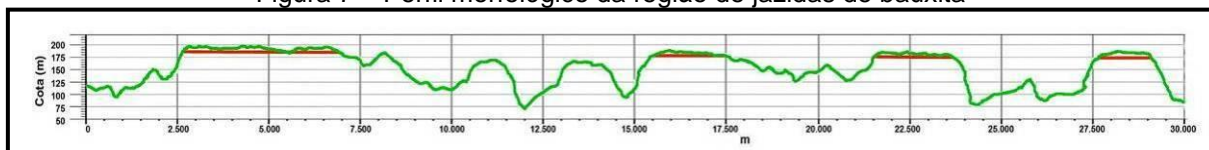
A área de análise na Amazônia brasileira é caracterizada por extensas jazidas de bauxita que consistem em corpos estratiformes sub-horizontais de sedimentos continentais, como aqueles provenientes de rios e lagos. Os sedimentos são organizados em camadas planas, com algumas intercalações de argila, e em alguns locais exibem características típicas de sedimentos fluviais, como estratificações cruzadas tangenciais, acanaladas e tabulares.

As jazidas de bauxita são formadas por intemperismo, um processo em que o clima tropical, a alta precipitação, a umidade e a drenagem desempenham um papel fundamental na hidrólise e alteração das camadas de minerais alumínio-ferruginosos primários no topo do conjunto sedimentar. As superfícies tabulares aplainadas geralmente apresentam crostas lateríticas associadas a elas.

Anteriormente, a camada de bauxita na região estudada era predominantemente sub-horizontais e levemente inclinada para o sul, cobrindo uma grande área. Entretanto, a forte erosão a montante causada pelos igarapés locais levou ao desenvolvimento de uma morfologia marcada por vastos platôs tabulares com topos planos e sistemas de relevo caracterizados por cristas, mesas e colinas com ravinas.

Consequência dos processos de erosão já citados, a bauxita se apresenta restrita ao topo dos platôs, aflorando abaixo do solo vegetal e argiloso, como representado pela linha marrom horizontal na Figura 7 que apresenta o perfil morfológico da região das jazidas de bauxita na região de análise.

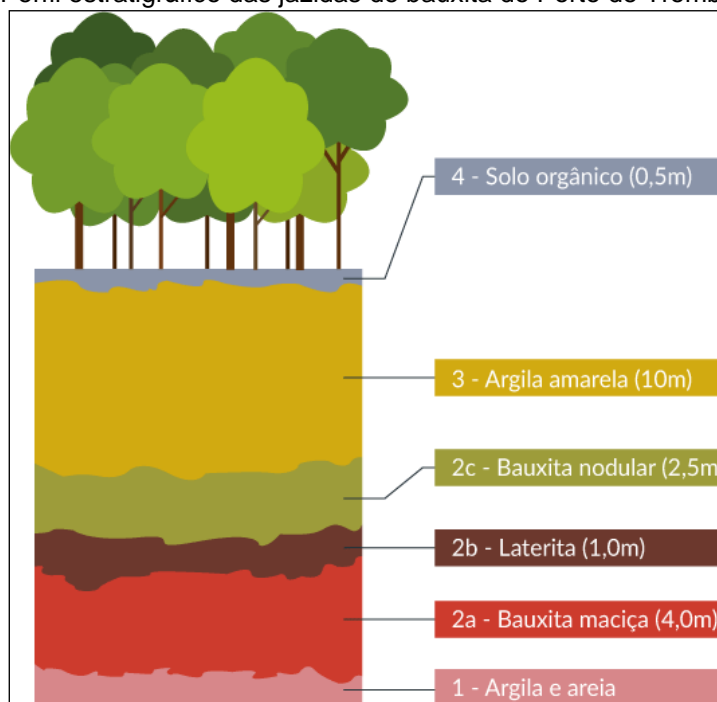
Figura 7 – Perfil morfológico da região de jazidas de bauxita



Fonte: Acervo do autor

É importante também ressaltar quais são as camadas estratigráficas que compõem esse perfil morfológico. A Figura 8 ilustra o perfil típico das jazidas de bauxita de uma área similar à estudada.

Figura 8 – Perfil estratigráfico das jazidas de bauxita do Porto de Trombetas



Fonte: MRN (2023)

4.2 Caracterização geotécnica do rejeito

Haja vista a caracterização da área de lavra, se faz necessária a caracterização do rejeito produzido e posteriormente utilizado na superfície de conformação de barragens de rejeito, o qual é o objeto de estudo do presente trabalho. É válido citar nesse tópico que o rejeito utilizado é classificado como Inertes Não Perigosos (Classe II-B, nos termos da ABNT NBR 10.004:2004), podendo assim ser utilizado na superfície de cobertura sem que haja problemas ambientais.

Para a caracterização geotécnica do rejeito foram verificados a Curva de distribuição granulométrica, seguindo os padrões da ASTM D422, e os Limites de Plasticidade, conforme ABNT NBR 6459 e ABNT NBR 7180.

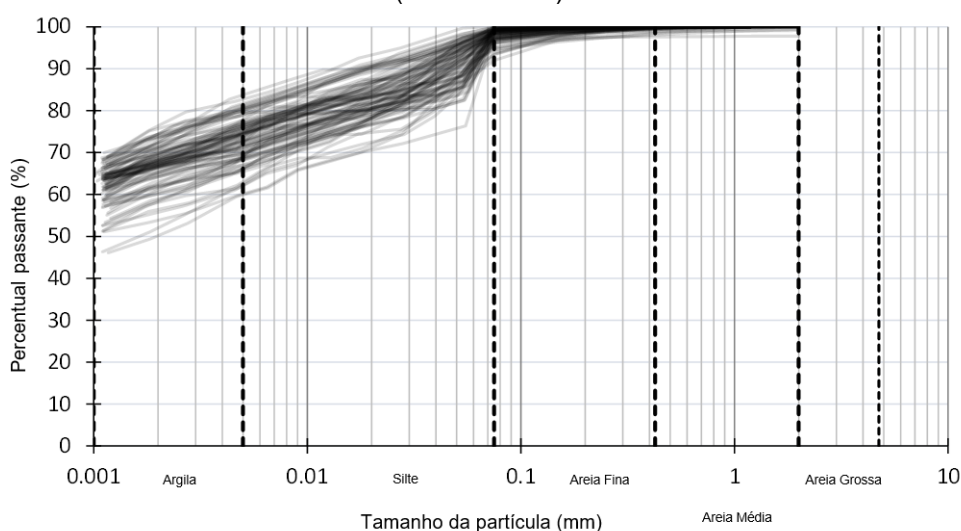
4.2.1 Curva de distribuição granulométrica

A análise granulométrica é uma técnica utilizada para determinar a distribuição do tamanho das partículas presentes em uma amostra de solo ou de material granular. É uma das análises mais importantes na área de geotecnia, pois a distribuição granulométrica do solo tem um papel fundamental na caracterização e na previsão de seu comportamento geotécnico.

O método mais comum de análise granulométrica é realizado através da peneiração, que consiste na passagem da amostra de solo através de uma série de peneiras de malhas diferentes, desde a mais grossa até a mais fina. As partículas que ficam retidas em cada peneira são pesadas e, a partir desses valores, é possível determinar a porcentagem de material presente em cada faixa granulométrica.

A Figura 9 apresenta as curvas de distribuição granulométrica de várias amostras de rejeito ressecado, conforme classificação ASTM D422, o qual é o material utilizado na execução da superfície de conformação de barragem de rejeito, objeto de estudo do presente trabalho.

Figura 9 – Curvas de distribuição do tamanho dos grãos a partir de amostras perturbadas (ASTMD4212)



Fonte: Acervo do autor

A partir da análise do gráfico é possível observar um material predominantemente argiloso com a seguinte composição exposta na Tabela 4:

Tabela 4 – Tabela resumo de percentuais granulométricos.

