



COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE REJEITO FILTRADO DE MINÉRIO DE OURO DE UMA PILHA EM MINAS GERAIS

Mayara Ferreira Rodrigues

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores:

Márcio de Souza Soares de Almeida

Marcos Barreto de Mendonça

Rio de Janeiro

Maio de 2025

COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE REJEITO FILTRADO DE MINÉRIO DE
OURO DE UMA PILHA EM MINAS GERAIS

Mayara Ferreira Rodrigues

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA DA (COPPE) UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Orientadores: Márcio de Souza Soares de Almeida

Marcos Barreto de Mendonça

Aprovada por: Prof. Márcio de Souza Soares de Almeida

Prof. Marcos Barreto de Mendonça

Prof. Eduardo Antonio Gomes Marques

Prof. Maria Claudia Barbosa

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MAIO DE 2025

Rodrigues, Mayara Ferreira.

Comportamento geotécnico de rejeito filtrado de minério de ouro de uma pilha em Minas Gerais/
Mayara Ferreira Rodrigues. – Rio de Janeiro:
UFRJ/COPPE, 2025.

xii, 81 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Márcio de Souza Soares de Almeida
e Marcos Barreto de Mendonça

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa
de Engenharia Civil, 2025.

Referências Bibliográficas: p. 67-73.

1. Rejeito filtrado 2. Estado Crítico 3. Pilha de
rejeitos filtrados. I. Almeida, Márcio de Souza Soares
de – *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro,
COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

À minha família.

Tu deviens responsable pour toujours de ce que tu as apprivoisé.

(Tu te tornas eternamente responsável por aquilo que cativas).

Antoine de Saint-Exupéry

AGRADECIMENTOS

Agradecimento especial aos meus pais, por uma vida de dedicação e empenho para me garantir ensino de qualidade e pelo valor estabelecido de que a educação é o melhor caminho e nunca é em vão. Muito obrigada!

Aos meus irmãos pela compreensão, parceria e suporte por toda a vida. Obrigada por sempre acreditar, incentivar, apoiar, torcer, por sempre estarem presentes!

Ao meu marido por toda paciência e incentivo. Crescemos juntos, conquistamos juntos.

Um agradecimento com carinho aos meus amigos que compartilharam dos sentimentos que esta jornada proporcionou. Uma lembrança especial aos que me acolheram nessa cidade maravilhosa sempre que precisei.

Agradeço aos meus orientadores Márcio Almeida e Marcos Barreto, pela disponibilidade e compartilhamentos.

Aos vários colegas de trabalho que participaram da minha carreira profissional, pelas portas que abriram, pelos conselhos pessoais e profissionais, pelas oportunidades, por todo aprendizado, em especial aos que viabilizaram o início e término deste mestrado.

À mineradora pela disponibilização dos dados técnicos para o desenvolvimento desta pesquisa e aos laboratórios Chammas Engenharia e Solocap Geotecnologia que se dispuseram a executar os ensaios complementares necessários.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE REJEITO FILTRADO DE MINÉRIO DE OURO DE UMA PILHA EM MINAS GERAIS

Mayara Ferreira Rodrigues

Maio/2025

Orientadores: Márcio de Souza Soares de Almeida e Marcos Barreto de Mendonça

Programa: Engenharia Civil

Esta pesquisa apresenta a discussão de resultados de ensaios de campo e laboratório realizados em um aterro experimental e em uma pilha de rejeitos filtrado, proveniente da etapa de flotação do beneficiamento de minério de ouro. Foram realizados ensaios de densidade *in situ* para conhecer o efeito da compactação em diferentes espessuras de camada empregando diferentes equipamentos, além de ensaios em laboratório para caracterização, compactação, condutividade hidráulica e resistência ao cisalhamento através de ensaios triaxiais drenados e não drenados. Os ensaios em campo demonstraram a necessidade de restrição das espessuras das camadas a 30 cm e permitiram discutir a qualidade de compactação em função dos equipamentos utilizados. A partir dos resultados dos ensaios de caracterização, o material foi classificado como silto arenoso, não plástico. Nos ensaios de condutividade hidráulica em corpos de prova talhados ou reconstituídos em diferentes índices de vazios, observou-se comportamento isotrópico. A análise dos ensaios sob a ótica da mecânica dos solos do estado crítico permitiu a obtenção de 4 linhas de estado crítico (LECs) distintas para o rejeito proveniente do mesmo processo, o que é atribuído às variações granulométricas identificadas nas amostras. Os resultados ressaltam a necessidade do acompanhamento das mudanças das características geotécnicas do rejeito ao longo da vida útil das pilhas e de adequar os processos construtivos conforme tais mudanças ocorram.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

GEOTECHNICAL BEHAVIOR OF FILTERED GOLD ORE TAILINGS FROM A STACK IN MINAS GERAIS

Mayara Ferreira Rodrigues

May/2025

Advisors: Márcio de Souza Soares de Almeida and Marcos Barreto de Mendonça

Department: Civil Engineering

This research presents the discussion of results from field and laboratory tests carried out on an experimental embankment and on a filtered tailings stack, originating from the flotation stage of gold ore beneficiation. In-situ density tests were carried out to evaluate the effect of compaction at different layer thicknesses using various equipment. Additionally, laboratory tests were carried out for characterization, compaction, permeability, and shear strength, including both drained and undrained triaxial tests. Field tests indicated the need to limit layer thickness to 30 cm and allowed discussions of compaction quality depending on the equipment used. Based on the results of the characterization tests, the material was classified as a non-plastic sandy silt. The hydraulic conductivity tests on trimmed or laboratory-compacted specimens at different void ratios virtually evidenced an isotropic behavior. The analysis based on Critical State Soil Mechanics led to the identification of four distinct Critical State Lines (CSLs) for the tailings produced by the same process, which is attributed to the particle size variability observed in the samples. The results highlight the importance of monitoring the evolution of the geotechnical properties of the tailings throughout the operational life of the stacks and adjusting the construction methods accordingly as these changes occur.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	JUSTIFICATIVA.....	2
1.2	OBJETIVOS.....	2
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	ASPECTOS GEOLÓGICOS DAS RESERVAS NATURAIS DE OURO NO BRASIL.....	4
2.1.1	CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA.....	4
2.1.2	QUADRILÁTERO FERRÍFERO EM MINAS GERAIS.....	6
2.2	DISPOSIÇÃO DE REJEITO.....	9
2.2.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	9
2.2.2	FILTRAGEM DE REJEITOS.....	10
2.2.3	DISPOSIÇÃO DE REJEITO FILTRADO.....	11
2.3	PROPRIEDADES DOS REJEITOS DO MINÉRIO DE OURO.....	13
2.4	MECÂNICA DOS SOLOS DO ESTADO CRÍTICO.....	15
2.4.1	LINHA DE ESTADO CRÍTICO.....	15
2.4.2	PARÂMETRO DE ESTADO E LIQUEFAÇÃO.....	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
3.1	DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO E FILTRAGEM DO MINÉRIO DE OURO.....	24
3.2	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO REJEITO.....	25
3.3	DESCRIÇÃO DO ATERRO EXPERIMENTAL E DA PILHA DE REJEITOS 27	
3.3.1	ATERRO EXPERIMENTAL.....	27
3.3.2	PILHA DE REJEITOS.....	30
3.4	INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS.....	31
3.4.1	PROGRAMAÇÃO GERAL.....	31
3.4.2	ENSAIOS E CONTROLES DE CAMPO.....	33
3.4.3	ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	34
4	RESULTADOS.....	38
4.1	INVESTIGAÇÕES DE CAMPO.....	38
4.1.1	GRAU DE COMPACTAÇÃO E TEOR DE UMIDADE <i>IN SITU</i>	38
4.2	ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	44

4.2.1	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	44
4.2.2	DENSIDADE REAL DOS GRÃOS	47
4.2.3	ÍNDICES DE VAZIOS MÁXIMO (em _{ax}) E MÍNIMO (em _{ín})	48
4.2.4	ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO	49
4.2.5	ENSAIOS DE PERMEABILIDADE	50
4.3	ENSAIOS DE COMPRESSÃO TRIAXIAL	54
4.3.1	LINHAS DE ESTADO CRÍTICO	54
4.3.2	TRAJETÓRIAS DE TENSÕES	57
4.3.3	DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	59
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
5.1	ENSAIOS DE CAMPO	63
5.2	CARACTERIZAÇÃO, COMPACTAÇÃO E PERMEABILIDADE DO REJEITO	64
5.3	ESTADO CRÍTICO	64
5.4	SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
	ANEXO I – TABELA COM A RELAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS AO ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL	74
	ANEXO II – TABELA COM O RESUMO DOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA EXECUTADOS	78
	ANEXO III – TABELA COM O RESUMO DOS ENSAIOS DE DENSIDADE REAL DOS GRÃOS EXECUTADOS	79
	ANEXO IV – TABELA COM O RESUMO DOS ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO PROCTOR NORMAL EXECUTADOS	80
	ANEXO V – TABELA COM O RESUMO DOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE EXECUTADOS	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Distribuição das províncias geológicas do Brasil (sem escala indicada) (CPRM, 2003).....	5
Figura 2-2- Localização dos principais depósitos de ouro no Brasil (Lobato et al., 2016).	6
Figura 2-3 – Mapa geológico de Minas Gerais e indicação da localização do Quadrilátero Ferrífero e arredores (Lobato & Costa, 2018).....	7
Figura 2-4 – Mapa geológico simplificado do QF cm indicação da localização dos principais depósitos de ouro (Lobato et al., 2016).	8
Figura 2-5 - Distribuição granulométrica do rejeito de ouro de jazidas da África do Sul, Estados Unidos, México e Brasil (Adaptado de Vick, 1990; Bedin, 2010 e Silva, 2023)..	14
Figura 2-6 - Comportamento típico de areia submetida à compressão triaxial (adaptado de Jefferies & Been, 2016).	16
Figura 2-7 - Linha do Estado Crítico representada em função de $p':e$ (adaptado de Jefferies & Been, 2016).	17
Figura 2-8 - LEC definida no espaço $p':q$ para ensaio de compressão.	18
Figura 2-9 - Ilustração da não linearidade da LEC para solos granulares (Viana da Fonseca et al., 2021).	19
Figura 2-10 - Posicionamento da LEC no plano $p':e$ de um material com diferentes teores de finos (adaptado de Carrera et al., 2011)	20
Figura 2-11 - Parâmetro de Estado (adaptado de Jefferies & Been, 2016).....	21
Figura 2-12 - Representação do Índice de Fragilidade Não Drenada (Ibu) (Adaptado de Telles, 2017)	23
Figura 3-1 - Fluxograma da primeira etapa de beneficiamento. (Adaptado da Mineradora, 2023).....	25
Figura 3-2 - Composição mineralógica do rejeito estudado (Mineradora, 2022).	26
Figura 3-3 - Geometria do aterro experimental (Mineradora, 2023).....	28
Figura 3-4 – Lançamento da 1ª camada do Aterro Experimental (Mineradora, 2023). .	29
Figura 3-5 – Compactação da camada com trator de esteira D6 (Mineradora, 2023)....	29
Figura 3-6 - Croqui da seção típica do aterro experimental (sem escala).	29
Figura 3-7 – Vista da construção da pilha de rejeitos com uso de rolo compactador liso (Mineradora, 2023).	30
Figura 3-8 - Croqui do aterro experimental com indicação da posição da coleta das amostras indeformadas do tipo bloco (sem escala).	32
Figura 4-1 - Resultados de densidade seca in situ. (a) Execução de até 3 ciclos de compactação. (b) Execução de 4 ciclos de compactação. (c) Execução de 5 e 6 ciclos de compactação.	39
Figura 4-2 – Grau de compactação em topo e base das camadas compactada com trator de esteira. (a) Camadas de 30cm de espessura. (b) Camadas de 50cm de espessura.	40
Figura 4-3 - Grau de compactação das camadas de 30cm compactadas com rolo liso. .	42

Figura 4-4 - Grau de compactação médio em função do número de ciclos de compactação.	43
Figura 4-5 - Comparativo da faixa granulométrica do rejeito analisado com as curvas granulométricas do rejeito de ouro apresentadas por outros autores (adaptado de Vick, 1990; Bedin, 2010; Silva, 2023).	45
Figura 4-6 – Faixa granulométrica do rejeito comparada às faixas dos materiais susceptíveis à liquefação sugerida por Tsuchida (1970) apud Terzaghi, et al. (1996). ..	46
Figura 4-7 - Consolidação das curvas de compactação Proctor normal obtidas.	49
Figura 4-8 - Coeficiente de condutividade hidráulica na direção vertical e horizontal em função do índice de vazios.....	50
Figura 4-9 - coeficiente de condutividade hidráulica horizontal e vertical.	53
Figura 4-10 - Gráfico $\eta:\varepsilon_a$. (a) Ensaios CIUsat; (b) Ensaios CIDsat.	54
Figura 4-11 - Agrupamento por granulometria das amostras consideradas para a análise da mecânica dos solos dos estados críticos.	55
Figura 4-12 - Linhas de Estado Crítico obtidas para o rejeito em estudo no plano $e:p'$ em escala logarítmica.	56
Figura 4-13 – Comportamento dos corpos de prova no plano $p':e$	58
Figura 4-14 - Trajetórias de tensões e envoltórias de ruptura no plano $p':q$	58
Figura 4-15 - Parâmetro de estado obtido representado em função do grau de compactação de cada corpo de prova.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 - Teores de sílica apresentados por outros autores em estudos de rejeito de minério de ouro.....	26
Tabela 3-2 - Características Técnicas do Aterro Experimental.	30
Tabela 3-3 - Características técnicas da pilha de rejeitos em setembro/2023 (Mineradora, 2023).....	31
Tabela 3-4 - Dados da coleta de amostras indeformadas (blocos) do aterro experimental.	32
Tabela 3-5 - Programação de coleta de amostras e ensaios de campo e laboratório do aterro experimental.	32
Tabela 3-6 - Dados da coleta de amostras indeformadas (blocos) da pilha de rejeitos. .	33
Tabela 3-7 - Programação de coleta de amostras e ensaios de campo e laboratório da pilha de rejeitos.....	33
Tabela 3-8 - Normas de referência utilizadas nos ensaios de laboratório.	35
Tabela 3-9 – Tipo e número de ensaios realizados em laboratório.....	36
Tabela 3-10 - Corpos de prova de compressão triaxial selecionados para análise quanto ao estado crítico.	37
Tabela 4-1 - Variação das frações granulométricas do rejeito estudado.....	45
Tabela 4-2 - Valores de densidade real dos grãos do rejeito de minério de ouro (adaptado de Bedin, 2010).	47
Tabela 4-3 – Resultados dos índices de vazios máximo ($e_{máx}$) e mínimo ($e_{mín}$).....	48
Tabela 4-4 - Resultados do ensaio de compactação Proctor normal em rejeito de ouro por alguns autores.	49
Tabela 4-5 - Comparativo dos coeficientes de condutividade hidráulica obtidos com outros apresentados em literatura.	51
Tabela 4-6 - Distribuição granulométrica dos 5 grupos obtidos.....	55
Tabela 4-7 - Parâmetro de estado dos corpos de prova analisados.....	59
Tabela 4-8 - Parâmetros de estado crítico do rejeito estudado.	62

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

ε_a – Deformação axial

ε_v – Deformação Volumétrica

ϕ – Ângulo de atrito interno total

ϕ' – Ângulo de atrito interno efetivo

ϕ_{cs} – Ângulo de atrito interno no estado crítico

γ_d – Densidade seca máxima

γ_s – Peso específico real dos grãos

γ_w – Peso específico da água

v – Volume específico

λ – Inclinação da linha de compressão no plano $v:\ln p'$

Γ – Intercepto da linha do estado crítico para $p'=1\text{kPa}$ no plano $v:\ln p'$

μm – Micrômetro

σ_1 – Tensão principal maior

σ'_1 – Tensão efetiva principal maior

σ_3 – Tensão principal menor

σ'_3 – Tensão principal menor

η – Razão entre os invariantes de tensão q/p'

ψ – parâmetro de estado

ρ_d – Massa específica aparente seca

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

Au – Ouro

B – Parâmetro de poropressão de Skempton

c – Intercepto de coesão total

c' – Intercepto de coesão efeito

CIU – Consolidated Isotropic Undrained

CIUsat – Consolidated Isotropic Undrained saturated

CID – Consolidated Isotropic Drained

CIDsat – Consolidated Isotropic Drained saturated

D – Dilatância

D_{\min} – Dilatância máxima absoluta

e – índice de vazios
e_a – índice de vazios ao final do adensamento
e_{ec} – índice de vazios do estado crítico
I_{bu} – Índice de fragilidade não drenada
IP – Índice de plasticidade
k – Coeficiente de condutividade hidráulica do solo
k_h – Coeficiente de condutividade hidráulica do solo na direção horizontal
k_v – Coeficiente de condutividade hidráulica do solo na direção vertical
LCI – Linha de Consolidação Isotrópica
LEC – Linha de Estado Crítico
LL – Limite de Liquidez
LP – Limite de Plasticidade
M – Razão de atrito do estado crítico (q_{cs}/p'_{cs})
MG – Minas Gerais
NBR – Norma Brasileira
p' – Tensão efetiva média
p'_{cs} – Tensão efetiva média no estado crítico
PN – Proctor Normal
QF – Quadrilátero Ferrífero
q – Tensão desviadora
q_c – Tensão desviadora no estado crítico
S – Grau de Saturação
S_{u,ec} – Resistência não drenada no estado crítico
S_{u,p} – Resistência não drenada de pico
TTE – trajetória de tensões efetivas
u – Poropressão
U – Urânio
v – Volume
w – Teor de umidade
w_{ot} - Teor de umidade ótima

1 INTRODUÇÃO

O histórico de acidentes com barragens no mundo com notória atenção ao Brasil, trouxe a necessidade de ampliação dos estudos geotécnicos relacionados à disposição dos rejeitos, que apresentam variações de comportamento em função de diversas variáveis, sejam elas pelas características dos corpos de minério e frentes de lavra, por modificações nos processos de beneficiamento até a forma de disposição destes rejeitos.

No Brasil, particularmente, como forma de prevenir novos desastres, a legislação tem passado por revisões regulares, tornando as exigências cada vez mais rigorosas e assim, provocando um movimento por parte das mineradoras em filtrar os rejeitos e depositá-los em pilhas compactados mecanicamente em pilhas.

Fourie *et al.* (2022) e Cacciuttolo & Atencio (2023) destacam o crescimento contínuo da mineração no mundo e a redução do teor de minério nas explorações e como consequência o aumento da produção de rejeito é inevitável. Isto reforça a necessidade em aprimorar os processos de gerenciamento da disposição de rejeitos da mineração, desde a sua geração, critérios de projeto e a operação da disposição.

Esse crescimento, associado às restrições legais existentes no Brasil, traz a necessidade em aprofundar o conhecimento acerca do comportamento geotécnico destes materiais. Com isto, compartilhar amplamente os resultados e experiências com os diversos tipos de rejeitos de mineração e, se necessário, revisar conceitos anteriormente existentes é fundamental para aprimoramento da disposição em pilhas dos rejeitos filtrados, contribuindo assim com a qualidade nos processos, segurança das estruturas e melhor embasamento técnico nos projetos (Davies, 2011; Furnell *et al.*, 2022).

As pilhas de disposição de rejeitos, acompanhando o crescimento da produção minerária, têm se tornado cada vez maiores em altura e volume (Crystal *et al.*, 2018; Fourie *et al.*, 2022, Cacciuttolo & Atencio, 2023). Crystal *et al.* (2018) destacam que a compactação adequada dos rejeitos reduz o potencial de liquefação das pilhas, atribuindo comportamento dilatante aos aterros. Desta forma, desenvolver pesquisas em aterros experimentais, para obtenção de parâmetros geotécnicos e entendimento do comportamento de um dado rejeito quando compactado mecanicamente após a filtragem, é uma etapa fundamental do processo. A definição de tais parâmetros é, portanto, fundamental para a orientação do projeto e definição dos critérios construtivos destas estruturas.

Este cenário foi o motivador da presente pesquisa, que apresenta e discute resultados de uma campanha experimental de ensaios realizados em rejeito filtrado do minério de ouro, proveniente da etapa de flotação, de um empreendimento em Minas Gerais, Brasil, envolvendo investigações de campo e laboratório.

1.1 JUSTIFICATIVA

A pesquisa sobre o comportamento geotécnico de rejeitos de mineração quando filtrados e compactados é de grande relevância, especialmente no contexto atual, em que se discute bastante em literatura sobre o comportamento dos rejeitos filtrados, aliado ao fato de que a produção de rejeitos por parte da mineração tende a crescer, como citado anteriormente.

Neste contexto, Fourie (2012) destaca que a redução do teor de água presente nos rejeitos associada à compactação destes quando realizada de forma adequada contribui com o aumento de resistência geotécnica.

Além disto, como uma grande parte dos rejeitos é granular, é indispensável que o estudo de seu comportamento seja realizado à luz da mecânica dos solos dos estados críticos, visto que o índice de vazios dos rejeitos compactados e as tensões nas quais serão submetidos interferirão diretamente na resistência ao cisalhamento destes materiais. (Jefferies e Been, 2016). Tornando importante também verificar a relação entre os parâmetros geotécnicos com os métodos de compactação dos rejeitos.

Diante do exposto, surge a motivação e justificativa desta pesquisa, que procura caracterizar o comportamento de um rejeito de minério de ouro em diferentes condições de índice de vazios, o que pode ser influenciado por diferentes condições de compactação e condições de carregamento.

Essa compreensão é fundamental para a formulação de modelos que preveem o desempenho dos rejeitos em longo prazo e durante o alteamento das pilhas de disposição de rejeitos.

1.2 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como principal objetivo analisar a influência das condições de compactação nos parâmetros de resistência ao cisalhamento de rejeito filtrado proveniente do processo de flotação do minério de ouro a partir de ensaios realizados em aterros experimentais e em laboratório à luz da mecânica dos solos do estado crítico.

Esta pesquisa tem como objetivos específicos:

- Apresentar a caracterização do rejeito estudado;
- Realizar um comparativo do comportamento mecânico do rejeito de ouro filtrado compactado em diferentes condições de compactação;
- Analisar os parâmetros de resistência do rejeito no contexto da mecânica dos solos dos estados críticos a partir dos resultados de ensaios triaxiais realizados em laboratório em corpos de prova talhados de blocos indeformados e reconstituídos de amostras deformadas em diferentes índices de vazios;

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está organizado em 5 capítulos, sendo a introdução, objetivos e justificativa da pesquisa apresentados neste Capítulo 1.

Na sequência, o Capítulo 2 apresenta a pesquisa bibliográfica, onde é feita uma descrição breve sobre a geologia no Brasil e no estado de Minas Gerais, com foco na formação das reservas de minério de ouro, descrevem-se também sobre os métodos de filtragem de rejeitos de mineração, resumindo-se as propriedades geotécnicas dos rejeitos de mineração estudados por outros autores e também sobre a mecânica dos solos dos estados críticos.

O Capítulo 3 descreve o processo de exploração e beneficiamento do rejeito de minério de ouro estudado nesta pesquisa, resultados da caracterização química do rejeito, apresentação do aterro experimental e da pilha de rejeitos, ambas fontes dos resultados *in situ* analisados e de onde foram coletadas amostras para realização dos ensaios em laboratório.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados em campo e em laboratório e a discussão destes.

As conclusões desta pesquisa são apresentadas no Capítulo 5, enquanto a sugestão de estudos complementares é feita no Capítulo 6.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASPECTOS GEOLÓGICOS DAS RESERVAS NATURAIS DE OURO NO BRASIL

2.1.1 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

Segundo Walshe & Cleverley (2009), o minério de ouro está presente em todas as regiões do mundo em diferentes concentrações que podem variar de 1mg/tonelada a 1g/tonelada e apresentar-se em diferentes associações com outros minerais, destacando-se a associação ao quartzo, mas acumulações de ouro também são encontradas com carbonatos, carbono, feldspatos, sulfetos e óxidos de ferro, sulfetos de metais básicos, arsenitos e silicatos.

Ainda conforme Walshe & Cleverley (2009), os depósitos de ouro podem ser classificados quanto à sua formação nas seguintes categorias:

- Depósitos ligados à atividade magmático-hidrotérmica, cuja formação possui uma relação espacial e temporal com atividade magmática intrusiva, encontrado em ambientes crustais rasos nas margens ativas das placas.
- Formação por processos vulcânico-hidrotérmicos no fundo do mar;
- Depósitos exalativos sedimentares formados pela expulsão de salmouras basais para o fundo do mar em sistemas de riftes intra-cratônicos e epicratônicos.
- Depósitos orogênicos, em terrenos metamórficos, ligados à presença de ouro não visível associado à piritita; e
- Depósitos paleoplacers, metaacongglomerados relacionados ao fim do período arqueano, associados a urânio.

Azevedo *et al.* (2012) destacam a relevância mundial que possui o Brasil, desde os anos 1700, na produção de ouro e ferro. Estima-se que no período compreendido entre 1700 e 1820 aproximadamente 1.000 toneladas de ouro foram extraídas de fontes superficiais somente na região do Quadrilátero Ferrífero (QF), localizado em Minas Gerais. Já no ano de 2008, a produção de minério de ouro chegou a representar aproximadamente 19% da produção mundial, sendo que desta produção, cerca de 79% originaram-se também em Minas Gerais no QF.

