

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

SABRINA TOLEDO DE SOUZA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE REJEITO DE
MINERAÇÃO PARA FINS DE DISPOSIÇÃO EM PILHAS DE REJEITOS
DESAGUADOS**

Ouro Preto

2025

SABRINA TOLEDO DE SOUZA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE REJEITO DE
MINERAÇÃO PARA FINS DE DISPOSIÇÃO EM PILHAS DE REJEITOS
DESAGUADOS**

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

Data da aprovação: 28/08/2025

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira – UFOP

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Daniela Antunes Lessa - UFOP

Ouro Preto

2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S729a Souza, Sabrina Toledo De.

Análise do comportamento geomecânico de rejeito de mineração para fins de disposição em pilhas de rejeitos desaguados. [manuscrito] / Sabrina Toledo De Souza. - 2025.

59 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira.

Coorientadora: Profa. Dra. Daniela Antunes Lessa.

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

1. Rejeitos (Metalurgia). 2. Engenharia geotécnica. 3. Ensaios laboratoriais. I. Ferreira, Lucas Deleon. II. Lessa, Daniela Antunes. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624

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



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA URBANA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Sabrina Toledo de Souza

**Análise do comportamento geomecânico de rejeito de mineração para fins de disposição em pilhas
derejeitos desaguados**

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

Aprovada em 28 de agosto de 2025

Membros da banca

Prof. Dr. - Lucas Deleon Ferreira - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Profa. Dra. - Daniela Antunes Lessa - Coorientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. - Eleonardo Lucas Pereira - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Msc. - Diogo Reis Stavaux Baudson - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Lucas Deleon Ferreira, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de
Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 02/09/2025



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Deleon Ferreira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**,
em 16/09/2025, às 12:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do
[Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site
http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0,
informando o código verificador **0978882** e o código CRC **CD9969B5**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.011872/2025-57

SEI nº 0978882

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: (31)3559-1471 - www.ufop.br

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho e para minha formação acadêmica. Agradeço a Deus pela vida e pelas oportunidades que me foram concedidas ao longo desta trajetória. À minha família, especialmente ao meu pai Rafael, à minha mãe Juliana e ao meu namorado Flávio, pelo amor e apoio incondicional em todos os momentos. Sou grata à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) pela formação e infraestrutura que tornaram possível o desenvolvimento deste estudo. Também agradeço ao CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro e fomento à pesquisa. Um agradecimento especial ao Núcleo de Geotecnia Aplicada (NUGEO), em particular ao Diogo e a todos os técnicos do laboratório, pelo suporte fundamental durante todas as etapas desta pesquisa. Ao meu orientador, Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira, agradeço pelo incentivo, pela orientação dedicada e pelos ensinamentos essenciais para a realização deste trabalho. À minha coorientadora, Prof.^a Dr.^a Daniela Antunes Lessa, sou grata pelo apoio na revisão e aprimoramento do texto. Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta conquista.

Ninguém nasceu no topo da montanha

E a escalada sempre vai ser árdua

Só aquele que resistir o processo

Vai ter direito à vista mais fantástica.

(Resiliência - Tribo da Periferia)

RESUMO

A disposição de rejeitos de mineração em estruturas seguras e sustentáveis é um dos principais desafios da indústria mineral, sobretudo diante da necessidade de reduzir a dependência de barragens convencionais. Este trabalho teve como objetivo analisar a influência do teor de finos no comportamento geomecânico de rejeitos de minério de ferro, com foco em sua aplicação em pilhas drenadas. Para isso, foram realizados ensaios laboratoriais de caracterização física, compactação, adensamento, permeabilidade e resistência ao cisalhamento em diferentes frações de rejeitos. Os resultados demonstraram que a granulometria exerce papel decisivo nas propriedades mecânicas e hidráulicas, influenciando o peso específico, a compressibilidade e a resistência dos materiais. Em especial, verificou-se que maiores teores de finos aumentam a densificação e a resistência sob compactação, mas reduzem a permeabilidade e elevam a compressibilidade. Observou-se ainda que a presença de finos pode favorecer a compactação em proporções controladas, mas exige atenção ao desempenho hidráulico. Conclui-se que a compreensão desses efeitos é fundamental para o dimensionamento seguro de pilhas de rejeitos desaguados, contribuindo para o avanço de práticas mais responsáveis e ambientalmente adequadas na mineração.