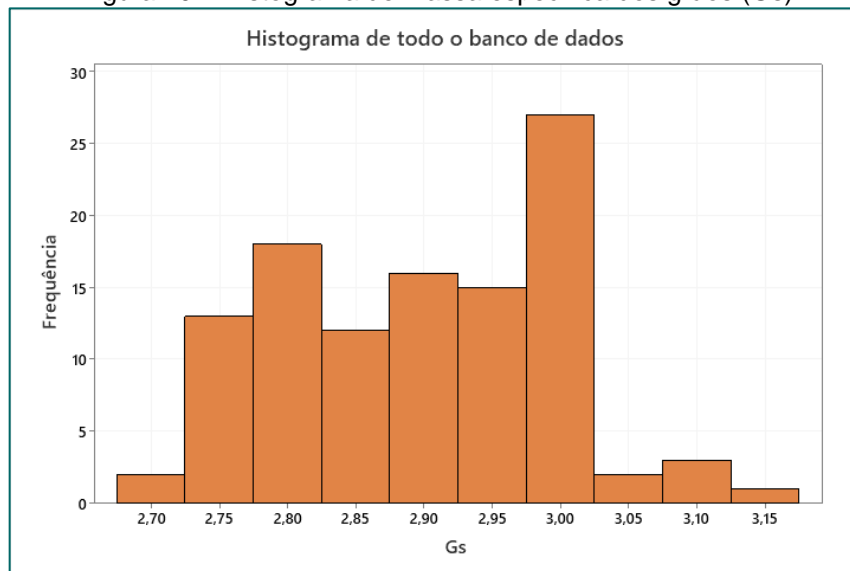
Material	Percentual
Areia Grossa (4,75 - 2,0 mm)	0,10%
Areia Média (2,0 - 0,425 mm)	0,22%
Areia Fina (0,425 - 0,075 mm)	1,59%
Silte (0,075 - 0,005 mm)	24,87%
Argila (< 0,005 mm)	73,22%

Fonte: do autor.

Anterior a etapa de peneiramento em laboratório foi definida também a massa específica dos grãos. A massa específica dos grãos (G_s) é uma propriedade física importante na geotecnia, que permite avaliar a resistência do solo e sua capacidade de suportar cargas. Sua determinação é realizada através de testes de laboratório e é influenciada pelas características dos grãos e da composição mineralógica do solo.

Os dados sobre a massa específica dos grãos (G_s) são demonstrados a seguir no histograma (Figura 10) que reúne várias amostras realizadas no rejeito a ser utilizado no escopo do presente trabalho. A partir da análise das amostras têm-se um G_s médio igual a 2,9 g/cm³.

Figura 10 – Histograma de massa específica dos grãos (G_s)



Fonte: Acervo do autor

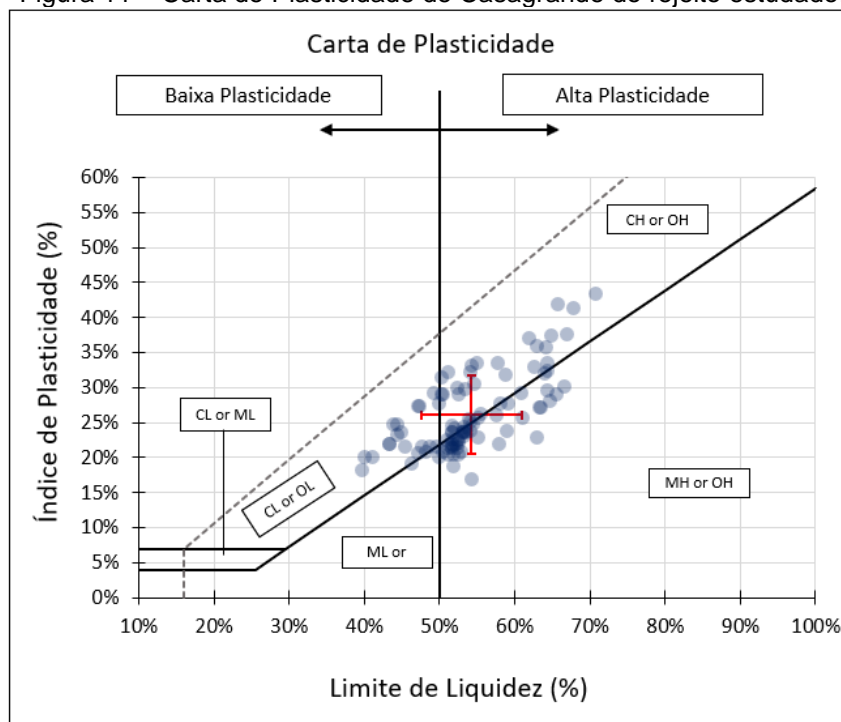
4.2.2 Limites de plasticidade

O limite de plasticidade é uma das propriedades físicas dos solos, que representa o teor de umidade abaixo do qual um solo se torna plástico e acima do qual ele se torna “semi-sólido”. É definido como o teor de umidade em que o solo começa a apresentar deformação plástica quando submetido a uma pressão.

Essa propriedade é importante na geotecnia, pois permite avaliar a capacidade do solo de suportar cargas e deformações. Solos com limite de plasticidade mais elevado são mais resistentes e menos suscetíveis a deformações plásticas, enquanto solos com limite de plasticidade baixo são mais suscetíveis a deformações e menos resistentes.

Na avaliação do presente trabalho foram utilizadas as normas ABNT NBR 6459 e ABNT NBR 7180 para classificação do solo, a Figura 11 apresenta o Gráfico de Plasticidade que reúne diversas amostras realizadas no rejeito.

Figura 11 – Carta de Plasticidade de Casagrande do rejeito estudado.



A partir da análise do gráfico pode-se aferir um ponto médio, representado pela cruz vermelha, o qual representa de forma geral os atributos quanto à plasticidade do material estudado. Ainda com base na Figura 11, conclui-se que o rejeito é

majoritariamente muito plástico e se localiza próximo a linha A, o que confirma a análise granulométrica de que se trata de um material argilo-siltoso.

4.3 Dados de controle tecnológico

A fim de se ter dados sobre como a compactação seguiu e se esta atingiu os limites estipulados para realização da superfície de conformação, foram realizados diversos ensaios de Hilf no aterro de conformação.

Para se ter uma boa superfície de compactação, capaz de redirecionar o fluxo de água para as zonas de drenagem é necessário que as partículas desse material não se desprendam facilmente e que a superfície não apresente caminhos preferenciais para a água. Dessa forma, os aterros foram executados a maiores graus de compactação no ramo seco da curva de compactação.

As definições que dizem respeito à compactação, como o grau de compactação e o desvio de umidade, advém de um estudo realizado na China por Lu et al. (2013) sobre argilas compactadas, material muito semelhante ao rejeito objeto de estudo desse trabalho. Nesse estudo, os pesquisadores analisaram as propriedades de inchaço, encolhimento e fissuração da argila compactada e observaram que o encolhimento axial médio tende a aumentar com o aumento do teor de umidade da amostra, considerando o mesmo grau de compactação. Nesse sentido, para minimizar o encolhimento dos rejeitos compactados após a construção e evitar a ocorrência de fissuras, o desvio de umidade adotado na execução da superfície de compactação foi inferior a zero por cento (ramo seco da curva de compactação).

Para se ter uma melhor análise, esse trabalho apresenta dados de controle tecnológico realizados na superfície de conformação e em aterros experimentais compactados com diferentes espessuras de camada e passadas de equipamento compactador.

4.3.1 Superfície de conformação

Para execução da superfície de conformação, foi utilizado rejeito proveniente de um reservatório de rejeito ressecado. Esse material foi disposto na praça de

trabalho em camadas de vinte (20) centímetros, espalhado e recebeu tratamento para correção de umidade.