A estrutura geológica do Brasil é ampla e diversificada. No território brasileiro, várias províncias geológicas refletem essa estrutura desenvolvida ao longo do tempo. As

províncias geológicas são unidades estruturais, delimitadas conforme a similaridade de idade, tipo de rocha de formação e os processos tectônicos pelos quais cada região passou. Cada província possui importante contribuição na economia do Brasil, principalmente no tocante à exploração mineral (Tassinari & Macambira, 1999). As 15 províncias geológicas consideradas no país são apresentadas na Figura 2-1.

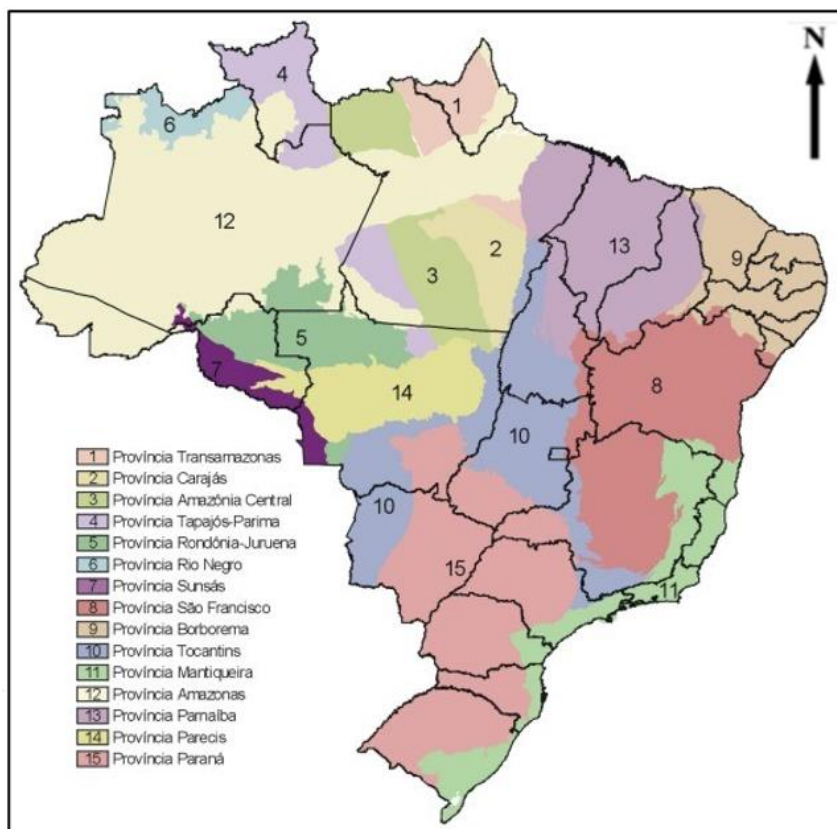


Figura 2-1 - Distribuição das províncias geológicas do Brasil (sem escala indicada) (CPRM, 2003).

Nessa distribuição, destacam-se as províncias dos escudos cristalinos, sendo estas as formações mais antigas, do período Pré-Cambriano, de rochas ígneas e metamórficas, onde há a maior concentração de minérios de ferro, manganês e ouro. Neste contexto enquadra-se principalmente a Província São Francisco, onde está inserido o QF (Souza & Marinho, 2020). O mapa apresentado na Figura 2-2 apresenta a distribuição das reservas de ouro no Brasil e indica a localização do QF no estado de Minas Gerais.



Figura 2-2- Localização dos principais depósitos de ouro no Brasil (Lobato *et al.*, 2016).

Como o rejeito da presente pesquisa é proveniente de uma reserva mineral localizada no QF, maior detalhamento da caracterização geológica desta região será feita no item a seguir.

2.1.2 QUADRILÁTERO FERRÍFERO EM MINAS GERAIS

O Quadrilátero Ferrífero (QF), assim chamado em função de sua geometria, localiza-se na porção centro-sudeste do estado de Minas Gerais de formação pré-cambriana e detém importantes reservas de ouro e de ferro do país (Azevedo *et al.*, 2012). A Figura 2-3 apresenta, no mapa geológico do estado de Minas Gerais, a localização do QF e a distribuição das reservas auríferas no estado.

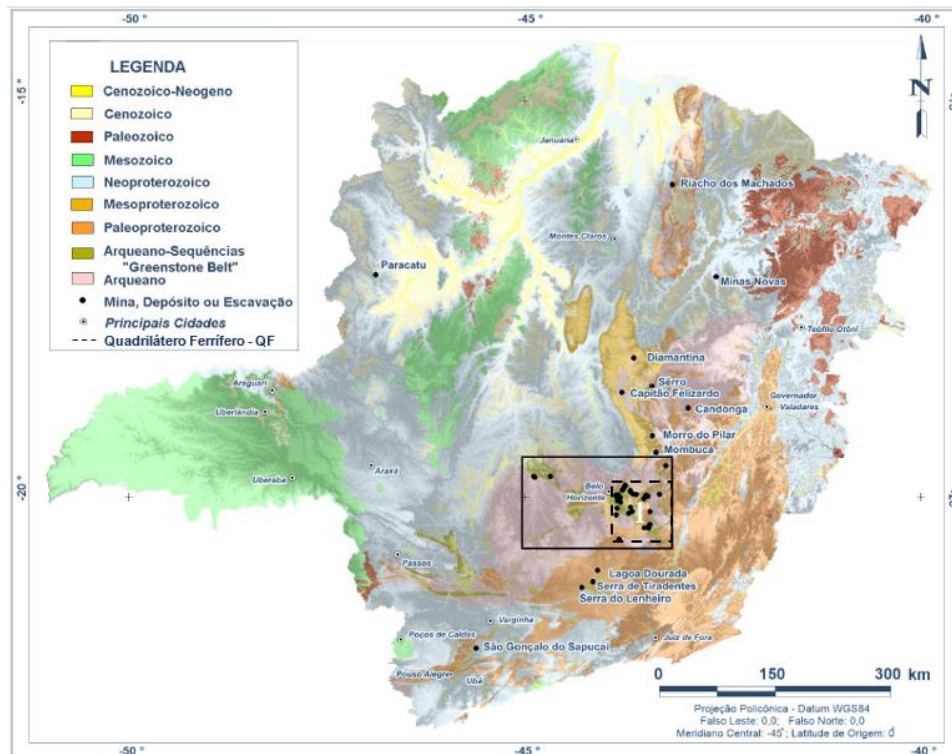


Figura 2-3 – Mapa geológico de Minas Gerais e indicação da localização do Quadrilátero Ferrífero e arredores (Adaptado de Lobato & Costa, 2018).

Azevedo *et al.*(2012) e Vitorino (2017) descrevem que a geologia do QF pode ser caracterizada em três unidades geológicas, sendo elas: embasamento cristalino; uma sucessão de *greenstone belts* arqueanos, exemplificada pelo Supergrupo Rio das Velhas e de rochas sedimentares supracrustais datadas do período Paleoproterozóico, conhecido como o Supergrupo Minas.

Vitorino (2017) detalha ainda a subdivisão aplicável ao Supergrupo Rio das Velhas em sete categorias:

- Vulcânico máfico-ultramáfico, composto por lavas basálticas e ultramáficas e rochas félsico-vulcanoclásticas.
- Sedimentar vulcânico-químico, contendo sedimentos menos clásticos como turbiditos e pelito carbonáceo.
- Sedimentar clástico-químico, caracterizado por alternância de pelitos micáceos
- Vulcanoclástico com predominância de arenitos e argilitos.
- Ressedimentado, apresentando três sequências distintas de grauvaque argiloso, sendo duas metamorfoseadas e outra em condições de anfíbolito.

- Associação costeiro-marinha, composta por arenitos com estratificação cruzada de média a grande dimensão e arenitos siltosos.
- Associação não marinha, constituída por arenitos conglomerativos

Já o Supergrupo Minas pode ser dividido em dois subgrupos, sendo um de sedimentos marinhos e continentais (grupos Piracicaba, Itabira e Caraça) e outro de depósitos submarinos (grupo Sabará) (Vitorino, 2017).

Lobato & Costa (2018) abordam que os depósitos do QF na porção noroeste estão relacionados ao *greenstone belt* Rio das Velhas em Formação Ferrífera Bandada (FFB). A sul há rochas metavulcano-sedimentares com idade paleoproterozoica. A sudeste há uma faixa mais extensa, com formação baseada em itabirito da Formação Cauê e associada às fatias tectônicas do grupo Nova Lima, compondo o Supergrupo Minas. Já a leste, encontra-se o segundo Supergrupo Minas, tratando-se de uma classe especial de uma faixa mineralizada de depósito de ouro paladiado, sendo grupos de minério de formação hidrotermal, estruturalmente controlado, friável, com ouro livre presente e de idade cambriana.

Em uma adaptação feita por Lobato & Costa (2018), apresentada na Figura 2-4, é possível observar a distribuição das principais jazidas de ouro conhecidas em Minas Gerais e evidenciar a maior concentração na região do QF, citada anteriormente.

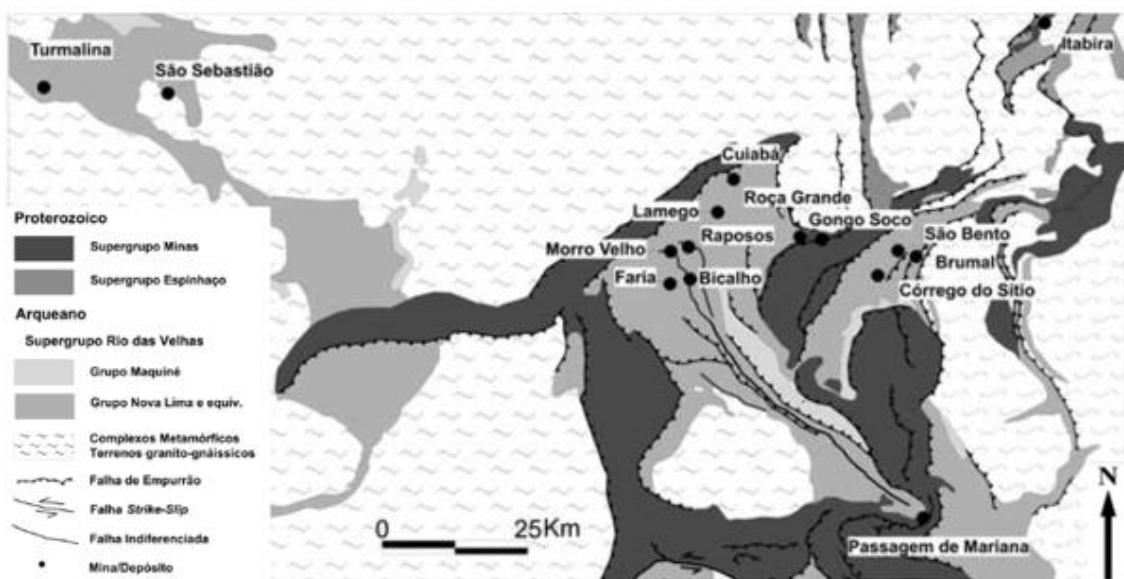


Figura 2-4 – Mapa geológico simplificado do QF com indicação da localização dos principais depósitos de ouro (Lobato *et al.*, 2016).

Nessa distribuição, por ser a área de origem do rejeito de minério de ouro objeto de estudo desta pesquisa, destaca-se a jazida de ouro Cuiabá, localizada na porção nordeste do QF. Indicada na Figura 2-4. Nesta jazida há a predominância de rochas metavulcano-sedimentares do Grupo Nova Lima com espessuras médias de 500m com matriz predominante de fenocristais de quartzo e plagioclásio. A jazida Cuiabá é composta por quatro principais corpos de concentração do minério de ouro (Fonte Grande Sul, Serrotinho, Galinheiro e Balancão) (Vitorino, 2017).

2.2 DISPOSIÇÃO DE REJEITO

2.2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A ABNT (2024) define os rejeitos como “*qualquer material descartado durante o processo de beneficiamento de minérios, bem como os resíduos do processamento de minérios*”. Durante esse processo, ainda conforme a ABNT (2024), os rejeitos podem passar por etapas de ciclonagem ou segregação hidráulica para separação das partículas e aferir ao material características geotécnicas específicas para então serem utilizados como material de construção das estruturas de disposição de rejeitos.

A disposição dos rejeitos de mineração é ambientalmente desafiadora para as mineradoras, uma vez que vários cuidados são necessários durante a operação, ao longo da vida útil das estruturas de disposição de rejeitos. Assim sendo, é preciso que se contemplem planos de fechamento destas estruturas as reintegrando ao meio ambiente e sempre garantindo a segurança estrutural e ambiental durante todas as etapas. Dentre as estruturas de disposição de rejeitos, por um longo período no Brasil, a construção de barragens foi a principal alternativa praticada pelas mineradoras, além de alternativas, como disposição em cavas, pilhas de codisposição de rejeito e empilhamentos drenados (Cardozo *et al.*, 2016).

Entretanto, em função dos acontecimentos históricos relacionados a acidentes com barragens de rejeitos (Lin *et al.*, 2022), outras metodologias para disposição de rejeito passaram a ser amplamente estudadas e implantadas, visando principalmente dissociar a disposição destes materiais à necessidade de construção de barragens (Davies, 2011; Ulrich, 2019; Cacciuttolo & Campomanes, 2022) . Entre estas metodologias de

disposição, a filtragem dos rejeitos para posterior disposição em pilhas compactados mecanicamente, tem sido uma das alternativas buscadas e praticadas pelas mineradoras (Cacciuttolo & Campomanes, 2022; Carneiro, *et al.*; 2023 e Silva *et al.*, 2024).

2.2.2 FILTRAGEM DE REJEITOS

Para a redução ou eliminação da disposição hidráulica de rejeito em barragens, torna-se necessária a aplicação de processos para redução da umidade do rejeito. Com isso, a definição do processo mais aplicável para esta finalidade dependerá de uma série de fatores como clima, característica do minério conforme apresentado na caracterização geológica, característica do rejeito – que, por sua vez está atrelada às características do processo de beneficiamento – distância da planta de beneficiamento à área de filtragem, da área de filtragem à área de disposição, área disponível para construção da planta de filtragem, volume de rejeito gerado por dia de produção além das exigências legais vigentes em cada região e de vários outros fatores (Crystal *et al.*, 2018; Ulrich, 2019; Cacciuttolo & Atencio, 2023).

A redução da água no rejeito pelo processo de filtragem é uma prática já aplicada em escala global. Existem vários métodos de filtragem empregados conforme os aspectos apresentados anteriormente, destacando-se a porcentagem de finos presentes no rejeito a ser filtrado (Crystal *et al.*, 2018; Gomes *et al.*, 2019).

Crystal *et al.* (2018) abordam que quase todos os rejeitos podem passar por processo de filtragem e que o ponto de maior dificuldade é a seleção da melhor tecnologia a ser empregada neste processo que permitirá o alcance dos teores de umidade desejáveis para empilhamento dos rejeitos, evitando a necessidade de trabalhos secundários para alcance do teor de umidade necessário em campo. Conforme dados apresentados pelos autores, a maior parte dos rejeitos possui granulometria siltosa, silto arenosa ou areno siltosa e todos passaram bem pelo processo de filtragem. Já aqueles com maior presença de finos, com contribuição das argilas, as dificuldades no processo de filtragem foram maiores, sejam elas no alcance do teor de umidade desejado levando a maior tempo de filtragem ou paradas no processo em função do entupimento dos filtros causado pelas partículas finas presentes.

Gomes *et al.* (2019) e Furnell *et al.* (2022) destacam em seus estudos que a caracterização prévia do rejeito é fundamental para entendimento da tendência de comportamento do

material para redução do teor de umidade. Segundo os autores, em geral, rejeitos com matriz arenosa ou areno siltosa apresentarão melhor desempenho durante os processos de filtração ou desaguamento natural, pois possuirão coeficientes de condutividade hidráulica mais altos que os rejeitos muito finos para os quais a secagem natural exigirá um tempo muito longo para a redução do teor de umidade.

Conforme Davies (2011); Gomes *et al.* (2019), Andrade (2022) e Cacciuttolo & Campomanes (2022), os processos de filtração são amplamente empregados para redução do teor de umidade dos rejeitos, sendo os mais comuns a filtração por tambor a vácuo; correias; pressão; e filtros de discos cerâmicos. O rejeito da presente pesquisa passou pelo processo de filtração por disco cerâmico.

Neste processo, o filtro é composto por discos cerâmicos microporosos que viabilizam a ação capilar durante a filtração de rejeitos com matriz granulométrica com ausência de finos e muito aplicáveis em processos com volume alto de geração de rejeito. Quando submerso na polpa de rejeito, a ação capilar intensificada pela aplicação de um vácuo pelo sistema de bombas faz com que a água presente seja absorvida pelos poros do disco (Gomes *et al.*, 2019; Andrade, 2022 e Cacciuttolo & Campomanes (2022)).

Gomes *et al.* (2019) e Cacciuttolo & Campomanes (2022) indicam que a torta de rejeito é formada nas faces dos discos à medida que estes se movem para serem novamente mergulhados na polpa de rejeito. Neste processo, ao chegar ao final do ciclo de rotação do disco, um raspador remove o rejeito filtrado que é então direcionado para transporte.

Independente da tecnologia a ser empregada, o objetivo da filtração para disposição de rejeito filtrado é deixar o teor de umidade do rejeito o mais próximo possível do teor de umidade para a disposição final, geralmente próximo ao teor de umidade ótimo da energia Proctor normal (Ulrich, 2019).

2.2.3 DISPOSIÇÃO DE REJEITO FILTRADO

Johns *et al.* (2014) e Moreno *et al.* (2018), em estudos de viabilidade desenvolvidos para a implantação de pilhas de disposição de rejeito filtrado, abordam vários fatores motivadores para filtração mecânica dos rejeitos e operação dos empreendimentos por pilhas para disposição do rejeito filtrado, que também são mencionados por Ulrich (2019); Cacciuttolo & Campomanes, (2022) e Cacciuttolo & Atencio (2023). Entre eles:

- Maior recuperação para reuso de água utilizada no processo;
- Redução da possibilidade de rupturas em função de excesso de poropressão, uma vez que a quantidade de água presente nos vazios é inferior se comparado com a disposição hidráulica. Neste caso há ressalvas a serem feitas pois as condições de compactação do rejeito precisam ser consideradas;
- Redução do impacto ambiental em caso de rupturas parciais ou totais nas pilhas em função da menor concentração de água na massa empilhada;
- Reabilitação ambiental simultânea ao processo de operação da pilha;

Johns *et al.* (2014) e Gomes *et al.* (2019) destacam que estudos precisam ser realizados também para a definição dos métodos de disposição do rejeito filtrado. Para tanto, além das características do rejeito, é preciso estabelecer uma relação e ponderação do impacto ambiental, social e econômico que a metodologia de disposição causará em condição normal de operação e em caso de ocorrência de rupturas.

Do ponto de vista da engenharia e custos operacionais, para a definição da metodologia de disposição do rejeito filtrado, Johns *et al.* (2014), Moreno *et al.* (2018) e Gomes *et al.* (2019) destacam a necessidade em se conhecer:

- Caracterização geotécnica e comportamento geomecânico dos rejeitos;
- Características topográficas das áreas disponíveis para disposição do rejeito;
- Condições climáticas locais e regionais;
- Infraestrutura disponível nas proximidades;
- Infraestrutura a ser impactada;
- Disponibilidade de materiais além do rejeito, seja estéril, materiais granulares, solo, recursos para proteção vegetal etc.;
- Método(s) empregado(s) para a redução do teor de umidade do rejeito gerado (ciclonagem, espessamento, filtragem, desidratação natural etc.);
- Meios de transporte disponíveis (transporte rodoviário, correias, tubulações etc.).

Davies & Rice (2001); Hogg (2010) e Davies (2011) destacam os seguintes fatores aos quais as dificuldades técnicas na operação das pilhas de rejeito podem estar relacionadas:

- Trafegabilidade, principalmente em período de chuva;
- Gerenciamento das drenagens superficiais, já que a geometria da pilha está em construção e que parte das contribuições superficiais precisarão ser

temporariamente desviadas até a implantação dos dispositivos de drenagem superficial definitivos;

- Controle de poluição do ar através da umectação do rejeito e de forma que o processo não impacte na elevação da umidade do rejeito da camada a ser compactada;
- Estabelecimento de ritmo satisfatório entre o processo de filtragem e a operação da pilha, exigindo que o planejamento de operação tenha previsões de fechamento de camadas, construção de aterros de proteção que serão removidos posteriormente, garantia de volume de material em condições satisfatórias para completar camadas e outros fatores;
- Variações nos parâmetros geotécnicos durante a operação exigindo adequação dos procedimentos empregados na compactação das camadas.

Nota-se que as variáveis que interferem na escolha do método de filtragem até as condições de operação e fechamento da pilha são várias e precisam ser previamente levantadas, estudadas e possuir planos de atuação na ocorrência de quaisquer fatores, dentre estes e vários outros que possam surgir durante a operação da estrutura.

2.3 PROPRIEDADES DOS REJEITOS DO MINÉRIO DE OURO

Tendo em vista que as metodologias de disposição de rejeito se direcionam para a construção de pilhas, ensaios de laboratório para estudo do comportamento geotécnico destes materiais vêm sendo amplamente realizados e discutidos, visando também seu aprimoramento. Melhorias nos procedimentos desde a coleta de amostras, moldagem de corpos de prova em laboratório e procedimentos de ensaios tem acontecido de forma a trazer melhor aproximação das condições de campo destes materiais e reduzir incertezas geradas em função das particularidades que os rejeitos possuem (Fourie et. al, 2022 e Delgado *et al.*, 2023).

Conforme visto anteriormente, a composição granulométrica dos rejeitos tem influência direta nos métodos de redução da quantidade de água presente no rejeito ao final do processo de beneficiamento. Para o caso do rejeito de ouro, estudos desenvolvidos por Vick (1990) em uma série de amostras de diferentes processos de beneficiamento de jazidas localizadas na África do Sul, Estados Unidos e México, apontaram que a granulometria do rejeito seria predominantemente siltosa ou arenosa (areia fina). A

mesma classificação foi encontrada também por Bedin (2010), Preciado *et al.* (2014), Silva (2023) e Oliveira *et al.* (2024). A Figura 2-5 mostra as curvas granulométricas apresentadas por alguns destes autores.

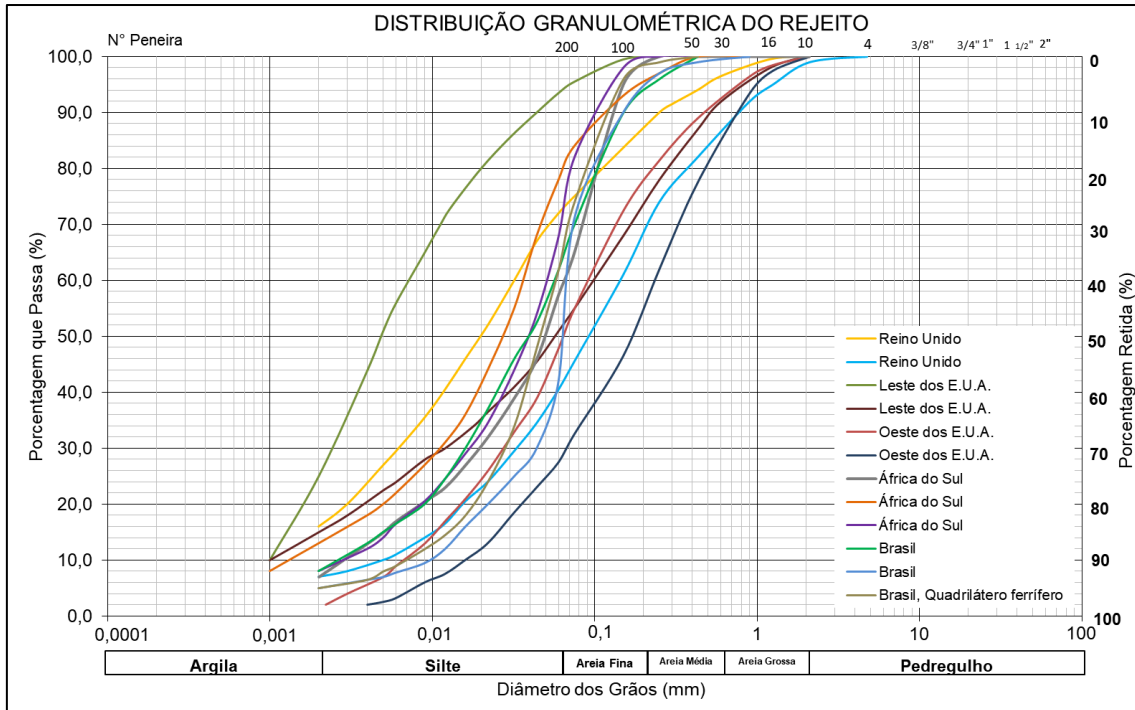


Figura 2-5 - Distribuição granulométrica do rejeito de ouro de jazidas da África do Sul, Estados Unidos, México e Brasil (Adaptado de Vick, 1990; Bedin, 2010 e Silva, 2023).

