



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



MAÍRA FERREIRA TEIXEIRA

**AVALIAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE COMPACTAÇÃO MAIS EFICAZES PARA
REJEITOS DE BAUXITA A PARTIR DE ANÁLISES DE ESTABILIDADE DE UMA
PILHA DE REJEITOS FILTRADOS, COM BASE EM ENSAIOS REALIZADOS NO
ATERRO EXPERIMENTAL.**

OURO PRETO

Abril 2025

Avaliação de procedimentos de compactação mais eficazes para rejeitos de bauxita a partir de análises de estabilidade de uma pilha de rejeitos filtrados, com base em ensaios realizados no aterro experimental.

Maíra Ferreira Teixeira

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

Data da aprovação: 11/04/2025

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Felipe de Campos Loch – UFOP

Coorientadora: Me. Juliana Santos Fabre

OURO PRETO

Abril 2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

T266a Teixeira, Maira Ferreira.

Avaliação de procedimentos de compactação mais eficazes para rejeitos de bauxita a partir de análises de estabilidade de uma pilha de rejeitos filtrados com base em ensaios realizados no aterro experimental. [manuscrito] / Maira Ferreira Teixeira. - 2025.

76 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Felipe de Campos Loch.

Coorientadora: Profa. Ma. Juliana Santos Fabre.

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

1. Solos - Compactação. 2. Barragens de rejeitos - Bauxita. 3. Barragens e açudes - Fator de Segurança. I. Loch, Felipe de Campos. II. Fabre, Juliana Santos. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Maíra Ferreira Teixeira

Avaliação de procedimentos de compactação mais eficazes para rejeitos de bauxita a partir de análises de estabilidade de uma pilha de rejeitos filtrados, com base em ensaios realizados no aterro experimental.

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

Aprovada em 11 de abril de 2025

Membros da banca

Prof. Dr. Felipe de Campos Loch - Orientador - DECIV - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Mateus Oliveira Xavier - DEARQ - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Hebert da Consolação Alves - DECIV - Universidade Federal de Ouro Preto

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 11/04/2025



Documento assinado eletronicamente por **Felipe de Campos Loch, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/04/2025, às 11:38, 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 **0894618** e o código CRC **5BC6CCCO**.

*Dedico este trabalho aos meus pais e ao meu irmão,
sem vocês nada disso teria sido possível.*

AGRADECIMENTOS

Sou grata a Deus por me guiar em cada passo ao longo desses anos de graduação. Agradeço aos meus pais, Ângela e Wilton, que se esforçaram incansavelmente para que eu pudesse realizar o sonho de estudar engenharia. Ao meu irmão Maicon, que está sempre ao meu lado em todos os momentos da minha vida. À minha avó Maria, pelas suas orações e carinho.

Um agradecimento especial ao meu orientador Felipe e à minha coorientadora Juliana, pela paciência, comprometimento e dedicação na orientação, que foram essenciais para a conclusão deste trabalho.

Por fim, agradeço à UFOP e à Escola de Minas pelo ensino e por todas as oportunidades que me proporcionaram durante esses anos de graduação. Sem dúvida, cursar a graduação nesta instituição foi fundamental para minha formação como profissional.

RESUMO

Para realizar projetos seguros de disposição de rejeitos de mineração em pilhas, é necessário avaliar os métodos de compactação que proporcionem maior estabilidade. Este trabalho teve como objetivo identificar o procedimento de compactação mais eficaz para rejeitos de bauxita, capaz de proporcionar os maiores valores de fator de segurança. A pesquisa foi conduzida através de análises de uma pilha hipotética de rejeitos filtrados, com base em ensaios realizados em um aterro experimental. Os métodos avaliados incluíram a compactação com trator de esteira e rolo compactador pé de carneiro vibratório, em diferentes condições de umidade (ótima, acima e abaixo da umidade ótima). Foram realizados ensaios triaxiais adensados não drenados saturados (CIUSAT) para determinar os parâmetros de resistência do rejeito. Os resultados indicaram que todas as condições analisadas atenderam ao critério mínimo de fator de segurança (FS) igual a 1,50. A condição "Wot com rolo pé de carneiro" apresentou o maior valor de FS, sendo a mais indicada para ser utilizada no depósito de pilha estudado.

Palavras-chaves: Compactação, Rejeitos de Bauxita, Fator de Segurança.

ABSTRACT

To carry out safe projects for the disposal of mining waste in piles, it is necessary to evaluate the compaction methods that provide greater stability. This study aimed to identify the most effective compaction procedure for bauxite tailings, capable of providing the highest safety factor values. The research was conducted through analyses of a hypothetical pile of filtered tailings, based on tests carried out in an experimental landfill. The evaluated methods included compaction with a bulldozer and a vibratory sheep's foot roller, under different moisture conditions (optimal, above, and below optimal moisture). Consolidated undrained saturated triaxial tests (CIUSAT) were performed to determine the resistance parameters of the tailings. The results indicated that all analyzed conditions met the minimum safety factor (FS) criterion of 1.50. The "optimal moisture with sheep's foot roller" condition presented the highest FS value, being the most suitable to be used in the studied pile deposit.

Keywords: Compaction, Bauxite Tailings, Safety Factor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Método de Alçamento a Montante.....	19
Figura 2 – Método de Alçamento a Jusante.	20
Figura 3 – Método de Alçamento de Linha de Centro.....	21
Figura 4 – Empilhamento Drenado.	22
Figura 5 – Fases da disposição subaérea. a) Período de enchimento: ocorrência do processo de sedimentação e adensamento, b) Período de espera: ocorrência do processo de adensamento e ressecamento.....	22
Figura 6 – Seção da Pilha Dividida em Duas Zonas.	26
Figura 7 – Filtro Prensa Horizontal.	28
Figura 8 – Filtro Prensa Vertical.	29
Figura 9 – Esforços atuantes do Método de Spencer	32
Figura 10 – Esquema do Ensaio Triaxial.	34
Figura 11 – Etapas do Trabalho.	36
Figura 12 – Croqui do Aterro Experimental.	38
Figura 13 – Processo de locação com estacas da área a ser utilizada.	39
Figura 14 – Espalhamento do Material com o emprego da motoniveladora.....	40
Figura 15 – Processo de Cravação do Cilindro Biselado na Camada Compactada.	43
Figura 16 – Realização do Método Hilf para determinação dos Parâmetros de Controle do Aterro.....	43
Figura 17 – Coleta de Amostra Deformada e Indeformada.	44
Figura 18 – Seção hipotética utilizada nas análises.	50
Figura 19 – Carta de Plasticidade.....	54
Figura 20 – Curva Granulométrica.....	55
Figura 21 - Trajetória de Tensões na condição Wot +6% com Trator de Esteira.	56
Figura 22 – Variação de Poropressão x Deformação Axial na condição Wot + 6% com Trator de Esteira.	57
Figura 23 – Trajetória de Tensões na condição Wot +4% com Trator de Esteira.	57
Figura 24 - Variação de Poropressão x Deformação Axial na condição Wot + 4% com Trator de Esteira.	58
Figura 25 – Trajetória de Tensões na condição Wot +2% com Trator de Esteira.	58

Figura 26 – Variação de Poropressão x Deformação Axial na condição na condição Wot +2% com Trator de Esteira.....	59
Figura 27 – Trajetória de Tensões na condição Wot com Trator de Esteira.	59
Figura 28 – Variação de Poropressão x Deformação Axial na condição na condição Wot com Trator de Esteira.	60
Figura 29 – Trajetória de Tensões na condição Wot -2% com Trator de Esteira.	60
Figura 30 – Variação de Poropressão x Deformação Axial na condição Wot -2% com Trator de Esteira.	61
Figura 31 – Trajetória de Tensões na condição Wot +2% com Rolo Pé de Carneiro.....	61
Figura 32 – Variação de Poropressão x Deformação Axial na condição Wot +2% com Rolo Pé de Carneiro.	62
Figura 33 – Trajetória de Tensões na condição Wot com Rolo Pé de Carneiro.	62
Figura 34 - Variação de Poropressão x Deformação axial na condição Wot com Rolo Pé de carneiro.....	63
Figura 35 – Trajetória de Tensões na condição Wot -2% com Rolo Pé de Carneiro.....	63
Figura 36 – Variação de Poropressão x Deformação axial na condição Wot -2% com Rolo Pé de Carneiro.	64
Figura 37 – Análise de estabilidade para a condição Wot +6% com trator de esteira.	66
Figura 38 – Análise de estabilidade para a condição Wot +4% com trator de esteira.	67
Figura 39 – Análise de estabilidade para a condição Wot +2% com trator de esteira.	67
Figura 40 – Análise de estabilidade para a condição Wot com trator de esteira.....	68
Figura 41 – Análise de estabilidade para a condição Wot -2% com trator de esteira.	68
Figura 42 – Análise de estabilidade para a condição Wot +2% com rolo pé de carneiro	69
Figura 43 – Análise de estabilidade para a condição Wot com rolo pé de carneiro.	69
Figura 44 – Análise de estabilidade para a condição Wot -2% com rolo pé de carneiro. .	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de espessadores usualmente utilizados para polpas de minério de ferro	24
Tabela 2 – Mecanismos de Filtragem e os Principais fornecedores.....	25
Tabela 3 – Fatores de Segurança Mínimos para barragens de Mineração.	30
Tabela 4 – Condições de Equilíbrio Estático satisfeitas de cada método.	31
Tabela 5 - Características Gerais do Trator de Esteira D-61 Komatsu.	37
Tabela 6 – Características Gerais do Rolo Compactador Pé de Carneiro Vibratório VAP 70.....	37
Tabela 7 – Resultados do Ensaio Proctor Normal, Peso Específico Seco de Campo e Grau de Compactação.	51
Tabela 8 – Resultados Peso Específico Natural e Limites de Atteberg.	52
Tabela 9 – Caracterização Granulométrica.	55
Tabela 10 – Parâmetros de Resistência Efetivos.....	64
Tabela 11 – Resumo dos parâmetros utilizados e do Fator de segurança obtido.....	70

LISTADE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Acp – Área Inicial

Af – Área Final

ANM – Agência Nacional de Mineração

c' – Coesão Efetiva

CID – Ensaio Triaxial Adensado Drenado

CIU – Ensaio Triaxial Adensado Não Drenado

CP – Corpo De Prova

C_v – Coeficiente De Adensamento

d – Diâmetro

d_f – Diâmetro Final

e – Índice De Vazios

e_f – Índice De Vazios Final

ϵ_a – Deformação Axial

Φ' – Ângulo De Atrito Efetivo

FS – Fator de Segurança

GC – Grau De Compactação

G_s – Densidade Dos Grãos

h – Altura

h_f – Altura Final

IP – Índice De Plasticidade

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

$M_{\text{esp.seca}}$ – Massa Específica Seca Final

$M_{\text{esp.úmida}}$ – Massa Específica Úmida

M_S – Massa Seca

$M_{\text{úmida}}$ – Massa Úmida

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

ρ_d – Massa Específica Aparente Seca

S – Grau De Saturação

S_u – Resistência Não Drenada

SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos

σ_1 – Tensão Vertical Total

σ'_1 – Tensão Vertical Efetiva

σ_3 – Tensão Horizontal Total

σ'_3 – Tensão Horizontal Efetiva

σ_d – Tensão Desviadora

σ'_c – Tensão Efetiva Do Cisalhamento

u – Poropressão

UU – Ensaio Triaxial Não Adensado Não Drenado

V_{ep} – Volume Inicial

V_f – Volume Final

W – Umidade

W_{ot} – Umidade Ótima

$\Delta\mu$ – Variação De Poropressão

ΔV_f – Variação Do Volume

$\gamma_{\text{água}}$ – Peso Específico Da Água

γ_d – Peso Específico Seco

$\gamma_{d\text{campo}}$ – Peso Específico Seco De Campo

$\gamma_{d\text{máx}}$ – Peso Específico Seco Máximo

γ_{nat} – Peso Específico Natural

γ_s – Peso Específico Dos Sólidos

γ_{sat} – Peso Específico Saturado

SUMÁRIO

1. Introdução.....	15
1.1. Objetivo	16
1.1.1. Objetivos específicos	16
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	17
2.1. REJEITOS DE MINERAÇÃO.....	17
2.2. MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS.....	18
2.2.1. Disposição Convencional: Barragem de Rejeito	18
2.2.2. Empilhamento Drenado	21
2.2.3. Disposição Subaérea.....	22
2.2.4. Disposição de Rejeitos Espessados	23
2.3. EMPILHAMENTO DE REJEITOS FILTRADOS	24
2.3.1. Filtro Prensa.....	27
2.4. ESTABILIDADE DE TALUDES	29
2.4.1. Análise de Estabilidade Determinística	30
2.4.2. Análise de Estabilidade Probabilística	33
2.5. ENSAIO TRIAXIAL.....	33
2.5.1. Ensaio Triaxial Adensado não Drenado (CIU).....	34
3. METODOLOGIA.....	36
3.1. PLANEJAMENTO DO ATERRO EXPERIMENTAL	37
3.2. PROCEDIMENTOS EXECUTIVOS.....	38
3.2.1. Preparação da Área Teste.....	38
3.2.2. Escavação do Rejeito.....	39
3.2.3. Tratamento e Homogeneização do Rejeito.....	39
3.2.4. Compactação do Material.....	40

3.3.	CONTROLE TECNOLÓGICO DAS CAMADAS COMPACTADAS	42
3.3.1.	Ensaio de Controle Realizados na Pista de Compactação	42
3.3.2.	Procedimentos dos Ensaio Realizados no Laboratório	43
3.4.	MODELAGEM DETERMINÍSTICA.....	46
3.5.	INTERPRETAÇÃO DOS ENSAIOS TRIAXIAIS CIU _{SAT}	46
3.6.	MODELO DE ANÁLISE	49
4.	RESULTADOS	51
4.1.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	51
4.2.	ENSAIOS TRIAXIAIS CIU _{SAT}	56
4.3.	ANÁLISE DE ESTABILIDADE	66
5.	CONCLUSÃO.....	72

1. INTRODUÇÃO

A mineração consiste em um conjunto de atividades tais como pesquisar, extrair, beneficiar, tratar e transformar recursos minerais de modo que esses materiais se tornem benefícios sociais e econômicos. A geração de resíduos faz parte de qualquer processo produtivo e neste setor são produzidos os rejeitos da mineração. Estes rejeitos podem ser o estéril, resíduo sólido da extração que não possui valor imediato e o rejeito, resíduo gerado após o beneficiamento (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 2016).

No Brasil, a atividade mineradora ocorre há cerca de 300 anos, e por muito tempo a geração de resíduos e os seus impactos quando lançados ao ambiente muitas vezes não recebem a devida atenção, tendo a sua disposição final lançada diretamente ao meio ambiente. Após a revolução industrial, além da crescente demanda de insumos, houve aumento significativo na produção de rejeitos, necessitando assim de retirá-los de perto da área de produção e dispendo-os em outros locais, muitas vezes próximos a cursos d'água, surgindo assim as primeiras construções de barramentos e diques de contenção (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 2016). Segundo a ABNT NBR 13028:2024, a disposição de rejeito consiste no acúmulo de rejeitos de forma planejada e organizada de modo que sejam mínimos os impactos ambientais e riscos estruturais. Esta disposição pode ser feita através de barragens de rejeito, estruturas planejadas e projetadas de forma controlada para receber os rejeitos provenientes do beneficiamento do minério.

Outra forma de se dispor os rejeitos é por empilhamento drenado. Esta estrutura pode ser construída hidráulica ou mecanicamente com rejeitos, possuindo um sistema de drenagem que caracteriza a estrutura como um maciço permeável. Como ponto positivo, estas estruturas possuem flexibilidade do local de implantação, podendo ser locadas em fundo de vales, encostas, dentre outros locais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2024).

Quando ocorre separação de sólidos e líquidos por um processo de filtração, o empilhamento é caracterizado como empilhamento de rejeitos filtrados. Entretanto, materiais com índices altos de porcentagem fina podem tornar inviável a utilização do processo de filtração (PORTES, 2013).

O empilhamento de rejeitos é realizado por meio de compactação. Este processo envolve a densificação de materiais particulados ou granulares, aplicando energia para expulsar o ar dos vazios do solo. A compactação pode ser executada de duas maneiras principais: utilizando rolos compactadores ou através do tráfego de veículos. Nos depósitos de estéril construídos pelo método convencional, a compactação ocorre principalmente devido ao tráfego de veículos na superfície, cujo objetivo principal é a disposição do material, não a compactação em si. Por outro lado, a compactação com rolo compactador é feita com equipamentos específicos projetados para aplicar força sobre o material, aumentando sua densidade. Essa força pode ser gerada pelo peso do rolo ao trafegar na superfície ou por uma força adicional, como a queda do rolo, exemplificada por rolos de impacto ou giratórios com peso excêntrico (NUNES, 2014). Neste contexto, o presente trabalho propõe um estudo sobre a compactação de rejeitos de mineração, visando identificar o procedimento de compactação mais eficaz para rejeitos de bauxita, capaz de proporcionar os maiores valores de fator de segurança.

1.1. OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo identificar o procedimento de compactação mais eficaz para rejeitos de bauxita, capaz de proporcionar os maiores valores de fator de segurança. A partir de análises de uma pilha hipotética de rejeitos filtrados, com base nos ensaios realizados no aterro experimental.

1.1.1. *Objetivos específicos*

Como objetivos específicos, têm-se:

- Interpretar e analisar os ensaios triaxiais CIU_{SAT} realizados em amostras do aterro experimental;
- Analisar os ensaios de caracterização realizados em amostras do aterro experimental;
- Determinar os parâmetros de resistência do rejeito;
- Realização de análises de estabilidade, através do software Slide 2, com os valores obtidos dos parâmetros de resistência do rejeito.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A geração de resíduos é inerente a qualquer processo produtivo. Na mineração, esses resíduos podem se dividir em estéril, um resíduo sólido originado da extração, e rejeito, gerado após o beneficiamento do minério. Para a destinação desses resíduos, geralmente utilizam-se barragens de rejeito e depósitos de estéril (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 2016). Essas estruturas de disposição de resíduos requerem a aplicação de métodos e técnicas específicas, que serão detalhadas a seguir.

2.1. REJEITOS DE MINERAÇÃO

De acordo com a Lei Federal nº 12.305/2010 – 02/08/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos sólidos (PNRS) rejeito pode ser definido como: “resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada.”

Segundo Edraki et al. (2014), pode-se definir os rejeitos de mineração como materiais que após o beneficiamento do mineral com água, possuem granulometria fina, podendo conter em sua composição metais pesados e reagentes utilizados durante o processamento.

Gomes (2004) apud por Peixoto (2012), expõe para os rejeitos de mineração a seguinte classificação:

- rejeitos em polpa (*slurry*): rejeito que apresenta baixa teor de sólidos e que possui baixa ou nenhuma resistência ao transporte por gravidade ou via bombeamento;
- rejeitos espessados ou polpas de elevada densidade (*thickened tailings*): rejeitos parcialmente desaguados, detém a consistência semelhante a de uma polpa, sendo o transporte feito por bombeamento;
- rejeitos em pasta (*paste tailings*): rejeitos que possuem a consistência típica de uma pasta, que não fluem facilmente e nem liberam grandes quantidades de água quando são dispostos;
- rejeitos filtrados úmidos (*wet cake tailings*): rejeitos com fisionomia de uma massa saturada ou quase-saturada em que o transporte não pode ser feito por bombeamento;

- rejeitos filtrados secos (*dry cake tailings*): rejeitos com aspecto de uma massa não saturada com grau de saturação entre 70% e 85% em que o transporte não pode ser feito por bombeamento.

2.2. MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

Durante as operações de mineração, uma quantidade significativa de rejeitos é gerada como subproduto dos processos de beneficiamento mineral. Em 2010, somente com as barragens de rejeitos do estado de Minas Gerais, aproximadamente 49 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério foram produzidos (Aguiar, 2013).

Esses rejeitos devem ser armazenados de maneira adequada e segura, a fim de minimizar os impactos ambientais. Para isso, é fundamental que a disposição dos rejeitos ocorra em áreas previamente licenciadas pelos órgãos ambientais competentes, garantindo que essas áreas atendam a todas as exigências legais e técnicas necessárias para preservar o meio ambiente e evitar riscos à saúde pública e à segurança da população.

Os rejeitos podem ser dispostos de várias formas, sendo a mais comum a disposição convencional em barragens de rejeitos. Além desse método, existem opções conhecidas como disposições alternativas, entre as quais se destacam o empilhamento drenado, a disposição subaquática e a disposição de rejeitos espessados.

As características de disposição são descritas a seguir.

2.2.1. *Disposição Convencional: Barragem de Rejeito*

A barragem de rejeito pode ser definida como uma estrutura que foi criada para conter águas e sólidos que surgem após o processo de beneficiamento do minério (Stela, Duarte, Pereira, 2020).