Inicialmente, o material foi compactado utilizando um trator de esteiras D6. Foram necessárias doze passadas do equipamento para garantir uma compactação mínima de 98%. Entretanto, foi observado que as ranhuras da esteira do equipamento causaram deslocamento do material durante as passadas. Isso resultou em um acabamento superficial com baixa aderência de qualidade, mesmo tendo alcançado o grau de compactação pré-estabelecido.

Nesse sentido, foram testadas também as compactações com rolo CA-25 e com rolo compactador Hyster. Para o rolo CA-25 foram necessárias seis passadas e para o Hyster doze. Com relação ao resultado do material compactado, pode-se observar na Figura 12 que a compactação com rolo (tanto o CA-25 quanto o Hyster) apresentou melhores resultados se comparada a compactação com trator esteira.

Figura 12 – Comparativo entre a compactação com rolo (esquerda) e com trator esteira (direita)



Fonte: do autor.

Nesse sentido para as subcamadas foi utilizada a compactação por meio de trator esteira e para a camada mais superior o rolo compactador, a fim de evitar o deslocamento do material e conseqüente geração de caminhos preferenciais para a percolação do fluxo superficial.

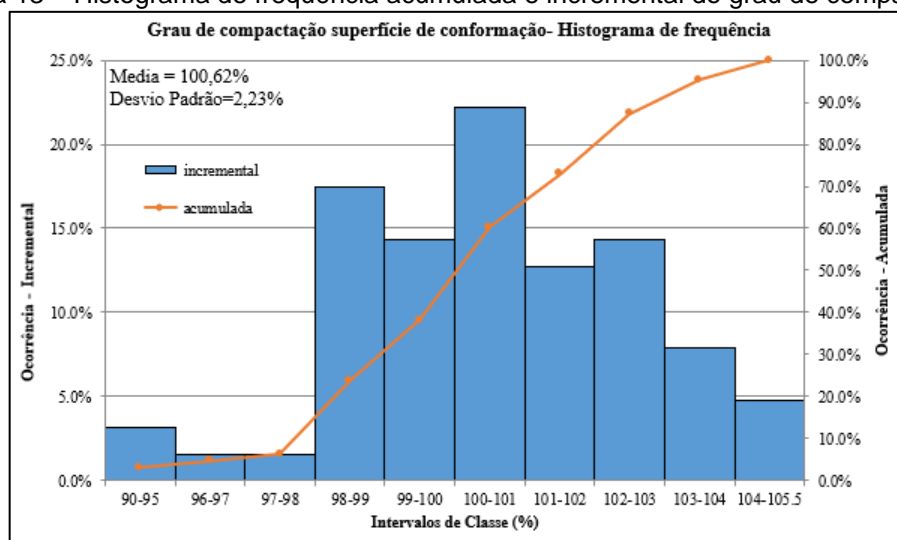
O controle tecnológico do aterro executado foi realizado através do controle de compactação (Ensaio Hilf) e caracterização dos materiais, em conformidade com as

Normas Técnicas Brasileiras da ABNT associadas a estes ensaios, além dos critérios para aceitação e rejeição dos serviços de acordo com as diretrizes estabelecidas de Grau de compactação mínimo de 98% do Próctor Normal e Desvio de umidade entre -2% e 0% a fim de evitar a ocorrência de fissuras como já explicado acima. Como ocorreram chuvas mais intensas que as previstas durante o período de obra o limite superior do desvio de umidade foi flexibilizado para +1%.

Com base nos resultados desses ensaios, determinou-se a distribuição de frequência relativa e acumulada para do grau de compactação e dos desvios do teor de umidade do aterro. Foram realizados 59 ensaios de Hilf para o aterro de conformação.

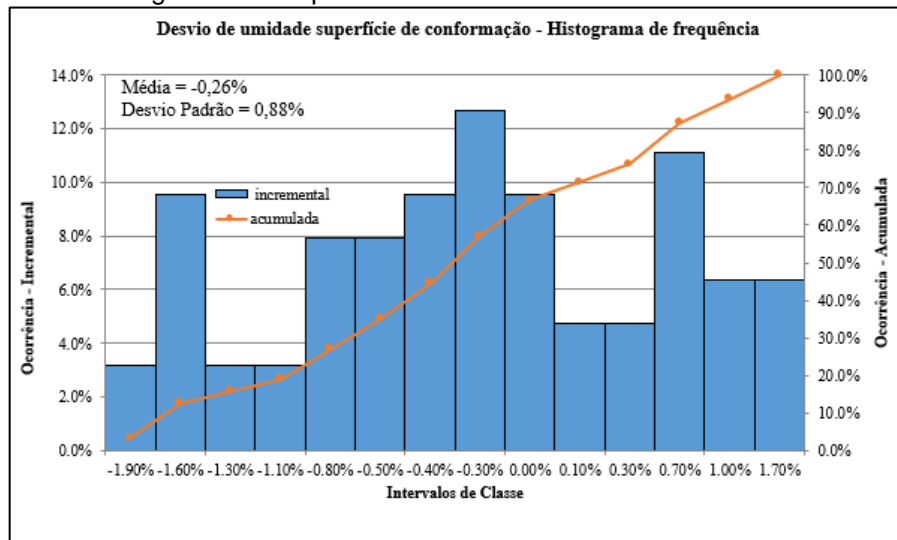
Dessa forma, para uma melhor interpretação dos resultados, a totalidade dos ensaios foi contabilizada de maneira a obter a frequência relativa e acumulada global do grau de compactação e dos desvios de umidade para as camadas aprovadas. Os resultados podem ser vistos na Figura 13 e na Figura 14 mostradas a seguir.

Figura 13 – Histograma de frequência acumulada e incremental do grau de compactação



Fonte: do autor.

Figura 14 – Histograma de frequência acumulada e incremental do desvio de umidade



Fonte: do autor.

A partir da análise dos histogramas apresentados, percebe-se que alguns ensaios não atenderam às especificações pré-estabelecidas. Os resultados, em geral, foram aderentes aos limites de grau de compactação e desvio de umidade propostos.

Para o rejeito utilizado no aterro de conformação, obteve-se uma média global do grau de compactação de 100,62%, com desvio padrão de 2,23% e uma média da variação do teor de umidade de -0,26% em relação à ótima, com desvio padrão de 0,88%, o que atende às especificações pré-estabelecidas.

4.3.2 Aterros experimentais

O uso de rejeito na conformação de superfícies de fechamento tem se tornado uma prática comum em diversas áreas de disposição de resíduos. Entretanto, é importante garantir que essa técnica seja viável, e que o grau de compactação obtido seja satisfatório. Com esse objetivo, foram realizados aterros experimentais, onde se variou a espessura da camada de rejeito a ser compactada.

O estudo teve como objetivo avaliar como o grau de compactação varia com o aumento da espessura da camada e a variação do número de passadas do rolo CA-25. Para isso, foram selecionados diferentes pontos de amostragem, e foram realizadas medições da densidade seca do solo em cada um desses pontos.

Conforme esperado, os resultados mostraram que o grau de compactação varia conforme se varia a espessura da camada de rejeito. Além disso, foi possível observar que o número de passadas do rolo CA-25 também influencia no grau de compactação, sendo que quanto maior o número de passadas, maior a densidade seca do solo.

Em suma, a principal relevância destes testes foi a obtenção de resultados que serão utilizados para otimizar o processo de compactação, indicando as condições de execução que resultem em graus de compactação satisfatórios em diferentes espessuras de camada e número de passadas. Para compactação de grandes volumes, é fundamental o conhecimento das condições ótimas de trabalho.