A densidade real dos grãos de rejeitos de mineração, em geral, pode variar de $2,3\text{ g/cm}^3$ chegando a $3,8\text{ g/cm}^3$, enquanto o rejeito de ouro apresenta variações na ordem de $2,8\text{ g/cm}^3$ a $3,1\text{ g/cm}^3$ (Fourie *et. al.*, 2022). Outros valores encontrados em literatura serão apresentados no item 4, onde serão comparados com os resultados desta pesquisa.

Uma característica importante do material dos rejeitos é o formato dos grãos. Como o rejeito é gerado por processos industriais citados anteriormente, as partículas muitas vezes são mais angulares que os solos, o que interfere diretamente nos índices de vazios dos materiais depositados. Quanto mais angulares os grãos, maior tende a ser o índice de vazios *in situ* e a diferença entre o índice de vazios máximo e o índice de vazios mínimo. Esta premissa tem se mostrado válida para os materiais silto arenosos não plásticos, classificação granulométrica em que se enquadra boa parte dos rejeitos de mineração (Fourie *et. al.*, 2022).

Alguns valores típicos de índice de vazios mínimo e máximo para rejeito de minério de ouro encontrados em outros estudos de rejeito de minério de ouro apresentam-se entre $e_{\min}=0,56$ Oliveira *et al.* (2024) e $e_{\max}=1,83$ Fourie & Papageorgiou (2001).

Ensaio de compactação Proctor normal realizados em laboratório em rejeitos de mineração de ouro localizadas no Brasil e no Peru indicaram que a variabilidade da densidade seca máxima dos rejeitos foi de $1,679 \text{ g/cm}^3$ a $1,806 \text{ g/cm}^3$, enquanto o teor de umidade ótimo variou entre 14,6% e 18,8% (Preciado *et al.*, 2014).

Referente à condutividade hidráulica para rejeitos de mineração, Vick (1990) e Carneiro *et al.* (2023) destacam a dificuldade de se definir valores gerais ou representativos, uma vez que todas as características anteriormente citadas têm influência sobre a obtenção deste valor.

Complementarmente à observação feita por Vick (1990), Boyton & Daniel (1984) e Carneiro *et al.* (2023) citam os fatores que influenciam a determinação da condutividade hidráulica dos materiais: teor de umidade durante a moldagem do corpo de prova; variações durante a compactação da amostra; distribuição granulométrica do rejeito; angularidade das partículas; índice de vazios, plasticidade e tensões de confinamento são pontos de destaque e anteriormente mencionados por Lambe & Whitman (1969).

Alguns valores constantes na literatura quanto ao coeficiente de condutividade hidráulica dos rejeitos de minério de ouro sugerem variação de 10^{-7} a 10^{-2} cm/s .

2.4 MECÂNICA DOS SOLOS DO ESTADO CRÍTICO

2.4.1 LINHA DE ESTADO CRÍTICO

A mecânica dos solos do estado crítico foi adaptada ao comportamento de solos arenosos e siltosos a partir de estudos inicialmente desenvolvidos considerando o comportamento das argilas (Schofield e Wroth, 1968; Atkinson e Bransby, 1978).

No caso dos solos granulares, o índice de vazios inicial será mandatório em seu comportamento quando submetidos ao cisalhamento. Solos com baixo índice de vazios, quando cisalhados tendem a dilatar, desenvolvendo poropressões negativas e aumentando assim a resistência ao cisalhamento. Já os solos fofos, ou seja, aqueles com índice de vazios inicial elevado, tendem a contrair, gerando excesso de poropressão positiva reduzindo sua resistência ao cisalhamento. Esta variação de volume acontecerá até atingir

um estado último, ou seja, o estado crítico (Jefferies & Been, 2016). Este comportamento está graficamente representado na Figura 2-6.

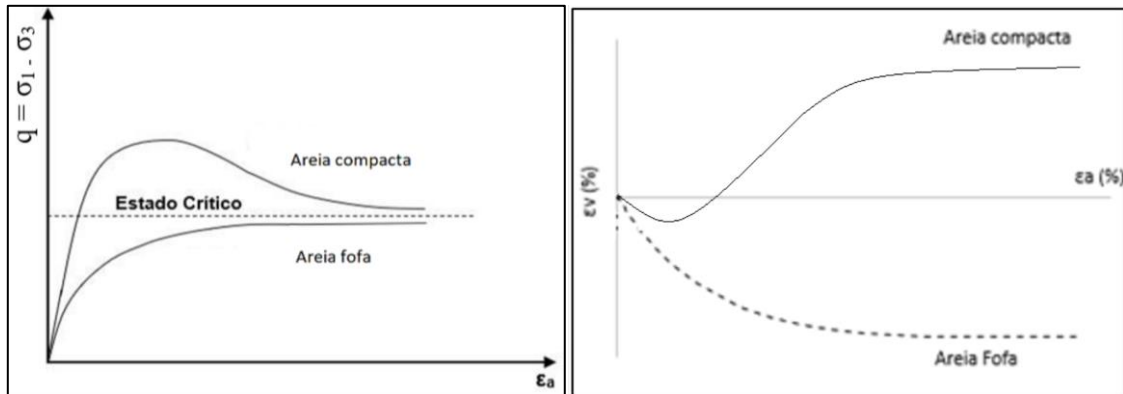


Figura 2-6 - Comportamento típico de areia submetida à compressão triaxial (adaptado de Jefferies & Been, 2016).

O estado crítico é aquele que uma massa de solo atinge durante o cisalhamento, a partir do qual não ocorre variação de volume, da tensão desviadora (q) ou da tensão efetiva média (p'). Nesta condição, qualquer que seja o incremento de deformação cisalhante não há nenhuma alteração do índice de vazios ou da resistência ao cisalhamento. Estes autores definiram o estado crítico matematicamente como apresentado na Equação 1 abaixo:

$$\frac{\partial q}{\partial \epsilon_s} = \frac{\partial p'}{\partial \epsilon_s} = \frac{\partial e}{\partial \epsilon_s} = 0 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

- q : tensão desviadora dada por $q = \sigma_1 - \sigma_3$
- p' : tensão efetiva média dada por $p' = (\sigma_1' + 2\sigma_3')/3$
- e : índice de vazios
- ϵ : deformação volumétrica

Quando um corpo é submetido a uma força cisalhante, a variação do volume poderá ser negativa (comportamento contrátil) ou positiva (comportamento dilatante) até alcançar a estabilidade, o que dependerá do estado inicial do índice de vazios deste corpo (Fourie *et al.*, 2022).

Esta mudança de volume relacionada ao índice de vazios foi observada em 1885 por Reynolds. Tal observação foi amplamente pesquisada ganhando notoriedade em 1936 por Casagrande, que desenvolveu o conceito de índice de vazios crítico (Fourie *et al.*, 2022). O índice de vazios crítico, conforme Jefferies & Been (2016), será alcançado pelo corpo quando este estiver nas condições citadas acima, na Equação 1, independentemente de estar em estado inicial fofo ou compacto. Ainda conforme os autores, a relação entre o índice de vazios do estado crítico e a tensão efetiva média (p') define a linha do estado crítico (LEC), que, por sua vez, define o limite de comportamento dos materiais entre contrátil e dilatante (Figura 2-7).

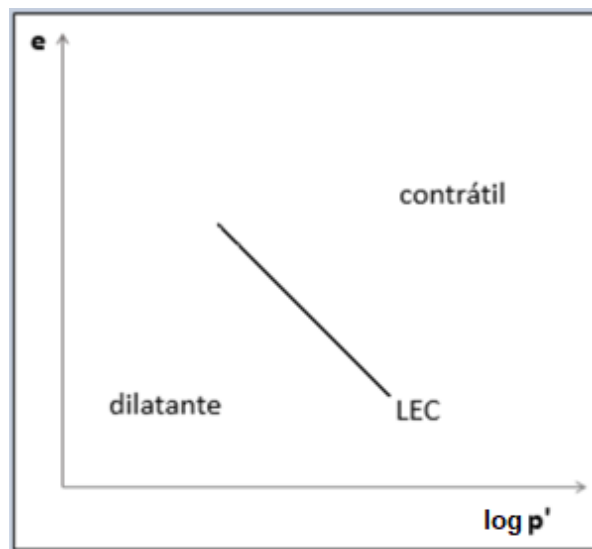


Figura 2-7 - Linha do Estado Crítico representada em função de p' : e (adaptado de Jefferies & Been, 2016).

A linha do estado crítico do solo pode ser definida em ambos os gráficos $\log p'$: e (Figura 2-7) e p' : q (Figura 2-8), dadas respectivamente pela Equação 2 e Equação 3. (Schofield e Wroth, 1968; Jefferies & Been, 2016; Delgado *et al.*, 2023).

$$e = \Gamma - \lambda \ln p' \quad \text{Equação 2}$$

$$q = M p' \quad \text{Equação 3}$$

Onde Γ é o valor do índice de vazios correspondente a $p'=1$ kPa, λ é a inclinação da LEC e M representa a razão de atrito no estado crítico, representado na Figura 2-8.

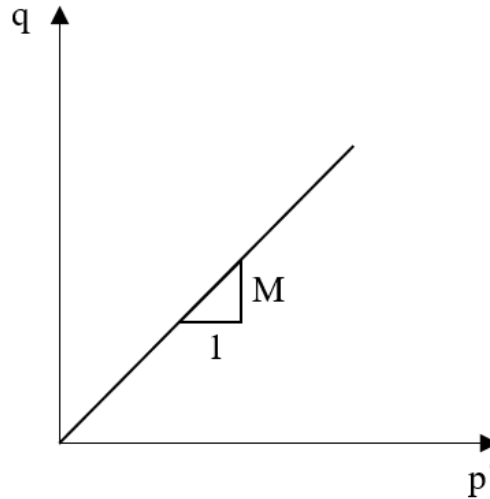


Figura 2-8 - LEC definida no espaço $p':q$ para ensaio de compressão.

A teoria da mecânica dos solos do estado crítico considera originalmente que a LEC é uma linha reta representada no plano $p'_0:q$ e no plano $e:\log p'_0$, entretanto, Viana da Fonseca *et al.* (2021) destacam que solos granulares tendem a apresentar LECs não lineares, principalmente em estados de baixas e em altas tensões. Apesar dos autores não mencionarem tensões de referência a serem consideradas baixas ou altas, destacam que são as tensões que podem causar respectivamente a instabilidade por fluxo ou a quebra de grãos que altera o formato dos grãos e a composição granulométrica. A Figura 2-9 representa o colocado pelos autores.

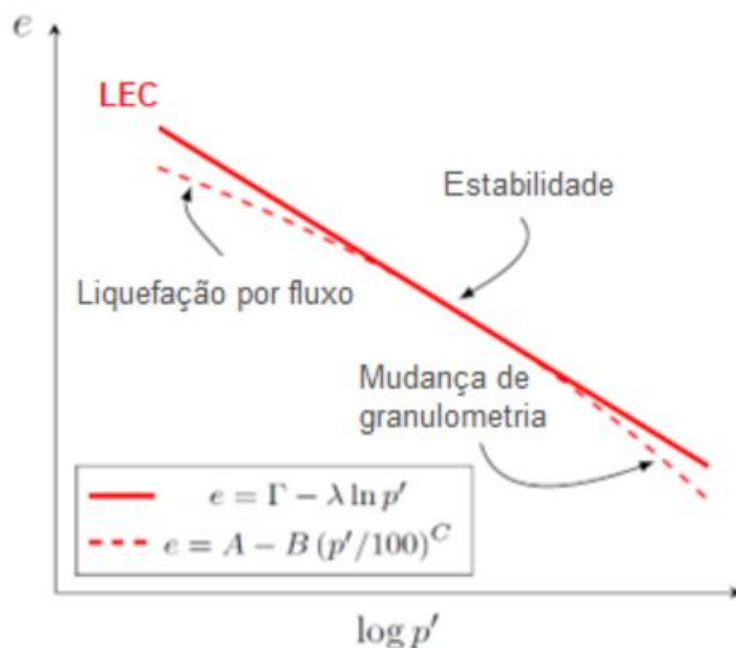


Figura 2-9 - Ilustração da não linearidade da LEC para solos granulares (Viana da Fonseca *et al.*, 2021).

Verdugo (1992); Verdugo & Ishihara (1996) e Schnaid *et al.* (2013) consideram que a LEC curva melhor representa o estado crítico e deve ser definida com base na Equação 4.

$$e = A - B \left(\frac{p'}{p_{ref}} \right)^c \quad \text{Equação 4}$$

Onde, p' corresponde à tensão efetiva média, p_{ref} a tensão de referência de 100 kPa e as variáveis A, B e C são ajustes da curva.

Fourie *et al.* (2022) mencionam que a não linearidade da LEC não necessariamente está associada à quebra de grãos, visto que, ao plotar em escala logarítmica um trecho curvilíneo pode ser observado. Tal afirmação foi feita a partir de estudos em que ensaios foram realizados não permitindo a quebra de grãos do material ensaiado e ainda assim obtiveram uma LEC curvilínea.

Ainda sobre formato da LEC, Fourie *et al.* (2022) defendem a existência de uma LEC única para cada material, enquanto estudos desenvolvidos por Rezende (2013), Coop (2015), Castilho (2017), Xu & Coop (2017), Li *et al.* (2018) e Li & Coop (2018) apontam que a teoria da unicidade da LEC não se aplica aos rejeitos.

Tanto o formato da LEC quanto sua posição são influenciados pela composição granulométrica, em especial pela quantidade de finos presente no solo (material passante na peneira #200). Solos siltosos e areias livre de finos com grãos mais angulares com maior facilidade de ocorrência de quebras durante os carregamentos tendem a apresentar LECs mais curvas e mais íngremes, enquanto areias a areias com silte entre os vazios e com grãos menos angulares tendem a apresentar LECs com maior tendência de linearidade e menos íngremes (Jefferies & Been, 2016). Além disso, segundo Thevanayagam *et al.* (2002), Yang *et al.* (2006) e Carrera *et al.* (2011) a presença de finos no material faz com que a LEC apresente tendência de se apresentar nas posições mais inferiores do plano $p':e$ e conforme a porcentagem de finos aumenta (Figura 2-10).

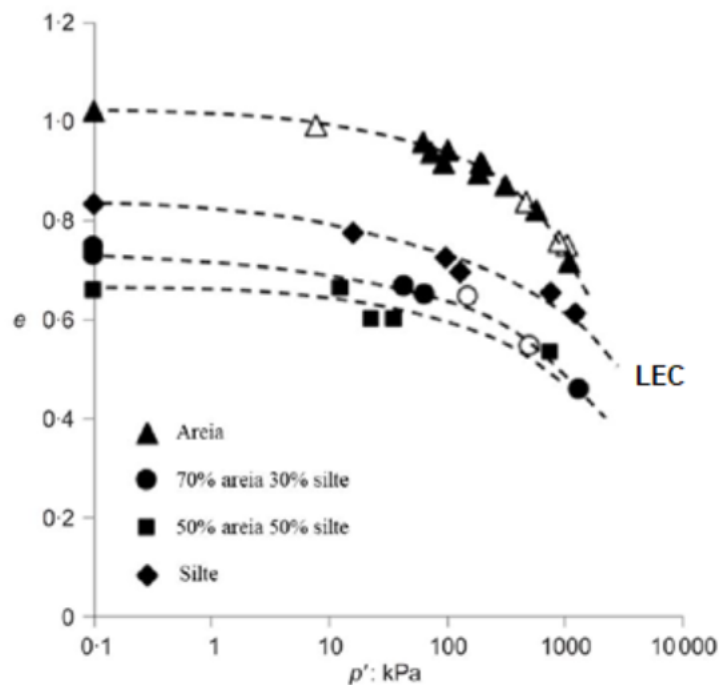


Figura 2-10 - Posicionamento da LEC no plano $p':e$ de um material com diferentes teores de finos (adaptado de Carrera *et al.*, 2011).

Independente da validade ou não da unicidade da LEC para materiais granulares, bem como as discussões das variações de inclinação e posicionamento no plano $p':e$, o estudo desenvolvido por Reid *et al.* (2021, apud. Coutinho, 2022) mostrou a dificuldade na determinação da LEC e chama atenção aos cuidados a serem acrescentados nas avaliações técnicas dos rejeitos à luz da mecânica dos solos do estado crítico. Nesta pesquisa, em que um mesmo material foi submetido a quinze diferentes laboratórios para que determinassem a LEC e os procedimentos a serem seguidos não foram definidos

previamente, ou seja, ficaram à cargo dos laboratórios, os autores consolidaram quinze diferentes LECs, ou seja, cada laboratório apresentou uma LEC distinta, mostrando que as variações de procedimentos de cada laboratório interferem diretamente no resultado a ser obtido.

Viana da Fonseca *et al.* (2021) recomendam que procedimentos específicos sejam empregados para a determinação da LEC, sendo eles o uso de base alargada, lubrificada e congelamento dos corpos de prova para obtenção do índice de vazios final.

2.4.2 PARÂMETRO DE ESTADO E LIQUEFAÇÃO

Conhecer o índice de vazios dos rejeitos em diferentes condições de compactação é fundamental e de grande influência no comportamento do material, podendo observar mudanças de comportamento contrátil para dilatante conforme alteração do nível de tensões atuantes (Casagrande, 1936; Roscoe *et al.*, 1958; Bolton, 1986). Esta análise pode ser realizada mediante a definição do parâmetro de estado (ψ) indicado na Equação 5 e representado graficamente na Figura 2-11.

$$\Psi = e_0 - e_{cv}$$

Equação 5

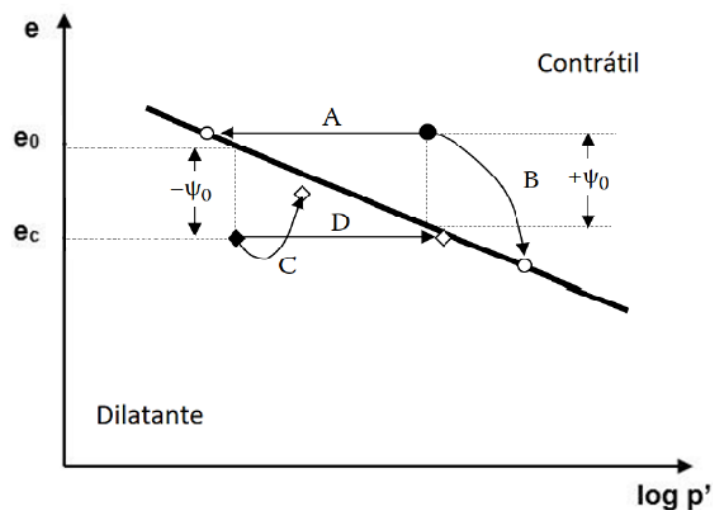


Figura 2-11 - Parâmetro de Estado (adaptado de Jefféries & Been, 2016).

A partir da análise gráfica da Figura 2-11, é possível perceber que corpos de prova que estiverem com índice de vazios acima da posição da LEC podem ser considerados no estado fofo (Figura 2-6) e, assim, terão comportamento contrátil, ou seja, diminuição do índice de vazios em relação ao seu estado inicial, apresentando parâmetro de estado positivo. Enquanto os que se encontrarem em índice de vazios no estado inicial abaixo da LEC, solos compactos (Figura 2-6), apresentarão aumento do índice de vazios quando submetidos a uma tensão cisalhante, ou seja, terão comportamento dilatante, apresentando parâmetro de estado negativo.

Feita esta análise geral quanto ao parâmetro de estado positivo e negativo, Jefferies & Been (2016) sugerem que rejeitos não plásticos com $\psi < -0,05$ tendem a apresentar comportamento dilatante enquanto os que tiverem $\psi > -0,05$ tendem a apresentar comportamento contrátil. Os autores chamam atenção aos materiais em que $-0,10 < \psi < 0$, conforme os autores, materiais cujo parâmetro de estado esteja nesse intervalo podem apresentar tanto o comportamento contrátil quanto o dilatante.

Jefferies & Been (2016) destacam a relação do parâmetro de estado com o comportamento dos solos, complementando ainda que quanto maior o valor absoluto do parâmetro de estado, mais rapidamente acontecerão as deformações do solo e maior será o potencial de liquefação que o material pode apresentar.

Quanto à liquefação dos solos, a ABNT (2024) através da NBR 13028 assim a define:

“O comportamento na ruptura de materiais granulares ou finos, não plásticos, ou com baixa plasticidade, pouco densificados (tendência à contração quando submetidos a cisalhamento drenado) e saturados (ou muito próximos da saturação), que, quando cisalhados em condição não drenada, geram acréscimos positivos de poropressão e conseqüente redução da tensão efetiva, caracterizando uma queda substancial na resistência ao cisalhamento.”

A liquefação é um fenômeno que pode ocorrer em qualquer tipo de solo que esteja em condição fofo, saturado ou quase saturado e ocorra um carregamento estático ou dinâmico que coloque o solo em condição não drenada.

Diante do exposto, mesmo com parâmetros efetivos de resistência ao cisalhamento satisfatórios, pilhas de rejeito mal compactadas para níveis de tensões a que estão sendo submetidas, estão sujeitas ao fenômeno de liquefação caso se estabeleça uma condição

não drenada. Desta forma, Robertson (2017) e Small *et al.* (2024) destacam que avaliar o potencial de liquefação do solo é fundamental e, uma forma de se avaliar numericamente tal potencial se dá pelo Índice de Fragilidade Não Drenada (I_{bu}), apresentado na Equação 6, dada por Bishop (1967).

$$I_{bu} = \frac{S_{u,p} - S_{u,ec}}{S_{u,p}} \quad \text{Equação 6}$$

Onde S_u é a resistência não drenada de pico e no estado crítico (resistência residual). Quando $I_{bu}=1$, o solo perde totalmente a sua resistência após atingir a resistência de pico, altamente susceptível a liquefação, enquanto $I_{bu}=0$, não ocorrerá perda da resistência, portanto, não é susceptível à liquefação. Esta relação está apresentada graficamente na Figura 2-12.

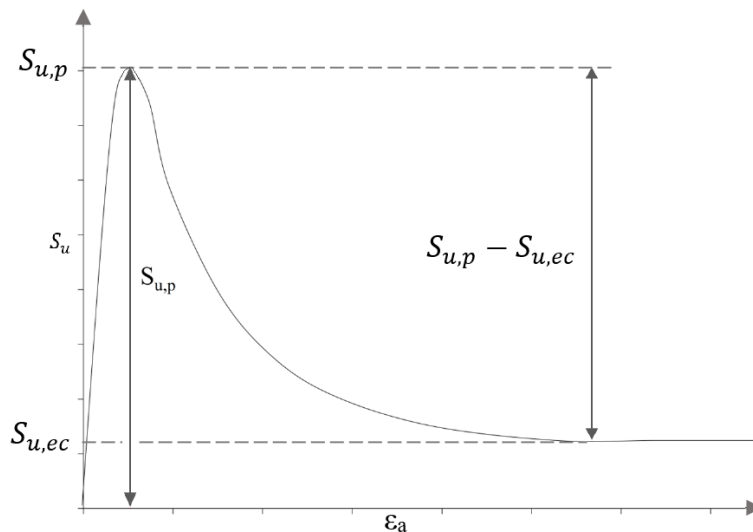


Figura 2-12 - Representação do Índice de Fragilidade Não Drenada (I_{bu}) (Adaptado de Telles, 2017) .

Em estudos da ocorrência de liquefação em diversos tipos de solo, Robertson (2017) concluiu que conforme registros, a maior parte das liquefações por fluxo ocorreram em solos com o $I_b > 0,4$ e as resistências não drenadas obtidas por retroanálise estavam entre 0,15 e 0,05.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO E FILTRAGEM DO MINÉRIO DE OURO

O rejeito em estudo nesta pesquisa é proveniente do beneficiamento do minério de ouro proveniente de duas minas subterrâneas localizadas no QF de Minas Gerais (MG).

Conforme documentos da mineradora, o minério é extraído das minas subterrâneas e passa pelas seguintes etapas de beneficiamento: transporte por caminhões até a planta de beneficiamento, britagem primária, moagem, separação gravimétrica, flotação. Ao final da flotação ocorre a separação do material em duas partes, correspondentes a 10% e 90% do volume total, sendo cada parte direcionada a dois processos distintos.

Um destes processos, para onde é direcionado 10% do volume de material que sai da flotação é composto por filtragem para redução do teor de umidade, transporte até a planta de metalurgia para o beneficiamento final do concentrado de minério de ouro.

Já para o outro processo, é direcionado 90% do volume de material que sai da flotação, que se trata do rejeito de flotação, objeto desta pesquisa. O rejeito então passa por processo de espessamento para uma primeira redução do volume de água e em seguida é direcionado para os filtros a disco, de onde o rejeito sai com teor de umidade variando entre 15% e 20%. Na sequência da filtragem o rejeito é transportado para três distintas pilhas de disposição de rejeito filtrado.

A Figura 3-1 a seguir apresenta o fluxograma da planta de beneficiamento em que ocorre o processo de flotação. Como o rejeito gerado no beneficiamento metalúrgico não será estudado, não serão apresentados detalhes deste processo nem as características deste rejeito.