Para Duarte (2008), barragens de rejeitos são estruturas que foram feitas para diminuir os custos nos processos de extração, mediante alteamentos sucessivos. Esses alteamentos podem ser construídos utilizando o próprio rejeito ou com materiais vindos de áreas de empréstimos. Existem 3 métodos para alteamentos de barragens sendo eles:

- **Método de Alteamento a Montante**

Para o método de alteamento a montante inicialmente é feito um dique de partida e durante a execução dos alteamentos, o eixo da barragem se desloca em direção a montante. O rejeito em polpa é lançado em torno do perímetro da crista do dique para formar uma praia. Tendo em

vista a grande variação granulométrica do rejeito, os grãos mais pesados sedimentam primeiro ficando em áreas perto dos diques, enquanto os grãos mais finos e menos densos ficam em suspensão, sendo direcionados para as zonas internas do reservatório (Lozano, 2006), como pode ser visto na Figura 1.

O método de disposição a montante era um dos mais utilizados pelas mineradoras por ser de baixo custo. Em contrapartida, é o método que apresenta mais riscos (Russo, 2007). Cabe ressaltar que este método foi proibido pela Resolução N° 13 de 2019 da Agência Nacional de Mineração (ANM).



Fonte: IBRAM (2016).

Segundo Soares (2010), as vantagens e desvantagens do método podem ser destacadas sendo:

Vantagens:

- baixo custo de construção;
- alta velocidade de alçamento;
- menores volumes na etapa de alçamento;
- menor uso de equipamentos de terraplenagem.

Desvantagens:

- menor coeficiente de segurança;
- a superfície crítica de ruptura passa pelos rejeitos sedimentados;
- há possibilidade de ocorrer *piping*;
- risco de ruptura provocado por liquefação.

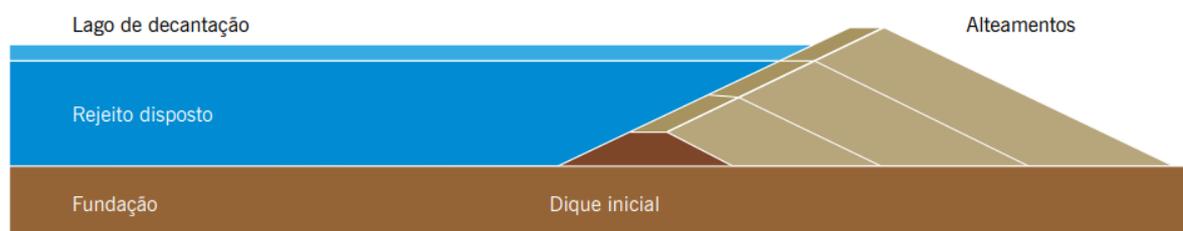
Atualmente no Brasil, depois dos acidentes de rompimento de barragem que ocorreram em Mariana (2015) e Brumadinho (2019) é proibido a construção de barragens do tipo montante. De acordo com a lei federal n° 14.066/2020, fica proibida a construção ou o alçamento de barragem de mineração pelo método a montante, e até fevereiro de 2022 todas as barragens construídas ou alteadas pelos métodos a montante devem ser descaracterizadas.

- **Método de Alçamento a Jusante**

O método de alçamento a jusante é quando se faz o alçamento da barragem para jusante do dique de partida, que já foi construído, fazendo com que o eixo da crista se desloque para jusante. Nessa construção pode-se utilizar o próprio rejeito, solos de empréstimo ou estéril proveniente da lavra (Silva et al., 2012), como pode ser observado na Figura 2.

Segundo Alves (2020), a disposição a jusante requer um grande volume de material para a sua execução. Mas, é o método indicado quando o armazenamento de água é necessário, já que com a compactação do aterro, a estrutura é apta para altas taxas de alçamento e tem uma resistência maior à liquefação.

Figura 2 – Método de Alçamento a Jusante.



Fonte: IBRAM (2016).

Segundo Soares (2010), as vantagens e desvantagens do método podem ser destacadas sendo:

Vantagens:

- maior segurança de alçamento;
- baixa probabilidade de ocorrência de *piping* e rupturas horizontais;
- maior resistência a vibrações tanto em caráter natural quanto a uso de explosivos;
- ao longo do alçamento é instalado o sistema de drenagem interna e impermeabilização.

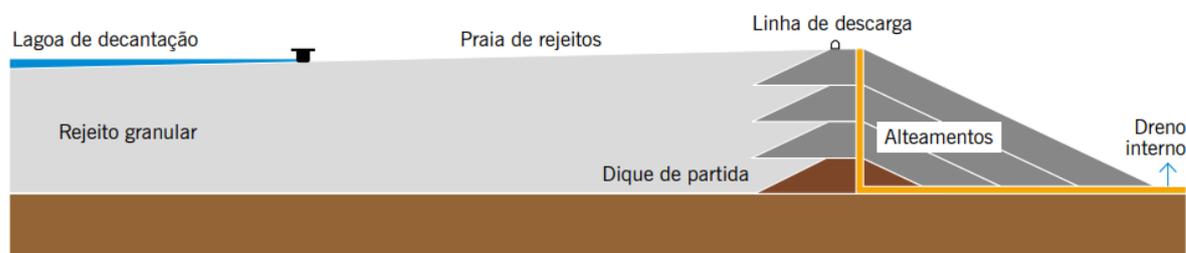
Desvantagens:

- alto custo;
- maior volume de material a ser movimentado e compactado;
- menor velocidade de alçamento;
- requer o emprego de hidrociclones e a construção de enrocamento de pé para conter o avanço do *underflow*, caso o aterro seja construído com rejeito;
- requer a construção de dique a jusante para contenção dos materiais do *underflow*, caso o aterro seja construído com rejeito.

- **Método de Alçamento de Linha de Centro**

O método de alçamento de Linha de Centro é uma mistura entre o método de montante e o de jusante, trazendo assim as vantagens e as desvantagens dos métodos, sendo que seu comportamento estrutural se assemelha mais ao método de jusante (Albuquerque Filho, 2004). Nesse método, os alçamentos são feitos de forma que a crista de montante se mova verticalmente no sentido de montante, devido a isso, pode ser feita a construção de um sistema de drenagem interno, que permitirá o controle da linha freática e da percolação dentro do maciço (Russo,2017), conforme pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Método de Alçamento de Linha de Centro.



Fonte: IBRAM (2016).

De acordo com Albuquerque Filho (2004), as vantagens desse método são a facilidade de construção, menor volume de material para sua construção e a possibilidade de se fazer um sistema de drenagem interna o que permitirá um controle maior da linha de saturação e de percolação dentro do maciço.

2.2.2. Empilhamento Drenado

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2019), empilhamento drenado pode ser definido como “estrutura construída hidráulica ou mecanicamente com rejeitos, que se configura como um maciço permeável, dotado de sistema de drenagem de fundo, com formação de espelho de água reduzido podendo ser implantada em fundo de vale, encosta ou outra área.” Nessa técnica, utiliza-se uma estrutura drenante, que não retém a água livre que sai dos poros dos rejeitos. Por meio de um sistema de drenagem interna, essa água é dispersa (IBRAM, 2016). Na Figura 4, encontra-se um exemplo do empilhamento.

Segundo Gomes (2009), esse empilhamento é característico de rejeitos arenosos, já que possuem características que garantem livre drenagem e possuem a capacidade de suporte para os aterros sucessivos que serão feitos.

Para sua disposição, os rejeitos são transportados na forma de polpa e depositados pela técnica de aterro hidráulico, depois constrói-se um dique inicial e um sistema de drenagem interna. Os rejeitos são despejados sobre a crista do dique inicial. Em seguida, são realizados sucessivos alteamentos no sentido montante, utilizando-se o trator de esteira (ALVES OLIVEIRA, 2015).

Figura 4 – Empilhamento Drenado.



Fonte: IBRAM (2016).

2.2.3. Disposição Subaérea

Na disposição subaérea, o rejeito é disposto em finas camadas, de modo que, antes do lançamento da próxima camada, o material da camada anterior já tenha sido adensado e ressecado. Assim, obtém-se um volume menor e ganha-se resistência em função do adensamento e do ressecamento do rejeito (PORTES, 2013).

De acordo com Lima (2006), a disposição do rejeito é feita de forma intermitente para que assim, os processos físicos de sedimentação, adensamento e ressecamento possam ocorrer antes do lançamento da próxima camada. A Figura 5 demonstra a ocorrência desses processos físicos.

Figura 5 – Fases da disposição subaérea. a) Período de enchimento: ocorrência do processo de sedimentação e adensamento, b) Período de espera: ocorrência do processo de adensamento e ressecamento.



Fonte: Almeida (2004) apud Lima (2006).

2.2.4. Disposição de Rejeitos Espessados

Segundo Portes (2013), o conceito de disposição de rejeitos espessados foi introduzido por Robinsky e consiste no aumento da concentração de sólidos em peso, por meio do desaguamento da polpa e do aumento do teor de sólidos.

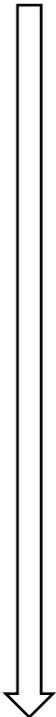
De acordo com Guimarães (2011), o espessamento é uma técnica de separação sólido-líquido que ocorre pela ação da gravidade, baseada na velocidade de sedimentação, promovendo a separação das partículas em um meio aquoso; seu objetivo é gerar uma polpa (*underflow*) com alta densidade.

O processo se dá através da inserção da polpa em um poço de alimentação (*feedwell*). As partículas quando sedimentadas são retiradas pelo fundo, constituindo o *underflow*, a água clarificada transborda (overflow) pela calha que rodeia o tanque. Posteriormente, as partículas sedimentadas são levadas até o cone de descarga (GUIMARÃES, 2011).

Para ajudar no processo de sedimentação, pode-se utilizar reagentes como os floculantes e os coagulantes. Os floculantes são polímeros naturais ou sintéticos que possuem alto peso molecular e que ajudam na sedimentação de partículas suspensas. Já os coagulantes são minerais naturais que atuam para a suspensão coloidal, porém, são menos eficientes se comparados aos floculantes. A autora também ressalta a importância do pH para auxiliar no processo de agregação e dispersão das polpas (PORTES, 2013).

Fitton (2013) apud por Alves (2020) acredita que os espessadores além de serem amplamente utilizados, são os mais utilizados para realizar o desaguamento e a recuperação de água dos rejeitos industriais na mineração. Há diferentes tipos de espessadores, que variam de acordo com o nível de desaguamento e do tipo de consistência que se pretende atingir no rejeito. A Tabela 1, traz os tipos de espessadores usualmente utilizados para polpas de minério de ferro.

Tabela 1 – Tipos de espessadores usualmente utilizados para polpas de minério de ferro.

Tempo	Tipo	Forma	Características	
	Convencional			Ação ineficiente do floculante, Grande área, Ø até 150m, Obtém baixa densidade.
	<i>High Rate ou High Capacity</i>			Adição de floculante, Menor área se comparado ao convencional, Obtém densidade similar ao convencional.
	<i>High Density</i>			Menor área e maior altura que o <i>High Capacity</i> , Obtém máxima densidade.
	<i>Deep Cone</i>			Aumento da altura em relação ao <i>High Density</i> , Maior redução de área, Produção de pasta.

Fonte: Portes (2013)

2.3. EMPILHAMENTO DE REJEITOS FILTRADOS

O processo de filtração do rejeito ocorre quando há a separação de sólidos e líquidos por um meio filtrante que detém os materiais sólidos e permite a passagem dos líquidos. Entretanto, materiais com índices altos de porcentagem fina podem tornar inviável a utilização do processo de filtração (PORTES, 2013).

Oliveira-Filho e Abrão (2015) apud por Alves (2020), descrevem que utilizando-se de espessadores, os rejeitos são espessados até atingirem certa consistência, e na sequência ocorre a filtração por meio de filtros a vácuo ou de pressão positiva. Após esta etapa, a água pode ser reutilizada no processamento do minério. A torta filtrante é o produto da filtração, e seu teor de umidade é determinante para o trabalho com o material durante o transporte, lançamento e compactação (ALVES, 2020).

O processo de filtração ocorre a partir da aplicação de uma força sobre as partículas em um meio poroso, o que pode ser realizado por gravidade, vácuo, pressão ou centrifugação (GUIMARÃES, 2011). A Tabela 2 apresenta os mecanismos de filtração e os principais fornecedores do produto.

Tabela 2 – Mecanismos de Filtração e os Principais fornecedores.

Tipos	Características	Modelos de Filtros	Principais Fornecedores
Filtração a vácuo	Criada uma pressão negativa abaixo do meio filtrante	Filtro tambor, de disco convencional, Filtro horizontal de mesa e Filtro horizontal de correia	Andritz, FLSmidth, Larox, Delkor, Gaudfrin
Filtração sob pressão	Uma pressão positiva é aplicada na polpa	Filtro prensa horizontal, Filtro prensa vertical	Andritz, FLSmidth (Pneumapress), Larox
Filtração centrífuga	Utiliza a força centrífuga para forçar a passagem do líquido	Centrífugas verticais e Decanters	Andritz, GEA (Westfalia), Alfa Laval
Filtração hiperbárica	Em que se combinam vácuo e pressão	Filtro de disco encapsulado ou hiperbárico	Andritz, Bokela, Gaudfrin
Filtração capilar	Utiliza a ação de capilares de meios cerâmicos porosos para efetuar o desaguamento	Ceramec	Larox

Fonte: Guimarães (2011).

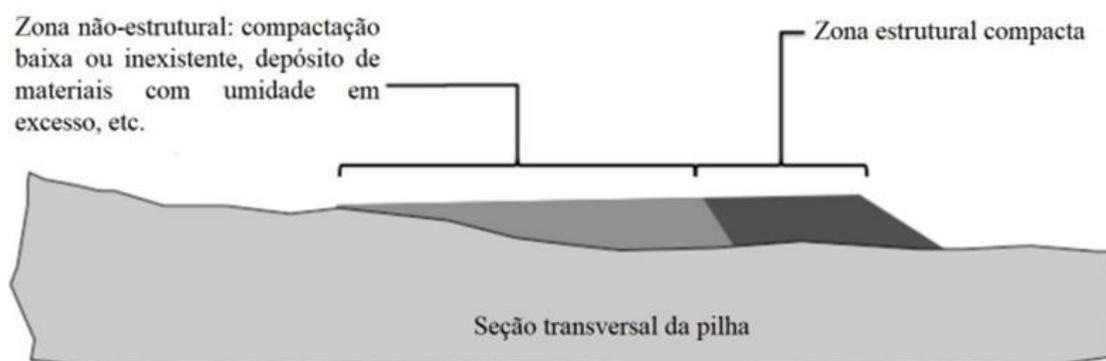
Para transportar o material filtrado, pode-se utilizar de caminhões ou correias transportadoras, sendo utilizado o critério econômico para definir o modal de transporte mais adequado (ALVES, 2020). Além do critério econômico, Davies (2011) menciona que é necessário avaliar a trafegabilidade da superfície da pilha para a escolha de caminhões para o transporte de rejeito filtrado. Isto deve-se ao fato de o material que está sendo transportado já possuir valores próximos ao valor ótimo de compactação, uma vez este material depositado, sua umidade já diminui a trafegabilidade, e em períodos chuvosos as condições das vias podem se tornar inviáveis, levando ao aumento do custo de produção.

Durante a disposição do material na pilha podem ser aplicados diferentes métodos para atingir o teor de umidade e densidade desejados. Normalmente é utilizado a técnica de dispor camadas finas de rejeito na pilha e após isso realizar a compactação. Esta técnica permite a evaporação por ação do vento e radiação solar, devido a pouca espessura das camadas e a estabilidade física da camada é garantida pela compactação que leva ao aumento da densidade (ALVES, 2020).

Crystal et al. (2018) destacam ser vantajoso realizar a filtragem de rejeitos mais finos separadamente, tendo em vista que a classe de rejeitos mais fina apresenta torta com maior teor de umidade, não sendo a especificação alvo. Assim, é recomendado a disposição desta classe no depósito em zonas que não sejam responsáveis pela estabilidade do empilhamento, conhecidas como zonas estruturais.

A zona estrutural corresponde a região mais externa do perímetro do depósito, nela é destinado o depósito de materiais que atendam rigorosamente as especificações técnicas, principalmente no que diz respeito a compactação e teor de umidade. As classes de rejeito que não atendem a estes critérios, devem ser dispostas na zona não estrutural, estando em uma porção mais interna do depósito, conforme Figura 6 a seguir Crystal et al. (2018).

Figura 6 – Seção da Pilha Dividida em Duas Zonas.



Fonte: Lupo e Hall (2010).

Em locais que possuam estações de chuvas bem definidas, durante o tempo da seca, deve-se depositar o rejeito na parte mais externa do depósito, fazendo a compactação deste material como se fosse de um aterro de contenção. Tal ação faz com que este material funcione como contenção para os rejeitos filtrados na estação chuvosa. Desta forma, o rejeito pertencente à zona não estrutural poderá ser apenas lançado e espalhado, podendo ter leve compactação em sua zona mais interna Davies (2011).

No que diz respeito ao alteamento do depósito, é necessário o controle para que ocorra tempo para o perfeito funcionamento da drenagem, consolidando o material depositado e promovendo a dissipação de poropressões. Além deste controle, o monitoramento e instrumentação adequada são essenciais para manter a estabilidade do depósito Crystal et al. (2018).

Por fim, Crystal et al. (2018) ainda citam cuidados especiais quanto à drenagem. Na base da pilha é necessário um cuidado especial, tendo em vista que o material depositado é úmido, camadas posteriores de rejeito podem levar à saturação das camadas de base. Para minimizar a infiltração na pilha, devem ser feitas bermas de segurança e superfície de topo da pilha com inclinação que permitam que o correto escoamento superficial da água.

No item a seguir será feita uma breve descrição sobre o filtro prensa por ser o modelo de filtro que é utilizado nos resíduos em estudo.

2.3.1. Filtro Prensa

De acordo com Legner (2017), para o tratamento de águas e efluentes, o filtro prensa é bastante utilizado devido ao seu baixo custo de manutenção, baixo consumo de energia, possibilidade de reaproveitamento do material retido e por permitir instalação em pequenas áreas. O filtro prensa pode ser dividido em horizontal e vertical.

- **Filtro Prensa Horizontal**

O filtro prensa horizontal é o filtro prensa de placas verticais. Sua estrutura é formada por um número elevado de placas, que variam em modelo e tamanho, podendo ser do tipo câmara ou diafragma. As placas são revestidas com um tecido filtrante, e cada uma delas possui um recesso em ambos os lados. Quando interligadas com as placas adjacentes, formam uma câmara (GUIMARÃES, 2011). A Figura 7 apresenta o filtro prensa horizontal.

Figura 7 – Filtro Prensa Horizontal.



Fonte: GRATT (2025).

- **Filtro Prensa Vertical**

O filtro prensa vertical é o filtro prensa de placas horizontais. Ele é caracterizado pela produção de torta com baixo teor de umidade, possui menor custo de operação e sua configuração é vantajosa devido à diminuição da área de piso. No entanto, tem um alto custo de investimento. (GUIMARÃES, 2011). A Figura 8 apresenta o filtro prensa vertical.

Ainda segundo o autor, o processo de filtração ocorre com o lançamento da polpa para dentro das câmaras, de modo que as tortas são geradas e o filtrado flui. Em seguida, as tortas são comprimidas quando água ou ar pressurizado preenchem o diafragma das câmaras, e ocorre a lavagem das tortas. Após isso, as tortas são comprimidas novamente para garantir a máxima recuperação do filtrado. Para reduzir a umidade, é insuflado ar comprimido nas tortas. Por fim, as placas do filtro se abrem e a esteira se move para descarregar as tortas.

Figura 8 – Filtro Prensa Vertical.



Fonte: Toncin (2025).

2.4. ESTABILIDADE DE TALUDES

Talude é o nome dado a qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha. Ele pode se originar de forma natural, sendo chamado de encosta, ou ser construído pelo homem, como nos casos de aterros e cortes (GERSCOVICH, 2012).

Abramson et al. (1995) apud por Pereira (2022) apresentam que a Análise de Estabilidade tem por objetivo a determinação de uma grandeza (fator de segurança) que quantifica o quão próximo da ruptura se encontra o talude.

O fator de segurança (FS) relaciona a resistência ao cisalhamento, ao longo de uma potencial superfície de ruptura, com as tensões cisalhantes atuantes geradas (AGUILAR,2015).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, pela norma NBR 13029/2024 - Elaboração e apresentação de disposição de estéril em pilha, propõe os fatores de segurança mínimos que devem ser considerados no caso de ruptura do talude geral e ruptura do talude entre bermas. Para a ruptura do talude geral, quando considerada uma superfície freática normal, o FS mínimo é de 1,50; já para uma superfície freática crítica, o FS mínimo é de 1,30. No caso de ruptura do talude entre bermas, considerando a face predominante de solo, o FS mínimo é de 1,50; e, considerando a face predominante de rocha, o FS mínimo é de 1,30.

Para o caso de barragens, a norma NBR 13028/2024 - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água, apresenta os Fatores de Segurança mínimo que deverão ser obtidos em barragens de mineração e em barragens de concreto. A Tabela 3 apresenta os Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração.

Análises de estabilidade de taludes podem ser realizadas utilizando diferentes métodos, dentre os quais se destacam as metodologias de análise determinística, como o de Morgenstern-Price e de Spencer.