As etapas para a realização do aterro experimental envolveram a seguinte sequência construtiva: escavação do rejeito, carga, transporte, descarga e espalhamento do material utilizando uma escavadeira, tratamento do material para garantir sua homogeneização e controle de umidade, nivelamento com motoniveladora e a compactação com um rolo compactador.

As amostras necessárias para a execução dos ensaios de Hilf, foram coletadas na porção central da camada de teste, onde não ocorreu a passagem dos pneus dos equipamentos. Essa abordagem garantiu que as amostras fossem representativas do nível de compactação atingido pela passagem do tambor do rolo compactador, sem a influência de quaisquer efeitos secundários que pudessem distorcer os resultados dos testes.

Nesse estudo foram realizados testes com camadas de diferentes espessuras, são elas: 25, 30, 35, 40, 50 e 60 centímetros. Para as camadas de 25, 40, 50 e 60 centímetros o número de passadas avaliado foi de 4, 6 e 8. Para as camadas de 30 e 35 centímetros foram adicionados os números de passadas 10 e 12, além dos inferiores já citados. Foram realizadas coletas adicionais de amostras na parte intermediária superior das camadas com espessuras de 50 e 60 cm, a fim de comparar o nível de compactação com a intermediária inferior dessas camadas. Os resultados estão dispostos nos itens abaixo.

4.3.2.1 Camada de 25 centímetros

Foram realizadas duas camadas independentes de 25 centímetros, os resultados foram, no geral, aderentes, no que diz respeito ao aumento proporcional

entre número de passadas e grau de compactação. A Tabela 5 e a Tabela 6 apresentam os resultados para os diferentes pontos analisados.

Tabela 5 – Primeira camada de 25 centímetros de rejeito

Camada 1 Número de passadas	Ponto A			Ponto B		
	GC	Δw	w	GC	Δw	w
4	97,5	0,36	27,9	95,4	0,52	27,8
6	99,5	-0,86	27,2	96,4	-0,13	27,9
8	97,1	-0,54	27,1	99	-0,28	26,4

Fonte: do autor.

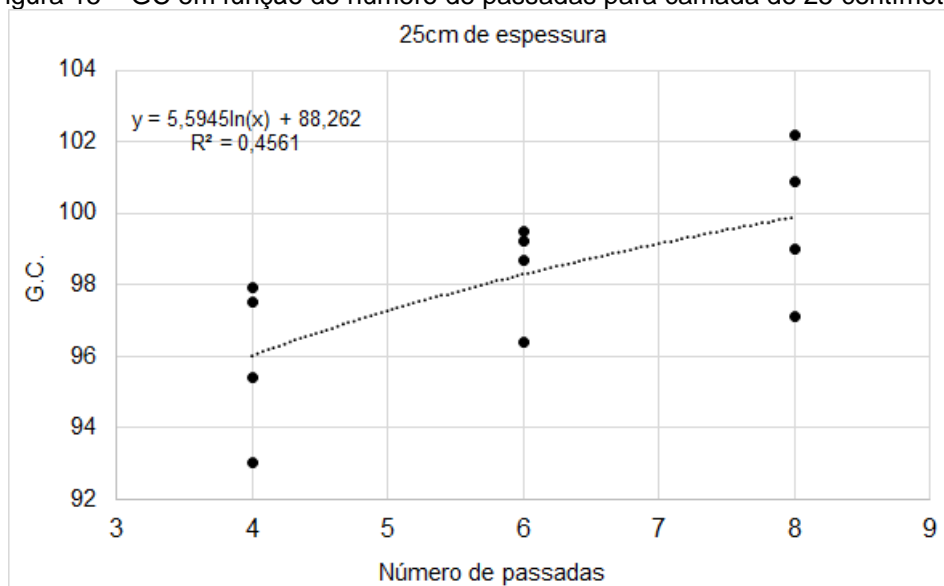
Tabela 6 – Segunda camada de 25 centímetros de rejeito

Camada 2 Número de passadas	Ponto C			Ponto D			Ponto E		
	GC	Δw	w	GC	Δw	w	GC	Δw	w
4	93	-1,8	25,2	97,9	0	26,4	-	-	-
6	98,7	-2,7	25,4	99,2	-0,1	26,4	-	-	-
8	-	-	-	100,9	-2,2	25,9	102,2	-1,5	25,8

Fonte: do autor.

A Figura 15 apresenta o gráfico de grau de compactação em função do número de passadas do rolo compactador e apresenta o ajuste dos dados dos ensaios válidos para análise do comportamento geral da camada.

Figura 15 – GC em função do número de passadas para camada de 25 centímetros



Fonte: Acervo do autor.

4.3.2.2 Camada de 30 centímetros

Foram realizadas duas camadas independentes de 30 centímetros, os resultados foram, no geral, aderentes, no que diz respeito ao aumento proporcional entre número de passadas e grau de compactação. A Tabela 7 e a Tabela 8 apresentam os resultados para os diferentes pontos estudados.

Tabela 7 – Primeira camada de 30 centímetros de rejeito

Camada 1 Número de passadas	Ponto A			Ponto B		
	GC	Δw	w	GC	Δw	w
4	89,1	-0,36	26,9	91,7	-0,57	26,8
6	92,9	-0,03	27,3	95,7	0,09	27,4
8	95,5	-0,78	27,6	95,4	-0,93	26,1

Fonte: Acervo do autor.

Na camada 2 foram realizados ensaios em pontos adjacentes por 3 diferentes empresas, com o fim de se ter uma verificação adicional. Os resultados se mostraram aderentes e estão representados na Tabela 8.

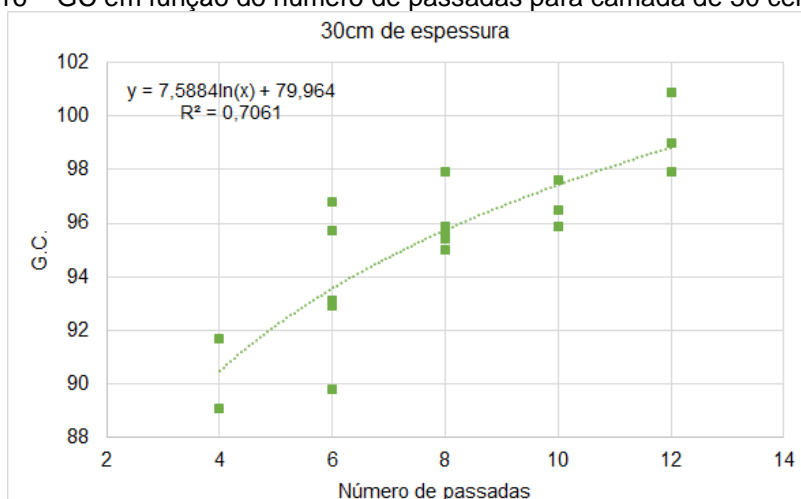
Tabela 8 – Segunda camada de 30 centímetros de rejeito

Camada 2 Número de passadas	Empresa A			Empresa B			Empresa C		
	GC	Δw	w	GC	Δw	w	GC	Δw	w
6	93,1	-0,1	26	-	-	-	89,8	-0,8	25,5
8	95,4	-1,4	25,5	95	-0,3	25,7	95,9	-1	24,7
10	-	-	-	96,5	-0,8	25,8	97,6	-0,9	25,5
10	-	-	-	95,9	-1,7	25,1	-	-	-
12	-	-	-	99	-0,3	26,4	-	-	-
12	-	-	-	97,9	-0,8	25,4	-	-	-
12	-	-	-	100,9	-0,8	26,2	-	-	-

Fonte: Acervo do autor.

A Figura 16 apresenta o gráfico de grau de compactação em função do número de passadas do rolo compactador e apresenta o ajuste dos dados dos ensaios válidos para análise do comportamento geral da camada.