Palavras-chaves: Rejeitos de mineração, Geotecnia, Ensaios laboratoriais, Disposição em pilhas drenadas.

ABSTRACT

The safe and sustainable disposal of mining tailings is one of the main challenges in the mining industry, especially given the need to reduce reliance on conventional tailings dams. This study aimed to analyze the influence of fine content on the geomechanical behavior of iron ore tailings, with a focus on their application in drained tailings stacks. Laboratory tests were conducted on different tailings fractions, including physical characterization, compaction, consolidation, permeability, and shear strength. The results showed that particle size distribution plays a decisive role in mechanical and hydraulic properties, affecting unit weight, compressibility, and material strength. In particular, higher fine content increases densification and strength under compaction but reduces permeability and raises compressibility. It was also observed that fine content can enhance compaction when properly controlled, but requires careful attention to hydraulic performance. The study concludes that understanding these effects is essential for the safe design of drained tailings stacks, contributing to the development of more responsible and environmentally sound mining practices.

Keywords: Mining tailings, Geotechnics, Laboratory tests, Drained stacking.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma do processamento de rejeitos de minério de ferro	17
Figura 2: Fluxograma dos ensaios realizados	25
Figura 3: Etapa de quarteamento	27
Figura 4: Separação granulométrica	28
Figura 5: Materiais utilizados	31
Figura 6: Corpo de prova desmoldado	32
Figura 7: Corpo de prova pronto para o ensaio	33
Figura 8: Curvas granulométricas.	36
Figura 9: Granulometria à Laser	38
Figura 10: Curvas de Compactação	38
Figura 11: Curva de Adensamento do Rejeito Total	40
Figura 12: Curva de Adensamento do Rejeito Grosso	41
Figura 13: Tensão x Deformação – RT CID	44
Figura 14: Variação Volumétrica - RT CID	44
Figura 15: Trajetória de Tensões - RT CID	45
Figura 16: Círculos de Mohr - RT CID	45
Figura 17: Tensão x Deformação - Rg CID	46
Figura 18: Variação volumétrica - Rg CID	46
Figura 19: Trajetória de tensões - Rg CID	47
Figura 20: Círculos de Mohr - Rg CID	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo das propriedades geotécnicas dos materiais utilizados	35
Tabela 2: Resumo da análise mineralógica dos rejeitos	36
Tabela 3: Composição das Misturas	37
Tabela 4: Propriedades das Misturas	39
Tabela 5: Valores do Coeficiente de Permeabilidade	42
Tabela 6: Variação do índice de vazios em função da tensão vertical	43
Tabela 7: Parâmetros de Resistência - CID	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Relação das normas técnicas de referência para os ensaios realizados	27
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

A – Argila

AF – Areia Fina

AG – Areia Grossa

Al_2O_3 – Óxido de Alumínio

AM – Areia Média

ANM – Agência Nacional de Mineração

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

B – Coeficiente de Saturação (*Skempton*)

c – Intercepto Coesivo

CaCl_2 – Cloreto de Cálcio

Cc – Índice de Compressão

C/D – Com Defloculante

CEE – Condutividade Elétrica Equivalente

CID – *Consolidated Isotropically Drained*

Cr – Índice de Recompressão

CTGA – Centro Tecnológico de Geotecnia Aplicada

DRX – Difração de Raios X

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Fe_2O_3 – Óxido de Ferro (III)

Gs – Peso Específico Relativo das Partículas Sólidas

H_2O – Água

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

ICMM – *International Council on Mining and Metals*

k_{20° – Coeficiente de Permeabilidade a 20°C

KCl – Cloreto de Potássio

L – Granulometria a Laser

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

MT – *Moist Tamping*

NBR – Norma Brasileira (da ABNT)