Tabela 3 – Fatores de Segurança Mínimos para barragens de Mineração.

Fase	Tipo de Ruptura	Talude	Fator de Segurança Mínimo
Final de construção ^a	Maciço e fundações	Montante e Jusante	1,3
Operação com rede de fluxo em condição normal de operação, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,5
Operação com rede de fluxo em condição extrema, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,3
Operação com rebaixamento rápido do nível d'água do reservatório	Maciço	Montante	1,1
Operação com rede de fluxo em condição normal	Maciço	Jusante	1,5
		Entre Bermas	1,3
Solicitação sísmica, com nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Montante e Jusante	1,1

^a Etapas sucessivas de barragens alteadas com rejeitos não podem ser analisadas como "final de construção", devendo atender aos fatores de segurança mínimos estabelecidos para as condições de operação.

Fonte: NBR 13028 (2024).

2.4.1. Análise de Estabilidade Determinística

De acordo com Matta e Villar (2020) a análise de estabilidade determinística é a mais usual no estudo da estabilidade de taludes, e leva em consideração que as propriedades do solo e as

solicitações são valores conhecidos e possíveis de serem determinados, o que gera o fator de segurança único. Assim, sua principal limitação é não levar em consideração a variabilidade intrínseca dos solos, rochas e rejeitos.

Nesta análise, acredita-se que obter um FS superior a 1 é o suficiente para garantir a segurança da estrutura. As incertezas são inseridas através de um coeficiente de segurança global e as variáveis aleatórias são consideradas através de algumas amostras ou observações feitas para definir o seu valor (RODRIGUES, 2014).

Para Telles (2015), utilizando-se a análise determinística há 2 tipos de abordagem para conseguir determinar o fator de segurança: a teoria do equilíbrio limite e a análise de tensões. De acordo com o autor, dentre essas 2 abordagens, a teoria do equilíbrio limite é a mais utilizada devido à sua abordagem simples e a facilidade de modelagem computacional.

O método de equilíbrio limite consiste em determinar o equilíbrio de uma massa de solo que é delimitada por uma superfície potencial de ruptura inicialmente arbitrada. Neste caso, é considerado que apenas uma parte da resistência do solo é mobilizada nessa superfície a fim de estar em equilíbrio com as forças solicitantes tendo em vista que há o peso da massa de solo (TELLES, 2015).

Ao longo dos anos, diversos métodos de equilíbrio limite foram desenvolvidos para determinar o FS de uma superfície de ruptura, entre os quais se destacam os métodos de Fellenius, Bishop Simplificado, Jambu, Simplificado, Spencer e Morgenstern-Price. De acordo com Gerscovich (2016), os métodos diferem entre si tanto na direção do equilíbrio das forças a ser considerado quanto na interação dessas forças entre as fatias. A Tabela 4 apresenta as condições de equilíbrio atendidas por cada um dos métodos.

Tabela 4 – Condições de Equilíbrio Estático satisfeitas de cada método.

Método	Equilíbrio de Forças		Equilíbrio de Momento
	X	Y	
Fellenius	Não	Não	Sim
Bishop Simplificado	Sim	Não	Sim
Jambu Simplificado	Sim	Sim	Não
US Corps of Engineers	Sim	Sim	Não
Lowe e Karafiath	Sim	Sim	Não
Morgenstern-Price	Sim	Sim	Sim
Spencer	Sim	Sim	Sim
Sarma	Sim	Sim	Sim

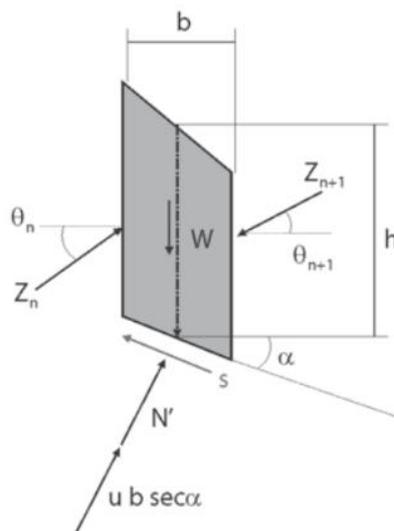
Fonte: Read e Stacey (2009).

Neste trabalho, será adotado o método Spencer nas análises de estabilidade, por ser considerado um método rigoroso. Deste modo, serão descritas algumas de suas características.

2.4.1.1. Método de Spencer

O Método de Spencer é considerado um método rigoroso, pois satisfaz as três equações de equilíbrio estático (TELLES, 2015). A Figura 9, apresenta os esforços atuantes no método de Spencer.

Figura 9 – Esforços atuantes do Método de Spencer



Fonte: Gerscovich (2016).

De acordo com Gerscovich (2016), a resultante das somas das forças é uma força Q com inclinação θ . A equação (1) da resultante Q é calculada a partir das equações de equilíbrio de forças nas direções paralela e normal à base da fatia.

$$Q = \frac{\frac{cb}{FS} \sec\alpha + \frac{tg\phi'}{FS} (W \cos\alpha - \mu b \sec\alpha) - W \sin\alpha}{\cos(\alpha - \theta) \left\{ 1 + \frac{tg\phi'}{FS} tg(\alpha - \theta) \right\}} \quad (1)$$

Deste modo, para determinar o valor de Q , adota-se um valor constante para a inclinação θ em cada fatia (sugerindo-se um valor inferior à inclinação do talude), deixando o FS como incógnita. Em seguida, o FS é calculado a partir das equações de equilíbrio de forças, equação

(2) e equação de equilíbrio de momentos, equação (3) . Assim, para os diferentes valores de θ adotados, comparam-se os valores de FS até que eles se igualem.

$$\Sigma Q \cos \theta = \Sigma Q \sin \theta = \Sigma Q = 0 \quad (2)$$

$$\Sigma [Q \cos (\alpha - \theta)] = 0 \quad (3)$$

2.4.2. *Análise de Estabilidade Probabilística*

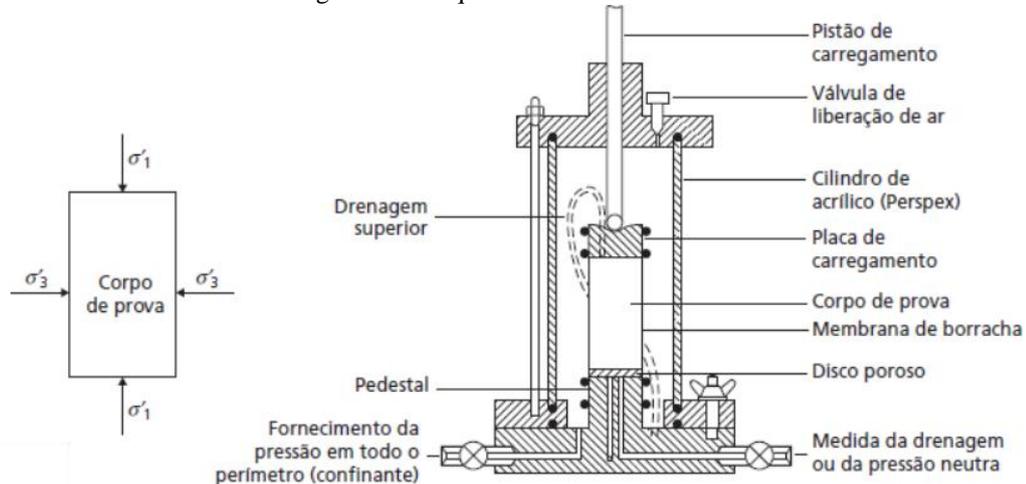
Na análise de estabilidade probabilística, as incertezas nos parâmetros são consideradas a partir de coeficientes de variação, distribuição de probabilidades e de correlações entre as variáveis (CAMPELLO, 2020).

Segundo Vecci (2018), a análise probabilística complementa as análises determinísticas e diminui as incertezas das análises tendo em vista que nessa análise o FS não é um valor médio e sim uma função. Assim, o FS torna-se uma variável aleatória que depende de outras variáveis que são chamadas de independentes, essas variáveis independentes são os parâmetros geotécnicos variáveis do solo como a coesão efetiva (c'), ângulo de atrito efetivo (Φ'), poropressão (u), peso específico natural (γ_{nat}), peso específico saturado (γ_{sat}) e resistência não drenada (S_u).

2.5. ENSAIO TRIAXIAL

De acordo com Pereira Álvaro (2006) o ensaio triaxial é realizado com uma amostra de solo cilíndrica que é envolta por uma membrana de látex e é colocado dentro de uma câmara de ensaio preenchida com a água, a qual é pressurizada a fim de aplicar uma tensão confinante, simulando as condições de campo. O cisalhamento ocorre aplicando uma tensão axial no topo da amostra entrando em contato com um pistão que atravessa a tampa da câmara. A Figura 10 apresenta o esquema do ensaio.

Figura 10 – Esquema do Ensaio Triaxial.



Fonte: Craig (2007).

Segundo Craig (2007), a principal vantagem desse ensaio é possibilitar o controle das condições de drenagem, permitindo o adensamento de solos saturados com baixa permeabilidade e a medição da poropressão durante a etapa de cisalhamento.

Este é o ensaio mais confiável para se determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo (DAS, 2014). Segundo o autor é comumente utilizado 3 tipos de ensaios triaxiais sendo eles: Ensaio adensado drenado ou ensaio drenado (ensaio CID), Ensaio adensado não drenado (Ensaio CIU) e Ensaio não adensado não drenado ou ensaio não drenado (UU). A seguir serão descritas as características do Ensaio adensado não drenado, ensaio utilizado no estudo de caso deste trabalho.

2.5.1. Ensaio Triaxial Adensado não Drenado (CIU)

Trata-se de um ensaio em que se aplica uma pressão confinante, permitindo a dissipação da pressão neutra gerada, de modo que o corpo de prova se adense sob essa pressão. Posteriormente, realiza-se um carregamento axial sob condições não drenadas (PINTO, 2006), permitindo a geração de poropressão.

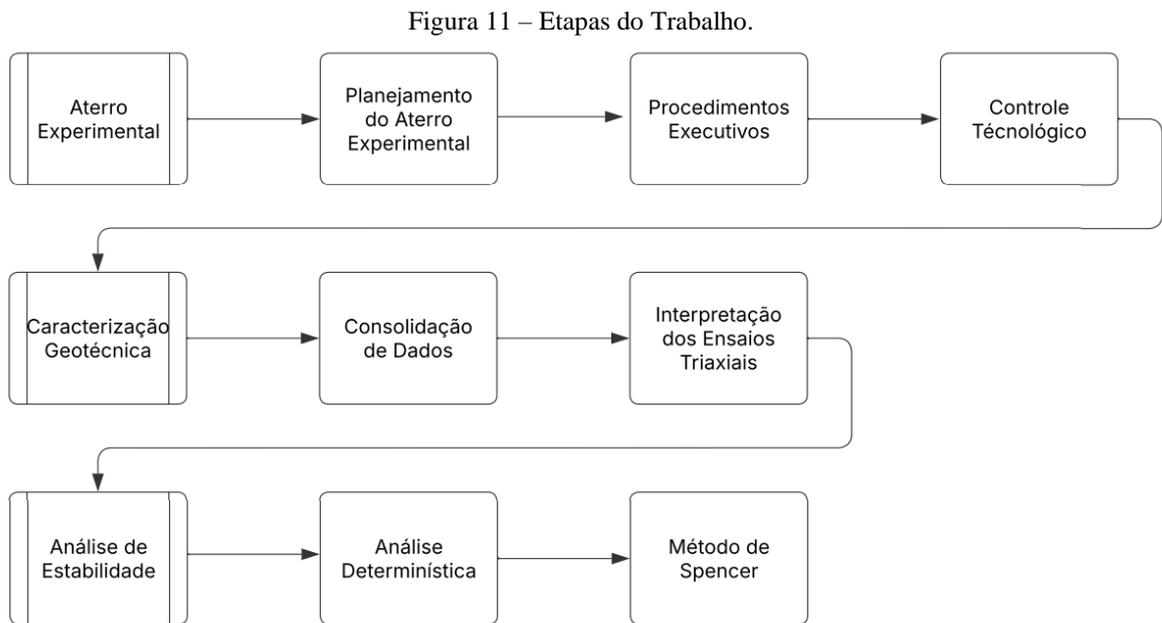
Para Pereira Álvaro (2006), as fases de água e ar não podem drenar durante o cisalhamento fazendo com que se tenha um excesso de poropressão de ar e água.

Com a aplicação da tensão de confinamento a poropressão é gerada e quando ela é dissipada, a tensão desviadora que atua no corpo de prova aumenta para que haja a ruptura de cisalhamento. Por não haver drenagem, a poropressão aumentará (DAS, 2014).

Segundo Pinto (2006) este ensaio é mais empregado já que se as pressões neutras forem medidas consegue-se determinar a resistência da tensão efetiva. Assim, consegue-se determinar a envoltória de resistência em termos de tensão efetiva mais rápido do que em um ensaio adensado drenado.

3. METODOLOGIA

A pesquisa tem natureza aplicada, com o objetivo de identificar o procedimento de compactação mais eficiente para um depósito em pilha localizado no Brasil. Adota-se uma abordagem quantitativa, focada na modelagem dos dados obtidos em ensaios triaxiais adensados não drenados saturados realizados em amostras do aterro experimental, com o propósito de determinar qual o procedimento de compactação resulta no maior fator de segurança para a estabilidade da pilha. A coleta de dados é conduzida de forma operacional, assegurando que os ensaios do aterro experimental sejam representativos da estrutura real. O fluxograma ilustrado na Figura 11 apresenta as etapas que serão realizadas.



Fonte: a autora.

Para a construção da futura pilha, foi criado um aterro experimental utilizando o rejeito depositado em uma pilha já existente, proveniente do filtro tambor. No entanto, buscou-se simular as condições de umidade esperadas para a disposição do rejeito de filtro prensa, que será o método de filtragem utilizado na nova pilha.

Os ensaios realizados tiveram como objetivo determinar as características e parâmetros geotécnicos do rejeito do filtro tambor, simulando as condições de disposição do filtro prensa. Todos os ensaios foram realizados por uma empresa especializada, conduzidos por profissionais

capacitados e seguindo os métodos preconizados pelas normas, a fim de garantir a confiabilidade dos resultados. Os ensaios foram realizados por outra empresa.

3.1. PLANEJAMENTO DO ATERRO EXPERIMENTAL

Para a construção do aterro foi utilizado o rejeito depositado em uma pilha já existente, proveniente do filtro tambor. O rejeito foi escavado e transportado até a área teste a fim de formar uma pilha de estoque.

Para os equipamentos, foi determinada a utilização de trator de esteira D-61 Komatsu, rolo compactador pé de carneiro vibratório VAP 70, escavadeira, carregadeira, trator agrícola com grade, motoniveladora, caminhão caçamba e caminhão pipa. As características principais do Trator de Esteira D-61 Komatsu e do Rolo Compactador Pé de Carneiro vibratório VAP 70 se encontram na Tabela 5 e Tabela 6, respectivamente.

Tabela 5 - Características Gerais do Trator de Esteira D-61 Komatsu.

Trator de Esteira D-61 Komatsu	
Peso Operacional (kgf)	19.000
Pressão de Contato no Solo (kPa)	53
Comprimento (m)	5,48
Largura (m)	3,86

Fonte: Locação De Equipamento LTDA (sem data).

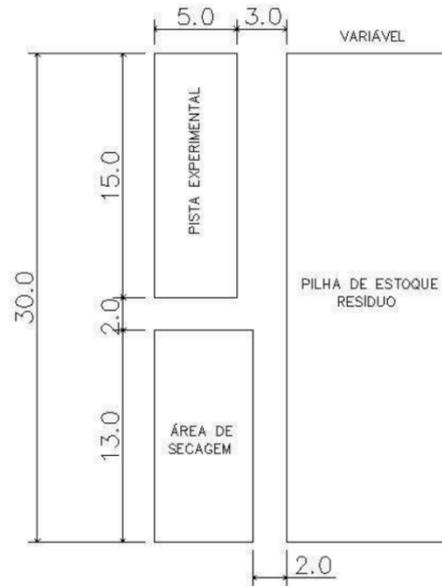
Tabela 6 – Características Gerais do Rolo Compactador Pé de Carneiro Vibratório VAP 70.

Rolo Compactador Pé de Carneiro Vibratório VAP 70	
Peso Operacional (kgf)	11.140
Número de Patas	140
Comprimento (m)	5,58
Largura (m)	2,35

Fonte: Muller (2024).

O aterro experimental consiste em uma pista experimental com dimensão de 15m X 5m, composta por 3 camadas compactadas com espessura solta de aproximadamente 30 cm. Os testes foram realizados em 8 cenários no qual em cada cenário era construído 1 pista experimental. Nos cenários ocorreu a variação do grau de compactação, teor de umidade e o equipamento de compactação utilizado. A Figura 12, ilustra o croqui do aterro experimental.

Figura 12 – Croqui do Aterro Experimental.



Fonte: Acervo da empresa.

3.2. PROCEDIMENTOS EXECUTIVOS

3.2.1. Preparação da Área Teste

No local selecionado para a execução do aterro experimental foram feitas as marcações topográficas para a delimitação das áreas (pista experimental, área de secagem e a pilha de estoque do rejeito). Além disso, a fim de evitar a contaminação do rejeito, foi feita a regularização e compactação da superfície.

A Figura 13, mostra o processo de locação com estacas da área a ser utilizada como pista experimental.

Figura 13 – Processo de locação com estacas da área a ser utilizada.



Fonte: Acervo da empresa.

3.2.2. *Escavação do Rejeito*

Antes de iniciar o processo de escavação, foi realizada a delimitação das áreas a serem escavadas. Determinou-se que a escavação ocorreria em locais onde o rejeito apresenta maior teor de sólidos, evitando-se áreas com lançamento recente ou contaminadas com outros resíduos.

Foi realizada a construção de acessos a fim de permitir o trânsito dos equipamentos, além do carregamento dos caminhões e do transporte do material até a pilha de estoque.

3.2.3. *Tratamento e Homogeneização do Rejeito*

Foi realizada a retomada do rejeito na pilha de estoque e foi feito o seu lançamento na área de tratamento e homogeneização. A secagem, se deu a partir do revolvimento do rejeito por meio de equipamentos a fim de que se chegue à umidade desejada para os testes de compactação. E em seguida, foi realizada a coleta de amostras para a determinação da umidade na área de tratamento. A Figura 14 ilustra o espalhamento do material utilizando a motoniveladora.

Figura 14 – Espalhamento do Material com o emprego da motoniveladora.



Fonte: Acervo da empresa.

3.2.4. Compactação do Material

Para a compactação, foi utilizado o Trator de esteira tipo D-61 e rolo compactador pé de carneiro vibratório.

- Para as condições Wot + 4%, Wot + 6%, Wot + 2%, Wot - 2% e Wot, com trator de esteira realizaram-se os seguintes procedimentos:
 - 1) Quando atingiu-se a umidade desejada na área de tratamento lançou-se o rejeito na pista de compactação;
 - 2) Utilizando-se o trator de esteira D-61 espalhou-se o material em camadas de aproximadamente 30 cm;
 - 3) O processo de compactação será realizado pelo próprio trator de esteira.
 - 4) Após 4 passadas com o trator de esteira executou-se ensaios para verificar a umidade e a densidade;
 - 5) Após 8 passadas com o trator, executou-se novos ensaios para verificar novamente a umidade e a densidade, buscando-se atingir grau de compactação de no mínimo 90%;
 - 6) Repetiu-se os procedimentos realizados nos itens de 1 a 5 por mais 2 vezes, a fim de que se chegasse em uma área teste com lançamento, espalhamento e compactação de 3 camadas de aproximadamente 30 cm de espessura;
 - 7) Executou-se ensaios de umidade e densidade na primeira camada executada a fim de identificar se houve aumento da densidade na camada inferior após a execução das 2 camadas seguintes;

- 8) Realizou-se a coleta das amostras deformadas e indeformadas para envio ao laboratório especializado de solos;
- 9) Removeu-se todo o material que se encontrava na área da pista experimental para realizar os novos testes com a próxima condição de umidade;
- 10) Repetiu-se os procedimentos realizados nos itens de 1 a 9 por mais 1 vez e assim obteve-se a pista experimental para as umidades.
 - Para as umidades $W_{ot} - 2\%$, $W_{ot} + 2\%$ e W_{ot} , com o rolo pé de carneiro realizou-se os seguintes procedimentos:
 - 1) Quando atingiu-se a umidade desejada na área de tratamento lançou-se o rejeito na pista de compactação;
 - 2) Utilizando-se o trator de esteira D-61 espalhou-se o material em camadas de aproximadamente 30 cm;
 - 3) O processo de compactação será realizado pelo próprio trator de esteira.
 - 4) Após 4 passadas com o trator de esteira executou-se ensaios para verificar a umidade e a densidade;
 - 5) Após 8 passadas com o trator, executou-se novos ensaios para verificar novamente a umidade e a densidade, buscando-se atingir grau de compactação de no mínimo 95%;
 - 6) Repetiu-se os procedimentos realizados nos itens de 1 a 5 por mais 2 vezes, a fim de que se chegasse em uma área teste com lançamento, espalhamento e compactação de 3 camadas de aproximadamente 30 cm de espessura;
 - 7) Executou-se ensaios de umidade e densidade na primeira camada executada a fim de identificar se houve aumento da densidade na camada inferior após a execução das 2 camadas seguintes;
 - 8) Realizou-se a coleta das amostras deformadas e indeformadas para envio ao laboratório especializado de solos;
 - 9) Removeu-se todo o material que se encontrava na área da pista experimental para reiniciar os testes utilizando-se agora o rolo compactador;
 - 10) Utilizando-se o trator de esteira D-61 espalhou-se o material em camadas de aproximadamente 30 cm;
 - 11) O processo de compactação foi realizado com o rolo compactador pé de carneiro vibratório;

- 12) Após a realização de 6 passadas com o rolo compactador executou-se novos ensaios para verificar novamente a umidade e a densidade, buscando-se atingir grau de compactação de no mínimo 95%;
- 13) Repetiu-se os procedimentos realizados nos itens de 10 a 12 por mais 2 vezes, a fim de que se chegasse em uma área teste com lançamento, espalhamento e compactação de 3 camadas de aproximadamente 30 cm de espessura;
- 14) Executou-se ensaios de umidade e densidade na primeira camada executada a fim de identificar se houve aumento da densidade na camada inferior após a execução das 2 camadas seguintes;
- 15) Realizou-se a coleta das amostras deformadas e indeformadas para envio ao laboratório especializado de solos;
- 16) Removeu-se todo o material que se encontrava na área da pista experimental para realizar os novos testes com a próxima condição de umidade;
- 17) Repetiu-se os procedimentos nos itens de 1 a 16 por mais 2 vezes e assim obteve-se a pista experimental para as umidades.