Figura 16 – GC em função do número de passadas para camada de 30 centímetros



Fonte: Acervo do autor.

4.3.2.3 Camada de 35 centímetros

Foram realizadas quatro camadas independentes de 35 centímetros, os resultados foram, no geral, aderentes, no que diz respeito ao aumento proporcional entre número de passadas e grau de compactação. A Tabela 9, a Tabela 10, a

Tabela 11 e a Tabela 12 apresentam os resultados para os diferentes pontos estudados.

Tabela 9 – Primeira camada de 35 centímetros de rejeito

Camada 1 Número de passadas	Ponto A			Ponto B		
	GC	Δw	w	GC	Δw	w
4	100,5	-1	27,2	101,3	-1,2	26,3
6	97,3	-0,5	26,7	100,4	-0,6	25,4
8	101,4	-1	26,7	98,7	-0,9	26,6

Fonte: Acervo do autor.

Tabela 10 – Segunda camada de 35 centímetros de rejeito

Camada 2 Número de passadas	Ponto A			Ponto B			Ponto C		
	GC	Δw	w	GC	Δw	w	GC	Δw	w
4	94,5	1,76	29,3	91,4	2,09	30,6	-	-	-
6	92	2,04	30,5	93,6	1,73	29,8	-	-	-
8	95	1,94	31,2	95,5	1,75	30,3	95,8	2,92	30,9
8	96,8	1,59	28,9	98,7	0,32	28,4	-	-	-

Fonte: Acervo do autor.

Tabela 11 – Terceira camada de 35 centímetros de rejeito

Camada 3 Número de passadas	Ponto A			Ponto B			Ponto C		
	GC	Δw	w	GC	Δw	w	GC	Δw	w
4	96,9	0,6	29,4	95,4	-0,3	28,8	-	-	-
6	90,8	-0,1	28,3	96,1	-0,7	28	-	-	-
8	95	-0,5	28,5	94,3	-2,5	28,2	97,7	-1,5	28,4

Fonte: Acervo do autor

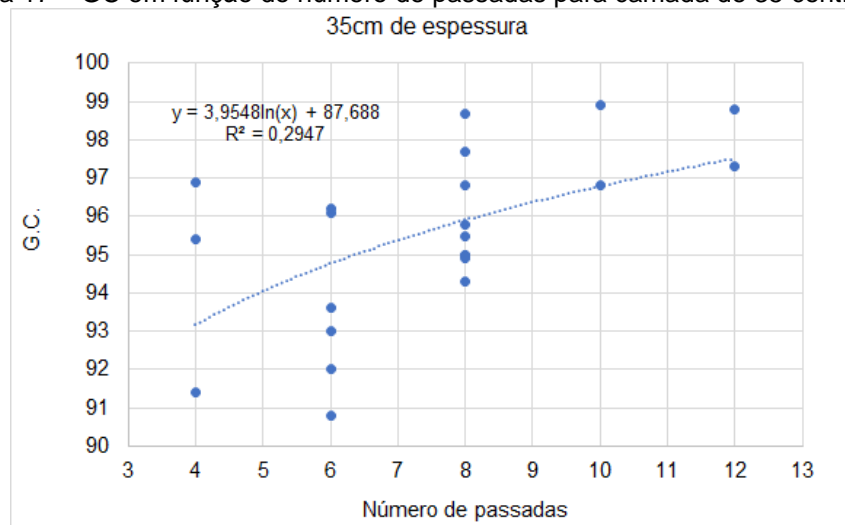
Tabela 12 – Quarta camada de 35 centímetros de rejeito

4ª camada Número de passadas	Empresa A			Empresa B		
	GC	Δw	w	GC	Δw	w
6	93	-1,8	26,3	96,2	-0,2	26,3
8	95	-2,2	26,4	94,9	-1	28,3
10	98,9	-0,9	26,3	96,8	-1,4	28
12	-	-	-	98,8	-0,1	28,4
12	-	-	-	97,3	0,6	28,6

Fonte: Acervo do autor

Na quarta camada 2 empresas diferentes realizaram ensaios em pontos adjacentes com fim de verificação complementar. A Figura 17 apresenta o gráfico de grau de compactação em função do número de passadas do rolo compactador e apresenta o ajuste dos dados dos ensaios válidos para análise do comportamento geral da camada.

Figura 17 – GC em função do número de passadas para camada de 35 centímetros



Fonte: Acervo do autor

4.3.2.4 Camada de 40 centímetros

Foi realizada uma camada de 40 centímetros, os resultados foram, no geral, aderentes, no que diz respeito ao aumento proporcional entre número de passadas e grau de compactação. A Tabela 13 apresenta os resultados para os diferentes pontos estudados.

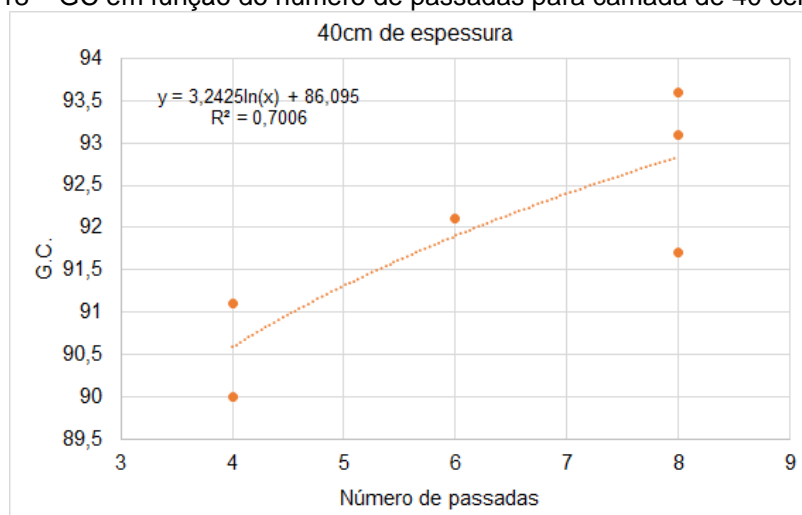
Tabela 13 – Camada de 40 centímetros de rejeito

Camada 1 Número de passadas	Ponto A			Ponto B			Ponto C		
	GC	Δw	w	GC	Δw	w	GC	Δw	w
4	91,1	-0,35	28,1	90	-0,45	28,1	-	-	-
6	92,1	-0,71	27,8	-	-	-	-	-	-
8	91,7	-0,64	27,3	93,6	-1	27,7	93,1	-0,33	28,5

Fonte: Acervo do autor

A Figura 18 apresenta o gráfico de grau de compactação em função do número de passadas do rolo compactador e apresenta o ajuste dos dados dos ensaios válidos para análise do comportamento geral da camada.

Figura 18 – GC em função do número de passadas para camada de 40 centímetros



Fonte: Acervo do autor

4.3.2.5 Camada de 50 centímetros

Para a camada de 50 centímetros foram coletadas amostras de topo e de base para se ter uma melhor análise da compactação da camada como um todo. Os resultados foram, no geral, aderentes, no que diz respeito ao aumento proporcional

entre número de passadas e grau de compactação. A Tabela 14 apresenta os resultados para os diferentes pontos estudados.