NL – Não Líquido

NP – Não Plástico

NUGEO – Núcleo de Geotecnia Aplicada da UFOP

P – Pedregulho

pH – Potencial Hidrogeniônico

QF – Quadrilátero Ferrífero

Rf – Rejeito Fino

Rg – Rejeito Grosso

RT – Rejeito Total

S – Silte

S/D – Sem Defloculante

SiO₂ – Dióxido de Silício

TSFs – *Tailings Storage Facility* (Instalação de Armazenamento de Rejeitos)

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

UFV – Universidade Federal de Viçosa

w_{ot} – Teor de Umidade Ótimo

γ_d – Peso Específico Aparente Seco

γ_s – Peso Específico dos Sólidos

σ – Tensão Normal

σ' – Tensão Efetiva

σ_1 – Tensão Principal Maior

σ_3 – Tensão Confinante

σ_d – Tensão Desviadora

τ – Tensão Cisalhante

ϕ – Ângulo de Atrito Interno

SUMÁRIO

1.	Introdução	16
1.1.	Objetivo.....	18
1.1.1.	Objetivos específicos	18
1.2.	Justificativa.....	18
1.3.	Estrutura do texto	19
2.	Revisão da literatura	20
2.1.	Rejeitos de mineração	20
2.2.	Formas de disposição de rejeitos	21
2.3.	Comportamento geomecânico.....	23
3.	Materiais e métodos.....	25
3.1.	Caracterização do rejeito utilizado.....	26
3.2.	Preparação das amostras	27
3.3.	Ensaio de granulometria	28
3.4.	Ensaio de Compactação.....	29
3.5.	Ensaio de Adensamento.....	30
3.6.	Ensaio de Permeabilidade.....	30
3.7.	Moldagem dos corpos de prova	31
3.8.	Ensaio Triaxiais	32
4.	Resultados e Discussões	34
4.1.	Caracterização dos rejeitos.....	34
4.1.1.	Caracterização das misturas.....	37
4.2.	Ensaio de compactação	38
4.3.	Ensaio de Adensamento.....	40
4.4.	Ensaio de Permeabilidade.....	42

4.5. Ensaio Triaxial	43
4.6. Discussão geral dos resultados.....	49
5. Conclusão	52
5.1. Sugestões para trabalhos futuros.....	53

1. INTRODUÇÃO

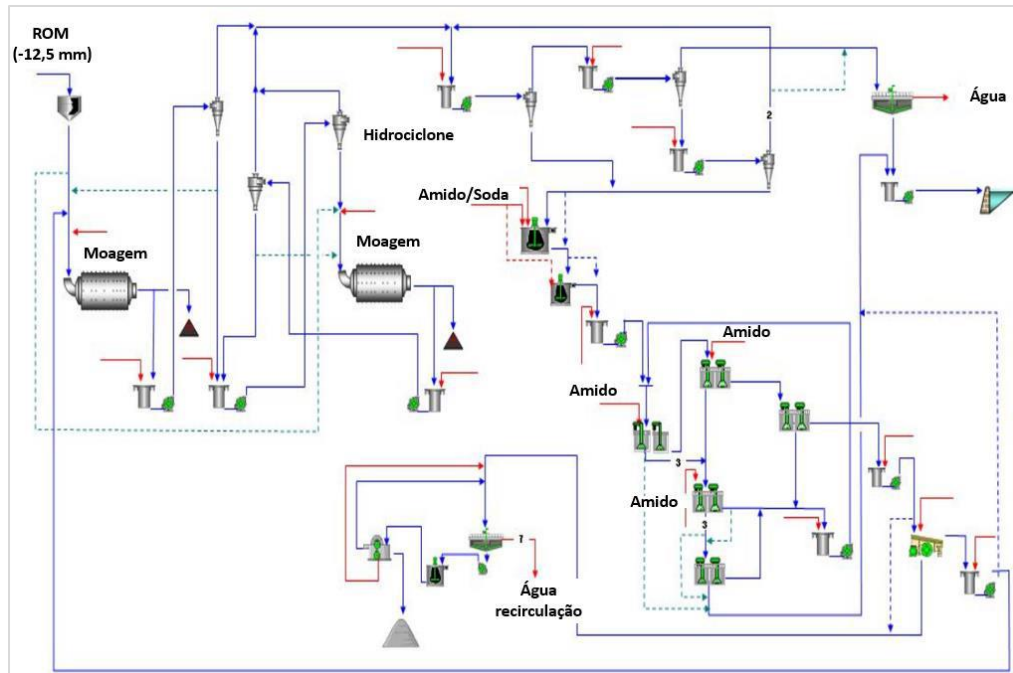
A mineração desempenha um papel fundamental na economia brasileira, sendo o minério de ferro um dos principais produtos exportados pelo país. Em 2023 e 2024, aproximadamente 378 e 389 milhões de toneladas desse minério foram exportadas, respectivamente, representando cerca de 59,4% do faturamento total do setor mineral (IBRAM, 2024). O Quadrilátero Ferrífero, localizado em Minas Gerais, destaca-se como uma das principais províncias minerais do mundo, concentrando grande parte da produção nacional de minério de ferro (GUIMARÃES, 2011).