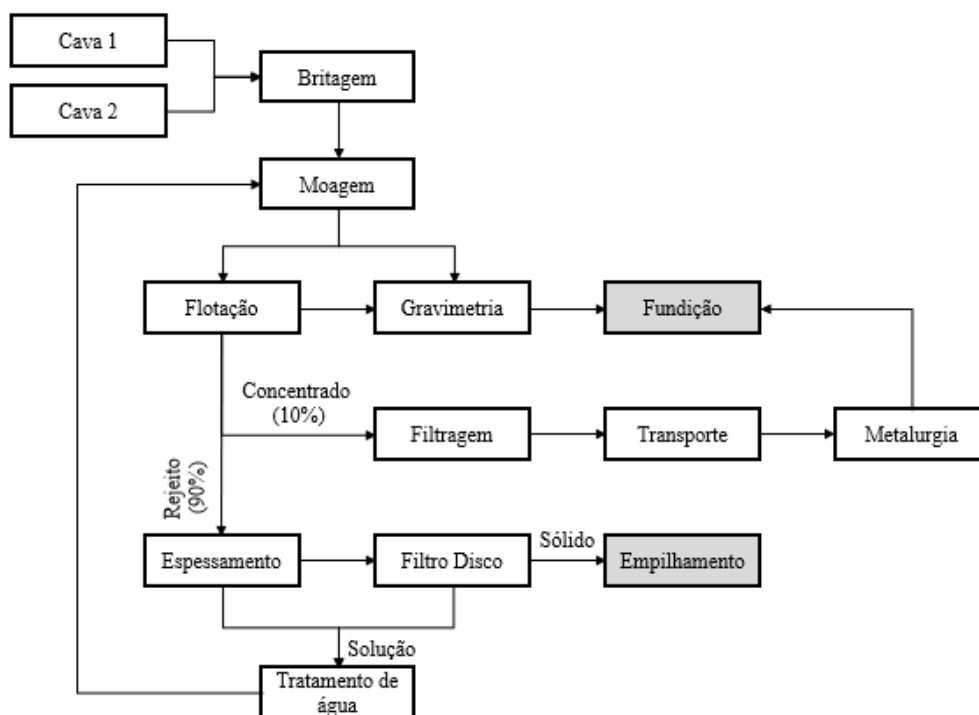


Figura 3-1 - Fluxograma da primeira etapa de beneficiamento. (Adaptado da Mineradora, 2023).

3.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO REJEITO

Para as análises mineralógicas do rejeito, após homogeneização e quarteamento das amostras, uma porção foi adicionada em resina epóxi em molde de 30mm de diâmetro, polida com pasta diamantada e submetida à microscopia. As amostras analisadas (seções polidas) foram previamente cobertas com carbono para observação por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Os ensaios foram desenvolvidos no laboratório da Universidade Federal de Minas Geral (UFMG) em 2022.

As análises mineralógicas e associações minerais realizadas consideraram tanto o contraste de número atômico quanto a composição química de cada fase (imagens de elétrons retroespalhados e espectros de raios X característicos por EDS, modo XBSE para análise modal e SPL_DZ para mineralogia Au-Ag).

Os resultados indicaram que o rejeito é rico em quartzo (46,4%), possuindo também carbonatos em proporções consideráveis sendo a Ankerita em maior expressão com aproximadamente 15,88% da amostra. Minerais do grupo muscovita e clorita, com aproximadamente 7,3% cada e frações inferiores a 5% de outros minerais (Figura 3-2).

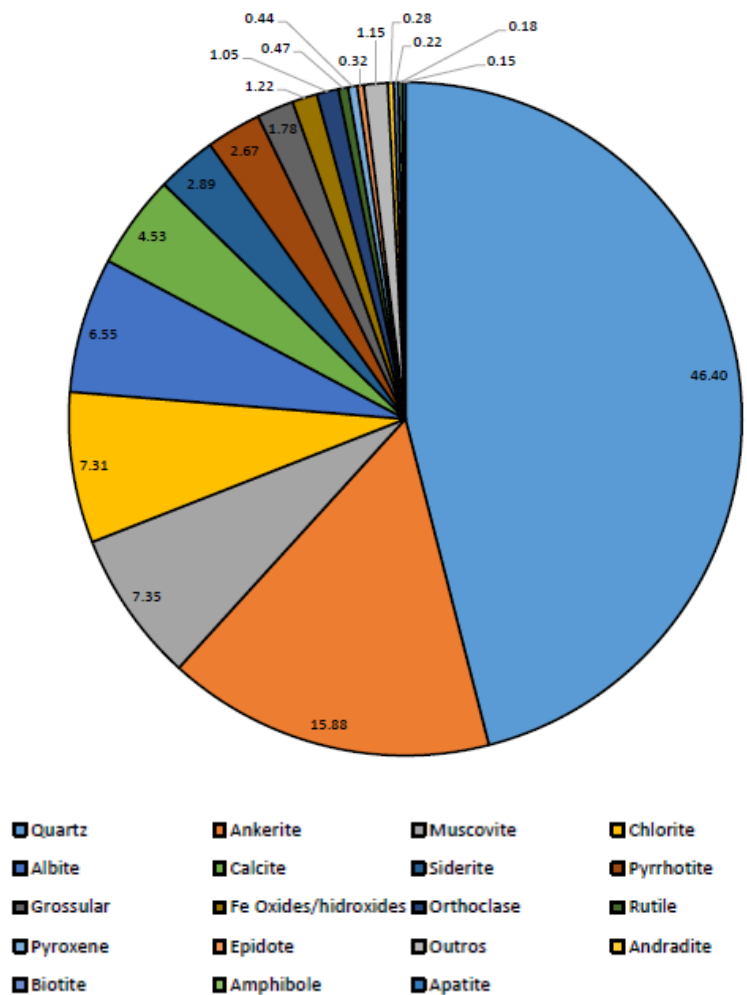


Figura 3-2 - Composição mineralógica do rejeito estudado (Mineradora, 2022).

Estudos apresentados por Oliveira *et al.* (2024), em rejeito de minério de ouro proveniente da etapa de flotação, indicaram teor de sílica de aproximadamente 22%, seguido de Ferro (12,3%) e outros minerais em teores abaixo de 5%. Neste estudo, o autor destaca que o rejeito é rico em quartzo (aproximadamente 38%) sendo encontrados também a albita, moscovita, clorita e carbonatos em menores proporções, similar ao encontrado na presente pesquisa. Outros autores que também estudaram rejeitos de minério de ouro relatam a predominância da sílica, apresentados na

Tabela 3-1 - Teores de sílica apresentados por outros autores em estudos de rejeito de minério de ouro.

Autor	Teor aproximado de sílica (%)
Bedin (2010)	32,5
Hoch (2022)	93,9
Silva (2023)	59,3
Oliveira <i>et al.</i> (2024)	22,0

3.3 DESCRIÇÃO DO ATERRO EXPERIMENTAL E DA PILHA DE REJEITOS

Os rejeitos filtrados analisados através de investigações de laboratório e de campo partiram de duas estruturas distintas construídas com o rejeito proveniente do mesmo processo e diferentes metodologias de construção empregadas. Uma estrutura é um aterro experimental, cuja descrição está detalhada no item 3.3.1, enquanto a outra estrutura é uma pilha de rejeitos que se encontra em operação e está detalhada no item 3.3.2.

3.3.1 ATERRO EXPERIMENTAL

O Aterro Experimental foi executado em 2023 com o intuito de obter os parâmetros geotécnicos a serem utilizados nas premissas de projeto da pilha de rejeitos a ser construída.

O aterro foi realizado sobre o reservatório de rejeitos de uma barragem que se encontrava fora de operação em uma área já consolidada e previamente forrada com uma cama de 1,0m de espessura de estéril. O aterro possuía geometria retangular (Figura 3-3), com 50m de largura e 60m de comprimento com rampas de entrada e saída localizadas em cada extremidade e desconsideradas para execução dos ensaios de campo e coletas de amostras para ensaios de laboratório.



Figura 3-3 - Geometria do aterro experimental (Mineradora, 2023).

O aterro experimental foi dividido em duas partes, sendo que uma parte foi executada com 04 camadas de 50cm de espessura cada uma e a outra parte com 03 (três) camadas de espessura de 30cm cada uma. A área foi subdividida em três faixas com larguras equivalentes e demarcadas através de balizas e estacas de forma a garantir melhor controle da passagem do trator de esteira utilizado para compactação das camadas. A execução se deu conforme descrito na sequência:

1. Carregamento dos caminhões basculante com rejeito filtrado com uso de escavadeira;
2. Transporte e descarregamento do rejeito em ponta de aterro na área do aterro experimental (Figura 3-4);
3. Espalhamento do rejeito em camadas com espessura de 50 cm com o trator de esteiras;
4. Compactação da camada com a utilização do trator de esteiras (D6) (Figura 3-5) realizando-se ensaio de verificação do teor de umidade e da densidade *in situ* pela metodologia Hilf em topo e base a cada ciclo de compactação concluído (2 passadas de equipamento) até completar 3 ciclos;

5. Umidificação da camada antes do início do lançamento da nova camada com o auxílio do caminhão pipa.



Figura 3-4 – Lançamento da 1ª camada do Aterro Experimental (Mineradora, 2023).



Figura 3-5 – Compactação da camada com trator de esteira D6 (Mineradora, 2023).

Durante a realização do aterro, foram extraídas 8 amostras indeformadas do tipo bloco seguindo todos os procedimentos constantes na NBR 9604 da ABNT (2016) para realização de ensaios de laboratório. O croqui do aterro experimental é apresentado na Figura 3-6, bem como o resumo das características da estrutura encontra-se na Tabela 3-2.

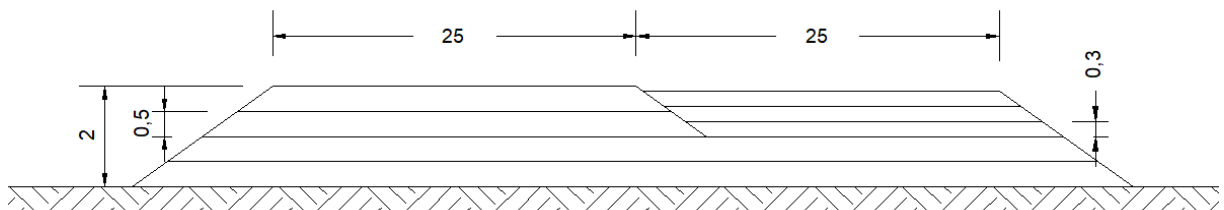


Figura 3-6 - Croqui da seção típica do aterro experimental (sem escala).

Tabela 3-2 - Características Técnicas do Aterro Experimental.

Comprimento	60m
Largura	50m
Número de faixas	3
Número de camadas	3 camadas para 30cm e 4 camadas para 50cm
Espessura das camadas	30cm e 50cm
Volume total final	6.000 m ³
Equipamentos utilizados para compactação	Trator de esteira (D6)
Controle de espessura das camadas	Topograficamente através de cruzetas

3.3.2 PILHA DE REJEITOS

A pilha de rejeitos teve seu início de construção em 2023. A estrutura possui geometria variável conforme topografia do local em que está sendo implantada (Figura 3-7).



Figura 3-7 – Vista da construção da pilha de rejeitos com uso de rolo compactador liso (Mineradora, 2023).

A estrutura está sendo construída em camadas de 30cm de espessura, com rejeito proveniente do processo de filtragem, compactado com rolo liso sem vibração com o teor de umidade próximo ao ótimo e com especificação do grau de compactação entre 95% e 100% em relação ao Proctor Normal.

Em todas as camadas foram realizados ensaios de controle de compactação pelo método Hilf no meio da camada. Além disto, amostras deformadas foram coletadas para caracterização em laboratório e duas amostras indeformadas do tipo bloco foram coletadas para realização de ensaios de resistência em laboratório, ensaios estes dos tipos compressão triaxial drenado e não drenado na condição saturada. Estas amostras foram coletadas seguindo todos os procedimentos constantes na NBR 9604:2016 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

O resumo das características técnicas deste aterro está apresentado na Tabela 3-3.

Tabela 3-3 - Características técnicas da pilha de rejeitos em setembro/2023 (Mineradora, 2023).

Altura (m)	13
Número de camadas	48 camadas
Espessura das camadas (cm)	30
Energia de compactação	Proctor Normal
Volume (m ³)	162.500
Equipamentos utilizados para compactação	Rolo liso sem vibração
Controle da espessura da camada	Topograficamente através de cruzetas

3.4 INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS

3.4.1 PROGRAMAÇÃO GERAL

As investigações geotécnicas consistiram na realização de ensaios de campo e de laboratório realizados em amostras coletadas a partir do aterro experimental e na pilha de rejeitos.

A autora teve acesso aos resultados dos ensaios realizados, cedidos pela mineradora, mas, não participou da realização destes ensaios, tanto em campo quanto em laboratório. Os ensaios foram realizados por diferentes laboratórios entre 2021 e 2024. Os resultados dos ensaios foram reinterpretados para esta pesquisa e serão apresentados no Capítulo 4.

No aterro experimental foram coletados 8 blocos indeformados conforme indicação feita no croqui de seção típica apresentado na Figura 3-8 e resumido na Tabela 3-4. A programação dos ensaios realizados nestas amostras é apresentada na Tabela 3-5.

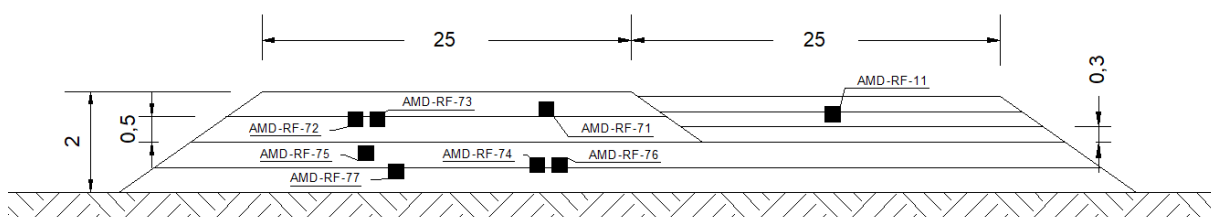


Figura 3-8 - Croqui do aterro experimental com indicação da posição da coleta das amostras indeformadas do tipo bloco (sem escala).

Tabela 3-4 - Dados da coleta de amostras indeformadas (blocos) do aterro experimental.

Identificação da amostra	Profundidade de coleta (m)	Espessura da camada (cm)	Condição de compactação
AMD-RF-11	0,20	30	Trator de esteira
AMD-RF-71	0,20	0,50	
AMD-RF-72	0,40		
AMD-RF-73	0,40		
AMD-RF-74	1,30		
AMD-RF-75	1,10		
AMD-RF-76	1,30		
AMD-RF-77	1,45		

Tabela 3-5 - Programação de coleta de amostras e ensaios de campo e laboratório do aterro experimental.

Ensaio realizado em campo	76 ensaios de controle de compactação Hilf realizados em topo e base das camadas
Ensaio realizado em laboratório	Análise granulométrica (28), densidade real dos grãos (28), limite de liquidez e plasticidade (15), índice de vazios máximo e mínimo (4), compactação Proctor normal (61), permeabilidade a carga variável (20), compressão triaxial CIUsat (9) e CIDsat (10)
Coleta de amostras indeformadas	8 blocos
Coleta de amostras deformadas	38 sacos

Os dados da coleta das amostras indeformadas da pilha de rejeitos são apresentados na Tabela 3-6 e a relação dos ensaios realizados é apresentada em sequência na Tabela 3-7.

Tabela 3-6 - Dados da coleta de amostras indeformadas (blocos) da pilha de rejeitos.

Identificação da amostra	Profundidade de coleta	Espessura da camada (cm)	Condição de compactação
AMD-RF-52	Não informado	30	Rolo liso
AMD-RF-53	Não informado		

Tabela 3-7 - Programação de coleta de amostras e ensaios de campo e laboratório da pilha de rejeitos.

Ensaio realizado em campo	107 ensaios de controle de compactação Hilf no meio da camada
Ensaio realizado em laboratório	Análise granulométrica (3), densidade real dos grãos (3), limite de liquidez e plasticidade (3), índice de vazios máximo e mínimo (3), compactação Proctor Normal (3), permeabilidade a carga variável (4), compressão triaxial CIUsat (10) e CIDsat (1)
Coleta de amostras indeformadas	2 blocos
Coleta de amostras deformadas	3 sacos

3.4.2 ENSAIOS E CONTROLES DE CAMPO

Foram realizados ensaios *in situ* para determinação do teor de umidade natural e verificação da densidade natural em diferentes camadas do aterro experimental e da pilha de rejeitos.

A verificação do teor de umidade foi realizada pelo método da frigideira em conformidade com a ABNT NBR 16097:2012. Já a obtenção da densidade *in situ* do rejeito compactado foi feita a partir do método Hilf, em conformidade com o disposto na ABNT NBR 12102:2020.

As amostras indeformadas do tipo bloco coletadas no aterro experimental e na pilha de rejeitos foram utilizadas para talhagem de corpos de prova para determinação de parâmetros de resistência ao cisalhamento e do coeficiente de condutividade hidráulica. Junto a estas amostras foram coletadas amostras deformadas para ensaios de compactação e caracterização em laboratório, sendo realizados também ensaios de resistência ao cisalhamento e de permeabilidade em corpos de prova reconstituídos em laboratório em diferentes índices de vazios.

A coleta dos blocos seguiu o disposto na norma NBR 9604 (ABNT, 2016). Os blocos em formato cúbico com 30cm de aresta foram extraídos em poços de investigação. A escavação para talhagem dos blocos seguiu até cerca de 10 cm abaixo da base da amostra, realizou-se a talhagem das 4 faces do bloco e nivelamento do topo e então a amostra foi envolvida por tecido tipo talagarça e parafina. Em seguida, houve o seccionamento da base, talhagem do fundo do bloco e fechamento também com talagarça e parafina desta face. O acondicionamento da amostra se deu em caixa de madeira com preenchimento no fundo, laterais e topo com serragem úmida, a caixa foi identificada com dados da amostra e topo e base sinalizados.

Todos os dados dos ensaios foram disponibilizados pela mineradora para esta pesquisa, nenhum ensaio foi acompanhado pela autora.

3.4.3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Foram realizados ensaios em laboratório para caracterização completa das amostras, ensaio de compactação, ensaios de resistência ao cisalhamento do tipo triaxial adensado drenado e adensado não drenado em condição saturada, ensaio de permeabilidade e de adensamento unidimensional. As normas de referência utilizadas para cada ensaio estão apresentadas na Tabela 3-8.

Tabela 3-8 - Normas de referência utilizadas nos ensaios de laboratório.

Norma	Ensaio
NBR 6457:2016	Solos — Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade
NBR 7181:2018	Solo - Análise granulométrica
NBR 6458:2017	Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água
NBR 6459:2017	Solo - Determinação do limite de liquidez
NBR 7180:2016	Solo - Determinação do limite de plasticidade
NBR 16843:2020	Solo - Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos
NBR 16840:2021	Solo - Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos
NBR 7182:2017	Solo - Ensaio de compactação
NBR 16853:2020	Solo - Ensaio de adensamento unidimensional
NBR 14545:2021	Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável
ASTM D4767:2020	Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils
ASTM D7181:2020	Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils

Durante o desenvolvimento desta pesquisa, houve a necessidade de realizar a separação das amostras para melhor interpretação e definição das Linhas de Estado Crítico (LEC). Sendo assim, realizou-se o agrupamento das amostras a partir dos ensaios de análise granulométrica, em função do material passante na peneira #200 (0,75mm). O detalhamento desse agrupamento e das curvas obtidas será apresentado no Capítulo 4.

Os corpos de prova reconstituídos em laboratório foram moldados por *Standard Moist Tamping*. O método, desenvolvido para preparação de corpos de prova para ensaios de resistência ao cisalhamento, consiste na umectação da amostra no teor de umidade desejado para o ensaio, geralmente próximo ao teor de umidade ótimo, deposição do material em camadas dentro de um molde cilíndrico onde cada camada é compactada com um soquete manual com controle do número de golpes, até atingir a densidade desejada, sendo possível preparar corpos de prova com diferentes índices de vazios, desde o estado fofo ao compacto ou até mesmo simulando índices de vazios encontrados em ensaios *in situ* (Ladd, 1978; Ishihara, 1996).

Segundo os autores, se executado com controle da espessura das camadas e número de golpes durante a moldagem do corpo de prova, a técnica permite a obtenção de corpos de prova com grau aceitável de homogeneidade.

Na Tabela 3-9 está apresentado o resumo dos tipos e quantitativos dos ensaios considerados para esta pesquisa.

Tabela 3-9 – Tipo e número de ensaios realizados em laboratório.

Ensaio	Número de ensaios realizados	Observações
Granulometria por peneiramento e sedimentação	31	-
Densidade real dos grãos	30	-
Índice de vazios máximo e mínimo	7	-
Limite de Liquidez e de Plasticidade	18	Como os resultados foram Não Plástico para todos os ensaios iniciais, não foram realizados ensaios nas demais amostras coletadas para caracterização
Compactação Proctor normal	64	-
Permeabilidade a carga variável	24	8 ensaios realizados na direção vertical e 8 na direção horizontal para os corpos de prova talhados a partir da amostra indeformada e 8 ensaios realizados na direção vertical em corpos de prova reconstituídos em laboratório
Compressão Triaxial CIUsat	19	Corpos de prova (CPs) reconstituídos em laboratório: 40 CPs talhados dos blocos: 40
Compressão Triaxial CIDsat	11	CPs reconstituídos em laboratório: 4 CPs talhados dos blocos: 40

A relação de todos os corpos de prova submetidos à compressão triaxial está apresentado no Anexo I. A partir dos ensaios realizados foram plotados os gráficos $\eta (q/p'):\epsilon_a$ (deformação axial) de todos os corpos de prova e selecionados os corpos de prova que

alcançaram o estado crítico. Os corpos de prova selecionados para análise estão apresentados na Tabela 3-10.

Tabela 3-10 - Corpos de prova de compressão triaxial selecionados para análise quanto ao estado crítico.

Amostra	Tipo de ensaio	Tipo de corpo de prova	σ_3	ϵ_i
AMD-RF-23	CIUsat	Reconstituído	800	0,552
AMD-RF-52	CIUsat	Talhado	100	0,684
			400	0,683
	CIDsat		100	0,630
			400	0,649
AMD-RF-53	CIUsat	Talhado	200	0,467
			800	0,483
AMD-RF-71	CIUsat	Talhado	1000	0,634
AMD-RF-72	CIUsat	Talhado	250	0,659
	CIDsat		250	0,695
AMD-RF-75	CIUsat	Talhado	500	0,819
	CIDsat		500	0,811
AMD-RF-76	CIUsat	Talhado	125	0,611
	CIDsat		500	0,642
AMD-RF-77	CIUsat	Talhado	125	0,894
			250	0,808
	CIDsat		250	0,787
AMD-RF-78	CIUsat	Reconstituído	100	0,633
			125	0,628
			125	0,633
			200	0,633
			250	0,633
			250	0,624
			400	0,703
			500	0,633
			800	0,891
			1000	0,635
			1600	0,895
	CIDsat		400	0,640

4 RESULTADOS

Este capítulo encontra-se dividido em dois itens, sendo o item 4.1 referente à análise dos resultados das investigações de campo, enquanto a análise dos resultados dos ensaios de laboratório será apresentada no item 4.2.

4.1 INVESTIGAÇÕES DE CAMPO

4.1.1 GRAU DE COMPACTAÇÃO E TEOR DE UMIDADE *IN SITU*

Visando a verificação da densidade (ρ) e teor de umidade *in situ* (w) do rejeito nas diferentes metodologias de compactação empregadas foram realizadas 76 medidas destas variáveis no aterro experimental e 107 ensaios na pilha de rejeitos.

Os resultados de densidade *in situ* obtidos em ambas as estruturas (aterro experimental e pilha de rejeitos) estão apresentados conforme os ciclos de compactação empregados. Um ciclo de compactação corresponde a duas passadas do equipamento empregado (rolo liso ou trator de esteira) em cada camada. Os resultados foram agrupados em até 3 ciclos, 4 ciclos, 5 e 6 ciclos de compactação, estando identificados de acordo com a espessura da camada, a posição do ensaio (topo ou base da camada) e tipo de equipamento compactador (Figura 4-1).

A partir da análise inicial dos gráficos apresentados na Figura 4-1, e, mediante a descrição de cada estrutura no Capítulo 3, percebe-se que apesar das densidades *in situ* alcançadas com o uso do trator de esteira em camadas de 30cm e de espessura serem próximas aos resultados obtidos no aterro executado com rolo compactador liso sem vibração em camadas de 30cm, é perceptível a diferença de grau de compactação entre topo e base das camadas.