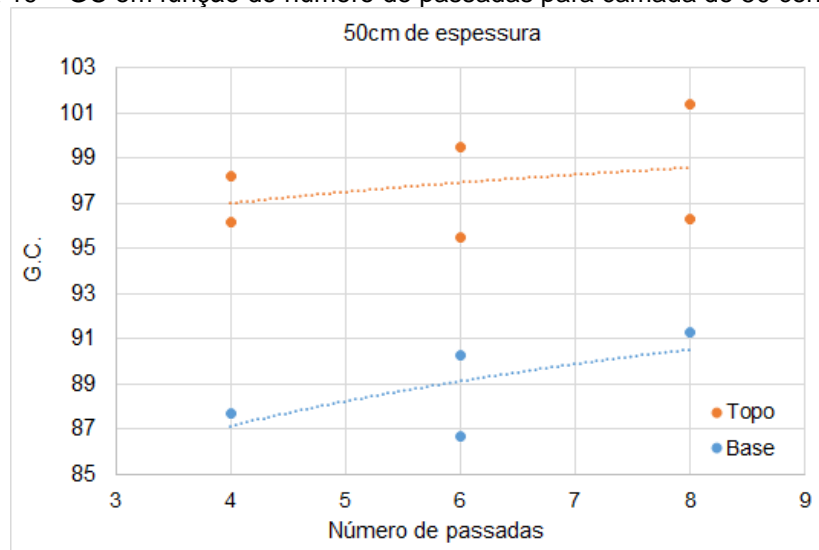
Tabela 14 – Camada de 50 centímetros de rejeito

Camada 1	Ponto A			Ponto B		
	GC	Δw	w	GC	Δw	w
4(topo)	96,2	-0,94	27	98,2	-0,91	27,8
6(topo)	99,5	-0,93	26,8	95,5	-0,78	28
8(topo)	101,4	-1,73	26,3	96,3	-1,16	26,1
4(base)	70,7	-0,77	27	87,7	-0,45	27,1
6(base)	86,7	-0,77	27,4	90,3	-0,71	27,4
8(base)	97,2	-0,48	26,8	91,3	-1,45	26,2

Fonte: Acervo do autor

A Figura 19 apresenta o gráfico de grau de compactação em função do número de passadas do rolo compactador e apresenta o ajuste dos dados dos ensaios válidos para análise do comportamento geral da camada.

Figura 19 – GC em função do número de passadas para camada de 50 centímetros



Fonte: Acervo do autor

4.3.2.6 Camada de 60 centímetros

Para a camada de 60 centímetros foram coletadas amostras de topo e de base para se ter uma melhor análise da compactação da camada como um todo. Os resultados foram, no geral, aderentes, no que diz respeito ao aumento proporcional

entre número de passadas e grau de compactação. A Tabela 15 apresenta os resultados para os diferentes pontos estudados.

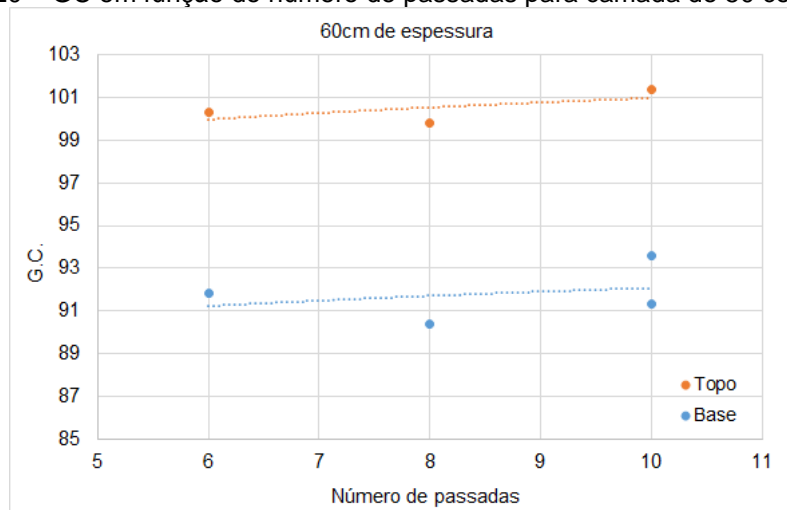
Tabela 15 – Camada de 60 centímetros de rejeito

Camada 1	Amostra A			Amostra B		
	GC	Δw	w	GC	Δw	w
6(topo)	100,3	-2	27	-	-	-
8(topo)	99,8	-1,2	26,4	-	-	-
10(topo)	-	-	-	101,4	-1,6	26,8
6(base)	-	-	-	91,8	-0,6	26,7
8(base)	90,4	-2,6	26,8	-	-	-
10(base)	93,6	-1,9	27	91,3	-1	27

Fonte: Acervo do autor

A Figura 20 apresenta o gráfico de grau de compactação em função do número de passadas do rolo compactador e apresenta o ajuste dos dados dos ensaios válidos para análise do comportamento geral da camada.

Figura 20 – GC em função do número de passadas para camada de 50 centímetros



Fonte: Acervo do autor

4.3.2.7 Comentários sobre resultados não conformes

Durante a realização dos ensaios de compactação de uma camada de rejeito, foram identificados alguns problemas que podem prejudicar a qualidade do trabalho.

Um deles foi a presença de equipamentos além do rolo compactador, que compactaram o material de forma não controlada. Apesar de ter sido tomado o cuidado de usar somente o tambor do rolo compactador para compactar a região do ensaio, em algumas camadas, principalmente nas primeiras, houve passagem de pneus ou esteiras de equipamentos, o que pode afetar a qualidade do resultado do ensaio.

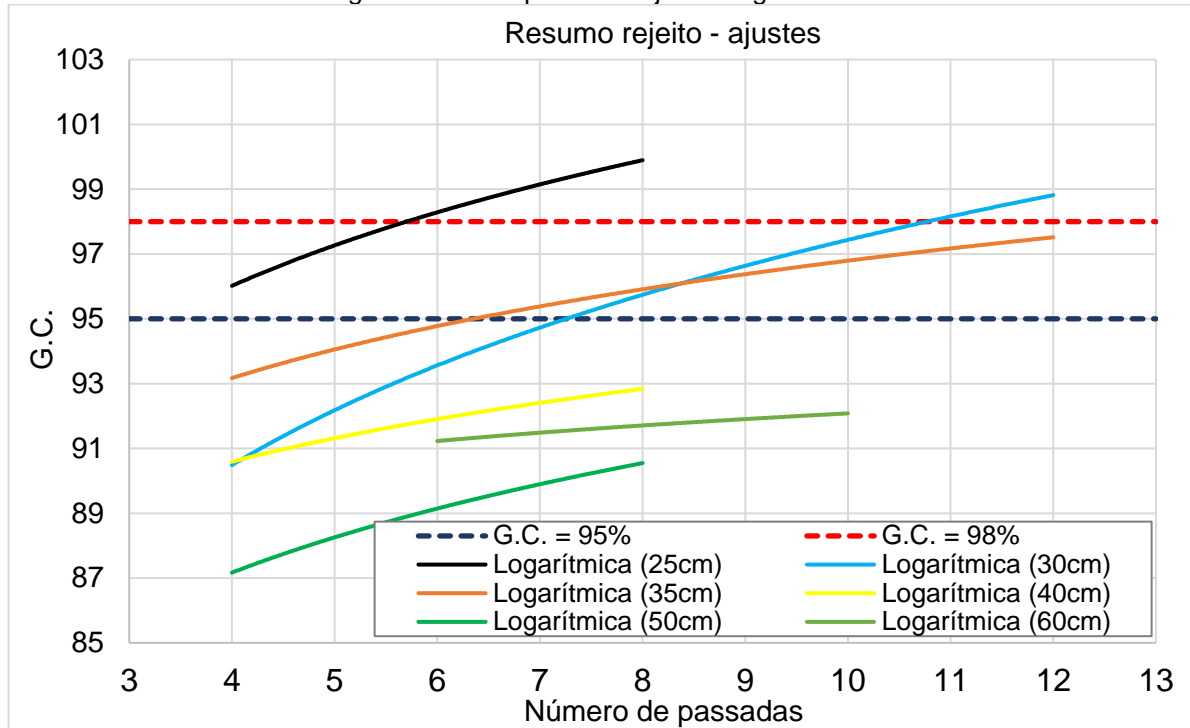
Outro problema identificado foi que a espessura do tratamento foi menor do que a espessura da camada. Como a profundidade em que a grade escarificadora pode alcançar é limitada, a região pode ter sido mais intensamente compactada devido às passagens dos equipamentos de tratamento, o que pode afetar a qualidade da camada.