3.3. CONTROLE TECNOLÓGICO DAS CAMADAS COMPACTADAS

3.3.1. *Ensaio de Controle Realizados na Pista de Compactação*

Após realizar o número de passadas pré-definido de acordo com o equipamento utilizado (4, 6 ou 8 passadas), foram realizados ensaios para verificar a umidade e a densidade. Para a verificação do grau de compactação e do desvio de umidade, o método empregado foi o ensaio de compactação Hilf, conforme preconizado na NBR 12102. Para a verificação da massa específica aparente in situ, o método empregado foi a cravação do cilindro biselado, conforme preconizado na NBR 9813. A Figura 15 e Figura 16 apresentam detalhes dos ensaios realizados.

Figura 15 – Processo de Cravação do Cilindro Biselado na Camada Compactada.



Fonte: Acervo da empresa.

Figura 16 – Realização do Método Hilf para determinação dos Parâmetros de Controle do Aterro.



Fonte: Acervo da Empresa.

3.3.2. Procedimentos dos Ensaios Realizados no Laboratório

Com a finalização da construção das três camadas em cada pista experimental, foram coletadas duas amostras indeformadas para a realização dos ensaios especiais em laboratório

especializado. Ao lado de cada amostra indeformada, também foram coletadas duas amostras deformadas em sacos de aproximadamente 50 kg, para a realização dos ensaios de caracterização completa. A Figura 17 apresenta a coleta de amostra deformada e indeformada. Antes da construção da pista experimental, foram realizados ensaios de compactação Proctor normal para servir de referência na determinação da umidade ótima e da densidade máxima do material a ser utilizado na construção da pista.

Figura 17 – Coleta de Amostra Deformada e Indeformada.



Fonte: Acervo da empresa.

3.3.2.1. *Ensaios de Caracterização*

Foram realizados ensaios de caracterização nas amostras deformadas, compreendendo ensaios de determinação do teor de umidade, peso específico, classificação tátil visual, ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação, determinação da massa específica dos grãos e limites de liquidez e de plasticidade.

A realização dos ensaios seguiu os métodos preconizados pelas normas e procedimentos internos relacionados a seguir:

- PES.187 - Classificação Tátil - Visual de amostras de solo;
- NBR 6457 - Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, ABNT;

- NBR 6459 - Solo - Determinação do Limite de liquidez, ABNT;
- NBR 6502 - Rochas e solos - Terminologia, ABNT;
- NBR 6508 - Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica, ABNT;
- NBR 7180 - Solo - Determinação do limite de plasticidade, ABNT;
- NBR 7181 - Solo - Análise granulométrica, ABNT.

3.3.2.2. *Ensaio Triaxial Adensado não Drenado, Saturado*

Os ensaios foram realizados em corpos de prova de aproximadamente 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro, sendo a relação de altura/diâmetro de aproximadamente 2.

Os corpos de prova foram saturados por contrapressão, sendo avaliado o parâmetro B, equação (4), sendo considerado saturado o material que se encontrava com o parâmetro B com valores maiores ou iguais a 0,98.

$$B = \frac{\Delta\mu}{\sigma_3} \quad (4)$$

Após a etapa de saturação, o material foi para a etapa de adensamento, onde os corpos de prova foram submetidos à tensão confinante (σ_c). Os níveis de tensões empregados nos ensaios foram de 50 kPa, 150 kPa, 300 kPa e 600 kPa.

Com a conclusão da etapa de adensamento, iniciou-se a etapa de cisalhamento, na qual os corpos de prova foram carregados axialmente até a sua ruptura, sem drenagem. A etapa de cisalhamento foi realizada com deformação controlada, e a velocidade foi calculada em função do coeficiente de adensamento (C_v), obtido na etapa de adensamento. Assim, obteve-se valores para $\sqrt{t100}$ de aproximadamente 4,5 minutos, correspondendo a um C_v da ordem de 10^{-2} , com um tempo de ruptura inferior a 60 minutos.

Assim sendo, para o cálculo da velocidade, fixou-se o tempo mínimo de ruptura de 120 minutos e estimou-se a deformação axial na ruptura de aproximadamente 10%, encontrando-se um valor de velocidade igual a 0,08mm/min.

Este ensaio, seguiu o método preconizado na norma vigente ASTM D4767 - *Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils*.

3.4. MODELAGEM DETERMINÍSTICA

A partir dos ensaios triaxiais adensados não drenados saturados e dos ensaios de caracterização, foram determinados os principais parâmetros: ângulo de atrito, coesão e peso específico. O ângulo de atrito e a coesão foram obtidos por meio da consolidação e interpretação dos dados dos ensaios triaxiais, enquanto o peso específico foi determinado pela média dos resultados fornecidos pela equipe do laboratório.

Para a análise de estabilidade, será adotada a teoria do equilíbrio limite, utilizando-se a superfície de ruptura circular, com a aplicação do método de Spencer. A análise será realizada com o auxílio do software Slide2, da empresa RocScience. O Slide2 realiza as análises com base na teoria do equilíbrio limite, utilizando o equilíbrio de forças e momentos em seções bidimensionais. Esse software é de grande valia, pois oferece agilidade, precisão e segurança na verificação da estabilidade. Para evitar a formação de superfícies de ruptura rasas no talude de jusante, foi estabelecido um valor mínimo de 3 metros para a profundidade.

3.5. INTERPRETAÇÃO DOS ENSAIOS TRIAXIAIS CIUSAT

Com os dados brutos do ensaio triaxial CIUSAT fornecidos pelo laboratório, foi realizada a análise e interpretação para a obtenção dos valores de coesão e ângulo de atrito efetivos dos modelos. Para isso, foi feito uma planilha em arquivo Excel para cada condição e em cada planilha foi feito uma aba para cada corpo de prova (CP). Os corpos de prova foram caracterizados de acordo com a tensão confinante aplicada, sendo o CP01 destinado à tensão de 50 kPa, o CP02 à tensão de 150 kPa, o CP03 à tensão de 300 kPa e o CP04 à tensão de 600 kPa.

No início da planilha é apresentado a identificação dos CP, contendo sua numeração, o tipo de adensamento, o tipo de cisalhamento e a data de realização do ensaio. Em seguida é mostrado as informações sobre os dados de moldagem do CP, sua altura (h), diâmetro (d), massa úmida ($M_{úmida}$), umidade (w) e a densidade dos grãos (G_s) e é realizado os cálculos iniciais do CP, sendo eles: a área inicial (A_{cp}), volume inicial (V_{cp}), massa seca (M_s) (equação (5)), massa específica úmida ($M_{esp.úmida}$) (equação (6)), massa específica aparente seca (ρ_d) (equação (7)), peso específico dos sólidos (γ_s) (equação (8)), peso específico seco (γ_d) (equação (9)), índice de vazios (e) (equação (10)) e grau de saturação (S) (equação (11)). Para o cálculo do Peso Específico foi considerado como sendo $9,81 \text{ kN/m}^3$ o Peso Específico da água ($\gamma_{água}$).

$$M_S = \frac{Múvida}{\left(1 + \frac{w(\%)}{100}\right)} \quad (5)$$

$$M_{\text{esp.úmida}} = \frac{Múvida}{V_{cp}} \quad (6)$$

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_{cp}} \quad (7)$$

$$\gamma_s = G_s * \gamma_{\text{água}} \quad (8)$$

$$\gamma_d = \rho_d * \gamma_{\text{água}} \quad (9)$$

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \quad (10)$$

$$S = \frac{\gamma_s * W}{e * \gamma_{\text{água}}} \quad (11)$$

Na fase de percolação, não foi enviado pelo laboratório nenhum dado referente a variação de volume nessa fase, sendo assim, não houve nenhuma coleta de dados nessa fase. Já na fase de saturação, foram coletados os dados relativos à contrapressão final e o valor do parâmetro B, também nessa fase não foram fornecidos os dados referentes a variação de volume.

Posteriormente, na fase de Adensamento, foram coletadas as informações referentes a tensão efetiva do cisalhamento (σ'_c), e os valores da variação do volume (ΔV_f), altura final (h_f), diâmetro final (d_f), para assim calcular os valores de volume final (V_f) (equação (12)), massa específica seca final ($M_{\text{esp.seca}}$) (equação (13)), área final (A_f) (equação (14)) e o índice de vazios final (e_f) (equação (15)).

$$V_f = V_{cp} - \Delta V_f \quad (12)$$

$$M_{\text{esp.seca}} = \frac{M_s}{V_f} \quad (13)$$

$$A_f = \frac{\pi * d_f^2}{4} \quad (14)$$

$$e_f = \frac{Gs}{Mesp.seca} - 1 \quad (15)$$

Na fase de Cisalhamento, foram retirados do boletim enviado pelo laboratório os dados brutos referentes a deformação axial (ϵ_a), variação de poropressão ($\Delta\mu$), Tensão horizontal total (σ_3), tensão desviadora (σ_d), e tensão vertical total (σ_1). A partir desses dados foram realizados os cálculos do parâmetro A (equação (16)), Tensão horizontal efetiva (σ'_3) (equação (17)), tensão vertical efetiva (σ'_1) (equação (18)), parâmetro t (equação (19)) e parâmetro s' (equação (20)).

$$A = \frac{\Delta\mu}{\sigma_d} \quad (16)$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - \Delta\mu \quad (17)$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - \Delta\mu \quad (18)$$

$$t = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \quad (19)$$

$$s' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad (20)$$

Após a realização de todos os cálculos, foram determinadas as trajetórias de tensões para cada condição, com base no critério de ruptura de Mohr-Coulomb. A ruptura foi caracterizada pelo critério da máxima tensão desviadora, e os parâmetros foram obtidos a partir do caminho de tensões efetivas, representado no plano t:s'. Nesse plano, o caminho de tensões é uma linha que conecta os pontos mais altos do círculo de Mohr. Para cada CP, foi identificado o ponto correspondente à maior tensão desviadora, e a partir desse ponto, foram extraídos os valores de t e s' que a representavam. Assim, no gráfico de trajetória de tensões (gráfico t x s'), os pontos de máxima tensão desviadora foram plotados como uma nova série de dados, e, a partir desses pontos, foi gerada uma linha de tendência linear para determinar a equação dessa reta. Nos caminhos de tensão. A equação (21), representa a equação da reta.

$$t = \operatorname{tg} \alpha * s' + a \quad (21)$$

Em que $\operatorname{tg} \alpha$ é a inclinação da reta e “a” é o intercepto coesivo.

A equação da reta do caminho de tensão está diretamente relacionada com a reta de resistência de mohr coulomb, equação (22).

$$\tau = \operatorname{tg} \Phi' * \sigma + c' \quad (22)$$

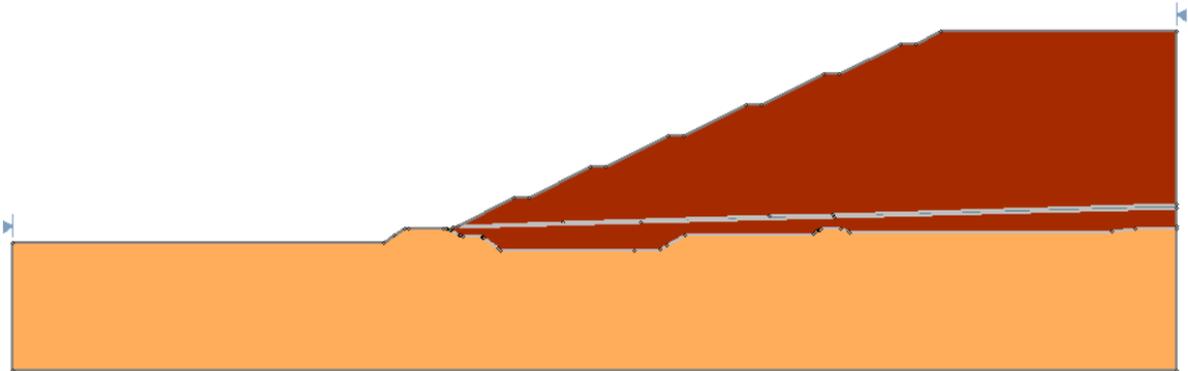
Onde, $\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{sen} \Phi'$ e $a = c' * \operatorname{cos} \Phi'$.

Nas envoltórias em que o intercepto coesivo apresentou valores negativos, definiu-se a coesão como zero, forçando a reta a interceptar o eixo na origem. Finalmente, após a obtenção das equações das retas, foi possível determinar os parâmetros de c' e Φ' .

3.6. MODELO DE ANÁLISE

Para o modelo de análise estrutural, a fim de garantir a confidencialidade da estrutura, foi adotada uma seção hipotética. A geometria da estrutura é composta por taludes inclinados, com uma relação de 1,0V: 2,0H entre as bermas, e bermas com largura de 5,0 m a cada 10 m de altura. O ângulo médio externo da pilha é de aproximadamente 22°. A seção inclui, ainda, um dreno subhorizontal de fundo, com uma inclinação de 4% de montante a jusante, destinado à drenagem da água no solo. A fundação da estrutura, tratada como um material homogêneo, apresenta os seguintes parâmetros geotécnicos: $\gamma_{\text{nat}} = 20,2 \text{ kN/m}^3$, $c' = 13 \text{ kPa}$ e $\Phi' = 27^\circ$. A Figura 18 ilustra a seção hipotética que será utilizada nas análises.

Figura 18 – Seção hipotética utilizada nas análises.



Fonte: a autora.

4. RESULTADOS

4.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Após a realização dos ensaios de caracterização, foram determinados o teor de umidade ótima e o peso específico seco máximo por meio do ensaio Proctor Normal, conforme apresentado na Tabela 7. Além disso, obtiveram-se os valores de peso específico seco de campo e o grau de compactação, conforme demonstrado na Tabela 8.

Tabela 7 – Resultados do Ensaio Proctor Normal, Peso Específico Seco de Campo e Grau de Compactação.

Condição	CP	Wot (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	γ_{dcampo} (kN/m ³)	Média γ_{dcampo} (kN/m ³)	GC (%)	Média GC (%)
Wot +6% com trator de esteira	1	28,20	15,60	15,86	16,0	101,69	102,58
	2			15,58		99,85	
	3			16,12		103,33	
	4			16,45		105,43	
Wot +4% com trator de esteira	1	28,10	15,70	15,22	14,97	96,96	95,37
	2			15,14		96,42	
	3			14,86		94,62	
	4			14,67		93,46	
Wot +2% com trator de esteira	1	25,80	16,10	15,31	15,14	95,06	94,02
	2			15,18		94,30	
	3			15,08		93,69	
	4			14,98		93,04	
Wot com trator de esteira	1	27,80	15,40	17,69	17,0	114,84	110,37
	2			16,60		107,79	
	3			16,45		106,83	
	4			17,25		112,03	
Wot -2% com trator de esteira	1	27,00	15,60	13,80	14,16	88,49	90,75
	2			13,96		89,47	
	3			14,34		91,95	
	4			14,52		93,08	
Wot +2% com rolo compactad or pé de carneiro vibratório	1	26,60	15,80	15,54	15,28	98,35	96,69
	2			14,07		89,03	
	3			15,87		100,47	
	4			15,625		98,89	
Wot com rolo	1	25,90	15,90	16,80	16,83	105,67	105,82
	2			17,22		108,28	

Condição	CP	Wot (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	γ_{dcampo} (kN/m ³)	Média γ_{dcampo} (kN/m ³)	GC (%)	Média GC (%)
compactad or pé de carneiro	3			17,11		107,6	
	4			16,17		101,72	
vibratório	1			14,83		93,86	
	2			16,27		102,98	
compactad or pé de carneiro	3	25,90	15,80	16,48	16,07	104,3	101,72
	4			16,71		105,74	
vibratório							

Nota: Wot – Umidade ótima; $\gamma_{dm\acute{a}x}$ – Peso específico seco máximo; γ_{dcampo} – Peso específico seco de campo;

GC – Grau de compactação.

Fonte: Acervo da empresa.

A partir da Tabela 7, nota-se que a umidade ótima variou entre 25,80% e 28,20%, sendo os valores mínimo e máximo observados, respectivamente, nas condições Wot +2% com trator de esteira e Wot +6% com trator de esteira. Em relação ao peso específico seco máximo, os valores oscilaram entre 15,40 kN/m³ e 16,10 kN/m³, correspondendo, respectivamente, às condições Wot com trator de esteira e Wot +2% com trator de esteira.

O peso específico seco de campo apresentou variação de 14,16 kN/m³ a 17,00 kN/m³, verificados nas condições Wot -2% com trator de esteira e Wot com trator de esteira, respectivamente. Quanto ao grau de compactação, os valores variaram entre 90,75% e 110,37%, também para as mesmas condições mencionadas. O que mostra que os valores encontrados estão condizentes tendo em vista que um maior peso específico de campo e maior grau compactação indicam uma eficácia na compactação.

Complementarmente, a Tabela 8 apresenta os valores de peso específico natural e Limites de Atteberg e a Figura 19 apresenta a carta de plasticidade do material.

Tabela 8 – Resultados Peso Específico Natural e Limites de Atteberg.

Condição	CP	γ_{nat} (kN/m ³)	Med. γ_{nat} (kN/m ³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Wot +6% com trator de esteira	1	20,4				
	2	20				
	3	20,6	20,55	33	16	17
	4	21,2				

Condição	CP	γ_{nat} (kN/m ³)	Med. γ_{nat} (kN/m ³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Wot +4% com trator de esteira	1	19,5	19,18	31	18	13
	2	19,3				
	3	19				
	4	18,9				
Wot +2% com trator de esteira	1	19,3	19,03	32	19	13
	2	19,1				
	3	18,9				
	4	18,8				
Wot com trator de esteira	1	21,4	20,73	32	16	16
	2	20,5				
	3	20,4				
	4	20,6				
Wot -2% com trator de esteira	1	16,8	17,3	32	24	8
	2	17				
	3	17,7				
	4	17,7				
Wot +2% com rolo compactador pé de carneiro vibratório	1	19,3	18,88	31	17	14
	2	17,5				
	3	19,7				
	4	19				
Wot com rolo compactador pé de carneiro vibratório	1	20,8	20,93	33	16	17
	2	21,4				
	3	21,3				
	4	20,2				
Wot -2% com rolo compactador pé de carneiro vibratório	1	18,3	19,83	31	17	14
	2	19,9				
	3	20,5				
	4	20,6				

Nota: γ_{nat} . – Peso específico natural; LL – Limite de liquidez; LP – Limite de plasticidade; IP – Índice de plasticidade.