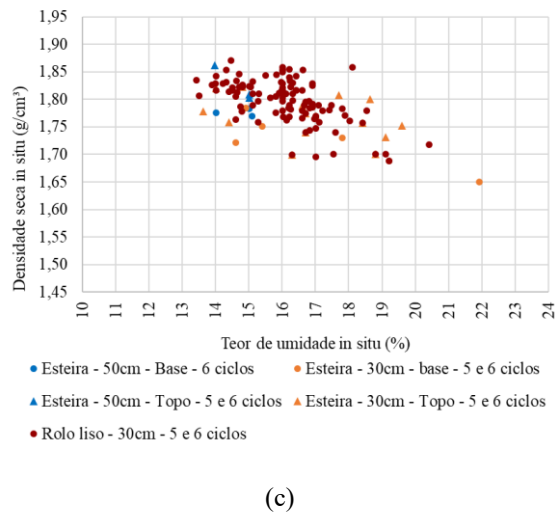
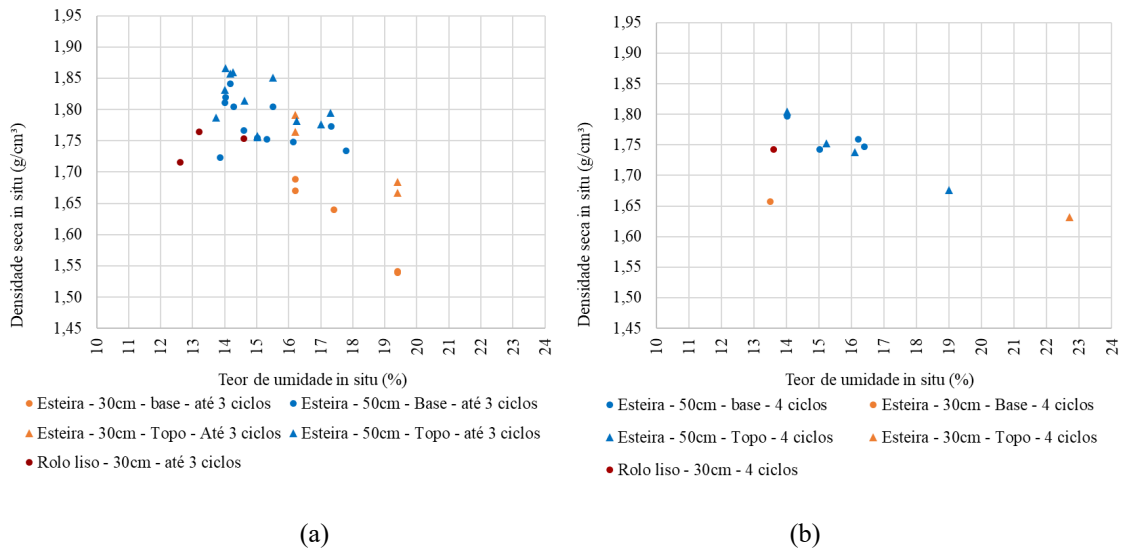


Figura 4-1 - Resultados de densidade seca *in situ*. (a) Execução de até 3 ciclos de compactação. (b) Execução de 4 ciclos de compactação. (c) Execução de 5 e 6 ciclos de compactação.

O manual do USACE (1995) destaca que a definição dos ciclos de compactação de aterro por trator de esteiras não pode ser feita da mesma forma como estabelecido para rolos compactadores, visto que o espaço de separação entre as esteiras não permite que a camada de solo seja completamente compactada na largura do trator. Tal fato evidencia a heterogeneidade que os aterros compactados com trator de esteira podem apresentar se as especificações técnicas e o acompanhamento de campo não garantirem que toda a superfície do aterro passe pelas mesmas condições de compactação.

A hipótese de diferença de densidade *in situ* entre topo e base é validada a partir dos gráficos apresentados na Figura 4-2, onde é possível observar que os valores de grau de

compactação no topo das camadas de 30cm (Figura 4-2a) e de 50cm (Figura 4-2b) de espessura compactadas com uso de esteira são superiores aos resultados dos ensaios executados na base da camada.

Nestes gráficos é possível observar uma linha de referência do $GC = 96\%$. Esta linha foi estabelecida após analisar o rejeito à luz da mecânica dos solos do estado crítico e concluir que este grau de compactação faz com que o material tenda a apresentar um comportamento dilatante – ver item 4.3.

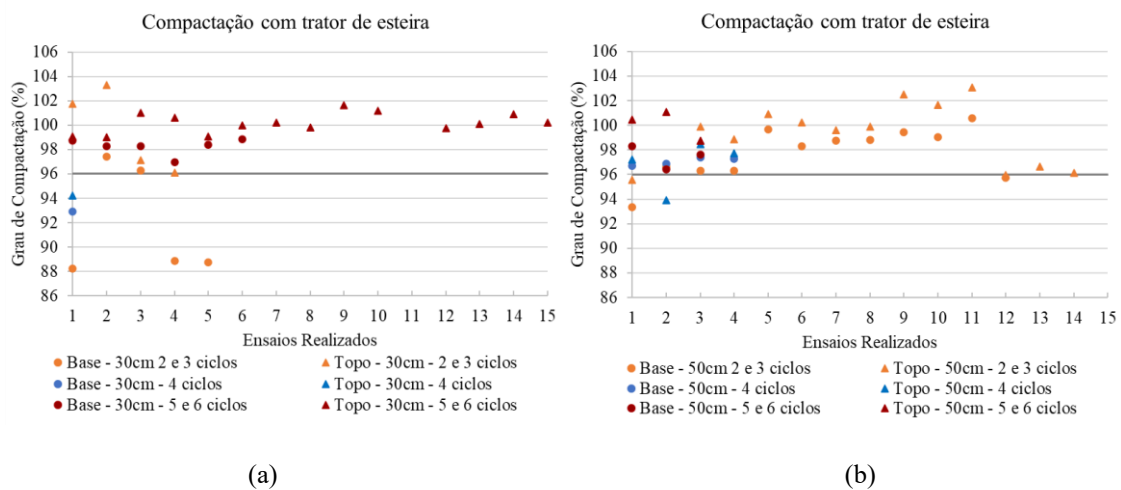


Figura 4-2 – Grau de compactação em topo e base das camadas compactada com trator de esteira. (a) Camadas de 30cm de espessura. (b) Camadas de 50cm de espessura.

A partir da análise da Figura 4-2a e b, que apresenta os resultados de grau de compactação sob diferentes condições de compactação, observa-se que:

- No aterro esteirado com espessura de camada de 30cm (Figura 4-2a):
 - Houve a variação do grau de compactação (GC) entre topo e base independentemente do número de ciclos de compactação empregado. Tal variação foi de até 3% em 5 e 6 ciclos, chegando a 13% em um dos ensaios realizados com 2 e 3 ciclos de compactação empregados;
 - O GC obtido com 2 e 3 ciclos de compactação empregados são concentrados, em sua maioria, abaixo de 98%, enquanto com 5 e 6 ciclos se concentram na faixa de 98% a 100%, tanto em topo quanto em base, mostrando que houve ganho de GC em topo e base conforme os ciclos de compactação aumentaram;

- A diferença do GC entre topo e base diminuiu conforme os ciclos de compactação aumentaram, o que indica menor heterogeneidade do aterro;
- Há apenas um ensaio e somente na base da camada para o emprego de 4 ciclos de compactação, como o ensaio não é representativo, não foi possível concluir sobre o resultado apresentado;
- No aterro esteirado com espessura de camada de 50cm (Figura 4-2b):
 - Os GC das camadas de topo e base para 5 e 6 ciclos de compactação situaram entre 98% e 101%, enquanto com menos ciclos os resultados apresentaram maior dispersibilidade, variando de 93% a 103%.
 - Os resultados de topo de camada para 2 e 3 ciclos de compactação, superiores aos resultados de 5 e 6 ciclos, chamaram atenção para a possibilidade de que aqueles ensaios podem ter sido realizados especificamente nas áreas de passagem das esteiras. Essa heterogeneidade das condições de compactação nos casos em que são empregados tratores de esteiras como equipamento de compactação é citado no manual do USACE (1995), como abordado anteriormente.
 - Houve a variação do GC entre topo e base independentemente do número de ciclos de compactação empregados, assim como observado nas camadas de 30 cm de espessura.
 - A diferença no valor de GC entre topo e base é de 5% em 5 e 6 ciclos de compactação e 3% para 2 e 3 ciclos. Com o aumento da espessura da camada, esperava-se que a diferença de GC fosse maior e os resultados inferiores aos da camada de 30 cm de espessura. Este fato também pode estar associado à heterogeneidade do aterro, em função da dificuldade em compactar de forma homogênea toda a camada com uso do trator de esteira, conforme citado anteriormente.
 - No caso de 4 ciclos de compactação, observou-se aumento do GC na base da camada em relação ao emprego de 2 e 3 ciclos. Tal comportamento é esperado, visto que o aumento do número de passadas do equipamento de compactação promove a redução do índice de vazios do material, refletindo no aumento do GC obtido.

Como citado no Capítulo 3, não foram realizados ensaios em topo e base, mas, no meio da camada do aterro compactado com uso do rolo liso sem vibração. Os resultados dos ensaios realizados são representados na Figura 4-3.

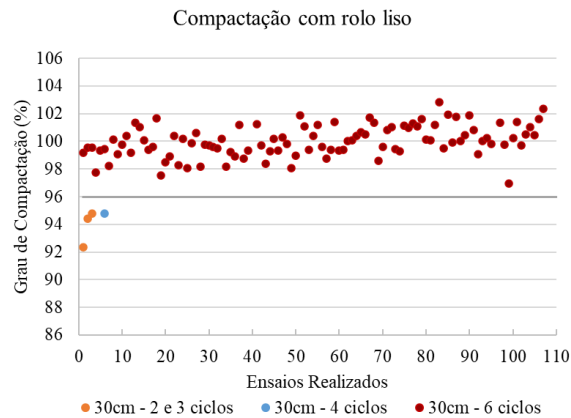


Figura 4-3 - Grau de compactação das camadas de 30cm compactadas com rolo liso.

A partir das análises dos resultados apresentados na Figura 4-3, observa-se que no aterro compactado com rolo liso sem vibração e espessura de camada de 30cm há a tendência de ganho de GC com o aumento dos ciclos de compactação, apesar de um número muito menor de ensaios nas condições de 2 a 4 ciclos de compactação. Nota-se também que com 2 e 3 ciclos de compactação os resultados do GC foram inferiores a 95%, com o menor resultado sendo de 92%, sendo esta condição a que apresentou maior dispersão de resultados. Houve um pequeno aumento de GC com o emprego de 4 ciclos (GC≈95%) enquanto o emprego de 6 ciclos de compactação garante GC médio próximo de 100%

A Figura 4-4 apresenta a variação da média do grau de compactação em função do número de ciclos de compactação por equipamento de compactação empregado em cada condição de ciclo de passadas, considerando também a posição do ponto na camada, ou seja, topo e base para o caso da compactação por trator de esteira e meio da camada para o caso da compactação por rolo liso sem vibração.

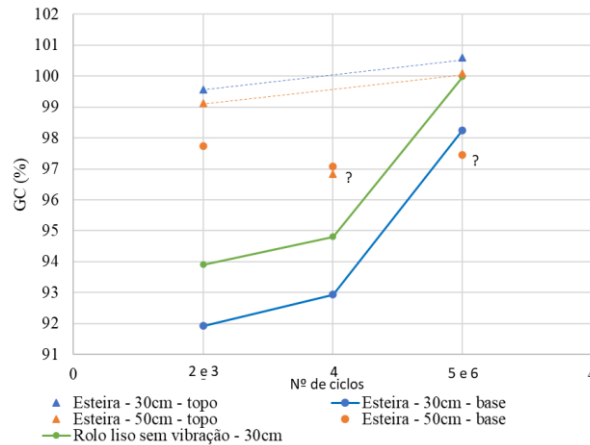


Figura 4-4 - Grau de compactação médio em função do número de ciclos de compactação.

A análise dos resultados médios apresentados na Figura 4-4 permitiu as seguintes conclusões:

- Houve uma tendência de ganho de GC em todas as condições de compactação, com o aumento do número de ciclos de compactação.
- Tanto para o uso de trator de esteira quanto para o uso de rolo liso sem vibração em camadas de 30cm de espessura, o ganho de GC foi mais expressivo com o emprego de 5 e 6 ciclos, com ganho de aproximadamente 5% em ambos os casos. Enquanto o ganho de GC obtido de 2 e 3 ciclos para 4 ciclos de compactação foi de aproximadamente 1% em ambos os casos.
- A dispersão de resultados médios diminuiu com o aumento do número de ciclos de compactação. A diferença entre os valores de GC de topo e base para compactação com esteira em camadas de 30 cm de espessura compactadas com 2 e 3 ciclos foi de quase 8% e caiu para 3% com o emprego de 5 e 6 ciclos. Isso demonstra que o aumento do número de ciclos de compactação contribuiu para a redução da heterogeneidade da camada.
- O ganho de GC na base das camadas foi mais significativo quando foram empregados 5 e 6 ciclos de compactação.
- O emprego de até 4 ciclos de compactação resultou em valores médios de GC inferiores a 95%.
- Os resultados dos ensaios realizados nas camadas de 50 cm apresentaram comportamento diferente das análises supracitadas. Isso pode indicar que os pontos ensaiados podem ter sido mais bem compactados em relação aos pontos

ensaiados para o aterro com camadas de 30 cm e evidencia a presença da heterogeneidade dos aterros de rejeitos compactados com esteira. Essa diferença de compactação pode se dar caso nem toda a superfície da camada tenha sido submetida ao mesmo número de passadas da esteira, visto que o deslocamento lateral do trator de esteira precisa ser cuidadosamente feito, considerando que há uma distância lateral entre as esteiras, fato que não ocorre com o rolo compactador.

Conforme USACE (1995), em solos com poucos finos e elevada condutividade hidráulica, ou seja, solos arenosos, é recomendado que a espessura das camadas seja limitada em até 40cm e em materiais com presença de finos em até 20cm. Cacciuttolo & Campomanes (2022) recomendam que, para rejeitos, a espessura das camadas sejam limitadas a 30cm.

Como o rejeito da presente pesquisa possui composição silto arenosa, conforme o manual da USACE (1995) a espessura de camada de 50 cm não é adequada para a execução de aterros com este material. Condição esta que pode ser verificada na análise dos resultados obtidos, em que o GC nas camadas de 30 cm de espessura se mantiveram acima de 98% com 5 ou 6 ciclos de compactação (Figura 4-2a e Figura 4-4).

Ainda em relação à espessura das camadas, Wagner *et al.* (2023) destacam que, apesar da busca por maiores espessuras de camadas com o intuito de aumentar a produtividade, espessuras menores favorecem a obtenção de graus de compactação maiores, interferindo diretamente no comportamento geotécnico da estrutura. Por fim, Zorzal *et al.* (2020), em estudos relacionados a um rejeito de minério de ouro, sugerem a necessidade de obter GC superiores a 95% visando garantir uma condição tal que o material apresente comportamento dilatante.

4.2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

4.2.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Foram realizados 31 ensaios de análise granulométrica por peneiramento e sedimentação em amostras deformadas coletadas no Aterro Experimental e na pilha de rejeitos em operação. Destes, dois ensaios foram descartados por apresentarem curva muito afastada

das curvas dos demais ensaios, indicando que pode ter tido falha no procedimento de coleta ou preparação da amostra ou mesmo na execução do ensaio.

A partir dos resultados dos ensaios, o rejeito foi classificado como silto arenoso e classificado, segundo SUCS, como ML (silte de baixa plasticidade), compatível com outros estudos apresentados na Figura 4-5 referentes a rejeito de minério de ouro de operações na África do Sul, Brasil, Estados Unidos e Reino Unido, onde também está representado o gráfico com a faixa granulométrica das amostras do rejeito objeto desta pesquisa. O intervalo granulométrico de cada fração que compõe o rejeito estudado está apresentado na Tabela 4-1.

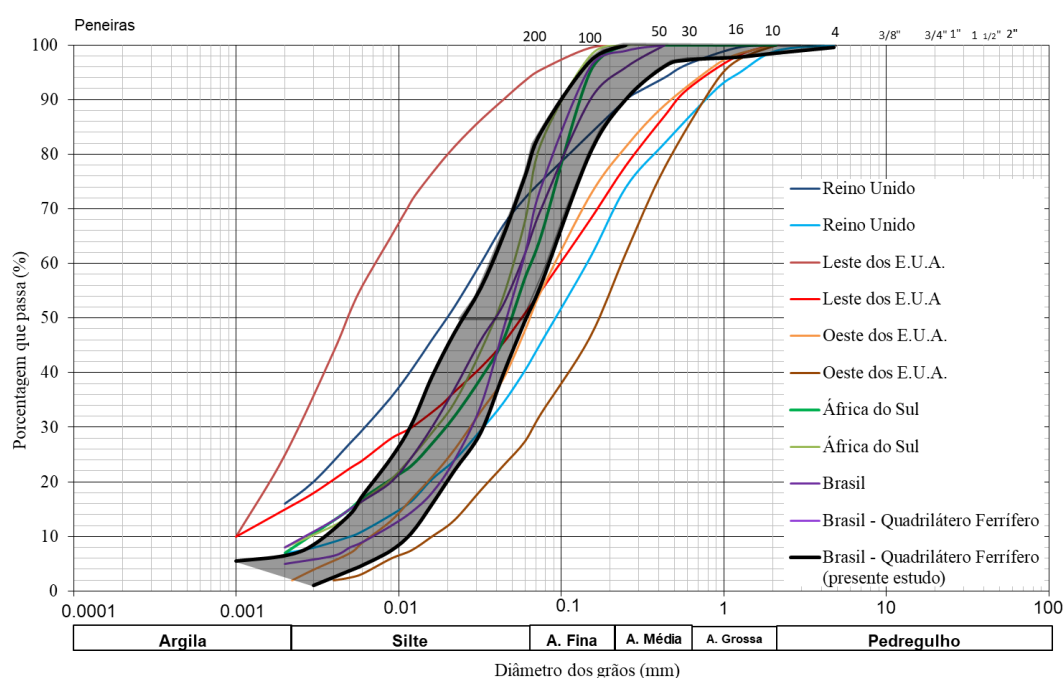


Figura 4-5 - Comparativo da faixa granulométrica do rejeito analisado com as curvas granulométricas do rejeito de ouro apresentadas por outros autores (adaptado de Vick, 1990; Bedin, 2010; Silva, 2023).

Tabela 4-1 - Variação das frações granulométricas do rejeito estudado.

Partícula	Fração	
	Mínima	máxima
Argila	0	6,5
Silte	56,0	77,5
Areia Fina	16,0	40,0
Areia Média	0,0	1,7
Areia Grossa	0,0	2,3
Pedregulho	0	0

A tabela com o resumo dos resultados da composição granulométrica dos 29 (vinte e nove) ensaios realizados encontra-se no Anexo II deste documento.

Terzaghi, *et al.* (1996) sugerem uma avaliação da suscetibilidade à liquefação de um material a partir da faixa granulométrica dos materiais. Neste estudo, os autores indicam duas faixas granulométricas, sendo uma referente a materiais com potencial de liquefação e outra com maior potencial de liquefação Figura 4-6. Nota-se que a faixa granulométrica do rejeito estudado no presente trabalho encontra-se na transição entre essas duas classificações dadas pelos autores, orientando em uma análise inicial que o potencial de liquefação deste rejeito deve ser estudado.

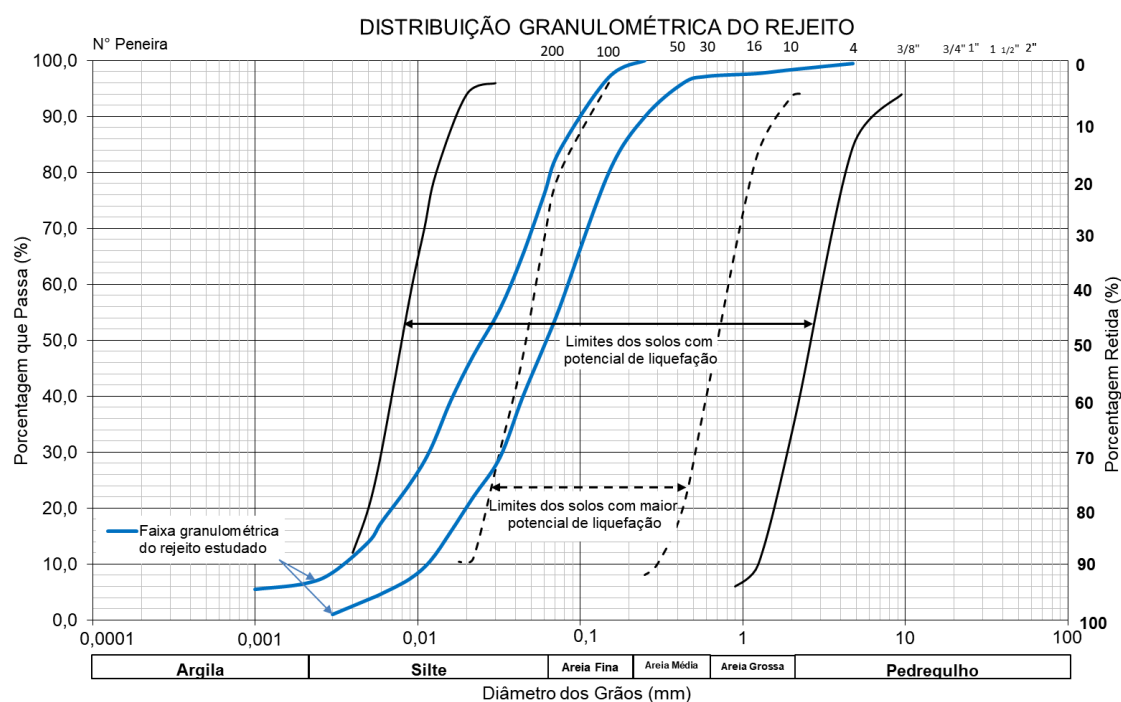


Figura 4-6 – Faixa granulométrica do rejeito comparada às faixas dos materiais susceptíveis à liquefação sugerida por Tsuchida (1970) *apud* Terzaghi, *et al.* (1996).

Trata-se, entretanto, de uma análise preliminar com base na metodologia proposta pelos autores, já que a liquefação depende de uma série de aspectos, como saturação, índice de vazios e um gatilho para que ocorra. O parâmetro de estado do solo é que efetivamente indica o potencial de liquefação do corpo. A análise da susceptibilidade à liquefação deste

rejeito será apresentada no item 4.3 a partir da análise dos ensaios de compressão triaxial realizados em laboratório.

Os ensaios para verificação do índice de plasticidade em 18 amostras não indicaram limite de liquidez (LL) ou de plasticidade (LP) em nenhuma delas, classificando o rejeito como não plástico.

4.2.2 DENSIDADE REAL DOS GRÃOS

Foram realizados 30 ensaios para obtenção da densidade real dos grãos nas amostras de rejeito coletadas. A análise dos resultados indicou valores de ρ variando entre 2,791 g/cm³ e 2,940 g/cm³ com média de 2,845 g/cm³, com desvio padrão amostral de 0,036 g/cm³. Os valores obtidos estão apresentados no Anexo III e são comparados aos valores apresentados por outros autores na Tabela 4-2.

Tabela 4-2 - Valores de densidade real dos grãos do rejeito de minério de ouro (adaptado de Bedin, 2010).

Autores	Região	ρ (g/cm ³)
Presente pesquisa	Brasil	2,79 - 2,94
Costa Filho <i>et al.</i> (2002)	Brasil	2,89 - 2,93
Barbosa & Santos (2003)	Brasil	2,9
McPhail <i>et al.</i> (2004)	Austrália	3,4-3,6
Bedin (2010)	Brasil	3,0
Preciado <i>et al.</i> (2014)	Peru	2,83
Zorzal <i>et al.</i> (2020)	Brasil	2,81
Bonin <i>et al.</i> (2022)	Canadá	2,78
Fourie (2022)	África do Sul	2,8 - 3,1
Silva (2023)	Brasil	2,79 - 2,85
Oliveira <i>et al.</i> (2024)	Brasil	2,81

A análise dos resultados apresentados anteriormente, mostra que a densidade real dos grãos obtidas para o rejeito em estudo está dentro dos intervalos encontrados pelos autores mencionados.

4.2.3 ÍNDICES DE VAZIOS MÁXIMO ($e_{máx}$) E MÍNIMO ($e_{mín}$)

A verificação do índice de vazios máximo e mínimo para este rejeito foi realizada em 10 (dez) amostras de rejeito, sendo que destes, 3 resultados encontraram-se fora do desvio padrão amostral e, portanto, foram descartados. O índice de vazios mínimo do rejeito variou entre 0,70 e 0,90, enquanto o máximo variou de 1,21 a 1,40, sendo a média do $e_{máx} = 1,27$ e $e_{mín} = 0,78$, os valores encontram-se dentro do encontrado em literatura. Os resultados considerados válidos estão apresentados na Tabela 4-3 a seguir, onde também são listados os valores sugeridos por outros autores também referentes ao rejeito de minério de ouro.

Tabela 4-3 – Resultados dos índices de vazios máximo ($e_{máx}$) e mínimo ($e_{mín}$).

Amostra		Índice de Vazios		Média
		$e_{mín}$	$e_{máx}$	
Presente pesquisa	AMD-RF-07	0,90	1,40	1,15
	AMD-RF-08	0,84	1,21	1,03
	AMD-RF-09	0,82	1,23	1,03
	AMD-RF-66	0,77	1,36	1,07
	AMD-RF-67	0,70	1,26	0,98
	AMD-RF-68	0,70	1,24	0,97
	AMD-RF-69	0,75	1,22	0,99
	MÉDIA	0,78	1,27	1,03
Fourie & Papageorgiou (2001)		0,66	1,83	1,25
Bedin (2010)		1,10	1,23	1,17
Gomes <i>et al.</i> (2019)		0,82	1,40	1,11
Zorzal <i>et al.</i> (2020)		0,70	1,25	0,98
Silva (2023)		0,65	1,34	1,00
Oliveira <i>et al.</i> (2024)		0,56	1,44	1,00

Davies (2011) e Fourie *et al.* (2022) destacam que um mesmo minério quando beneficiado por meio de diferentes processos tenderá a apresentar variações mineralógicas e de formatos diferentes de grãos, podendo ser mais ou menos angulares, incidindo em variações nos valores de índice de vazios máximo e mínimo de um mesmo rejeito. A consequência desta variação sem que haja a verificação periódica deste parâmetro associado aos demais ensaios necessários de controle de campo e de laboratório é a possibilidade de disposição de rejeitos sem a compactação adequada favorecendo o comportamento contrátil dos materiais durante o cisalhamento.