Além disso, houve desvio da umidade além do limite especificado. A ocorrência de chuvas antes ou durante a realização dos ensaios interfere diretamente no controle de umidade. A análise para manter ou não o ensaio foi feita de forma a se avaliar a tendência dos ensaios adjacentes.

Por fim, outro fator que pode ter influenciado na não conformidade de alguns ensaios é a coleta de amostras ter sido realizada em profundidades superiores à espessura da camada, o que pode conter amostras parciais da fundação da camada. Embora tenha sido controlada a espessura da camada antes e após a compactação, há dificuldades no controle da escavação. Todos esses problemas podem afetar a qualidade do trabalho e devem ser considerados na análise dos resultados obtidos.

Com o fim de uma melhor visualização, a Figura 21 apresenta o compilado de ajustes logarítmicos dos pontos relativos a diferentes espessuras de camada, número de passadas e grau de compactação.

Figura 21 – Compilado de ajustes logarítmicos



Fonte: Acervo do autor

4.4 Análise estatística

A Tabela 16 apresenta as combinações entre a espessura das camadas (E) e o número de passadas (P) do rolo compactador selecionados para o planejamento fatorial 3^2 , os resultados do Grau de Compactação, o valor médio (GCmed) e o desvio padrão.

Tabela 16 – Composições e resultados de Grau de Compactação.

Combinação	Espessura (E)	Número de Passadas (P)	Grau de Compactação				Desvio
			GC1	GC2	GC3	GCmed	
1	25	4	93	97,9	95,4	95,4	2,5
2	25	6	98,7	99,2	96,4	98,1	1,5
3	25	8	102,2	100,9	99	100,7	1,6
4	30	4	89,1	91,7		90,4	1,8
5	30	6	92,9	95,7	93,1	93,9	1,6
6	30	8	95,5	95,4	95,4	95,4	0,1
7	35	4	96,9	95,4	91,4	94,6	2,8
8	35	6	90,8	96,1	93,6	93,5	2,7
9	35	8	95	94,3	95,5	94,9	0,6

Fonte: do autor.

A Tabela 17 mostra resultados da análise de variância dos dados experimentais de Grau de Compactação. Adotando um nível de significância (α) de 0,05, os fatores E linear, E quadrático, P linear, e a interação entre E e P mostram-se significantes para o modelo.

A Tabela 17 também mostra que o modelo não apresenta falta de ajuste ($p = 0,669 \geq \alpha$). A proporção de variabilidade na medida da densidade de massa aparente que é explicada pelos fatores E e P, obtida na análise de variância, é $R^2 = 0,707$.

Tabela 17 – Análise de Variância (ANOVA).

Fonte	Soma Quadrados	Graus Liberdade	Média Quadrados	F	p
E	63,094	1	63,094	17,622	0,001
E²	43,785	1	43,785	12,229	0,003
P	49,152	1	49,152	13,728	0,002
E*P	18,008	1	18,008	5,029	0,039
Falta de ajuste	8,609	4	2,152	0,601	0,667
Erro	60,867	17	3,580		
Total	237,330	25			

Fonte: do autor.

Para avaliar a adequação do modelo foi realizada a análise dos resíduos. Os valores residuais seguem uma distribuição normal e estão aleatoriamente distribuídos. Portanto, o modelo é adequado para descrever o comportamento do Grau de Compactação do aterro experimental como uma função dos fatores E e P.

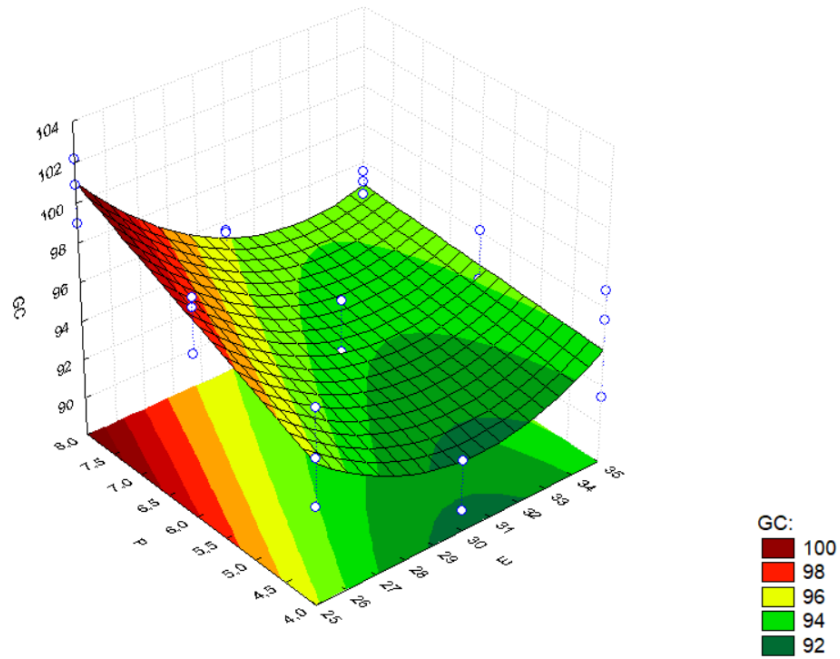
A equação final ajustada para o modelo de GC, em função dos fatores E e P, pode ser representada pela Equação 7. A Figura 22 representa graficamente o efeito de E e P sobre o GC e a Figura 23 apresenta a projeção da superfície de resposta.

$$GC = 178,93 - 6,4048E + 0,1128E^2 + 4,5283P - 0,1225EP \quad \text{Equação 7}$$

Em suma, os resultados indicaram que para se atingir um grau de compactação médio de 98%, utilizando-se do mínimo volume de rejeito e o mínimo número de passadas do rolo compactador, para uma camada de 25 centímetros é necessário 6 passadas do rolo compactador.

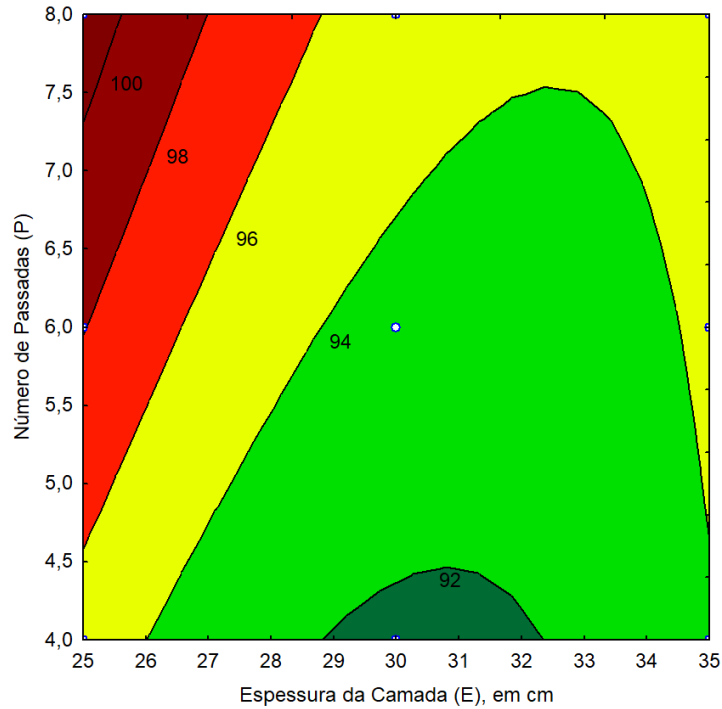
Isso é uma constatação importante no estudo, visto que o mínimo grau de compactação exigido no projeto estudado nesse trabalho foi de 98%, fazendo-se atendido pela espessura e número de camadas citados acima.