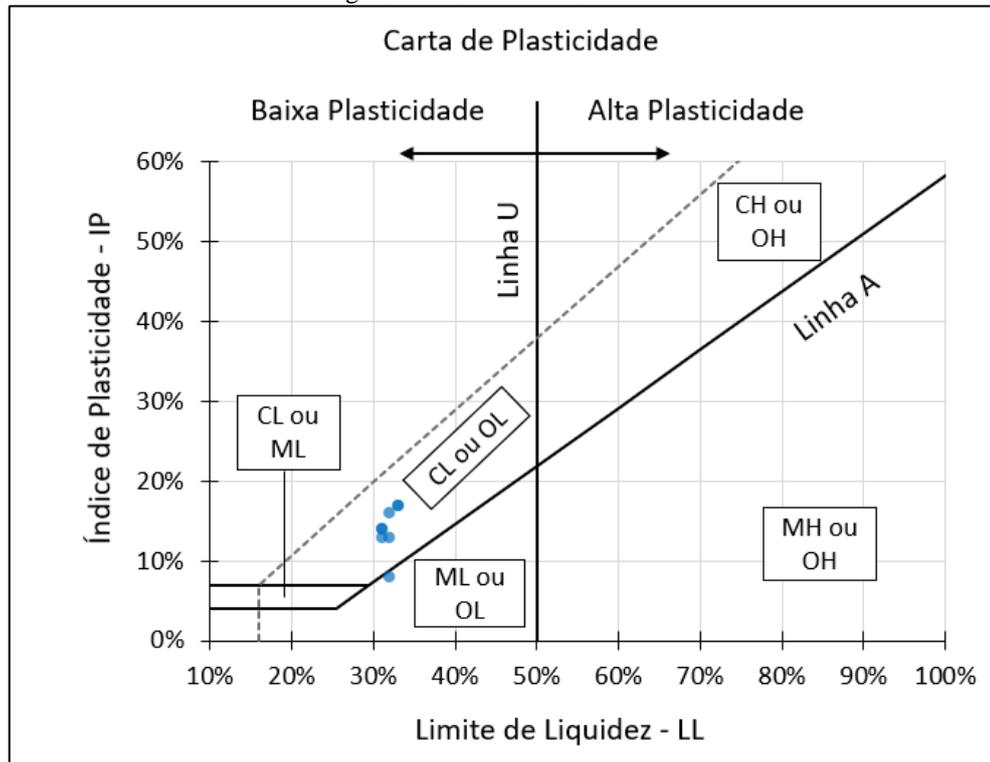
Fonte: acervo da empresa.

É possível observar a partir da Tabela 8 que o peso específico natural variou entre 17,30 kN/m³ e 20,93 kN/m³. A condição Wot -2%, com o uso de trator de esteira, apresentou o menor peso específico, enquanto a condição Wot, com rolo compactador pé de carneiro vibratório, obteve o maior valor. A média geral do peso específico foi de 19,55 kN/m³.

Com a carta de plasticidade ilustrada na Figura 19, conforme os critérios do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), nota-se que para a maioria das condições analisadas, o solo

foi classificado como CL (argila de baixa plasticidade). A exceção foi a condição Wot -2% com trator de esteira, na qual o solo foi classificado como ML (silte de baixa plasticidade), evidenciado pelo seu baixo valor de Índice de Plasticidade (8%).

Figura 19 – Carta de Plasticidade.



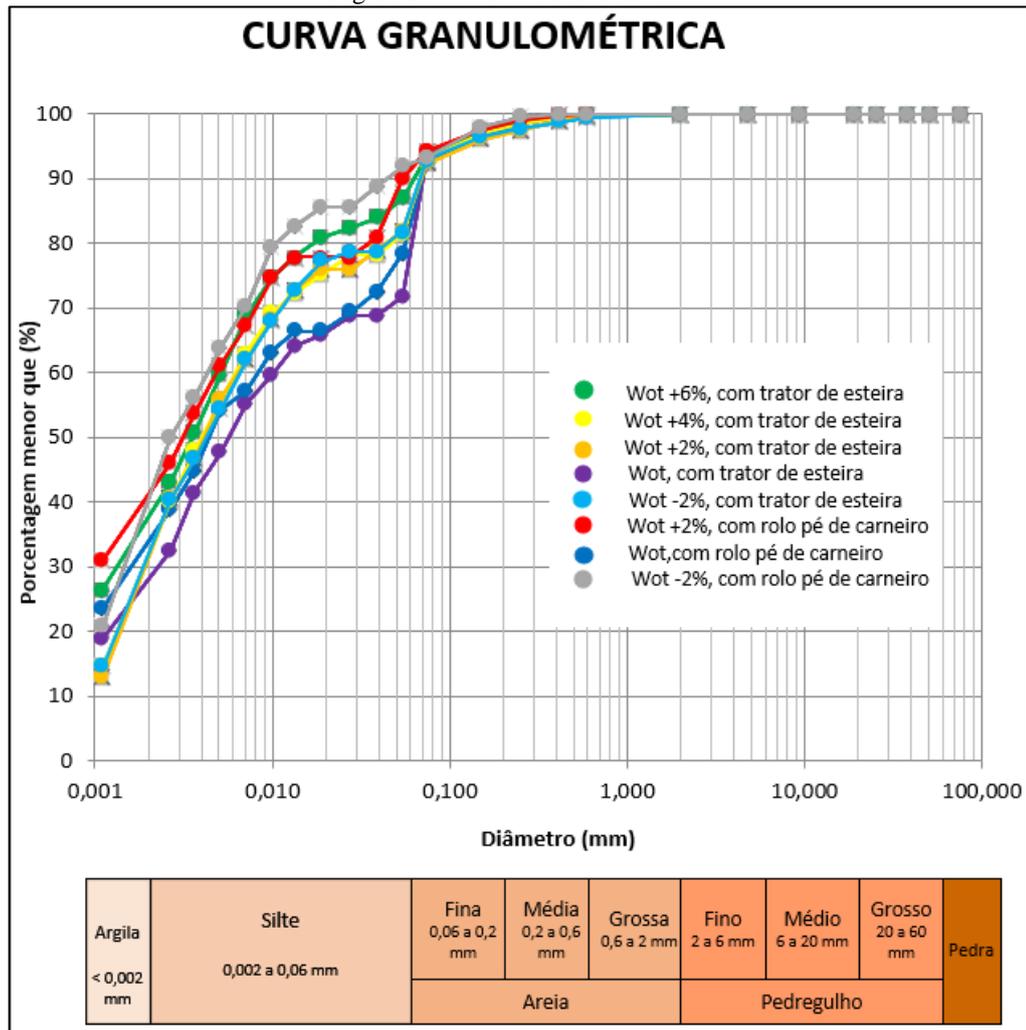
Fonte: a autora.

Com a realização dos ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação, foi possível determinar como mostra a Figura 20 a curva granulométrica do rejeito para cada condição. A Tabela 9 traz para cada condição a caracterização granulométrica.

De acordo com a NBR 6502/2022, que estabelece faixas granulométricas para os diâmetros das partículas, observou-se a partir da Figura 20 que o rejeito é predominantemente composto por finos e sua classificação é de silto-argiloso.

Para todas as condições, a faixa de silte superou os 50%, indicando uma predominância de material siltoso. As condições $w_{ot} + 2\%$ com trator de esteira e $w_{ot} - 2\%$ com trator de esteira apresentaram a maior porcentagem de silte, atingindo 53%, enquanto as condições w_{ot} com rolo pé de carneiro e $w_{ot} + 2\%$ com rolo pé de carneiro obteve a menor porcentagem de silte, com 50%. Além disso, foi observada uma porcentagem significativa de argila, variando entre 28% e 42% para as condições w_{ot} com trator de esteira e $w_{ot} + 2\%$ com rolo pé de carneiro, respectivamente. Por fim, a faixa de areia fina variou entre 6% e 18%.

Figura 20 – Curva Granulométrica.



Fonte: a autora.

Tabela 9 – Caracterização Granulométrica.

Condição	Areia			Silte (%)	Argila (%)
	Grossa (%)	Média (%)	Fina (%)		
wot., com trator de esteira	0	2	18	52	28
wot., com rolo pé de carneiro	0	2	14	50	34
wot+6%, com trator de esteira	0	2	9	51	38
wot+4%, com trator de esteira	0	2	14	52	32
wot +2%, com trator de esteira	0	3	12	53	32
wot +2%, com rolo pé de carneiro	0	2	6	50	42
wot -2%, com trator de esteira	0	3	12	53	32
wot -2%, com rolo pé de carneiro	0	1	7	51	41

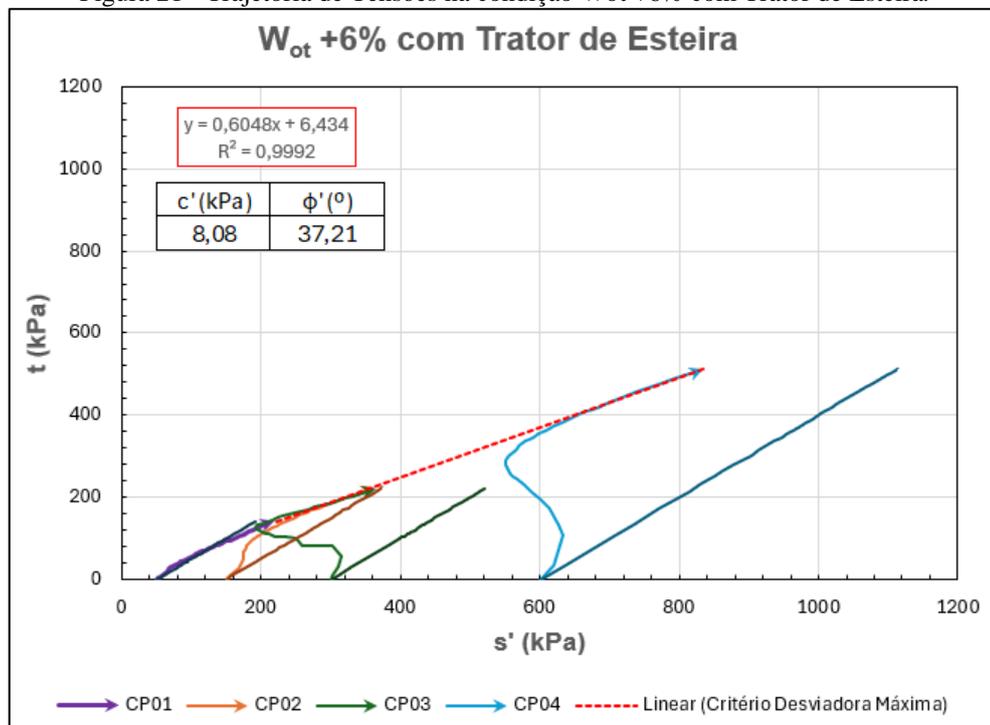
Fonte: a autora.

4.2. ENSAIOS TRIAXIAIS CIU_{SAT}

A análise dos resultados dos ensaios CIU em condições saturadas fornece importantes revelações sobre o comportamento do rejeito filtrado de bauxita. Como todas as amostras foram ensaiadas em condição saturada, os parâmetros de resistência obtidos representam o comportamento do material em situações críticas, como após períodos de precipitação intensa, quando a pilha de rejeitos estaria em sua condição mais vulnerável.

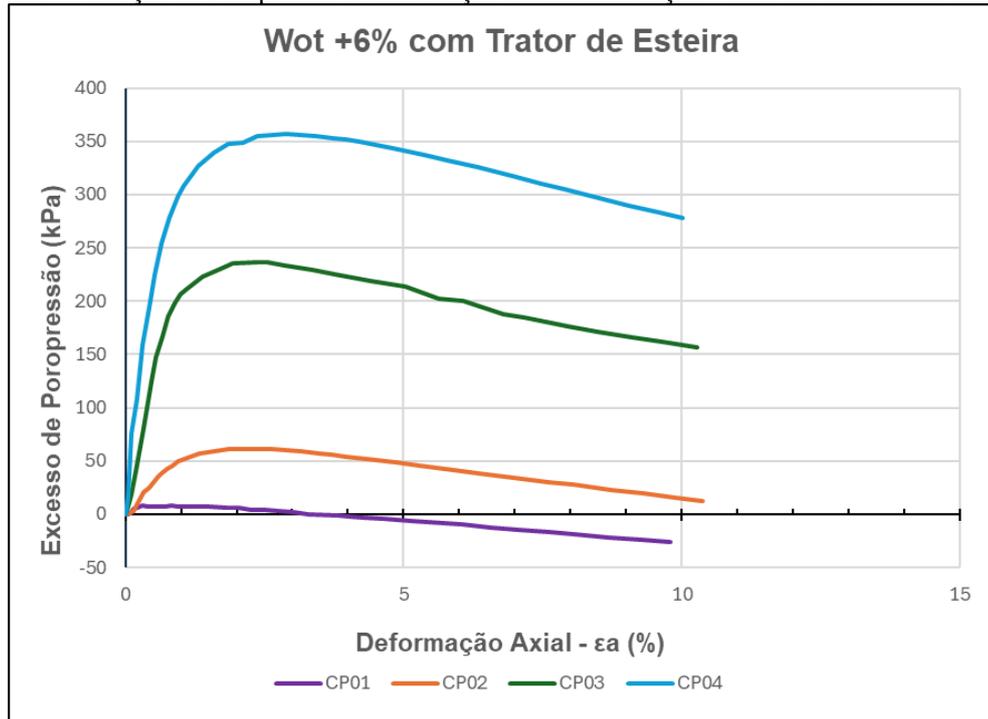
Os ensaios triaxiais CIU_{SAT} foram realizados para tensões de 50 kPa, 150 kPa, 300 kPa e 600 kPa. A partir da análise e interpretação dos ensaios triaxiais, foram determinadas as trajetórias de tensões para cada condição, com base no critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Os parâmetros de resistência foram obtidos considerando o critério da tensão desviadora máxima. Na Figura 21, Figura 23, Figura 25, Figura 27, Figura 29, Figura 31, Figura 33 e Figura 35 são apresentados as trajetórias de tensão para cada condição. Na Figura 22, Figura 24, Figura 26, Figura 28, Figura 30, Figura 32, Figura 34 e Figura 36 são apresentados o gráfico de variação de poropressão por deformação axial. E a Tabela 10 traz o resumo dos parâmetros de resistência efetivos obtidos (c' e Φ').

Figura 21 - Trajetória de Tensões na condição Wot +6% com Trator de Esteira.



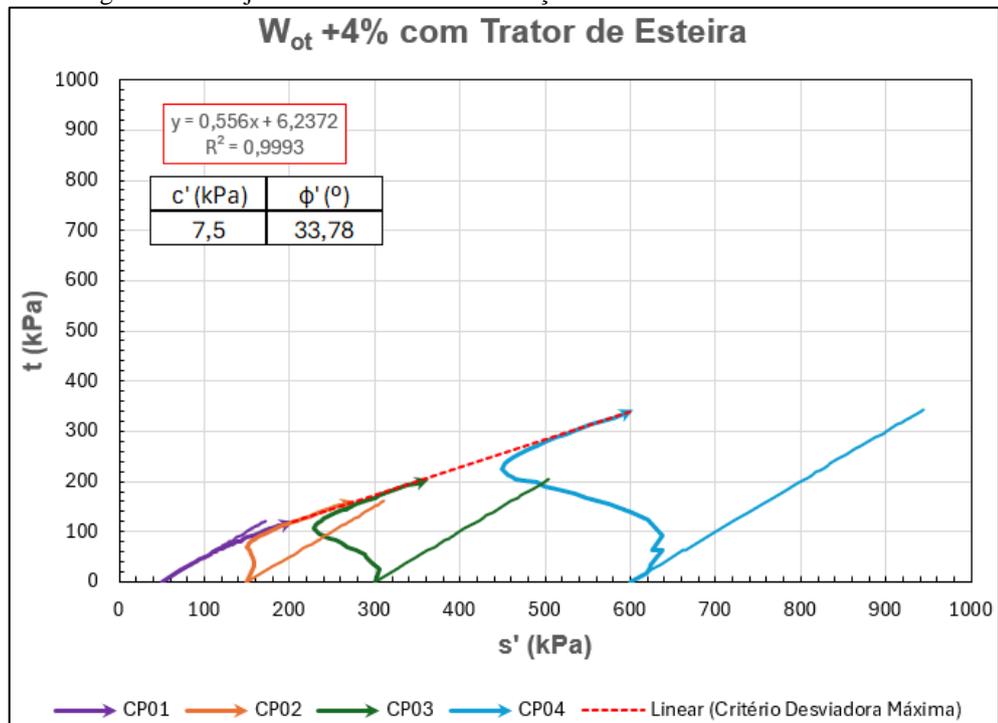
Fonte: a autora.

Figura 22 – Variação de Poropressão x Deformação Axial na condição Wot + 6% com Trator de Esteira.



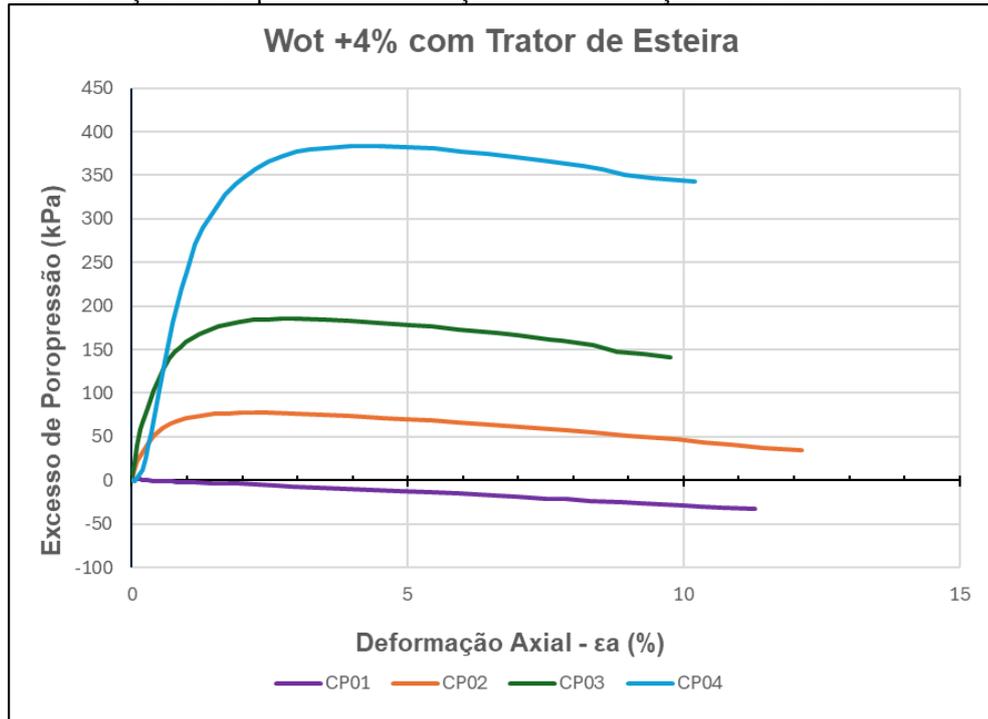
Fonte: a autora.

Figura 23 – Trajetória de Tensões na condição Wot +4% com Trator de Esteira.



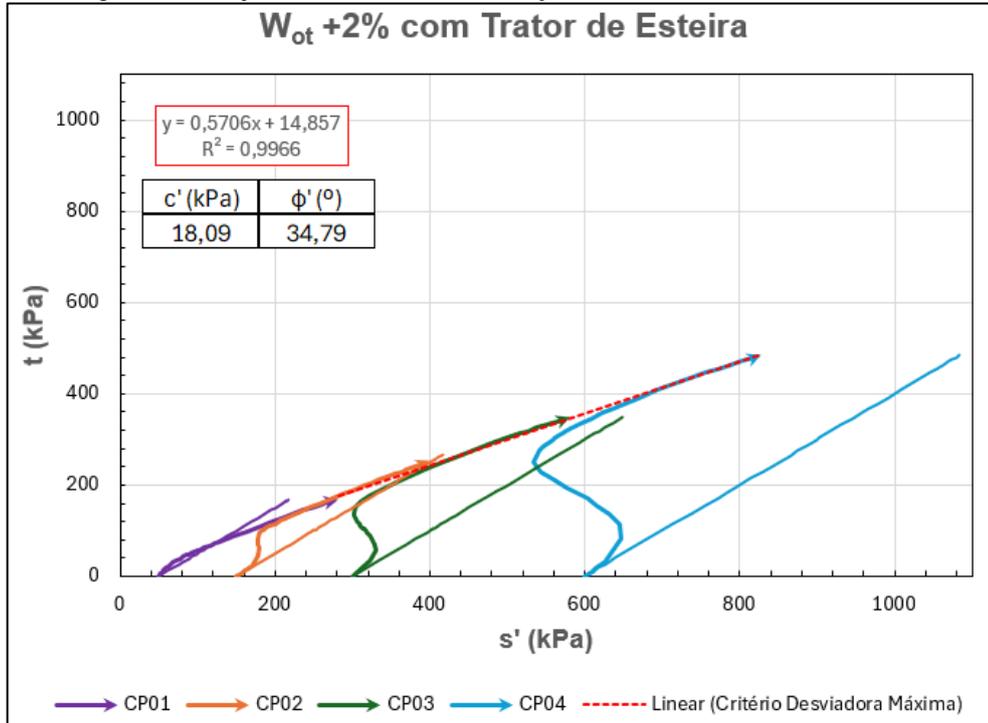
Fonte: a autora.

Figura 24 - Variação de Poropressão x Deformação Axial na condição Wot + 4% com Trator de Esteira.