4.2.4 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

Conforme citado no Capítulo 3, os ensaios de compactação foram realizados na energia Proctor normal, obtendo-se nesta condição o teor de umidade ótimo e a densidade seca máxima do rejeito analisado. Dos 64 ensaios realizados, 5 ensaios foram descartados por inconsistência de resultados. As médias da densidade seca máxima e do teor de umidade ótimo dos 59 ensaios (vide Anexo IV) foi de, respectivamente, 1,763 g/cm³ e 16,5%, se mostrando dentro do intervalo de valores encontrados em literatura (1,679 g/cm³ – 1,806 g/cm³ / 14,6% – 18,8%) vide Tabela 4-4.

Tabela 4-4 - Resultados do ensaio de compactação Proctor normal em rejeito de ouro por alguns autores.

Autores	γ_d (g/cm ³)	w _{ot} (%)
Presente pesquisa	1,763	16,5
Preciado <i>et al.</i> (2014)	1,806	16,9
Gomes <i>et al.</i> (2019)	1,758	14,6
Zorzal <i>et al.</i> (2020)	1,679	18,8
Oliveira <i>et al.</i> (2024)	1,720	17,8

A Figura 4-7 apresenta a consolidação das curvas dos ensaios realizados com destaque à curva média que descarta os resultados que se mostraram fora de um desvio padrão.

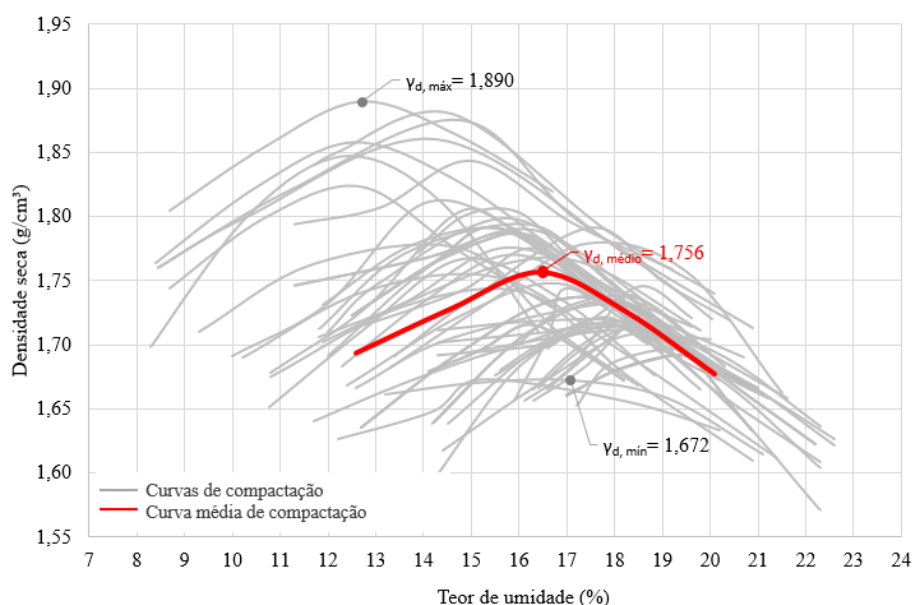


Figura 4-7 - Consolidação das curvas de compactação Proctor normal obtidas.

4.2.5 ENSAIOS DE PERMEABILIDADE

Os resultados de cada corpo de prova ensaiado com os respectivos índices de vazios utilizados para a moldagem, estão apresentados no Anexo V.

Na Figura 4-8 são apresentados os resultados dos ensaios realizados, agrupados pela forma de preparação dos corpos de prova (talhados de amostras indeformadas ou reconstituídos em laboratório). Das amostras indeformadas foram talhados corpos de prova nas direções vertical e horizontal dos blocos. Como não se observou variação significativa do coeficiente de condutividade hidráulica segundo a direção da moldagem dos corpos de prova talhados, as curvas indicadas na Figura 4-8 foram diferenciadas somente pelo método de obtenção do corpo de prova.

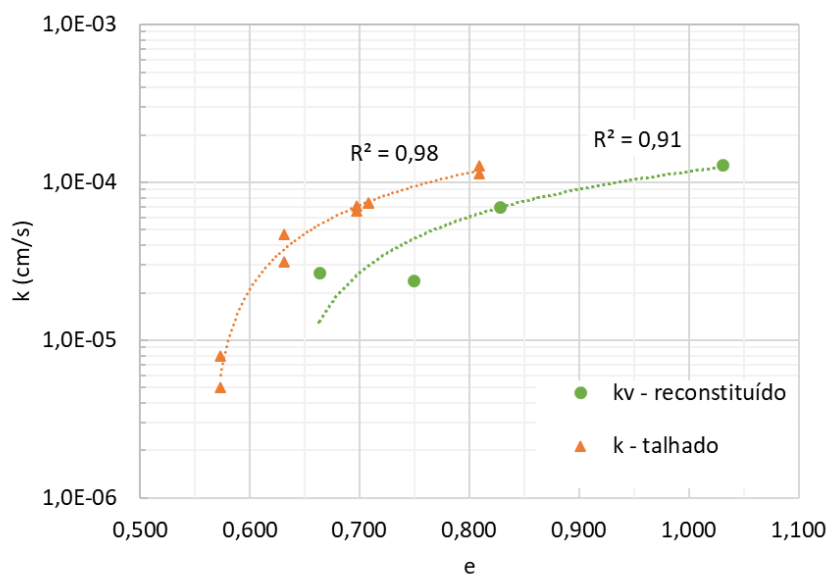


Figura 4-8 - Coeficiente de condutividade hidráulica na direção vertical e horizontal em função do índice de vazios.

A análise dos resultados apresentados na Figura 4-8 permite as seguintes ponderações:

- A variação do coeficiente de condutividade hidráulica deste rejeito é de $5,0 \times 10^{-6}$ a $1,3 \times 10^{-4}$ cm/s, com índices de vazios de respectivamente 0,573 e 1,031.
- O coeficiente de condutividade hidráulica médio obtido com índice de vazios entre 0,663 e 0,750 (índices de vazios próximos de 97% e 99%), é de $2,55 \times 10^{-5}$ cm/s.

- Conforme esperado, à medida que o índice de vazios aumenta, há o aumento do coeficiente de condutividade hidráulica do rejeito. Isto acontece independente da condição de preparação dos corpos de prova (talhados ou reconstituídos);

Apesar de não apresentado no gráfico, a comparação dos resultados dos ensaios de permeabilidade na direção horizontal com a direção vertical, realizados nos corpos de prova talhados a partir das amostras indeformadas, mostrou que coeficientes de condutividade hidráulica na direção horizontal são ligeiramente mais altos que os da direção vertical, indicando baixa anisotropia de permeabilidade do rejeito – os resultados destes ensaios são apresentados no Anexo V.

Vick (1990) apresentou um estudo que contemplou a realização de ensaios de permeabilidade de rejeitos de mineração com teor de finos superior a 30% e de rejeitos classificados como não plásticos ou de baixa plasticidade, seus resultados indicaram coeficientes de condutividade hidráulica variando entre 10^{-2} cm/s e 10^{-7} cm/s. A presença de finos e o comportamento não plástico do rejeito filtrado de ouro em análise se enquadram no proposto por Vick (1990).

Os resultados obtidos nesta pesquisa se mostram, portanto, aderentes aos registrados na literatura, conforme apresentado na Tabela 4-5, bem como com o comportamento de redução progressiva da condutividade hidráulica à medida que a razão de vazios diminui (Carneiro *et al.*, 2023).

Tabela 4-5 - Comparativo dos coeficientes de condutividade hidráulica obtidos com outros apresentados em literatura.

Autores	Origem	k (cm/s)
Presente pesquisa	Brasil	5×10^{-6} a $1,28 \times 10^{-4}$
Vick (1990)	África do Sul, Estados Unidos, Reino Unido	10^{-7} – 10^{-2}
Qiu & Sego (2001)	Canadá	$2,7 \times 10^{-5}$ a $6,7 \times 10^{-5}$
Preciado <i>et al.</i> (2014)	Peru	2×10^{-7}
Gomes <i>et al.</i> (2019)	Brasil	$9,47 \times 10^{-6}$
Silva (2023)	Brasil	$6,28 \times 10^{-4}$
Oliveira <i>et al.</i> (2024)	Brasil	$1,7 \times 10^{-7}$

A variabilidade dos valores apresentados neste estudo e pelos autores mencionados pode estar associada à granulometria, angularidade dos grãos e quaisquer outras características citadas anteriormente, visto que a origem do rejeito estudado pelos autores também varia.

Ainda na análise das propriedades hidráulicas dos materiais, segundo Terzaghi *et al.* (1996), muitos solos podem apresentar anisotropia de permeabilidade, que se refere à variação do coeficiente de condutividade hidráulica do solo em diferentes direções e que esta pode ser quantificada por meio da razão dos coeficientes de condutividade hidráulica dos materiais na direção horizontal pela direção vertical, conforme apresentado na Equação 7. Os autores destacam esse efeito principalmente em solos sedimentares, compostos por argilas e siltes, que podem apresentar diferenças significativas entre a condutividade hidráulica na direção horizontal (k_h) e na direção vertical (k_v), atribuída à orientação das partículas do solo durante a deposição e à compactação ao longo do tempo, que frequentemente cria planos de fraqueza ou caminhos preferenciais para o fluxo de água.

$$R_a = \frac{k_h}{k_v} \quad \text{Equação 7}$$

Apesar do processo de formação dos rejeitos ocorrer industrialmente, mediante a fração representativa de silte no rejeito em análise e a deposição em camadas compactadas uma sobre as outras, a análise da anisotropia foi realizada conforme procedimentos propostos por Terzaghi *et al.* (1996). A pequena diferença entre ambas as direções pode ser observada na Figura 4-9.

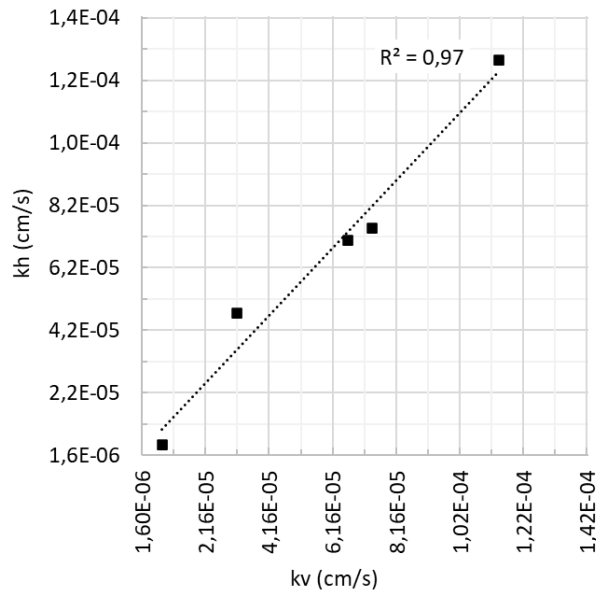


Figura 4-9 - coeficiente de condutividade hidráulica horizontal e vertical.

- Os coeficientes de condutividade hidráulica na direção horizontal (k_h) variam entre 5×10^{-6} cm/s e $1,28 \times 10^{-4}$ cm/s.
- Os coeficientes de condutividade hidráulica na direção vertical (k_v) variam entre $7,9 \times 10^{-6}$ cm/s e $1,14 \times 10^{-4}$ cm/s.
- Nota-se pouca variação dos coeficientes de condutividade hidráulica obtidos na direção horizontal e vertical, o que demonstra comportamento isotrópico quanto a permeabilidade do rejeito em análise para as condições de compactação utilizadas.
- Conforme análise dos estudos apresentados por Terzaghi *et al.* (1996), a baixa anisotropia pode estar relacionada à presença da fração arenosa no rejeito, enquanto os coeficientes de condutividade hidráulica menores, podem estar associados à forma mais angular dos grãos, que é uma característica presente nos rejeitos de mineração (Fourie *et al.* 2022).

4.3 ENSAIOS DE COMPRESSÃO TRIAXIAL

4.3.1 LINHAS DE ESTADO CRÍTICO

A definição dos parâmetros de estado crítico do rejeito em estudo foi realizada a partir da interpretação dos ensaios de compressão triaxial drenados e não drenados apresentados anteriormente na Tabela 3-10.

Para a seleção dos corpos de prova que chegaram ao estado crítico, considerou-se a estabilização do η em função da deformação axial. O gráfico dos corpos de prova selecionados encontra-se apresentado na Figura 4-10.

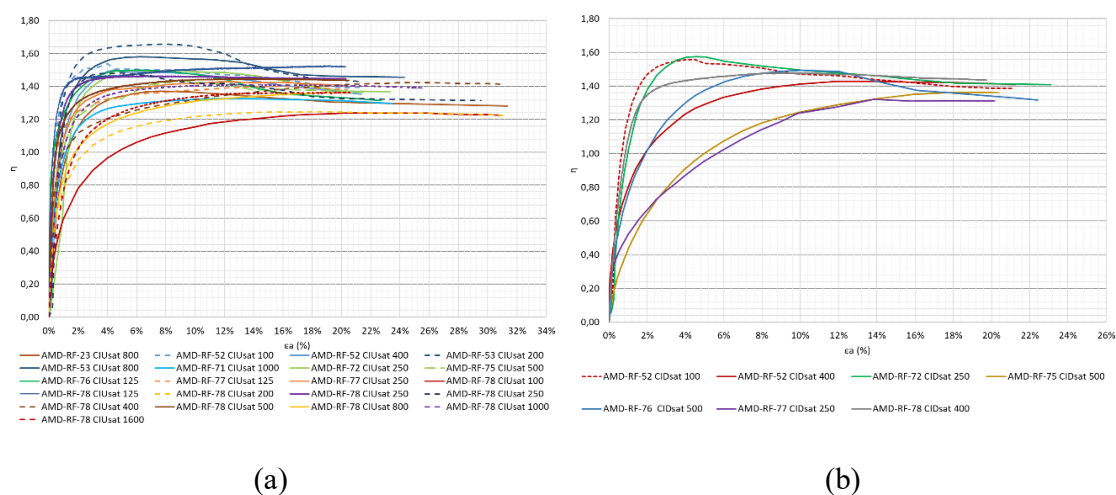


Figura 4-10 - Gráfico $\eta:\epsilon_a$. (a) Ensaios CIUsat; (b) Ensaios CIDsat.

A partir da seleção dos corpos de prova, seguiu-se com a plotagem do gráfico da LEC, onde observou-se a impossibilidade de se estabelecer uma única LEC. Com isso, observada certa heterogeneidade do material quanto à distribuição granulométrica, realizou-se o agrupamento das amostras em função da peneira de abertura 0,075mm (#200), sendo obtidos 4 grupos distintos, os quais estão apresentados na Figura 4-11 e resumidos na Tabela 4-6.

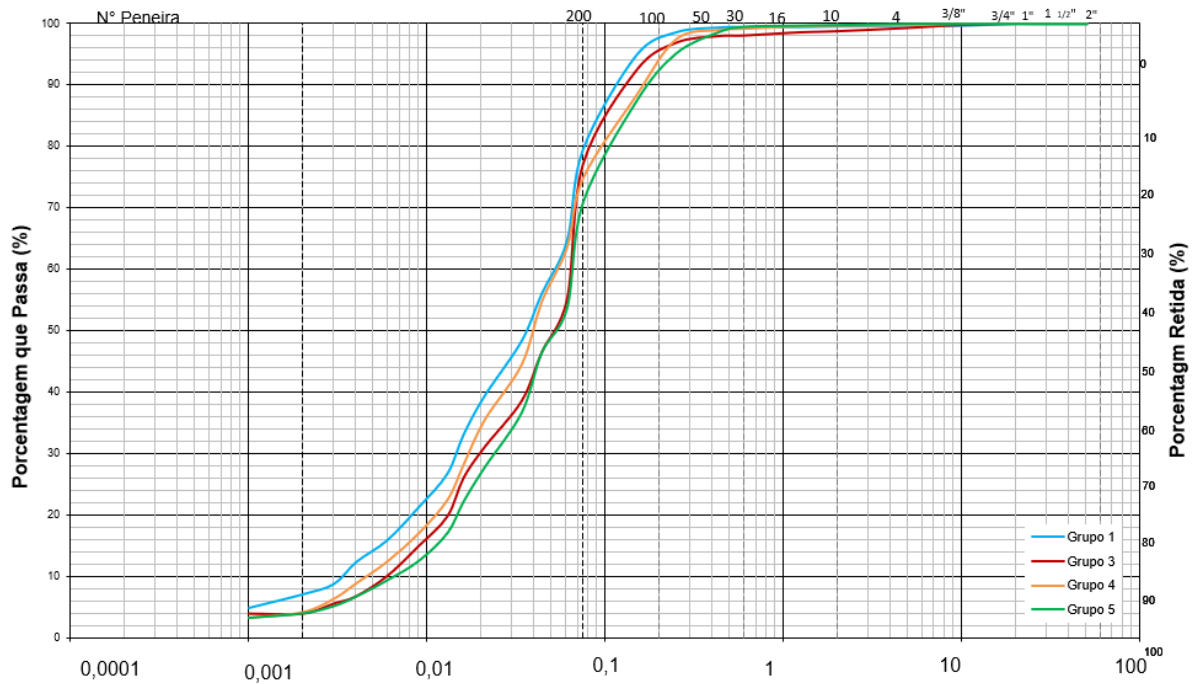


Figura 4-11 - Agrupamento por granulometria das amostras consideradas para a análise da mecânica dos solos dos estados críticos.

Tabela 4-6 - Distribuição granulométrica dos 5 grupos obtidos.

Grupo	Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Média (%)	Areia Grossa (%)	Passante na #200
1	7,0	72,6	19,8	0,1	0,5	79,6
2	3,9	73,2	20,9	0,6	1,4	77,1
3	4,1	70,7	24,2	0,6	0,4	74,8
4	3,9	66,9	27,8	1,1	0,3	70,9

Estabelecidos estes grupos de corpos de prova, o gráfico $e:\log p'$ para determinação da LEC do rejeito foi desenvolvido e encontra-se apresentado na Figura 4-12, onde percebe-se a obtenção de 4 LECs distintas, sendo cada uma delas representativa de um grupo com mesmas características granulométricas. Para facilitar a análise, cada LEC foi plotada a mesma cor da curva granulométrica do grupo correspondente.

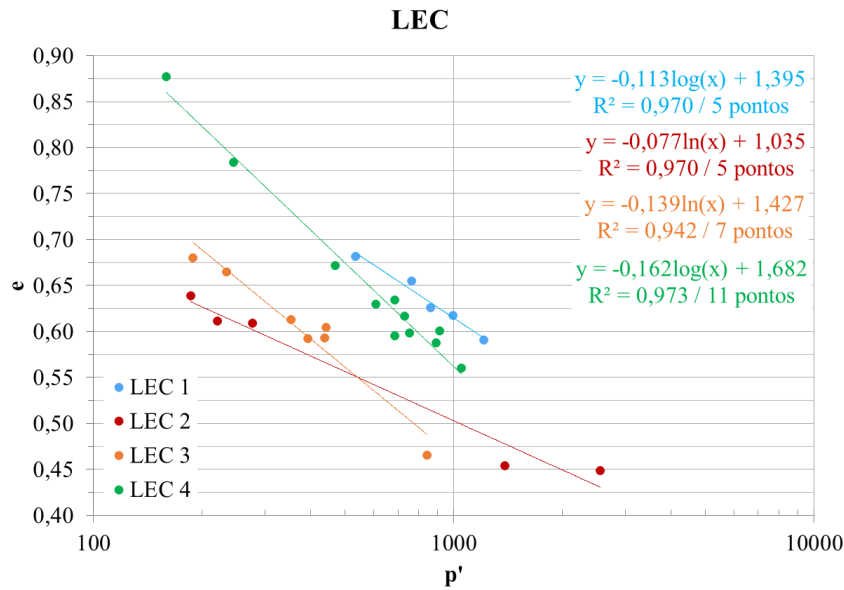


Figura 4-12 - Linhas de Estado Crítico obtidas para o rejeito em estudo no plano $e:p'$ em escala logarítmica.

No estudo desenvolvido em rejeito de minério de ouro por Fourie & Papageorgiou (2001), em que 4 distribuições granulométricas de um rejeito foram analisadas quanto ao estado crítico, a curva com maior percentual de finos apresentou uma LEC posicionada inferior às demais.

Os resultados encontrados na presente pesquisa referentes à existência de diferentes LECs para o mesmo rejeito corroboram com o comportamento mencionado pelos autores supracitados. Percebe-se na Figura 4-12 que a LEC denominada LEC 4 (em verde), está associada ao material com menor teor de finos (Figura 4-11) e se encontra acima das demais LECs obtidas. Enquanto o rejeito com maior teor de finos, identificados como LEC 3 (em vermelho) e LEC 4 (em laranja) se posicionaram abaixo das demais LECs obtidas (Figura 4-12), evidenciando a necessidade de emprego de maior número de ciclos de compactação para atribuir ao material mais fino um comportamento dilatante.

Há uma exceção na análise realizada quando considerada a LEC 1 (em azul). A granulometria representativa para este grupo indicou maior teor de finos presente na amostra, entretanto, a LEC se posicionou acima das demais, assim como o encontrado por Carrera *et al.* (2011), indicando possível mudança de comportamento quando a parcela siltosa é maior. O formato dos grãos e a mineralogia de cada amostra não foram

analisados neste estudo, portanto, estes fatores podem trazer um aspecto adicional para o comportamento distinto neste grupo.

No estudo de Fourie & Papageorgiou (2001), os autores abordam a dificuldade de definir uma única LEC para os rejeitos e recomendam inclusive que, para estes materiais, seja considerado um intervalo de estado crítico, ou seja, a determinação de um Limite Inferior e de um Limite Superior, sendo o intervalo entre esses limites considerado o estado crítico do rejeito.

Coop (2015), Xu & Coop (2017), Li *et al.* (2018) e Li & Coop (2018), também mencionam que a teoria da unicidade da LEC não se aplica aos rejeitos, pois estes são materiais que podem apresentar mudança de comportamento de dilatante para contrátil, e vice-versa, que pode estar associado às variações de distribuição granulométrica, à razão de vazios após a compactação e à forma dos grãos. Características estas que sofrem variações conforme as mudanças das frentes de lavra e alterações no processo de beneficiamento do minério, como mencionado no Capítulo 2.

4.3.2 TRAJETÓRIAS DE TENSÕES

O comportamento dos corpos de prova em relação às LECs é apresentado na Figura 4-13, já as trajetórias de tensões dos corpos de prova são apresentadas Figura 4-14, onde pode ser observado o comportamento dilatante e contrátil de cada corpo de prova considerado para determinação das LECs.

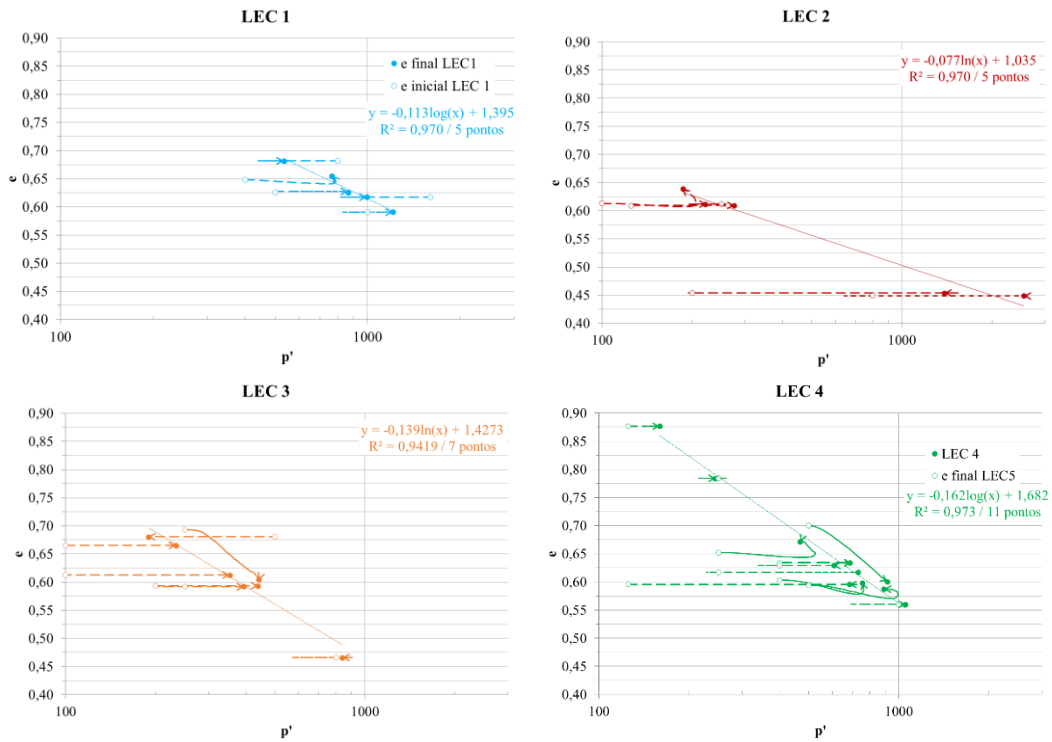


Figura 4-13 – Comportamento dos corpos de prova no plano p':e.