Figura 22 - Superfície de reposta do GC em função de E e P.



Fonte: do autor.

Figura 23 – Projeção da superfície de reposta do GC em função de E e P.



Fonte: do autor.

4.5 Pós-obra

Após a finalização da obra de terraplenagem da superfície de conformação foram realizadas checagens visuais e verificado se o comportamento do rejeito atendeu as especificações de compactação. Foram avaliados aspectos como o surgimento de trincas e o transporte de sedimentos.

O reservatório de rejeitos, cujas respectivas especificações de compactação foram relatadas no item 4.3.1, apresentou trincas de pequenas magnitudes e um carreamento de finos considerável em eventos chuvosos.

A fim de comparação, foi verificada uma superfície de conformação executada em um reservatório sem controle tecnológico de compactação. Essa obra apresentou trincas de maior magnitude, sendo utilizado o mesmo material na obra de terraplenagem (rejeito de bauxita) e mesmas condições climáticas e ambientais. Além de um carreamento de finos similar ao reservatório citado anteriormente.

As imagens apresentadas abaixo mostram a diferença de tamanho das trincas identificadas no reservatório 01 (terraplenagem com controle tecnológico) e reservatório 02 (terraplenagem sem controle tecnológico).

Figura 24 – Reservatório 01 - compactação com controle tecnológico



Fonte: Acervo do autor

Figura 25 – Reservatório 02 - compactação sem controle tecnológico



Fonte: Acervo do autor

5 CONCLUSÕES

O propósito principal deste estudo de caso foi avaliar o uso de rejeito de bauxita em obras de terraplenagem para superfície de conformação de barragens de rejeito em processo de fechamento. Para tal, foram apresentados resultados de caracterização do material, aterros experimentais e monitoramento visual pós obra.

O rejeito de bauxita mostrou-se aderente às condições de compactação pré-estabelecidas. Sua caracterização comprovou ser um tipo de material argilo-siltoso com características muito plásticas, considerado Inerte Não Perigoso, o que favorece o seu uso em obras que vigoram por anos no meio ambiente.

Foram realizados aterros experimentais para subsidiar informações para futuras aplicações, com o objetivo de obter condições executivas otimizadas, dependendo da espessura da camada e do número de passagens do equipamento compactador. Os resultados indicaram que a espessura ideal de camada para atingir 95% do Proctor Normal foi de cerca de 30 cm, com a realização de entre 6 e 7 passadas. Para atingir 98% do Proctor Normal, a espessura ideal foi de cerca de 25 cm, com a realização de cerca de 6 passadas.

No período de monitoramento pós-obra foi verificado que o rejeito tratado com as condições de compactação citadas no item 4.3.1 apresentou melhores resultados visuais, no que diz respeito ao surgimento de trincas. Isso pode ser atrelado à compactação ter sido realizada no ramo seco da curva de compactação a maiores graus de compactação.

Esses resultados são importantes, pois fornecem informações valiosas para otimizar futuras aplicações de superfícies de conformação. Dessa forma, é possível garantir a eficácia da compactação do material e evitar possíveis problemas de trincas ou transporte superficial de sedimentos após a terraplenagem. A análise desses dados pode ser utilizada como referência para a execução de projetos de terraplenagem em larga escala, promovendo a segurança e a qualidade da obra.

De modo geral, conclui-se que o uso de rejeito em obras de terraplenagem de fechamento além de factível, se mostra uma alternativa sustentável e economicamente viável para empresas do ramo minerário.

REFERÊNCIAS

- ABREU, G. F. (2017). *Estudo da produtividade de tratores D11T CD no método de lavras por tiras variando os ângulos do pit em uma mina de bauxita*. Ouro Preto: Trabalho de Conclusão de curso - UFOP.
- BARBETTA, P. A., REIS, M. M., & BORNIA, A. C. (2004). *Estatística para cursos de engenharia e informática*. São Paulo: Atlas.
- BASTO, K. F. (2021). *Influência da forma de disposição de um rejeito de minério de ferro no perfil de resistência não drenada de um depósito*. Ouro Preto: Trabalho Final de Curso - UFOP.
- BOX, G. E., & DRAPPER, N. R. (2007). Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analyses. *Hoboken*, p. 857p.
- Canadian Dam Association. (2014). Technical Bulletin. *Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams*.
- Corr, D. J., Juenger, M., Monteiro, P., & Bastacky, J. (2004). Investigating entrained air voids and Portland cement hydration with low-temperature scanning electron microscopy. *Cement & Concrete Composites*, 26, 1007–1012.
- FALCUCCI, A. (2007). *A influência de floculantes poliméricos na formação de pastas minerais*. . Belo Horizonte: Tese de mestrado.
- HINKELMANN, K. K. (2008). Design and analysis of experiments. *John Wiley & Sons*, p. 631p.
- Lottermoser, B. (2007). *Mine wastes*. Heidelberg: Springer.
- Lu, H.-J. e. (2013). The swelling, shrinkage and cracking properties of compacted clay. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 5-10.
- MARINHO, F. (2023, Março 16). *Guia da Engenharia*. Retrieved from Guia da Engenharia: <https://www.guiadaengenharia.com/classificacao-solos/>
- MATTOS, V. L. (2004). *Identificação de efeitos de dispersão em experimentos com poucas replicações*. Florianópolis: Tese Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina.
- MINERE, I. (2023, Janeiro 23). Retrieved from <https://institutominere.com.br/blog/a-influencia-das-pilhas-de-esteril-no-resultado-operacional-das-mineradoras>

- MONTGOMERY, D. C. (2009). *Design and Analysis of Experiments*. 7 ed. Hoboken, John Wiley & Sons, p. 656p.
- MONTGOMERY, D. C., & RUNGER, G. C. (2003). *Applied Statistics for engineers*. 3 ed. Hoboken, John Wiley & Sons, p. 656p.
- MRN. (2023, MARÇO 16). Retrieved from <https://www.mrn.com.br/index.php/pt/o-que-fazemos/perfil-litologico-da-jazida>
- MYERS, R. H., MONTGOMERY, D. C., & ANDERSON-COOK, C. M. (2009). *Response Surface Methodology. Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, 3 ed. Hoboken, John Wiley & Sons, p. 1247p.
- PALOMINO, C. (2017). *Caracterização geomecânica de um rejeito de mineração de bauxita. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.*
- Sampaio, J., Andrade, M., & Dutra, A. (2005). *Bauxita. CETEM/MCT.*
- SANTOS, K. S. (2015). *Análise faciológica da Formação Alter do Chão próximo a cidade Vitória do Jari (AP), Bacia do Amazonas.* Marabá: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do.
- SANTOS, P. S. (1989). *Ciência e Tecnologia das Argilas.* Edgard Blücher.
- SILVA FILHO, E. B., ALVES, M. C., & DA MOTTA, M. (2007). *Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas.* *Matéria (Rio de Janeiro)*, 322-338.
- VAN DEURSEN, C. M. (2016). *Métodos de desaguamento e disposição de rejeito da bauxita: estudo de caso e avaliação econômica.* São Paulo: Tese de doutorado - USP.
- VICK, S. G. (1990). *Planning, design, and analysis of tailings dams.* BiTech Publishers Ltd.
- VILLAR, L. F. (1990). *Análise do comportamento de resíduos industriais de bauxita:.* Rio de Janeiro: Dissertação Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- VILLAR, L. F. (2002). *Estudo do Adensamento e Ressecamento de Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita.* Rio de Janeiro: Tese de Doutorado - PUC Rio.

SILVEIRA, J. F. A. Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento. Oficina de Textos, 2006.