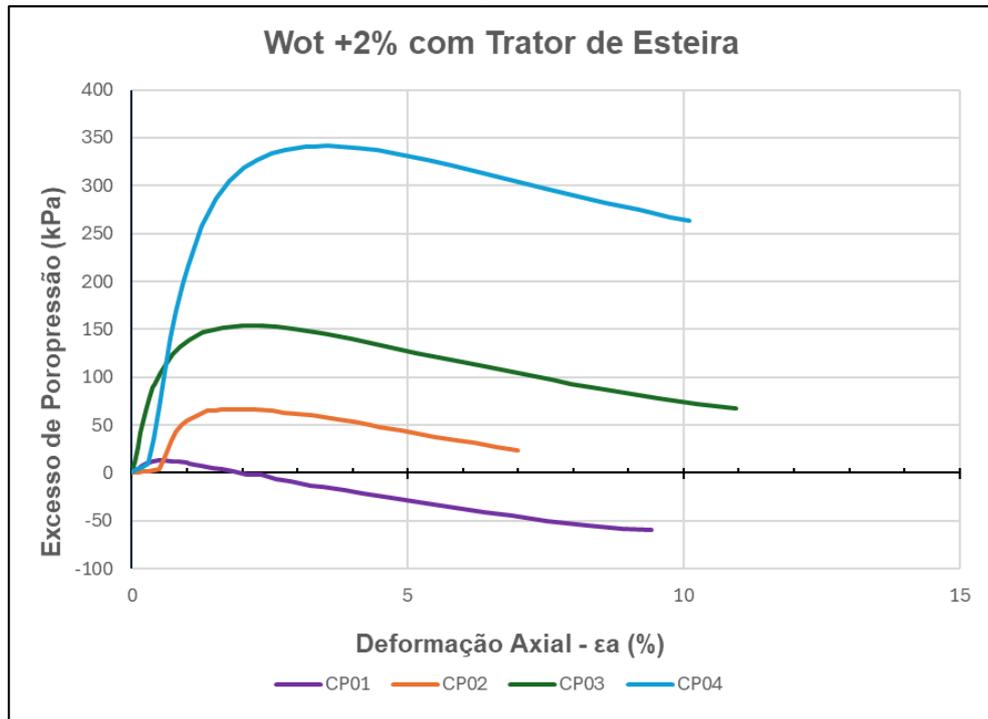
Fonte: a autora.

Figura 25 – Trajetória de Tensões na condição Wot +2% com Trator de Esteira.



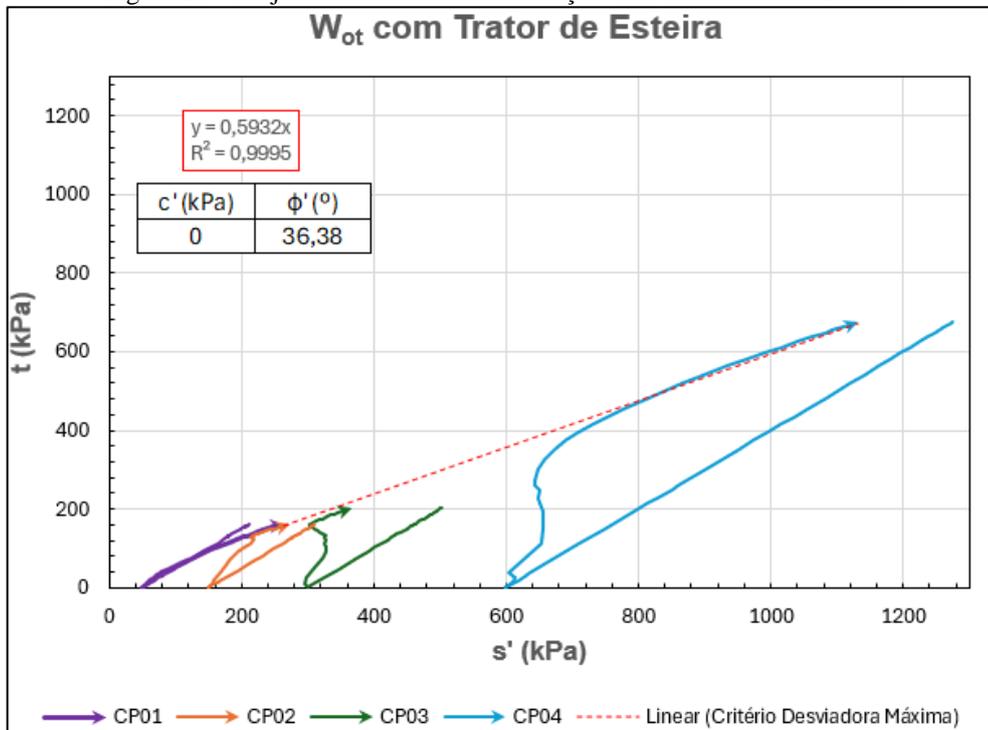
Fonte: a autora.

Figura 26 – Variação de Poropressão x Deformação Axial na condição na condição Wot +2% com Trator de Esteira.



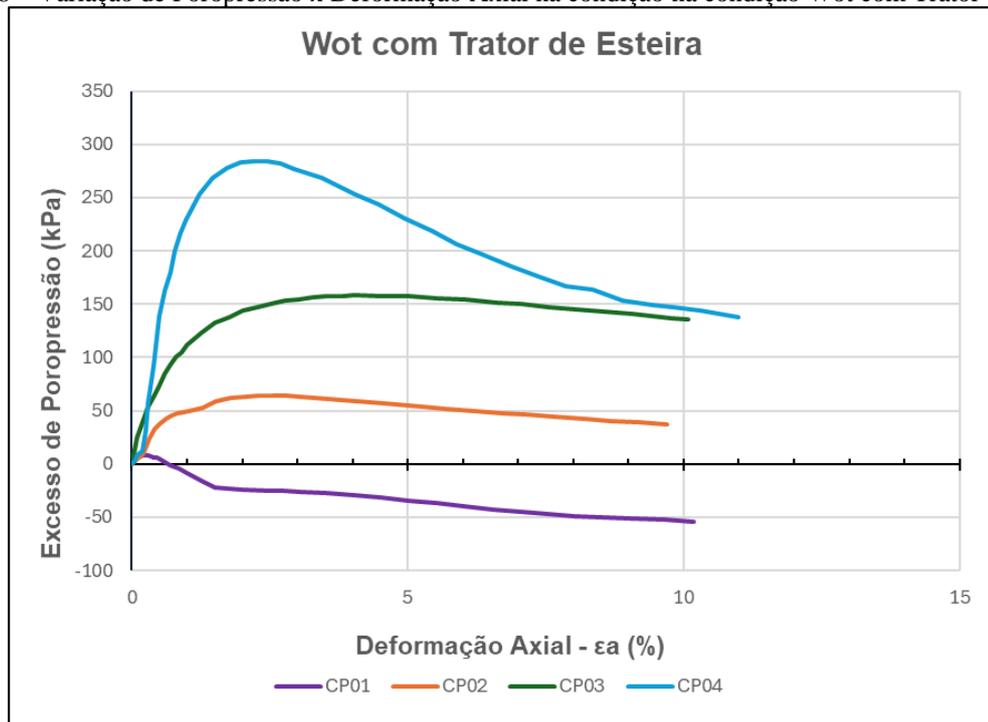
Fonte: a autora.

Figura 27 – Trajetória de Tensões na condição Wot com Trator de Esteira.



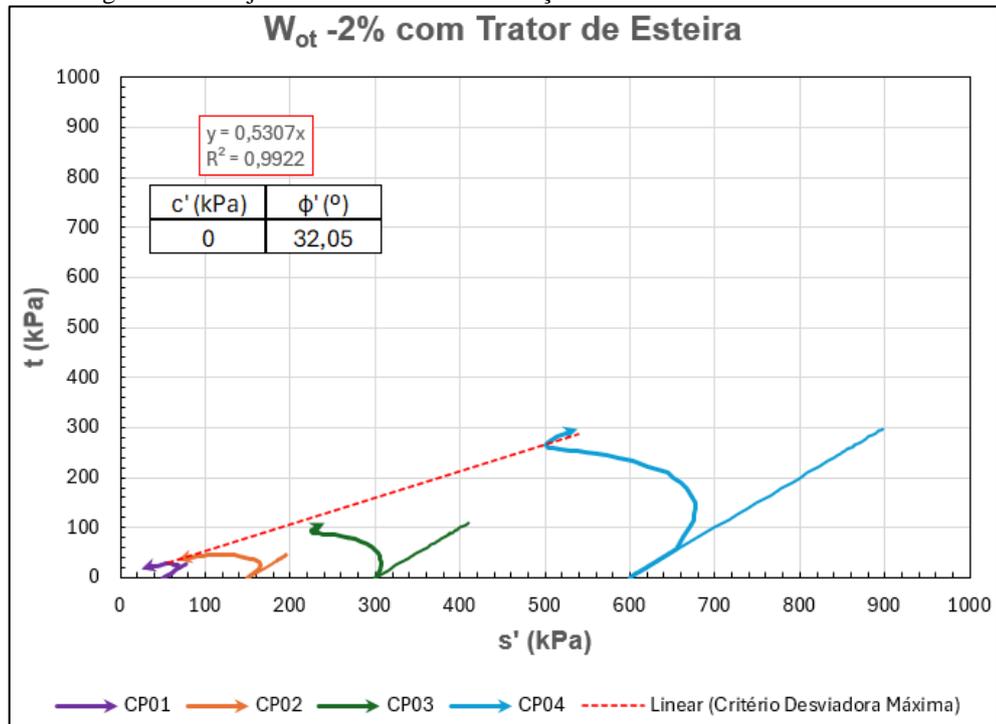
Fonte: a autora.

Figura 28 – Variação de Poropressão x Deformação Axial na condição na condição Wot com Trator de Esteira.



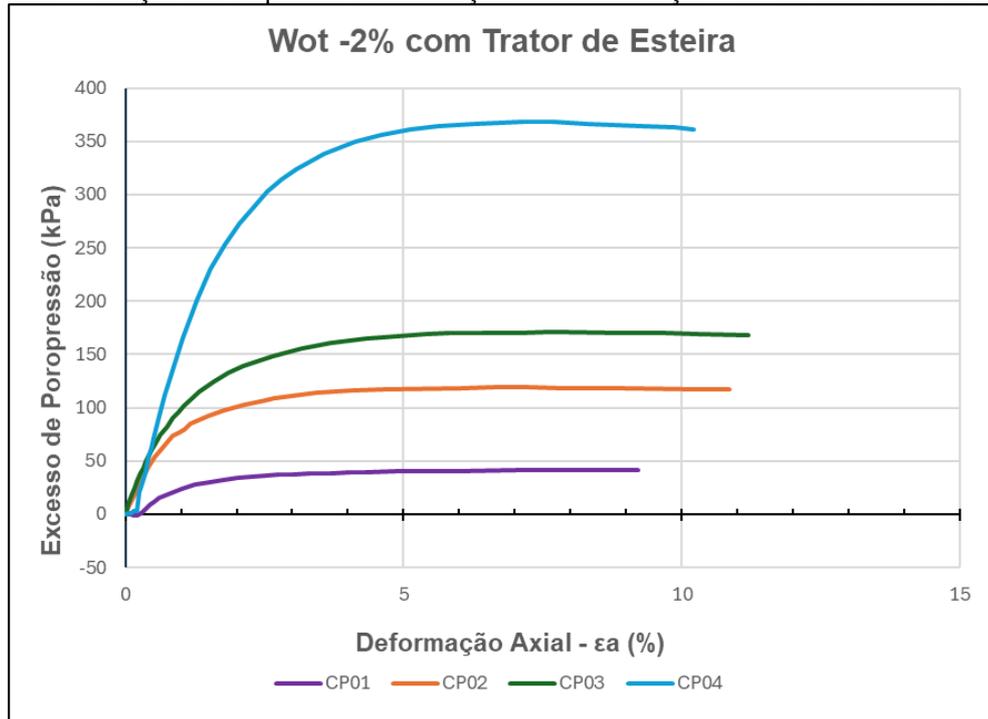
Fonte: a autora.

Figura 29 – Trajetória de Tensões na condição Wot -2% com Trator de Esteira.



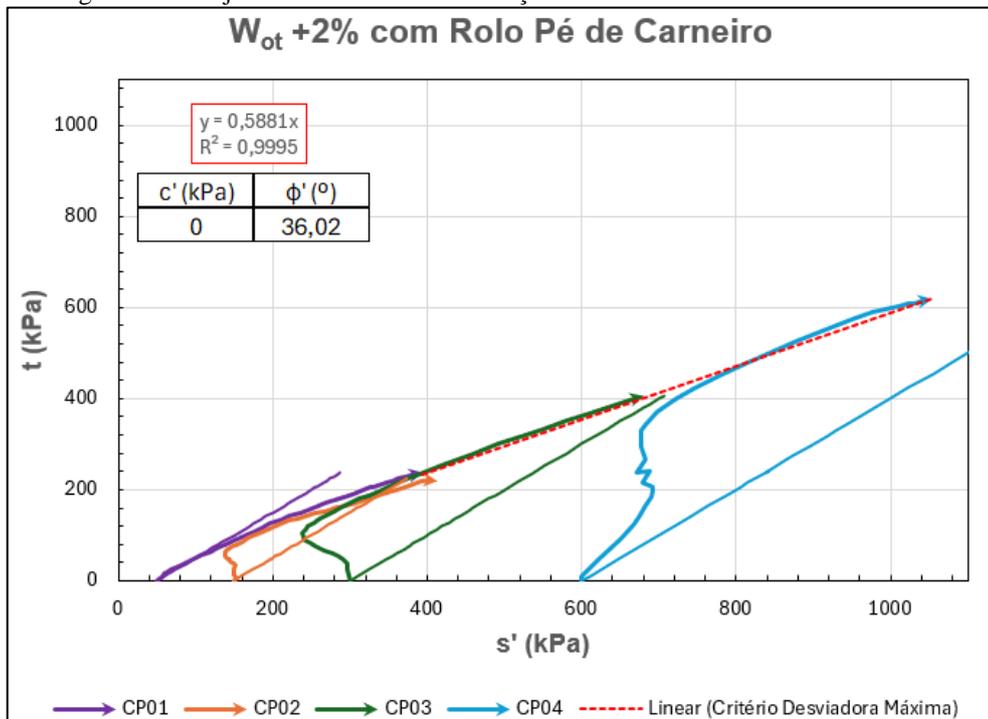
Fonte: a autora.

Figura 30 – Variação de Poropressão x Deformação Axial na condição Wot -2% com Trator de Esteira.



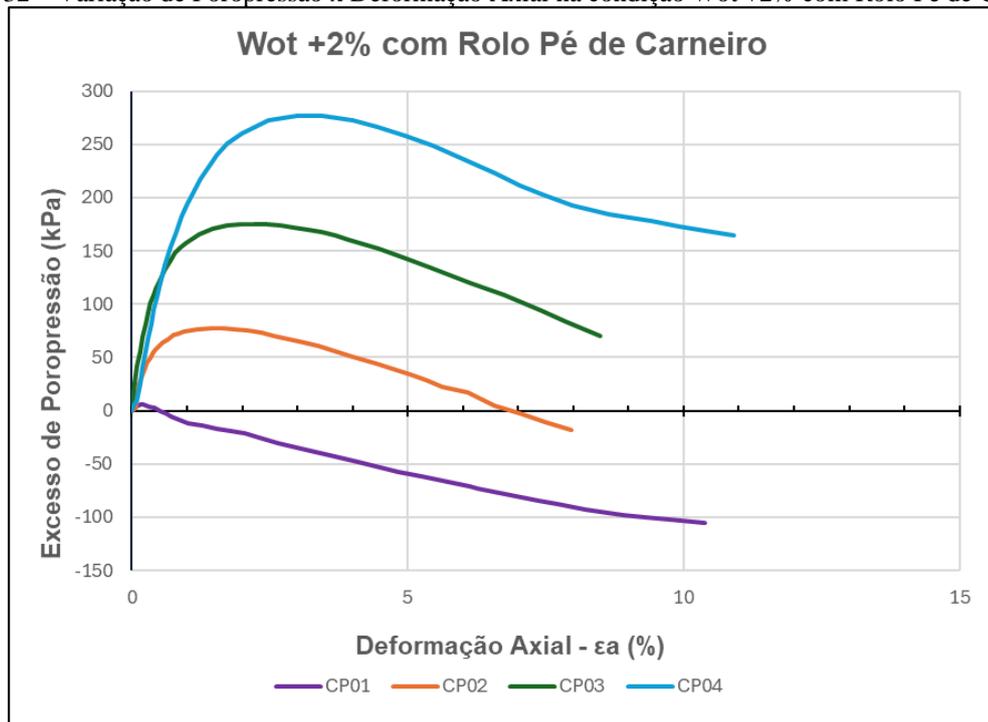
Fonte: a autora.

Figura 31 – Trajetória de Tensões na condição Wot +2% com Rolo Pé de Carneiro.



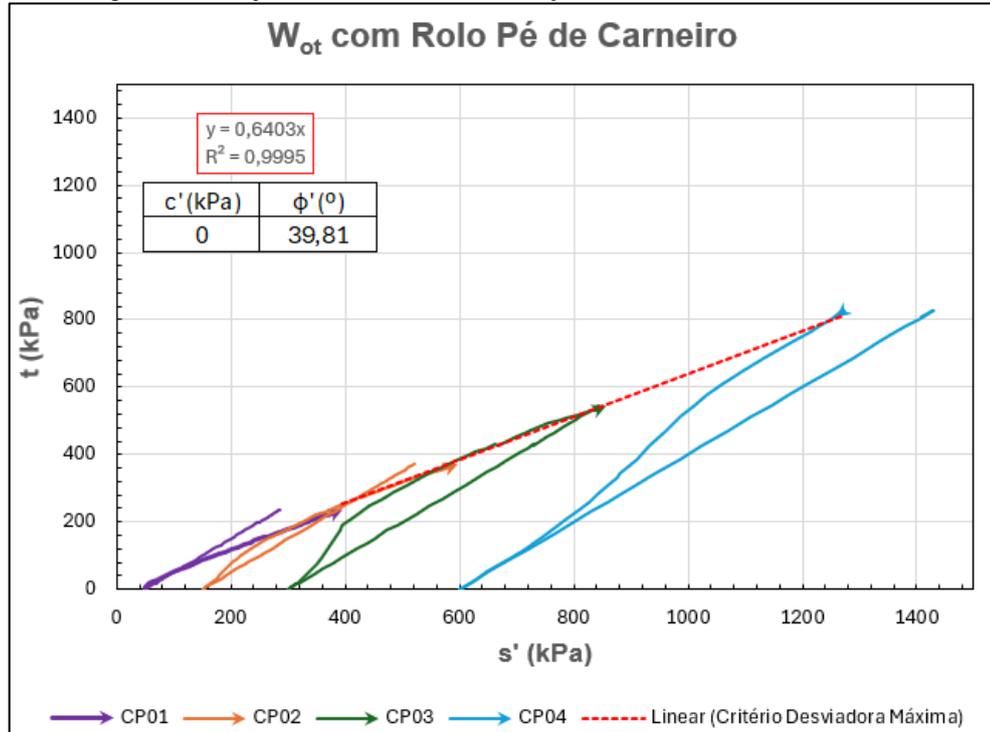
Fonte: a autora.

Figura 32 – Variação de Poropressão x Deformação Axial na condição Wot +2% com Rolo Pé de Carneiro.



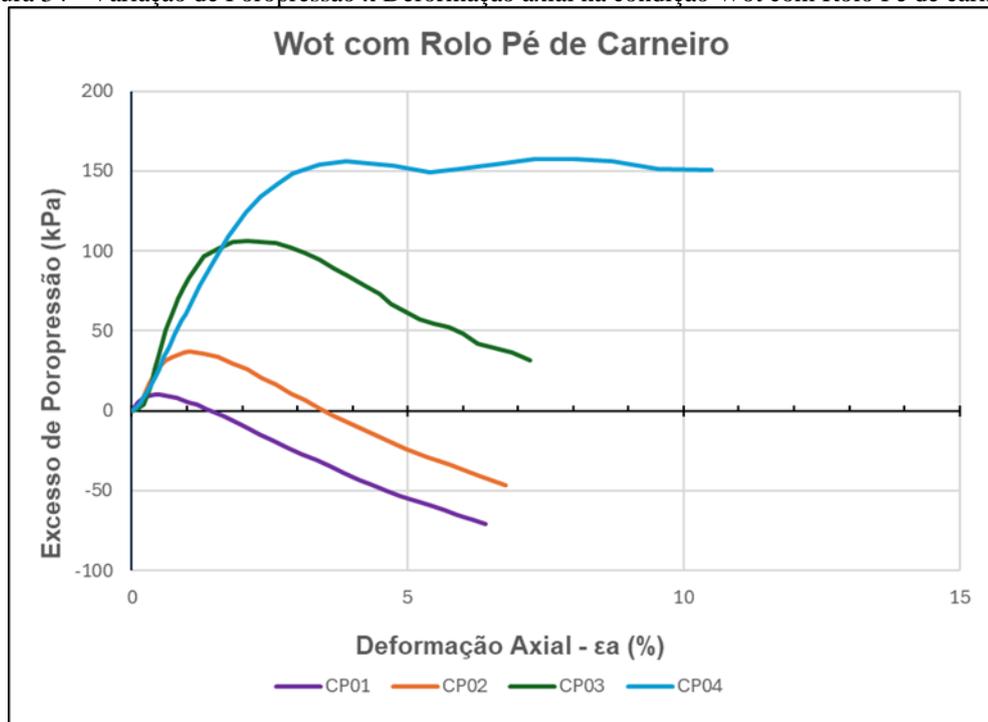
Fonte: a autora.