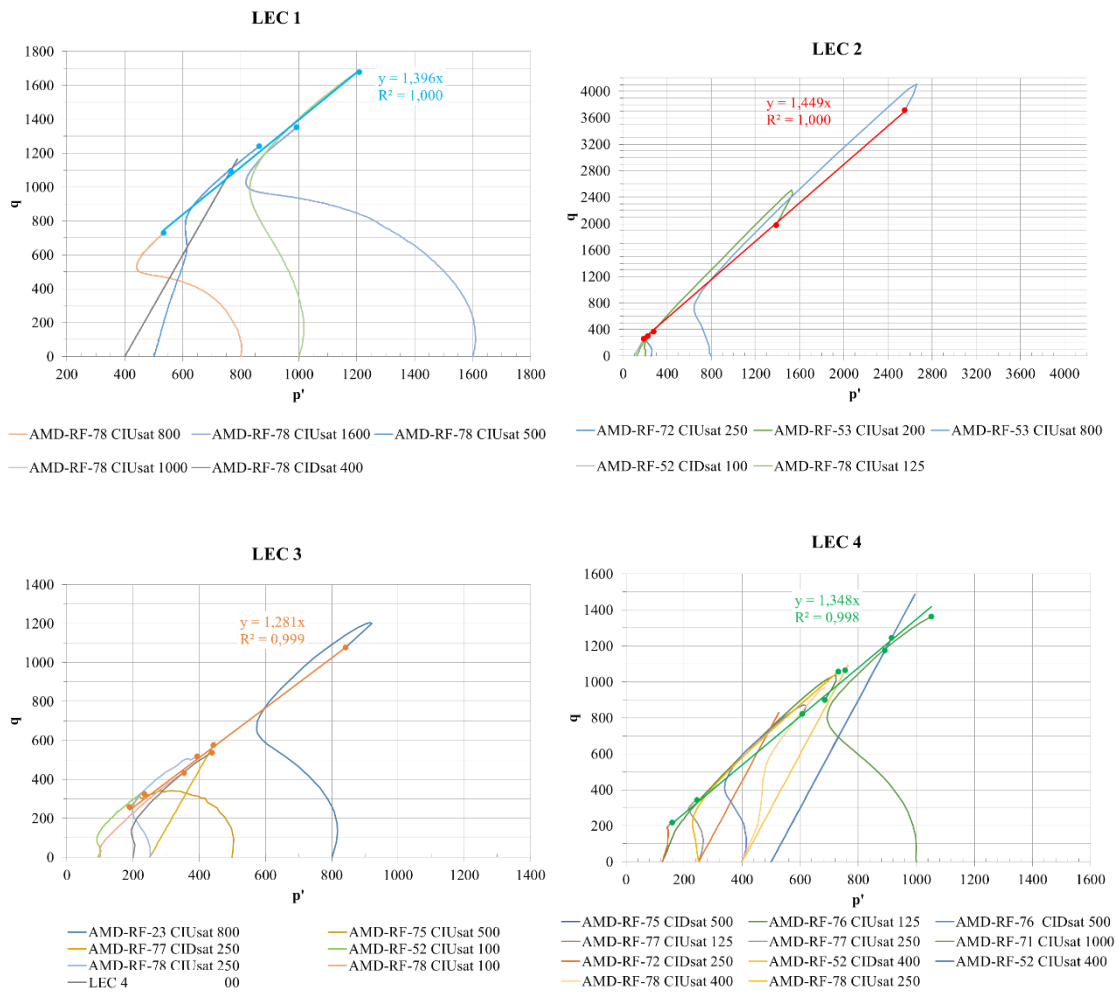


Figura 4-14 - Trajetórias de tensões e envoltórias de ruptura no plano p':q.

4.3.3 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Os resultados experimentais obtidos a partir de ensaios triaxiais drenados e não drenados, sob a ótica da mecânica dos solos do estado crítico são analisados neste item.

Os parâmetros de estado obtidos, que variaram entre -0,3 e 0,12 e a relação com o grau de compactação dos corpos de prova são apresentados em seguida, na Tabela 4-7 e na Figura 4-15. A análise dos parâmetros de estado do rejeito em relação ao grau de compactação do material é fundamental para verificação da segurança da estrutura, uma vez que a compactação adequada pode reduzir a susceptibilidade à liquefação do aterro.

Tabela 4-7 - Parâmetro de estado dos corpos de prova analisados.

LEC	Corpo de Prova	e_a	e_{cc}	GC (%)	ψ	Comportamento em função da TTE
1	AMD-RF-78 CIUsat 500	0,626	0,693	98	-0,07	Dilatante
	AMD-RF-78 CIUsat 800	0,682	0,640	84	0,04	Contrátil
	AMD-RF-78 CIUsat 1000	0,591	0,614	97	-0,02	Dilatante
	AMD-RF-78 CIUsat 1600	0,617	0,561	84	0,06	Contrátil
	AMD-RF-78 CIDsat 400	0,648	0,718	97	-0,07	Dilatante
2	AMD-RF-78 CIUsat 125	0,609	0,663	98	-0,05	Dilatante
	AMD-RF-72 CIUsat 250	0,612	0,610	101	0,00	Contrátil
	AMD-RF-53 CIUsat 200	0,454	0,627	111	-0,17	Dilatante
	AMD-RF-53 CIUsat 800	0,449	0,520	110	-0,07	Dilatante
	AMD-RF-52 CIDsat 100	0,613	0,680	99	-0,07	Dilatante
3	AMD-RF-78 CIUsat 100	0,613	0,788	98	-0,17	Dilatante
	AMD-RF-52 CIUsat 100	0,665	0,788	96	-0,12	Dilatante
	AMD-RF-78 CIUsat 200	0,593	0,692	98	-0,09	Dilatante
	AMD-RF-78 CIUsat 250	0,592	0,661	98	-0,07	Dilatante
	AMD-RF-75 CIUsat 500	0,680	0,564	89	0,12	Contrátil
	AMD-RF-23 CIUsat 800	0,466	0,499	97	-0,03	Dilatante
	AMD-RF-77 CIDsat 250	0,693	0,661	91	0,03	Dilatante
4	AMD-RF-77 CIUsat 125	0,877	0,900	86	-0,02	Contrátil
	AMD-RF-76 CIUsat 125	0,596	0,900	102	-0,30	Dilatante
	AMD-RF-78 CIUsat 250	0,617	0,790	98	-0,17	Dilatante
	AMD-RF-77 CIUsat 250	0,784	0,788	90	0,00	Contrátil
	AMD-RF-52 CIUsat 400	0,629	0,710	96	-0,08	Dilatante

AMD-RF-78 CIUsat 400	0,634	0,710	96	-0,08	Dilatante
AMD-RF-71 CIUsat 1000	0,560	0,560	99	0,00	Dilatante
AMD-RF-72 CIDsat 250	0,652	0,790	99	-0,14	Dilatante
AMD-RF-52 CIDsat 400	0,603	0,710	98	-0,11	Dilatante
AMD-RF-75 CIDsat 500	0,700	0,680	90	0,02	Dilatante
AMD-RF-76 CIDsat 500	0,594	0,680	100	-0,08	Dilatante

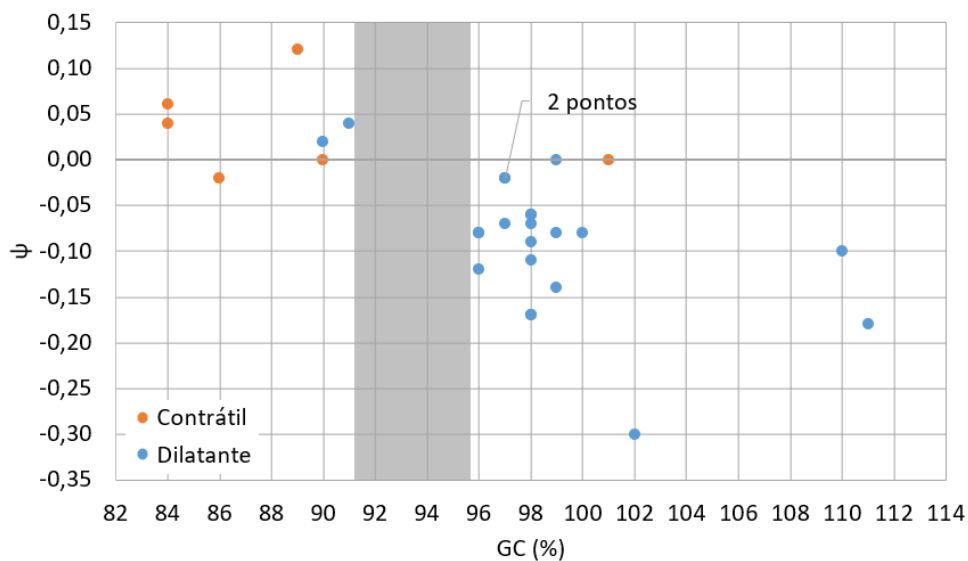


Figura 4-15 - Parâmetro de estado obtido representado em função do grau de compactação de cada corpo de prova.

A análise dos dados apresentados na Tabela 4-7 e na Figura 4-15 permitem as seguintes observações:

- Jefferies & Been (2016) definem que solos em geral que apresentam $\psi < 0$ tendem a comportamento dilatante e sugerem que para os rejeitos esta referência é de $\psi < -0,05$. A análise do comportamento dos corpos de prova ensaiados em função das trajetórias de tensões e a verificação do ψ de cada um deles, mostrou que, para este rejeito, os corpos de prova cujo parâmetro de estado foi inferior a $-0,02$ ($\psi < -0,02$) apresentaram comportamento dilatante.
- O corpo de prova (AMD-RF-71 CIUsat $p'_0=1000$ kPa) com $\psi > -0,02$ ($\psi=0$ e $GC=99\%$) apresentou comportamento dilatante, o que pode estar associado à quebra de grãos em função da tensão aplicada ao corpo de prova (ver Item 2.4).

- Houve uma variação de comportamento entre dilatante e contrátil em três corpos de prova cujo $\psi = 0$, dois dos corpos de prova submetidos a $p'_0=250$ kPa (AMD-RF-72 e AMD-RF-77) apresentaram comportamento contrátil (CG=90% e 101%), enquanto o outro corpo de prova (AMD-RF-71 CIUsat) com $p'_0=1000$ kPa apresentou-se dilatante. Tal mudança de comportamento pode estar associada à quebra de grãos em função da elevada tensão aplicada ao corpo de prova, mencionada também no item anterior.
- Três corpos de prova apresentaram $\psi = -0,02$, sendo que dois deles apresentaram comportamento dilatante (AMD-RF-23 CIUsat $p'_0=800$ kPa e AMD-RF-78 CIUsat $p'_0=1000$ kPa) e o outro comportamento contrátil (AMD-RF-77 CIUsat $p'_0=125$ kPa).
- Analisando a trajetória de tensões efetivas dos corpos de prova ensaiados, 23 deles apresentaram comportamento dilatante e os outros 7 apresentaram comportamento contrátil.
- Dos 6 corpos de prova com $GC \leq 91\%$ submetidos ao ensaio CIUsat, todos apresentaram comportamento contrátil.
- A maior parte dos corpos de prova com $GC \geq 96\%$ apresentaram comportamento dilatante e $\psi < -0,02$, exceto um deles com $GC=101\%$ (AMD-RF-72 CIUsat $p'_0=250$ kPa), $\psi = 0,00$, cuja trajetória de tensões indicou comportamento contrátil.
- Há uma lacuna de resultados necessários entre as condições de compactação no intervalo de GC de aproximadamente 91% a 96%. Intervalo este em que não houve corpos de prova reconstituídos em laboratório. Desta forma, não é possível determinar a partir de qual GC, ou índice de vazios equivalente, ocorre a mudança de comportamento de contrátil para dilatante.

Crystal *et al.* (2018) e Wilson (2021) destacam que a compactação adequada dos rejeitos reduz o potencial de liquefação das pilhas, atribuindo comportamento dilatante aos aterros e que se deve atentar aos cuidados necessários para evitar formação de zonas fofas nas estruturas. Com isso, e, considerando as análises de resultados apresentadas anteriormente, para garantir comportamento dilatante aos aterros executados com esse rejeito, recomenda-se que seja atingido um GC mínimo de 96%.

O resumo dos parâmetros de estado crítico obtidos a partir da interpretação das Linhas de Estado Crítico (LEC) obtidas está apresentado na Tabela 4-8.

Tabela 4-8 - Parâmetros de estado crítico do rejeito estudado.

Autor	Característica do rejeito	LEC	Γ	λ_{10}	M	ϕ_{cs}
Presente pesquisa	Flotação	1	1,395	0,113	1,396	34,5
		2	1,035	0,077	1,449	35,7
		3	1,427	0,139	1,281	31,9
		4	1,682	0,162	1,357	33,4
Bedin (2010)	Flotação – underflow e não ciclonado	-	2,34 – 2,64	0,045 – 0,058	1,33	30,5 a 33
Bonin <i>et al.</i> (2022)	Não informado		0,80	0,066	1,20-1,39	-
Silva (2023)	Flotação – Underflow		2,11	0,069	1,25	31,2
Oliveira <i>et al.</i> (2024)	Flotação – rejeito total		1,97	0,05	1,13	28

Mediante os dados de literatura apresentados no item 2.4 percebe-se que as inclinações das cinco linhas de estado crítico obtidas (λ de 0,077 a 0,162) são superiores aos citados por alguns autores em estudos relacionados ao rejeito de minério de ouro (λ de 0,045 a 0,066).

Já o Γ citado no mesmo item, varia de 0,80 a 2,64, intervalo este em que os resultados obtidos nesta pesquisa se enquadram. A razão de atrito (M) de 1,281 a 1,449 encontra-se ligeiramente superior ao encontrado em literatura (1,13 a 1,39), tal variação é refletida no ângulo de atrito do estado crítico em que o obtido varia entre 31,9° e 35,7° enquanto em literatura há registros de 28° a 33°. Isso pode acontecer pelas variações de granulometria comum entre os rejeitos, o rejeito da presente pesquisa se mostrou levemente mais arenoso que o rejeito dos autores, tendendo a apresentar a razão de atrito superior.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A disposição do rejeito filtrado em pilhas exige uma série de estudos prévios para assegurar a sua estabilidade geotécnica, pois são estruturas que também poderão sofrer liquefação. Desta forma a caracterização do rejeito gerado e a definição de parâmetros geotécnicos obtidos em laboratório são fundamentais para a orientação e definição dos critérios construtivos destas estruturas e devem considerar possíveis expansões das pilhas inicialmente projetadas para determinados volumes e dimensões. Além disto, conforme resultados observados neste estudo e mencionado também por Davies (2011), a revisão periódica destes dados é fundamental para garantir que as metodologias construtivas estejam adequadas às variações que os rejeitos podem apresentar ao longo do tempo.

Esta pesquisa apresentou os resultados dos estudos realizados em aterro experimental e em uma pilha de rejeito filtrado de minério de ouro proveniente da etapa de flotação situada no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.

5.1 ENSAIOS DE CAMPO

Em campo, os ensaios realizados no aterro experimental e na pilha de rejeitos, demonstraram que as variações das metodologias construtivas empregadas, que englobam tipo de equipamento de compactação, número de ciclos de compactação e a variação da espessura da camada, tem influência significativa no grau de compactação obtido (índice de vazios *in situ*), que, por sua vez, influencia no comportamento contrátil ou dilatante durante o cisalhamento.

Tal fato desperta ainda o cuidado necessário para a definição de espessura de camadas, que deve ser tal que evite a formação de zonas fofas e garanta graus de compactação próximos entre o topo e a base de cada camada. Para o caso do rejeito estudado, a limitação da espessura das camadas em 30cm se mostrou mais adequado para garantia de um aterro homogêneo e bem compactado. Para esta pesquisa, o aumento da espessura das camadas de aterro chegou a 50cm de espessura levando a uma redução do grau de compactação alcançado na base.

Além disso, a análises dos ensaios de campo e o encontrado em outros estudos por outros autores, demonstraram que o uso de equipamentos de esteira para compactação das camadas pode ser um problema crítico, pela falta de garantia de uniformidade de compactação em toda a área do aterro. Em função disso, é necessário um controle de

qualidade mais rígido dos aterros compactados com equipamentos de esteira para garantir que toda a área das camadas passará pelas mesmas condições de compactação, principalmente quanto a quantidade necessária de ciclos de compactação.

5.2 CARACTERIZAÇÃO, COMPACTAÇÃO E PERMEABILIDADE DO REJEITO

Com o objetivo de caracterizar o rejeito objeto do presente estudo, campanhas de ensaios de caracterização e compactação foram realizados em amostras coletadas em diferentes momentos da construção de um aterro experimental e durante a operação de uma pilha de rejeito, provenientes de um mesmo processo de beneficiamento.

Estas campanhas mostraram que o rejeito possui distribuição granulométrica silto arenosa e é caracterizado como não plástico. Os valores de densidade real dos grãos (entre 2,791 g/cm³ e 2,940 g/cm³ com média de 2,845 g/cm³), densidade seca máxima média (1,763 g/cm³), teor de umidade ótimo médio (16,5%) e índices de vazios máximo (1,21 a 1,40, sendo a média do $e_{máx} = 1,27$) e mínimo (0,70 e 0,90, sendo a média $e_{mín} = 0,78$) se mostraram aderentes ao encontrado em literatura em outros estudos de rejeito de minério de ouro.

Quanto ao coeficiente de condutividade hidráulica, observou-se uma relação crescente com o índice de vazios do rejeito. Isto acontece independente da condição de preparação dos corpos de prova (talhados ou reconstituídos). Além disso, os ensaios realizados em corpos de prova talhados nas direções vertical e horizontal indicaram comportamento isotrópico do material. Tal característica pode estar relacionada à presença da fração arenosa no rejeito. Os coeficientes de condutividade hidráulica menores podem estar associados à forma mais angular dos grãos, que é uma característica presente nos rejeitos de mineração (Fourie *et al.*, 2022).

5.3 ESTADO CRÍTICO

Os ensaios de compressão triaxial do tipo CIU e CID foram realizados em laboratórios comerciais e os resultados reinterpretados para a análise do estado crítico com o objetivo de determinar a Linha do Estado Crítico (LEC).

Durante o tratamento dos ensaios, em função da variação das curvas granulométricas e, conseqüentemente, dificuldade de determinação de uma única LEC, agruparam-se as amostras segundo o teor de finos (partículas menores que 0,075mm). A partir deste critério, foram definidos 4 grupos distintos de amostras, obtendo-se, conseqüentemente, 4 diferentes LECs.

A variação das LECs pode estar associada às variações das composições granulométricas das amostras, corroborando a literatura recente que aponta a não unicidade da LEC para materiais como rejeitos de mineração. A razão de atrito e os ângulos de atrito no estado crítico obtidos foram ligeiramente superiores aos reportados na literatura, o que pode estar relacionado à presença da fração arenosa no material analisado. O ângulo de atrito do estado crítico (ϕ'_{cs}) variou entre 31,9° e 35,7°.

A análise do rejeito à luz da mecânica dos solos do estado crítico, evidenciou comportamento contrátil quando o grau de compactação (GC) do rejeito é inferior a 96% e mudança de comportamento de dilatante para contrátil em tensões mais elevadas ($p'_0 \geq 1000$ kPa), cabendo aqui estudos complementares para entendimento da possibilidade da ocorrência de quebra de grãos e o efeito desta no comportamento deste rejeito para estas condições de carregamento.

5.4 SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

Como complemento a este estudo e de forma a validar as LECs aqui obtidas reduzindo possíveis incertezas, sugere-se a realização de ensaios de compressão triaxial drenados e não drenados em diferentes condições de carregamento e seguindo os procedimentos que contemplam o uso de base alargada, lubrificada e congelamento dos corpos de prova para obtenção do índice de vazios final, conforme Viana da Fonseca *et al.* (2021).

Além disso, sugere-se realizar ensaios em níveis de tensões mais baixas e em níveis de tensões mais elevadas avaliando a ocorrência de quebra de grãos, visto que se pode verificar a não linearidade de envoltória de tensões e a mudança de comportamento entre contrátil e dilatante (Verdugo, 1992; Verdugo & Ishihara, 1996 e Schnaid *et al.*, 2013).

É importante realizar ensaios de compressão triaxial complementares em corpos de prova moldados com GC entre 91% e 96%, para melhor compreensão do comportamento deste rejeito nessa condição que, apesar de ser encontrada em campo, carece de mais resultados.

Por fim, analisar as variações de mineralogia e formato dos grãos através de metodologias que sejam compatíveis com as características do rejeito pode trazer certa contribuição para entendimento das variações de comportamento do rejeito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. (1995). *NBR 6502: Rochas e solos - Terminologia*. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: ABNT.
- ABNT. (2012). *NBR 16097: Solo — Determinação do teor de umidade — Métodos expeditos de ensaio* (1ª ed.). Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: ABNT.
- ABNT. (2016). *NBR 6457: Solos — Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade* (2ª ed.). Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: ABNT.
- ABNT. (2016). *NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade* (2ª ed.). Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: ABNT.
- ABNT. (2016). *NBR 9604: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas — Procedimento* (2ª ed.). Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: ABNT.
- ABNT. (2017). *NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água* (2ª ed.). Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: ABNT.
- ABNT. (2017). *NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez* (2ª ed.). Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: ABNT.
- ABNT. (2018). *NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica* (2ª ed.). Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: ABNT.
- ABNT. (2020). *NBR 12102: Solo — Controle de compactação pelo método de Hilf* (2ª ed.). Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: ABNT.
- ABNT. (2020). *NBR 16843: Solo - Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos* (1ª ed.). Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: ABNT.
- ABNT. (2020). *NBR 16853: Solo - Ensaio de adensamento unidimensional* (1ª ed.). Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: ABNT.
- ABNT. (2020). *NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação* (2ª ed.). Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: ABNT.
- ABNT. (2021). *NBR 14545: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável* (2ª ed.). Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: ABNT.
- ABNT. (2021). *NBR 16840: Solo — Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos* (1ª ed.). Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: ABNT.
- ABNT. (2024). *NBR 13028: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos*. p. 24.

- Andrade, R. (2022). *Dissertação de mestrado: Comportamento Geotécnico de Rejeito Filtrado de Minério de Ferro de um Aterro Experimental*. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Andrade, R., Amaro da Silva, R., Almeida, M., & Nagula, S. (2024). Evaluation of the liquefaction potential of filtered tailings in a dry stack facility by means of laboratory investigation. *Canadian Geotechnical Journal*, p. 57 p.
- ASTM. (2017). *D2487: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*.
- ASTM. (2020). *D4767: Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils*.
- ASTM. (2020). *D7181: Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils*.
- Atkinson, J. H. (1978). *The Mechanics of Soils - An Introduction to Critical State Soil Mechanics*. Maidenhead, Berkshire, London: McGraw W-Hill Book Company.
- Azevedo, U., Machado, M., & Castro, P. e. (2012). *RIGeo*. Geologia, Belo Horizonte. Fonte: RiGeo.
- Bedin, J. (2010). *Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração*. Porto Alegre.
- Been, K., & Jefferies, M. (1985). A state parameter for sands. *Géotechnique*, v. 35, pp. p. 99 - 112. doi:10.1680/geot.1985.35.2.99
- Bishop, A. W. (1967). Progressive failure – with special reference to the mechanism causing it. *Proceedings of the Geotechnical Conference*, 2, pp. 142-150.
- Bolton, M. D. (1986). The strength and dilatancy of sands. *Géotechnique*, v. 33, pp. p. 65 - 78. doi:10.1680/geot.1986.36.1.65
- Bonin, M., Shaiget, M., Takch, A., & al., e. (2022). In-situ and laboratory site specific geotechnical characterization of hard rock gold mine tailings. *Tailing and Mine Waste*, p. 13 p.
- Boynton, S., & Daniel, D. (1984). Hydraulic Conductivity Tests on Compacted Clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111, pp. 465 - 178 p.
- Cacciuttolo, C., & Atencio, E. (2023). Dry Stacking of Filtered Tailings for Large-Scale Production Rates over 100,000 Metric Tons per Day: Envisioning the Sustainable Future of Mine Tailings Storage Facilities. *Minerals*, p. 30 p. doi:10.3390/min13111445
- Cacciuttolo, C., & Campomanes, G. (2022). Practical Experience of Filtered Tailings Technology in Chile and Peru: An Environmentally Friendly Solution. (Carlito Tabelin, Ed.) *Minerals*, 12(7), p. 889. doi:10.3390/min12070889
- Cardozo, F., Pimenta, M., & Zingano, A. (2016). Métodos construtivos de Barragens de Rejeitos de Mineração - Uma Revisão. *HOLOS*, 8 (32), pp. 77-85. doi:10.15628/holos.2016.5367

- Carneiro, J., Marques, E., Viana da Fonseca, A. J., Ferraz, R., & Oliveira, A. (03 de 2023). Characterization of an Iron Ore Tailing Sample and the Evaluation of Its Representativeness. *Geotechnical and Geological Engineering*, 41, pp. 2833-2852 p. doi:10.1007/s10706-023-02430-8
- Carneiro, J., Marques, E., Viana da Fonseca, A., & Ferraz, R. &. (2023). Characterization of an iron Ore Tailing Sample and the Evaluation of Its Representativeness. *Geotechnical and Geological Engineering*, 41, pp. 2833-2852. doi:10.1007/s10706-023-02430-8
- Carrera, A., Coop, M., & Lancellotta, R. (2011). Influence of grading on the mechanical behavior of Stava tailings. *Géotechnique*, 61(11), pp. 935-946.
- Casagrande, A. (1936). The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, v. 3, pp. 60 - 64.
- Castilho, B. d. (2017). *Dissertação de mestrado: Análise dos gatilhos de liquefação dinâmica e modelagem numérica da barragem do Germano*. Ouro Preto: UFOP/NUGEO.
- Coop, M. R. (2015). Limitations of a critical state framework applied to the behaviour of natural and “transitional” soils. *In Proceedings of the 6th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials*, pp. 115-155 p.
- Coutinho, R. S. (2022). *Dissertação de mestrado: Estudos experimentais e modelo Norsand aplicados a um rejeito de minério de ferro/Renê Souto Coutinho*. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE.
- CPRM. (2003). *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil : texto, mapas & SIG*. (L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti, & J. H. Gonçalves, Eds.) Brasília, Brasil: CPRM - Serviço Geológico do Brasil. doi:ISBN 85-230-0790-3
- Crystal, C., Hore, C., & Ezama, I. (2018). Filter-Pressed Dry Stacking: Design Considerations Based on Practical Experience. *Proceedings Tailings and Mine Waste 2015* (pp. 209 - 219). Keystone: Colorado State University.
- Davies, M. (2011). Filtered Dry Stacked Tailings – The Fundamentals. *Proceedings Tailings and Mine Waste*, p. 9.
- Davies, M. P., & Rice, S. (2001). An Alternative to Conventional Tailings Management – dry stack. *Proceedings of the 8th International Conference on Tailings and Mine Waste*, p. 10 p.
- Delgado, B., Fonseca, A., & Bittar, R. e. (10 de 2023). Geomechanical Behaviour of an Iron Ore Tailings under High-Stress Levels for Disposal by Dry Stacking. *1st International Conference on Geotechnics of Tailings and Mine Waste (ICGTMW)*, p. 10.
- Dias Neto, S., Ferraz, R., da Silva, T., Marques, E., & Pitanga, H. &. (2024). Hydraulic characteristics of Silt-Sized iron Ore Tailings. *Geotechnical and Geological Engineering*, pp. 1-23.