Figura 33 – Trajetória de Tensões na condição Wot com Rolo Pé de Carneiro.



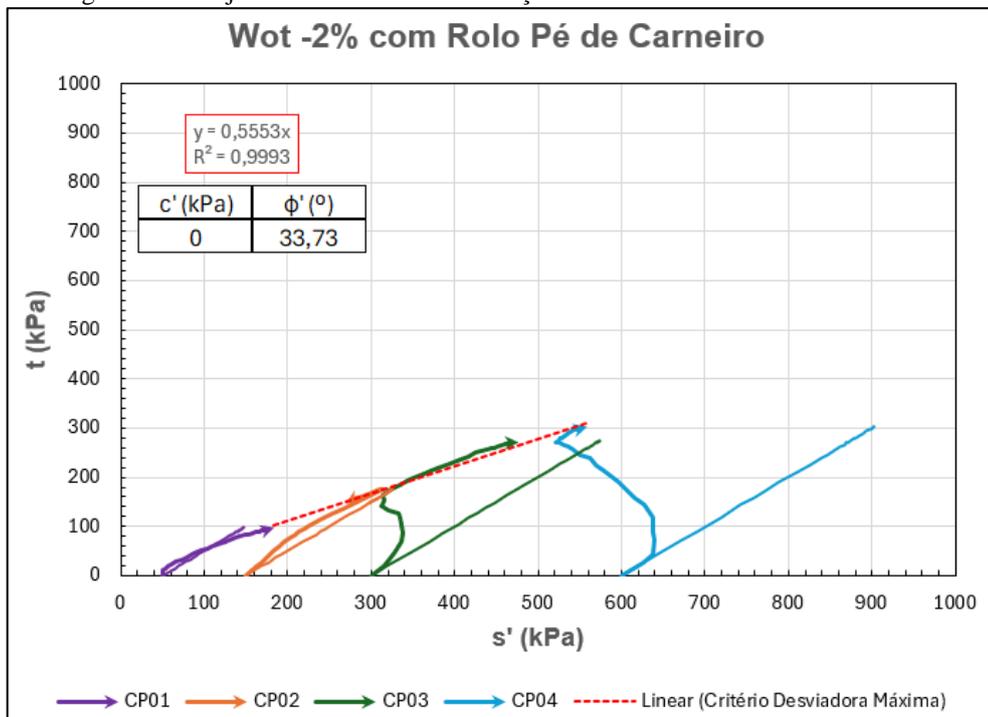
Fonte: a autora.

Figura 34 - Variação de Poropressão x Deformação axial na condição Wot com Rolo Pé de carneiro.



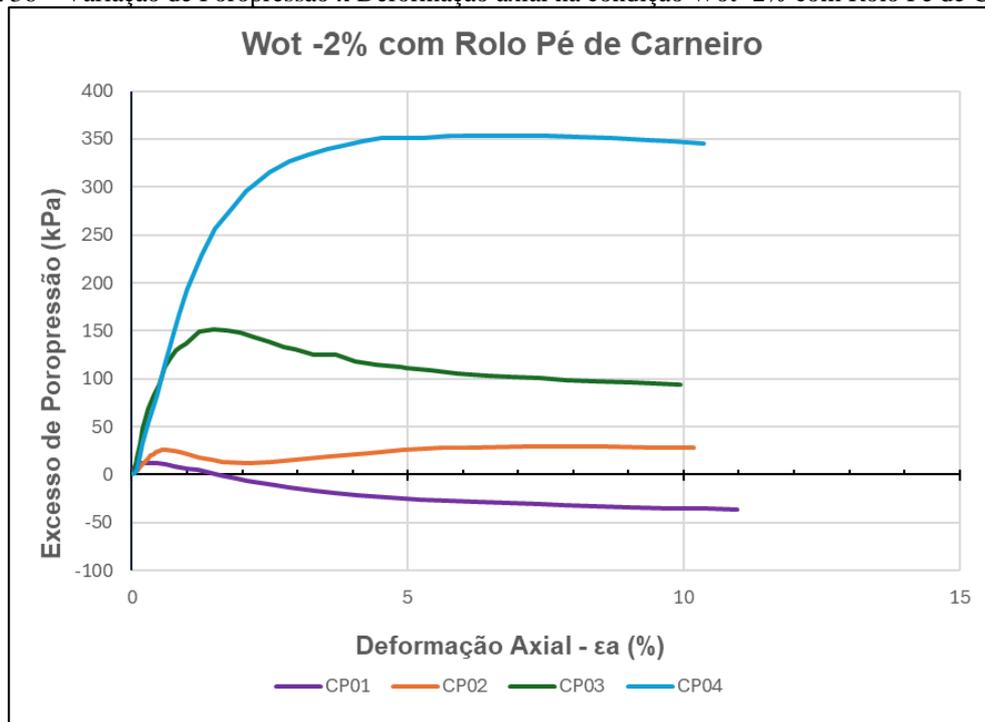
Fonte: a autora.

Figura 35 – Trajetória de Tensões na condição Wot -2% com Rolo Pé de Carneiro.



Fonte: a autora.

Figura 36 – Variação de Poropressão x Deformação axial na condição Wot -2% com Rolo Pé de Carneiro.



Fonte: a autora.

Tabela 10 – Parâmetros de Resistência Efetivos.

Condição	Desviadora Máxima	
	c' (kPa)	ϕ (°)
Wot +6%, com trator de esteira	8,08	37,21
Wot + 4%, com trator de esteira	7,5	33,78
Wot + 2%, com trator de esteira	18,09	34,79
Wot, com Trator de Esteira	0	36,38
Wot - 2%, com trator de esteira	0	32,05
Wot + 2%, com rolo pé de carneiro	0	36,02
Wot, com rolo pé de carneiro	0	39,81
Wot - 2%, com rolo pé de carneiro	0	33,73

Nota: c' – coesão drenada; ϕ – ângulo de atrito interno do solo;

Fonte: a autora.

Os valores de ângulo de atrito para o rejeito de bauxita compactado variam entre 32,05° e 39,81°, dependendo das condições de compactação e teor de umidade. O valor mais alto (39,81°) foi obtido na condição "Wot com rolo pé de carneiro", enquanto o menor valor (32,05°) foi obtido na condição "Wot -2% com trator de esteira". Em sua pesquisa, Schnaid et al. (2014) conduziram uma caracterização geotécnica abrangente de rejeitos de bauxita provenientes de uma mina no norte do Brasil. Trabalhando com amostras reconstituídas, os autores encontraram um ângulo de atrito efetivo (ϕ') de 36° para este material, que era composto predominantemente

por silte (aproximadamente 80% de silte, com frações menores de argila (15%) e areia fina (5%)).

A coesão varia significativamente, de 0 a 18,09 kPa. Nota-se que a coesão só é observada nas amostras compactadas com trator de esteira em condições de umidade acima da ótima (Wot +2%, Wot +4%, Wot +6%). O rolo pé de carneiro não gerou coesão efetiva em nenhuma condição. Na pesquisa de Schnaid et al. (2014), os autores também reportaram coesão zero para o rejeito de bauxita ensaiado. Este resultado foi consistente com as características do material estudado, que apresentava baixa plasticidade e natureza predominantemente siltosa.

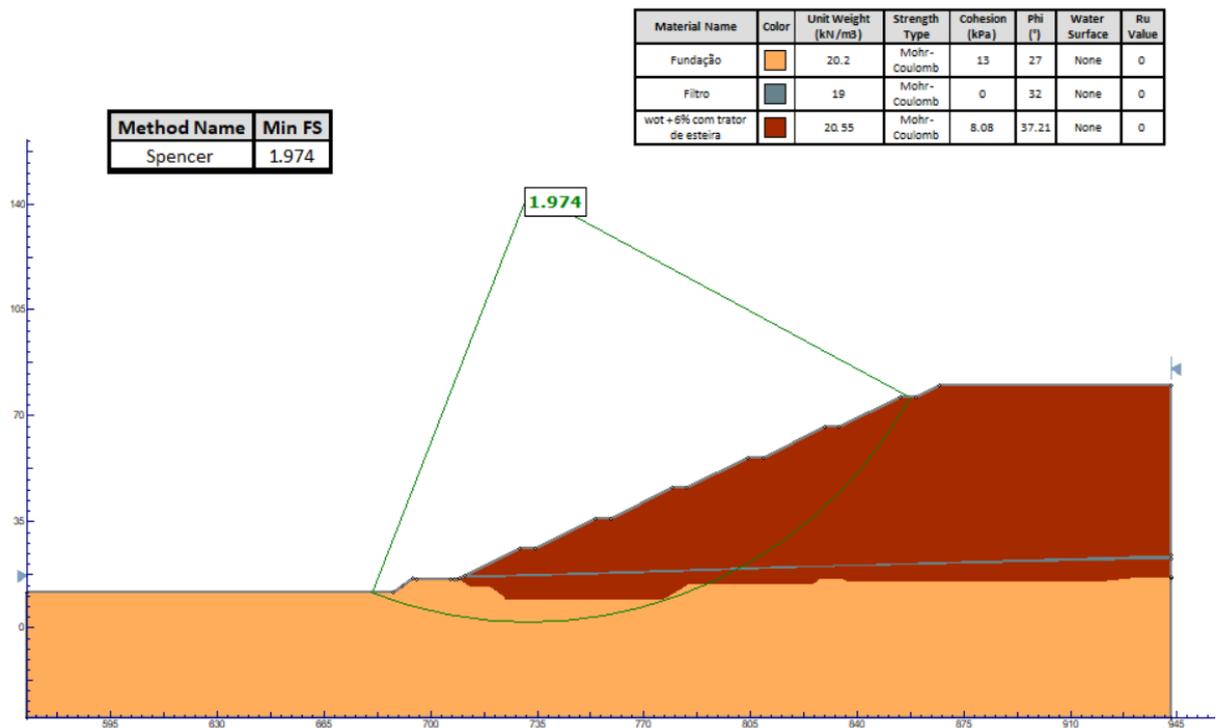
O gráfico de variação de poropressão por deformação axial permitiu avaliar o comportamento do rejeito para diferentes condições. Observou-se um padrão similar nas condições Wot com trator de esteira (Figura 28), Wot +6% com trator de esteira (Figura 22), Wot +4% com trator de esteira (Figura 23), Wot +2% com trator de esteira (Figura 26) e Wot -2% com rolo pé de carneiro (Figura 36). Nessas situações, para a tensão de 50 kPa (CP01), verificou-se uma variação de poropressão negativa, indicando um comportamento dilatante do rejeito. Já para as tensões de 150 kPa, 300 kPa e 600 kPa (CP02, CP03 e CP04), a variação de poropressão foi positiva, caracterizando um comportamento contrátil do material. Nas condições Wot com rolo pé de carneiro (Figura 34) e Wot +2% com rolo pé de carneiro (Figura 32), identificou-se um padrão distinto: para as tensões de 50 kPa e 150 kPa (CP01 e CP02), a poropressão foi negativa, indicando um comportamento dilatante do rejeito. No entanto, para as tensões de 300 kPa e 600 kPa (CP03 e CP04), a variação de poropressão tornou-se positiva, evidenciando um comportamento contrátil. A condição Wot -2% com trator de esteira (Figura 30) foi a única a apresentar poropressão positiva em todas as tensões aplicadas, indicando um comportamento exclusivamente contrátil do rejeito.

Verificou-se que, nas condições correspondentes à umidade ótima, os valores do ângulo de atrito e do grau de compactação foram mais elevados, o que contribuiu para o aumento da resistência do material. Em contraste, nas condições com umidade inferior à ótima, observou-se os menores valores do ângulo de atrito, indicando uma redução significativa da resistência ao cisalhamento. Já para os casos com umidade acima da ótima, verificou-se maiores valores de coesão, acompanhados de ângulos de atrito ainda elevados, o que também resultou em um incremento na resistência do solo.

4.3. ANÁLISE DE ESTABILIDADE

As análises de estabilidade foram realizadas para cada condição, a partir dos parâmetros que foram obtidos nos ensaios de caracterização e nos ensaios Triaxiais CIU_{SAT}. A Figura 37 a Figura 44 apresentam o FS obtido e os parâmetros utilizados para cada condição. A apresenta o resumo dos parâmetros de resistência efetivos utilizados (c' e Φ') e o FS encontrado.

Figura 37 – Análise de estabilidade para a condição Wot +6% com trator de esteira.



Fonte: a autora.

Figura 38 – Análise de estabilidade para a condição Wot +4% com trator de esteira.

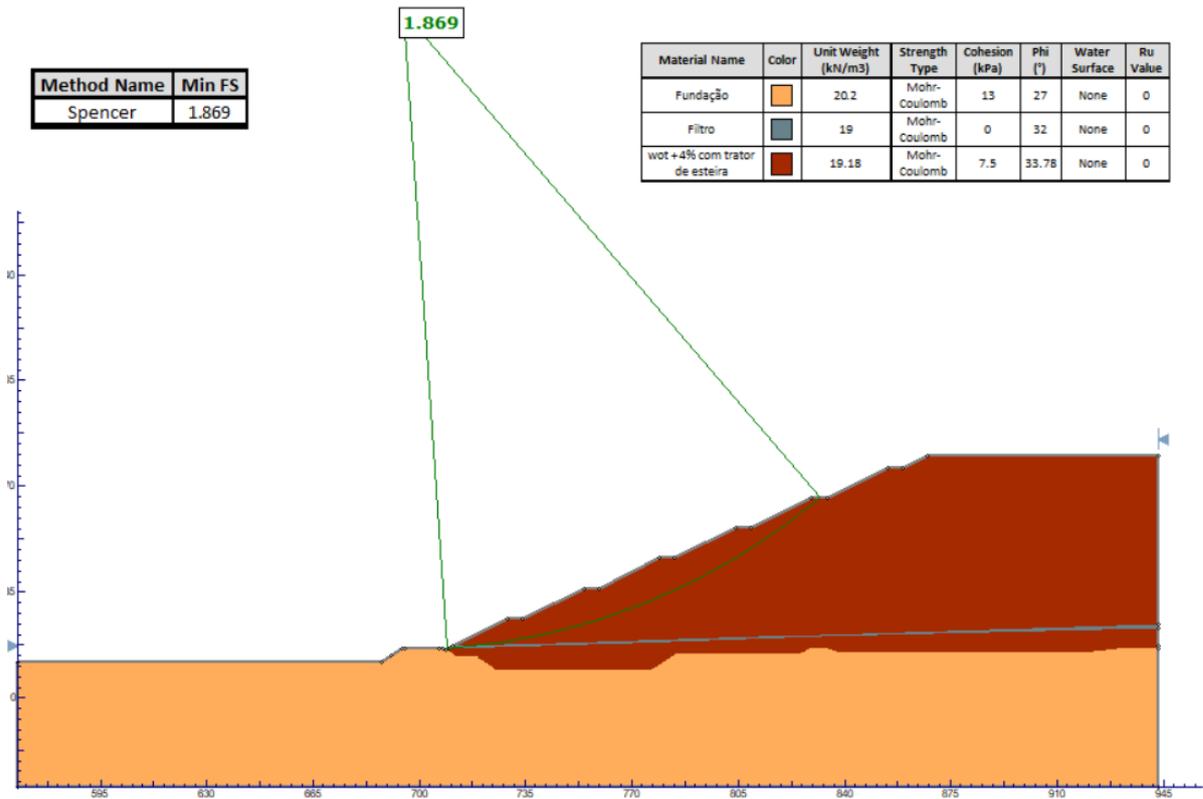


Figura 39 – Análise de estabilidade para a condição Wot +2% com trator de esteira.

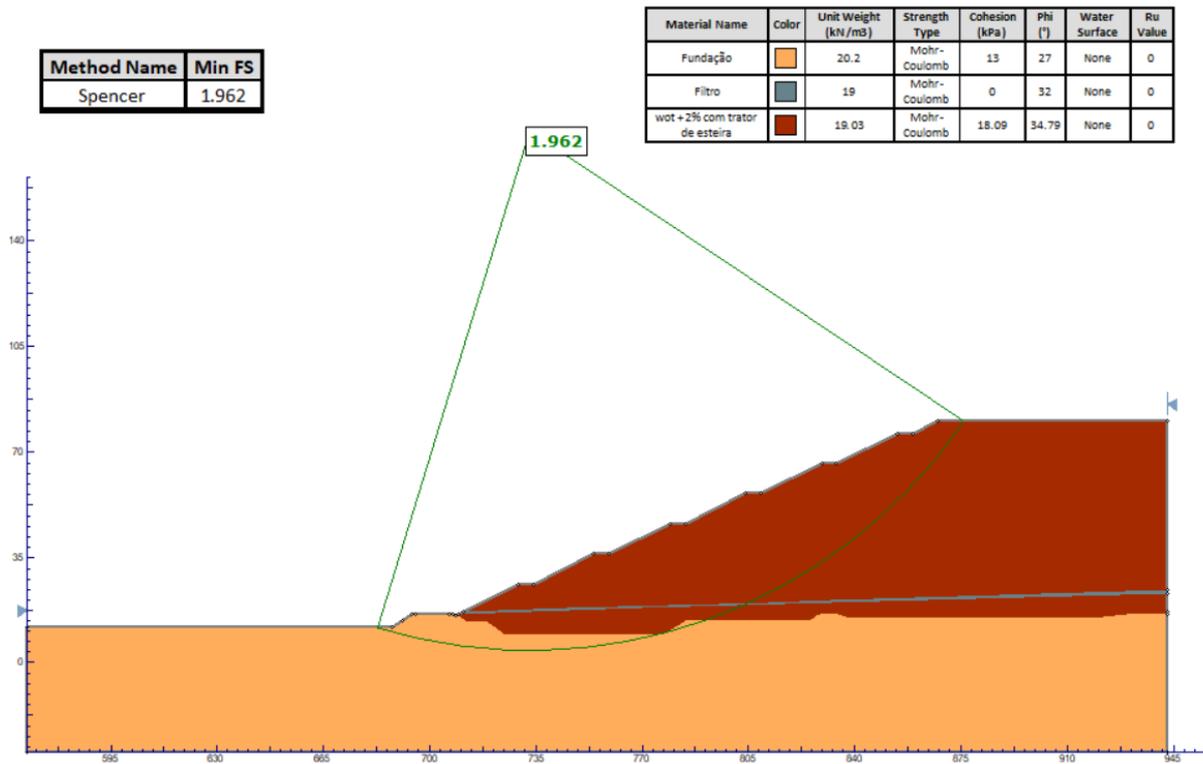
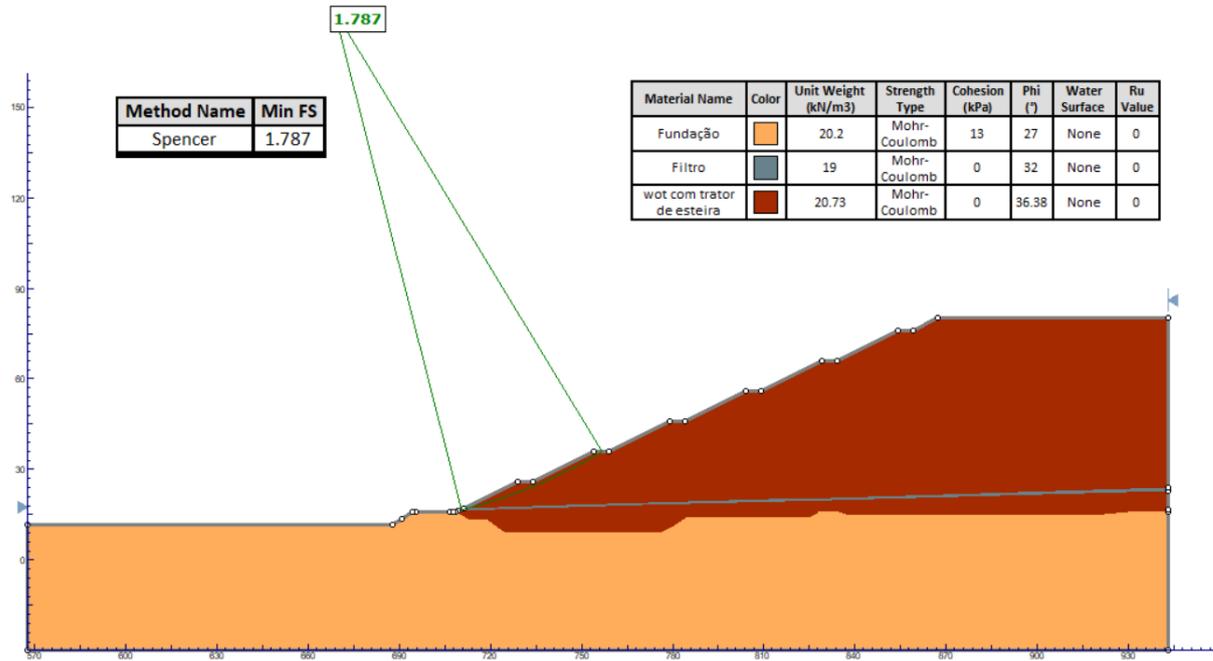
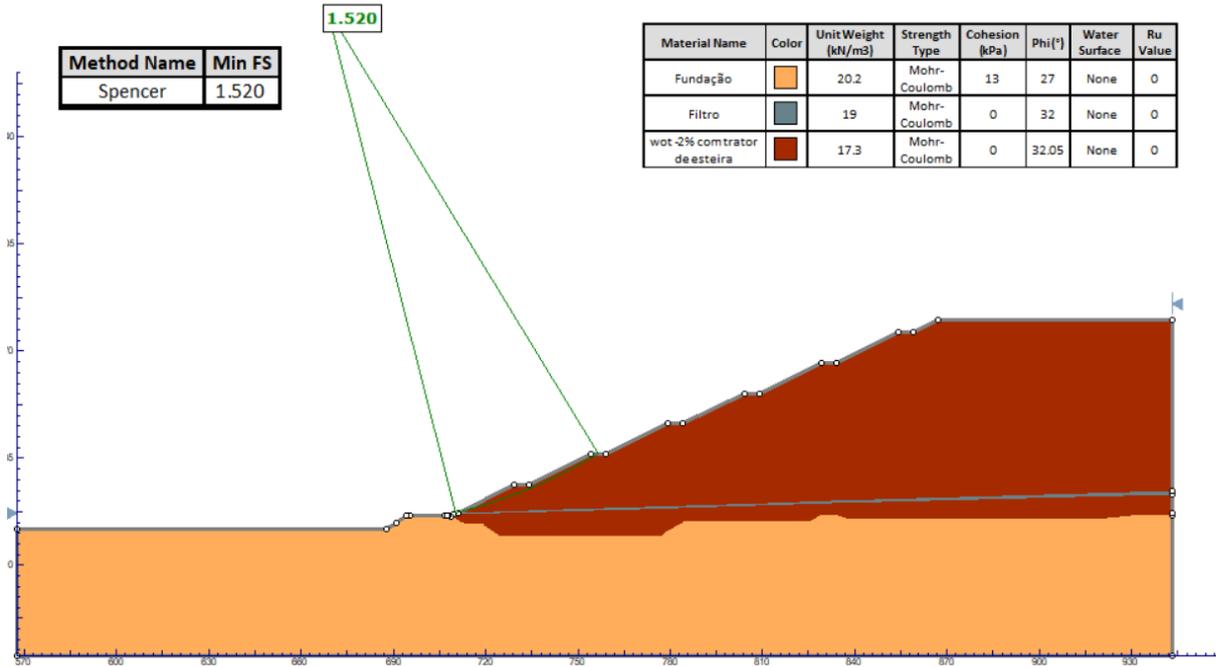


Figura 40 – Análise de estabilidade para a condição Wot com trator de esteira.



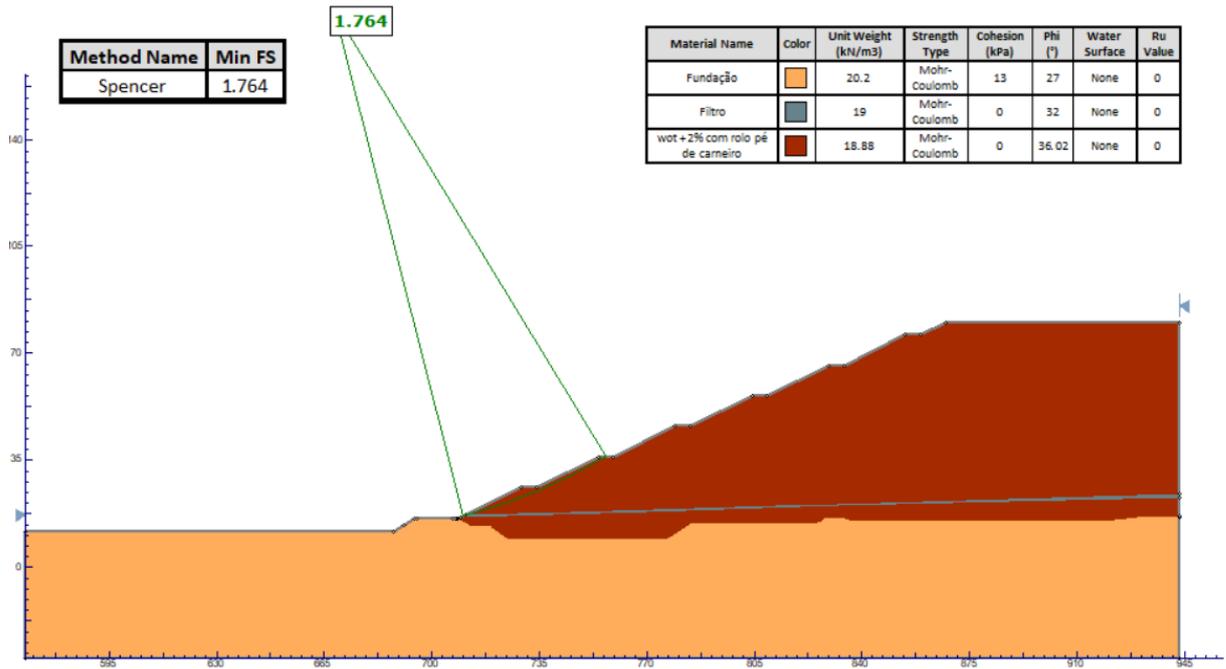
Fonte: a autora.

Figura 41 – Análise de estabilidade para a condição Wot -2% com trator de esteira.



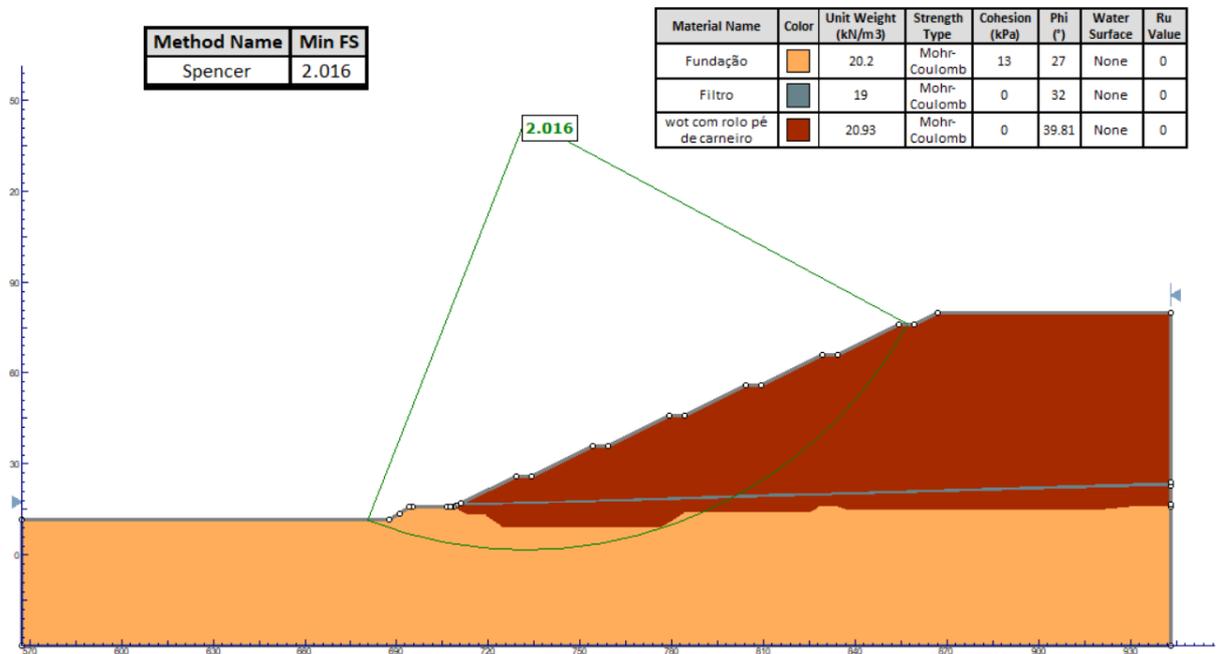
Fonte: a autora.

Figura 42 – Análise de estabilidade para a condição Wot +2% com rolo pé de carneiro.



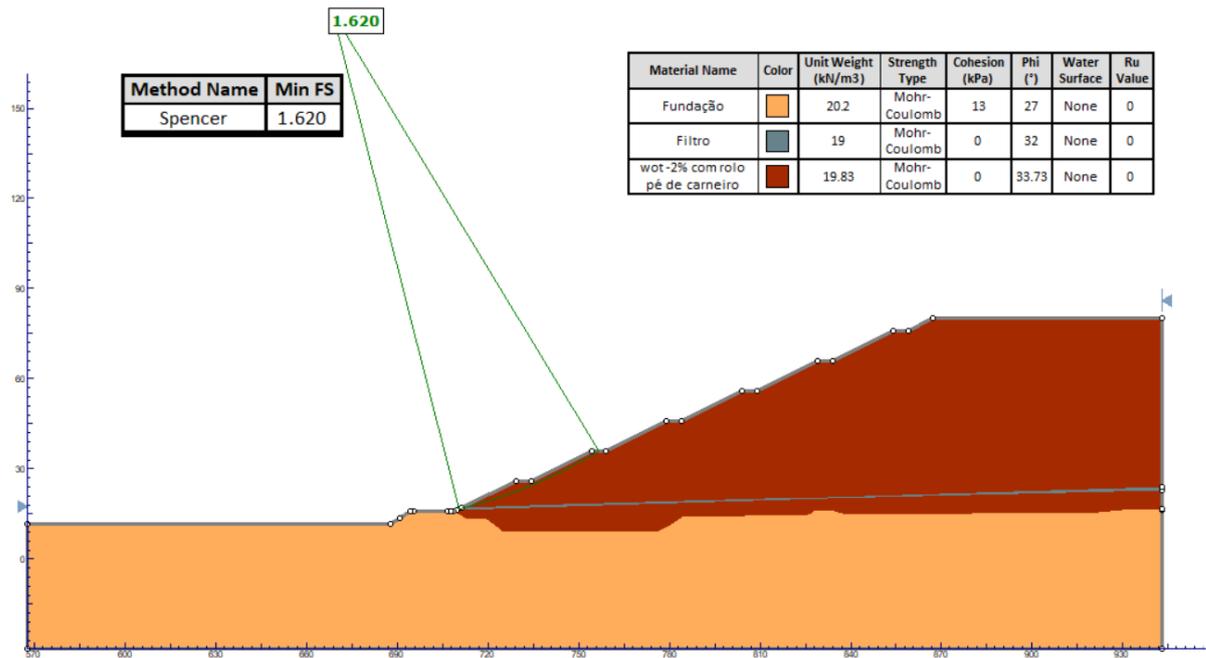
Fonte: a autora.

Figura 43 – Análise de estabilidade para a condição Wot com rolo pé de carneiro.



Fonte: a autora.

Figura 44 – Análise de estabilidade para a condição Wot -2% com rolo pé de carneiro.



Fonte: a autora.

Tabela 11 – Resumo dos parâmetros utilizados e do Fator de segurança obtido.

Condição	Desviadora Máxima		Fator de Segurança
	c' (kPa)	ϕ (°)	
Wot +6%, com trator de esteira	8,08	37,21	1,974
Wot + 4%, com trator de esteira	7,5	33,78	1,869
Wot + 2%, com trator de esteira	18,09	34,79	1,962
Wot, com Trator de Esteira	0	36,38	1,787
Wot - 2%, com trator de esteira	0	32,05	1,520
Wot + 2%, com rolo pé de carneiro	0	36,02	1,764
Wot, com rolo pé de carneiro	0	39,81	2,016
Wot - 2%, com rolo pé de carneiro	0	33,73	1,620

Nota: c' – coesão drenada; ϕ – ângulo de atrito interno do solo.

Fonte: a autora.

Verificou-se que todas as condições analisadas atenderam ao critério mínimo de FS igual a 1,50. A condição Wot - 2%, com trator de esteira apresentou o menor valor de ângulo de atrito dentre os cenários avaliados, resultando em um FS de 1,52, o mais próximo do limite de segurança estabelecido. Em contrapartida, a condição Wot, com rolo pé de carneiro apresentou o maior valor de FS, igual a 2,016, sendo também aquela com o maior ângulo de atrito, indicando desempenho superior em termos de estabilidade.

As condições abaixo da umidade ótima apresentaram os menores valores de FS e de ângulo de atrito, evidenciando a redução de resistência.

As condições na umidade ótima e acima da umidade ótima apresentaram valores altos de FS, evidenciando o aumento de resistência do solo.

O equipamento trator de esteira, nas condições de umidade de +6%, +4% e +2% em relação à umidade ótima, apresentou valores de coesão, os quais contribuíram para o aumento do FS. Ainda que a condição Wot +4% tenha registrado um ângulo de atrito relativamente baixo ($33,78^\circ$), o valor da coesão (7,5 kPa) foi determinante para o alto valor de FS encontrado.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo geral identificar o procedimento de compactação mais eficaz para rejeitos de bauxita, capaz de proporcionar os maiores valores de fator de segurança. A partir de análises de uma pilha hipotética de rejeitos filtrados, com base nos ensaios realizados no aterro experimental.

O estudo avaliou oito diferentes condições, analisando suas características geotécnicas por meio de ensaios de caracterização e determinando seus parâmetros de resistência a partir da interpretação dos ensaios Triaxiais CIUSAT. Com esses dados, o fator de segurança foi calculado por meio de uma análise de estabilidade baseada na teoria do equilíbrio limite, considerando uma superfície de ruptura circular e aplicando o método de Spencer.

Após realizar as análises de estabilidade para todas as condições, foi possível chegar nas seguintes conclusões:

- Todas as condições atenderam ao critério mínimo de $FS = 1,50$;
- As condições Wot - 2% com trator de esteira e Wot - 2% com rolo pé de carneiro, apresentaram os menores FS entre os cenários analisados.
- As condições na umidade ótima e acima da umidade ótima apresentaram os maiores fatores de segurança FS.
- A condição Wot, com rolo pé de carneiro foi a que apresentou o maior valor de FS.

Portanto, diante das análises realizadas, a condição Wot, com rolo pé de carneiro demonstra ser a condição mais indicada para ser utilizada no depósito de pilha estudado.

REFERÊNCIAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13028: **Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água.** Rio de Janeiro, 2024.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13029: **Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha.** Rio de Janeiro, 2024.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502: **Solos e rochas - Terminologia.** Rio de Janeiro, 2022.

AGUILAR, D. M. G. **Análise numérica de taludes de mineração a céu aberto em maciço de rocha fraturada.** Dissertação (Mestrado, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil) – PUC – Rio. Rio de Janeiro, 2015.

AGUIAR, F. L. **Redução do impacto ambiental através da recuperação dos ultrafinos de minério de ferro – uma revisão.** Curso de pós graduação em Engenharia de Recursos Minerais, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2013.

ALBUQUERQUE FILHO, L. H. **Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de piezocone.** Dissertação (Mestrado), Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2004.

ALVES OLIVEIRA, H. **Estudo comparativo de duas técnicas de lavra em barragem de rejeito sob o ponto de vista geotécnico.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2015.

ALVES, P. I. A. **Empilhamento de rejeito filtrado: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens.** Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2020.

BARBOSA, C. J. R. **Análise de Fiabilidade de Taludes em Solos.** Dissertação (Mestrado, Departamento de Engenharia Civil) - Universidade do Minho UMINHO. Guimarães, 2014.

BRASIL. **Lei nº 14.066, de 4 de setembro de 2020.** Altera a Lei nº 13.979, de 6 de fevereiro de 2020, para dispor sobre medidas para enfrentamento da emergência de saúde pública de importância internacional decorrente do coronavírus. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 4 set. 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2020-2022/2020/lei/114066.htm. Acesso em: 10 out. 2024.

CAMPELLO, I. C. **Abordagem Probabilística Aplicada Ao Estudo Da Variabilidade Geotécnica Dos Solos.** Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2020.

CRAIG, R. F. **Mecânica dos solos.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

DAS, B. M.; SOBHAN, K. **Fundamentos de engenharia geotécnica.** 8. ed. São Paulo: Cengage Learning Edições Ltda, 2014.

DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco**. Curso de pós graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
PEREIRA, D. M. **Retroanálise de talude rodoviário – abordagens determinísticas e probabilística**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2022.

GOMES, M. F. M. **Metodologia de análise hierárquica aplicada para escolha do sistema de disposição de subproduto da mineração com ênfase nos rejeitos de minério de ferro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2009.

Gomes, R. C. **Caracterização tecnológica e sistemas de disposição de resíduos de mineração**. Publicação Técnica. Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, 2004.

GRATT F. **Filtro prensa**. *Gratt*, 2025. Disponível em: <https://www.gratt.com.br/produto/49/filtro-prensa>. Acesso em: 16 jan. 2025.

GUIMARÃES, N.C. **filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas**. Dissertação (Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011.

Instituto brasileiro de mineração (IBRAM). Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração. IBRAM. 2016. Disponível em: <https://ibram.org.br/wpcontent/uploads/2021/02/Gestao-e-Manejo-de-Rejeitos-da-Mineracao-2016.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2024.

LEGNER, C. **Filtro Prensa no tratamento de água e efluentes**. Revista Meio Filtrante, São Paulo, Edição N° 85, Março/Abril 2017. Disponível em: <https://www.meiofiltrante.com.br/Artigo/1577/filtro-prensa-no-tratamento-de-agua-e-efluentes>. Acesso em 16 jan. 2025.

Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, 2 de agosto de 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 5 set. 2024.

LIMA, L. M. **Retroanálise da formação de um depósito de rejeitos finos de mineração construído pelo método subaéreo**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2006.

LOCAÇÃO DE EQUIPAMENTO LTDA. **Especificações técnicas do Trator de Esteira Komatsu Modelo D61-EX**. Belo Horizonte: LOCAÇÃO DE EQUIPAMENTO LTDA. 3 p. Disponível em: www.sermenge.com.br. Acesso em: 5 abr. 2025.

LOZANO, F. A. E. **Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

MATTA, J. L.; VILLAR, L. S. **Análise Probabilística de Estabilidade do Talude de Jusante de uma Barragem de Rejeitos de Minério de Ferro**. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens, VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens. Campinas, 2020.

MULLER. **Especificações técnicas do Compactador Vibratório VAP 70**. Gravataí: MULLER, 2024. 2 p. Disponível em: www.mullerbrasil.com. Acesso em: 5 abr. 2025.

NUNES, D. D. R. **Comportamento Geotécnico de Pilha de Estéril Formada Pelo Método de Disposição Por Correia**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2014.

PEIXOTO, C. L. P. **Proposta de nova metodologia de desagamento de rejeitos em polpa**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2012.

PEREIRA ÁLVARO. **Resistência ao cisalhamento de Solos não Saturados: Análise Experimental e Teórica**. Dissertação (Mestrado, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil) – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Porto Alegre, 2006.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistência polpas e tortas**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2013.

READ, J.; STACEY, P. **Guidelines for Open Pit Sole Design**. Australia: CSIRO PUBLISHING, 2009.

RUSSO, F. M. **Comportamento de barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico: caracterização laboratorial e simulação numérica do processo construtivo**. Tese (Doutorado), Universidade de Brasília. Brasília, 2007.

SCHNAID, F. *et al.* **On the Characterization and Classification of Bauxite Tailings**. *Soils and Rocks*, São Paulo, v. 37, n. 3, p. 277-284, set./dez. 2014.

SILVA, A. P. M. *et al.* **Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas: relatório de pesquisa**. Brasília: IPEA, 2012.

SOARES, L. **Barragem de rejeitos**. In: **tratamento de minérios**, 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap.19. p. 831-888.

STELA, L. H.; DUARTE, J. C.; PEREIRA, C. O. **Métodos de disposição dos rejeitos de minério de ferro alternativos ao método de barragens: uma revisão**. *Revista Brasileira de Processos Químicos, [S. l.]*, v. 1, n. 1, p. 34-45, 2020. Disponível em:

<https://www.fateccampinas.com.br/rbpq/index.php/rbpq/article/view/8>. Acesso em: 8 set. 2024.

TELLES, A. C. M. **Análise de Estabilidade de um Talude Rompido na Rodovia RJ 130, Teresópolis, RJ.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015.

TONCIN. **Filtro de prensa de vacío vertical automático de torre para la industria química.** *Toncin*, 2025. Disponível em: <https://es.toncin.com/Filtro-de-prensa-de-vac%C3%ADo-vertical-autom%C3%A1tico-de-torre-para-la-industria-qu%C3%ADmica-pd41488943.html>. Acesso em: 16 jan. 2025.

VECCI, A. N. **Análise Probabilística da Estabilidade de um Talude de Mineração.** Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018.