- Fourie, A. (2012). Preventing catastrophic failures and the risks of static liquefaction in tailings storage facilities. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138, pp. 964-971.
- Fourie, A. B., & Papageorgiou, G. (August de 2001). Defining an appropriate steady state line for Merriespruit gold tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(4), pp. 695 - 706 p. doi:10.1139/t00-111
- Fourie, A., Verdugo, R., Bjelkevik, A., & al., e. (05 de 2022). Geotechnics of mine tailings: a 2022 State of the Art. (R. a. Jaksa, Ed.) *International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*(2022), pp. 121 - 183 p.
- Furnell, E., Bilaniuk, K., Goldbaum, M., Shoaib, M., Wani, O., Tian, X., . . . Bobicki, E. (2022). Dewatered and Stacked Mine Tailings: A Review. *ACS ES&T Engineering*, 2, pp. 728-745. doi:10.1021/acsestengg.1c00480
- Gomes, M., Filho, J., Pinheiro, J., & Crystal, C. (2019). Disposal of tailings and the mining industry perspective: a case study of the Cuiabá Mine. *Paste 2019: Proceedings of the 22nd International Conference on Paste* (pp. 219-231). Perth: Australian Centre for Geomechanics.
- Head, K. (1986). *Manual of Soil Laboratory Testing - Volume 3: Effective Stress Tests*. London: Pentech Press.
- Hogg, C. (2010). Filtered tailings in Western Australian iron ore projects — comparison of filtered tailings with other tailings disposal methods. *Proceedings of the 1st International Seminar on the Reduction of Risk in the Management of Tailings and Mine Waste*, p. 10.
- Jefferies, M. G., & Been, K. (2016). Soil liquefaction: a critical state approach. (C. Press, Ed.) p. 712.
- Johns, C., Hussey, A., & Wolf, C. (10 de 2014). Pumpkin Hollow Project dry stack tailings storage facility design. *Tailings and Mine Waste '14*, pp. 269 - 279 p.
- Lambe, T. &. (1969). *Soil Mechanics*. New York, USA: John Wiley & Sons.
- Li, W. C. (26th de July de 2018). The mechanics of a silt-sized gold tailing. *Engineering Geology*, pp. 97-108 p. doi:10.1016/j.enggeo.2018.05.014
- Li, W., & Coop, M. R. (8th de June de 2018). Mechanical behaviour of Panzhihua iron tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, 56(3), pp. 420-435 p. doi:10.1139/cgj-2018-0032
- Lin, S.-Q., Wang, G.-J., Liu, W.-L., & al., e. (2022). Regional Distribution and Causes of Global Mine Tailings Dam Failures. *Metals*, 12(6), 905, p. 19.
- Lobato, L. M., & al., e. (2016). Ouro no Brasil: principais depósitos, produção e perspectivas. Em A. B. Ciências, A. J. Melfi, A. Misi, D. d. Campos, & U. G. Cordani (Eds.), *Recursos Minerais no Brasil - problemas e desafios* (pp. 46-59). Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Academia Brasileira de Ciências e Vale S.A.

- Lobato, L., & Costa, M. (2018). *CODEMGE*. Acesso em 22 de 01 de 2024, disponível em Recursos Minerais de Minas Gerais: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/wp-content/uploads/2018/10/Ouro.pdf>
- Mineradora. (2022). *Relatório de Caracterização de Rejeitos de Flotação*.
- Mineradora. (2023). *Descritivo plantas de beneficiamento - Gerência de Metalurgia*.
- Mineradora. (2023). *Relatório Técnico Aterro Experimental II*.
- Moreno, J., Kendal, S., & Ortiz, A. (2018). Dewatering options for management of fine gold tailings in Western Australian Goldfields. (R. J. Fourie, Ed.) *Paste*, p. 12. doi:10.36487/ACG_rep/1805_34_Moreno
- Oliveira, D., Araújo, T., & Consoli, N. (24 a 27 de 09 de 2024). Estudo do Comportamento Geomecânico de um Rejeito de Mineração de Ouro a Luz do Estado Crítico. *COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, p. 8.
- Preciado, H., Ale, J., Byler, B., & al., e. (10 de 2014). Parametric and sensitivity analysis for a proposed filtered tailings storage facility in challenging topography. *Tailings and Mine Waste '14*, pp. 315 - 325 p.
- Qiu, J., & Sego, D. (2001). Laboratory properties of mine tailings. *Canadian geotechnical Journal*, 38(1), pp. 183-190.
- Reid, D., Dickinson, S., Mital, U., Fanni, R., & Fourie, A. (2021). On some uncertainties related to static liquefaction triggering assessments. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*, 175(2), pp. 181-199. doi:10.1680/jgeen.21.00054
- Rezende, V. (2013). *Dissertação de mestrado: Estudo do Comportamento de Barragem de Rejeito Arenoso Alteada por Montante*. UFOP/NUGEO.
- Rezende, V. A. (2013). *Estudo do comportamento de barragem de rejeito arenoso alteada por montante. Dissertação de M.Sc.* Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil: NUGEO / UFOP.
- Robertson, P. K. (2017). Evaluation of Flow Liquefaction: influence of high stresses. *PBD III - Earthquake Geotechnical Engineering*, p. 9.
- Roscoe, K. H., Schofield, A. N., & Wroth, C. (1958). On the yielding of soils. *Géotechnique*, v. 8, pp. 22 - 53. doi:10.1680/geot.1958.8.1.22
- Santos, J., Groves, D., & Hartmann, L. e. (08 de 05 de 2001). Gold deposits of the Tapajós and Alta Floresta Domais, Tapajós-Parima orogenic belt, Amazon Craton, Brazil. *Mineralium Deposita*, pp. 278-299. doi:10.1007/s001260100172
- Schnaid, F., Bedin, J., Viana da fONSECA, A., & Costa Filho, L. M. (2013). Stiffness and Strength Governing the Static Liquefaction of Tailings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(12), pp. 1943-5606.
- Schofield, A., & Wroth, P. (1968). *Critical State Soil Mechanics*. McGraw-Hill Book Company.

- Silva, C. (2023). *Dissertação de Mestrado: Propriedades Físicas e Geomecânicas à Luz do Estado Crítico de um Rejeito de Ouro*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Engenharia Civil.
- Silva, J., Rissoli, A., Cacciari, P., & al., e. (2024). Triaxial testing response of compacted iron ore tailings considering a broad spectrum of confining pressures. *Soils and Foundations*, 64, p. 15 p.
- Small, A., Witte, A., & Bjelkevik, A. (2024). What Could Tailings Facility Engineering Look Like in 2030? (J. Goodwill, Ed.) *Proceedings of Tailings and Mine Waste 2024*, pp. 3-26.
- Souza, D., & Marinho, F. (2020). Metalogenia do ouro na Província Tapajós-Parima, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências Aplicadas*, 8, pp. 45-62.
- Tassinari, C., & Macambirra, M. (1999). Geocronologia e evolução crustal do Brasil Central. *Revista Brasileira de Geociências*, 29 (2), pp. 345-364.
- Telles, A. (2017). *Análise do comportamento de um rejeito de minério de ferro no estado de regime permanente*. *Disertação de M.Sc.* Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: COPPE / UFRJ.
- Terzaghi, K. P. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3ª ed.). New York: John Wiley & Sons, INC.
- Thevanayagam, S., Shenthnan, T., & Mohan, S. (2002). Undrained Fragility of Clean Sands, Silty Sands, and Sandy Silts. *J. Geotech*, 128(10), pp. 849-859.
- Ulrich, B. (2019). Practical thoughts regarding filtered tailings. (A. F. AJC Paterson, Ed.) *Paste 2019: Proceedings of the 22nd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings*, pp. 71-79. doi:10.36487/ACG_rep/1910_01_Ulrich
- USACE. (1995). *Engineer Manual 1110-2-1991: Construction control for earth and rock-fill dams*. Washington, U.S.A.
- Velten, R., Consoli, N., Filho, H., & al., e. (24 de 06 de 2022). Influence of Grading and Fabric Arising from the Initial Compaction on the Geomechanical Characterisation of Compacted Copper Tailings. *Géotechnique*, p. 45p.
- Verdugo, R. (1992). *Ph.D. Thesis: Characterization of sandy soil behavior under large deformation*. University of Tokyo.
- Verdugo, R., & Ishihara, K. (Junho de 1996). The Steady State of sandy soils. *Soils and Foundations*, 36 (2), pp. 81-91.
- Viana da Fonseca, A., Cordeiro, D., & Molina-Gómez, F. (2021). Recommended Procedures to Assess Critical State Locus from Triaxial Tests in Cohesionless Remoulded Samples. *Geotechnics*, 1(1), pp. 95-127. doi:10.3390/geotechnics1010006
- Vick, S. (1990). Planning, design and analysis of tailings dam. *BiTech*, 2, p. 369. Vancouver. doi:10.14288/1.0394902

- Vitorino, A. (07 de dez de 2017). Mineralização aurífera associada aos veios quartzo-carbonáticos hospedados na unidade máfica basal da jazida Cuiabá, greenstone belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Mineralização aurífera associada aos veios quartzo-carbonáticos hospedados na unidade máfica basal da jazida Cuiabá, greenstone belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil.*, 110. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais.
- Wagner, A. C. (2023). Mechanical behavior of iron ore tailings under standard compression and extension triaxial stress paths. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(7), pp. 1883-1894.
- Walshe, J., & Cleverley, J. (outubro de 2009). Gold Deposits: Where, When and Why. *Elements - An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*, 5, p. 1. doi:10.2113/gselements.5.5.288
- Xu, L., & Coop, M. R. (July de 2017). The mechanics of a saturated silty loess with a transitional mode. *Géotechnique*, 67(7), pp. 581-596 p. doi:10.1680/jgeot.16.P.128
- Yang, S. L. (2006). Instability of sand-silt mixtures. *Can. Geotech. J*, 3, pp. 1213-1219. doi:10.1016/j.soildyn.2004.11.027
- Zorzal, R., Gomes, M., & Pinheiro, J. (2020). Geotechnical Tailings Characterization from Cuiabá Mine Site to Support a Dry Stacking Disposal Design for Cuiabá Dam. *Paste 2020: 23rd Internacional Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings*, p. 13 p. doi:10.36487/ACG_repo/2052_55

**ANEXO I – TABELA COM A RELAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA
SUBMETIDOS AO ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL.**

Tabela I.1 – Corpos de prova submetidos aos ensaios de compressão triaxial.

Identificação da amostra	Tipo do ensaio	Corpo de prova	$\epsilon_{inicial}$	σ_3 (kPa)
AMD-RF-78	CIUsat	Reconstituído	0,882	200
			0,898	400
			0,891	800
			0,895	1600
	CIUsat	Reconstituído	0,628	125
			0,641	250
			0,624	250
			0,633	500
			0,635	1000
			0,643	200
	CIDsat		0,640	400
			0,659	800
AMD-RF-23	CIUsat	Reconstituído	0,858	100
			0,816	200
			0,808	400
			0,796	800
			0,819	1600
	CIUsat	Reconstituído	0,685	100
			0,685	200
			0,685	400
			0,715	800
			0,685	1600
			0,642	100
	CIUsat	Reconstituído	0,704	200
			0,562	400
			0,552	800
			0,643	1600
			0,934	250
			0,811	500
			0,952	1000

Identificação da amostra	Tipo do ensaio	Corpo de prova	$\epsilon_{inicial}$	σ_3 (kPa)
AMD-RF-74	CIUsat	Talhado	0,533	125
			0,591	250
			0,567	500
			0,600	1000
	CIDsat	Talhado	0,566	125
			0,505	250
			0,647	500
			0,650	1000
AMD-RF-75	CIUsat	Talhado	0,807	125
			0,853	250
			0,819	500
			0,911	1000
	CIDsat	Talhado	0,826	125
			0,934	250
			0,811	500
			0,952	1000
AMD-RF-76	CIUsat	Talhado	0,611	125
			0,529	250
			0,557	500
			0,526	1000
	CIDsat	Talhado	0,575	125
			0,581	250
			0,642	500
			0,599	1000
AMD-RF-77	CIUsat	Talhado	0,894	125
			0,808	250
			0,857	500
			0,815	1000
	CIDsat	Talhado	0,800	125
			0,787	250
			0,835	500
			0,822	1000

Identificação da amostra	Tipo do ensaio	Corpo de prova	$\epsilon_{inicial}$	σ_3 (kPa)
AMD-RF-11	CIUsat	Talhado	0,606	125
			0,675	250
			0,672	500
			0,605	1000
	CIDsat	Talhado	0,600	125
			0,621	250
			0,676	500
			0,676	1000
AMD-RF-72	CIUsat	Talhado	0,591	125
			0,630	250
			0,571	500
			0,634	1000
	CIDsat	Talhado	0,638	125
			0,602	250
			0,641	500
			0,660	1000
AMD-RF-71	CIUsat	Talhado	0,586	125
			0,659	250
			0,669	500
			0,633	1000
	CIDsat	Talhado	0,567	125
			0,695	250
			0,605	500
			0,592	1000
AMD-RF-73	CIUsat	Talhado	0,593	125
			0,565	250
			0,634	500
			0,583	1000
	CIDsat	Talhado	0,593	125
			0,646	250
			0,606	500
			0,680	1000

Identificação da amostra	Tipo do ensaio	Corpo de prova	$\epsilon_{inicial}$	σ_3 (kPa)
AMD-RF-53	CIUsat	Talhado	0,463	100
			0,467	200
			0,519	400
			0,483	800
	CIDsat	Talhado	0,444	100
			0,500	200
			0,485	400
			0,478	800
AMD-RF-52	CIUsat	Talhado	0,684	100
			0,589	200
			0,683	400
			0,685	800
	CIDsat	Talhado	0,630	100
			0,718	200
			0,649	400
			0,723	800
AMD-RF-79	CIUsat	Reconstituído	0,633	125
			0,633	250
			0,633	500
			0,633	1000
	CIUsat	Reconstituído	0,667	125
			0,667	250
			0,667	500
			0,667	1000
	CIUsat	Reconstituído	0,633	100
			0,633	200
			0,633	400
			0,633	800
CIUsat	Reconstituído	0,703	100	
		0,703	200	
		0,703	400	
		0,703	800	

ANEXO II – TABELA COM O RESUMO DOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA EXECUTADOS

Tabela II-1 – Resumo da distribuição granulométrica dos ensaios realizados no rejeito.

Amostra	Distribuição granulométrica (ABNT - NBR 6502:1995)					
	argila	silte	areia			pedregulho
			areia fina	areia média	areia grossa	
AMD-RF-01	4,45	65,22	26,96	2,97	0,40	0,00
AMD-RF-02	4,39	63,99	28,96	2,46	0,20	0,00
AMD-RF-03	4,36	65,78	28,85	0,81	0,20	0,00
AMD-RF-04	4,42	59,71	35,06	0,81	0,00	0,00
AMD-RF-05	4,43	66,64	28,51	0,42	0,00	0,00
AMD-RF-06	2,14	59,89	37,22	0,50	0,25	0,00
AMD-RF-07	1,50	61,56	34,94	2,00	0,00	0,00
AMD-RF-08	1,30	54,64	42,06	2,00	0,00	0,00
AMD-RF-09	1,10	60,77	32,13	6,00	0,00	0,00
AMD-RF-11	4,14	53,51	38,05	3,72	0,55	0,00
AMD-RF-17	4,30	48,90	36,10	10,00	0,10	0,00
AMD-RF-18	4,30	49,80	43,60	2,10	0,20	0,00
AMD-RF-22	3,10	49,00	46,90	1,00	0,00	0,00
AMD-RF-52	4,05	52,65	39,24	1,37	2,69	0,00
AMD-RF-53	4,04	52,84	40,27	1,17	1,68	0,00
AMD-RF-54	1,00	74,60	23,10	1,30	0,00	0,00
AMD-RF-55	1,10	70,80	26,50	1,60	0,00	0,00
AMD-RF-56	1,10	74,90	22,70	1,30	0,00	0,00
AMD-RF-57	3,58	48,94	45,94	1,13	0,41	0,00
AMD-RF-59	3,85	52,39	41,72	1,53	0,48	0,00
AMD-RF-60	3,81	56,02	38,51	1,19	0,44	0,00
AMD-RF-66	5,64	61,86	32,50	0,00	0,00	0,00
AMD-RF-67	3,19	54,49	42,32	0,00	0,00	0,00
AMD-RF-68	3,28	67,27	29,45	0,00	0,00	0,00
AMD-RF-69	3,31	56,28	37,41	3,00	0,00	0,00
AMD-RF-70	5,64	61,86	30,00	2,50	0,00	0,00
AMD-RF-71	4,32	49,81	35,01	10,45	0,40	0,00
AMD-RF-72	3,92	46,67	41,87	7,38	0,00	0,00
AMD-RF-78	6,98	58,33	34,02	0,87	0,50	0,00

ANEXO III – TABELA COM O RESUMO DOS ENSAIOS DE DENSIDADE REAL DOS GRÃOS EXECUTADOS

Tabela III-1 – Resumo dos ensaios de densidade real dos grãos realizados no rejeito.

Amostra	Densidade real dos grãos (g/cm ³)	Amostra	Densidade real dos grãos (g/cm ³)
AMD-RF-01	2,800	AMD-RF-53	2,901
AMD-RF-02	2,860	AMD-RF-54	2,839
AMD-RF-03	2,870	AMD-RF-55	2,793
AMD-RF-04	2,820	AMD-RF-56	2,804
AMD-RF-05	2,840	AMD-RF-57	2,890
AMD-RF-06	2,940	AMD-RF-58	2,873
AMD-RF-07	2,870	AMD-RF-59	2,833
AMD-RF-08	2,810	AMD-RF-60	2,878
AMD-RF-09	2,800	AMD-RF-66	2,818
AMD-RF-11	2,873	AMD-RF-67	2,844
AMD-RF-12	2,832	AMD-RF-68	2,811
AMD-RF-17	2,830	AMD-RF-69	2,791
AMD-RF-18	2,843	AMD-RF-70	2,818
AMD-RF-22	2,867	AMD-RF-71	2,833
AMD-RF-52	2,878	AMD-RF-72	2,890

ANEXO IV – TABELA COM O RESUMO DOS ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO PROCTOR NORMAL EXECUTADOS

Tabela IV.1 – resultados obtidos a partir dos ensaios de compactação Proctor normal.

Amostra	Densidade seca máxima (g/cm ³)	Teor de umidade ótimo (%)	Amostra	Densidade seca máxima (g/cm ³)	Teor de umidade ótimo (%)
AMD-RF-02	1,860	14,3	AMD-RF-37	1,714	18,3
AMD-RF-04	1,880	12,2	AMD-RF-38	1,723	18,5
AMD-RF-06	1,880	14,6	AMD-RF-39	1,746	18,6
AMD-RF-07	1,758	15,7	AMD-RF-40	1,807	15,6
AMD-RF-08	1,750	15,1	AMD-RF-41	1,716	16,2
AMD-RF-09	1,770	14,7	AMD-RF-42	1,744	16,2
AMD-RF-10	1,716	16,2	AMD-RF-43	1,770	17,7
AMD-RF-12	1,734	16,2	AMD-RF-44	1,800	15,6
AMD-RF-13	1,847	12,4	AMD-RF-45	1,792	17,2
AMD-RF-14	1,785	16,4	AMD-RF-46	1,797	15,4
AMD-RF-15	1,673	16,5	AMD-RF-47	1,818	14,5
AMD-RF-16	1,775	16,4	AMD-RF-48	1,804	15,0
AMD-RF-17	1,858	12,6	AMD-RF-49	1,792	15,2
AMD-RF-19	1,786	15,8	AMD-RF-50	1,843	15,0
AMD-RF-20	1,791	16,1	AMD-RF-51	1,766	16,5
AMD-RF-21	1,672	17,1	AMD-RF-52	1,776	15,9
AMD-RF-23	1,736	17,8	AMD-RF-54	1,715	18,0
AMD-RF-24	1,791	15,7	AMD-RF-57	1,718	18,1
AMD-RF-25	1,858	17,6	AMD-RF-58	1,749	16,6
AMD-RF-26	1,720	17,3	AMD-RF-59	1,790	16,0
AMD-RF-27	1,722	17,8	AMD-RF-60	1,770	16,0
AMD-RF-28	1,720	17,6	AMD-RF-61	1,825	12,5
AMD-RF-29	1,713	17,9	AMD-RF-62	1,891	12,7
AMD-RF-30	1,716	18,6	AMD-RF-63	1,768	14,8
AMD-RF-31	1,693	19,1	AMD-RF-66	1,783	18,2
AMD-RF-32	1,739	17,9	AMD-RF-67	1,740	17,6
AMD-RF-33	1,696	19,1	AMD-RF-68	1,709	18,4
AMD-RF-34	1,700	18,9	AMD-RF-69	1,716	17,8
AMD-RF-35	1,739	18,2	AMD-RF-70	1,783	18,2
AMD-RF-36	1,717	18,1			

ANEXO V – TABELA COM O RESUMO DOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE EXECUTADOS

Tabela V.1 - Resultados dos ensaios de permeabilidade a carga variável realizados nas amostras deformadas e indeformadas.

Amostra	Tipo da amostra	Índice de vazios	Coeficiente de condutividade hidráulica a carga variável		Anisotropia (Ra=kh/kv)
			Kh (sat) (cm/s)	Kv (sat) (cm/s)	
AMD-RF-12	reconstituída	0,663	-	2,70x10 ⁻⁵	-
AMD-RF-17	reconstituída	0,554	-	2,70x10 ⁻⁵	-
AMD-RF-18	reconstituída	0,561	-	4,50x10 ⁻⁵	-
AMD-RF-22	reconstituída	0,750	-	2,40x10 ⁻⁵	-
AMD-RF-68	reconstituída	1,253	-	7,00x10 ⁻⁴	-
		1,031	-	1,30x10 ⁻⁴	-
		0,828	-	7,00x10 ⁻⁵	-
AMD-RF-11	talhado	0,708	7,43x10 ⁻⁵	7,40x10 ⁻⁵	1,0
AMD-RF-71	talhado	0,632	4,70x10 ⁻⁵	3,15x10 ⁻⁵	1,5
AMD-RF-72	talhado	0,809	1,28x10 ⁻⁴	1,14x10 ⁻⁴	1,1
AMD-RF-73	talhado	0,698	7,05x10 ⁻⁵	6,63x10 ⁻⁵	1,1
AMD-RF-74	talhado	0,573	5,00x10 ⁻⁶	7,90x10 ⁻⁶	0,6
AMD-RF-75	talhado	0,690	8,10x10 ⁻⁶	4,90x10 ⁻⁶	1,6
AMD-RF-76	talhado	0,656	5,20x10 ⁻⁶	8,70x10 ⁻⁶	0,6
AMD-RF-77	talhado	0,700	5,10x10 ⁻⁶	8,40x10 ⁻⁶	0,6