A intensificação da atividade mineral no Brasil tem resultado na geração de volumes expressivos de rejeitos, subprodutos do beneficiamento do minério. A disposição adequada desses materiais é essencial para mitigar impactos ambientais e riscos geotécnicos. Tradicionalmente, os rejeitos têm sido armazenados em Instalações de Armazenamento de Rejeitos (TSFs – *Tailings Storage Facilities*), predominantemente por meio de barragens. Contudo, os rompimentos das barragens de Fundão, em Mariana (2015), e do Córrego do Feijão, em Brumadinho (2019), evidenciaram os riscos associados a essa prática, ocasionando impactos socioambientais severos e motivando mudanças significativas no setor. Em resposta, a Agência Nacional de Mineração (ANM) publicou diversas resoluções, como as de nº 13/2019, 95/2022, 130/2023 e 175/2024, que incluem a proibição de barragens alteadas a montante e a restrição de outras formas de barramento.

Diante desse novo cenário, métodos alternativos de disposição às barragens, como o empilhamento drenado de rejeitos filtrados (*dry stacking*) e a disposição em cavas exauridas (*in-pit disposal*), têm ganhado relevância. A adoção dessas alternativas requer estudos aprofundados sobre o comportamento dos rejeitos, sobretudo no que se refere ao desempenho sob diferentes condições de compactação e carregamento. A compreensão das propriedades geomecânicas e hidráulicas desses materiais é fundamental para o projeto seguro de estruturas de contenção. (FREIRE, 2022).

Durante o beneficiamento dos minérios de ferro, são gerados resíduos com diferentes características granulométricas, conforme ilustrado na Figura 1. Os resíduos da etapa de deslamagem são denominados lamas e apresentam partículas mais finas (diâmetro < 0,075 mm), enquanto os rejeitos granulares, oriundos da concentração, possuem partículas mais grossas. A combinação desses dois materiais dá origem ao rejeito total. (SILVA, 2017).

Figura 1: Fluxograma do processamento de rejeitos de minério de ferro



Fonte: Adaptado de Freire, 2022.

Neste contexto, a questão que norteia este estudo é: *como as propriedades geomecânicas e hidráulicas de um rejeito de minério de ferro são influenciadas por diferentes proporções de finos?* A resposta a essa pergunta envolve avaliar a influência do teor de finos na resistência ao cisalhamento, na permeabilidade e no comportamento tensão-deformação do material.

Estudos indicam que o aumento da fração de finos pode alterar significativamente a microestrutura do rejeito, interferindo nos mecanismos de transmissão de tensões e nos contatos entre partículas. Em materiais arenosos, quantidades moderadas de finos podem promover o intertravamento e aumento a resistência. No entanto, teores elevados, especialmente com presença de finos plásticos, tendem a reduzir a permeabilidade, aumentando a suscetibilidade à liquefação e comprometendo a estabilidade (SANTOS et al., 2020; FREIRE, 2022).

Sob diferentes condições de confinamento, os rejeitos apresentam comportamentos distintos: tensões mais baixas tendem a resultar em resposta dúctil, enquanto tensões mais elevadas induzem comportamento frágil, com picos de resistência mais evidentes. Esse padrão, relacionado às variações volumétricas e ao índice de vazios, já foi observado em ensaios

triaxiais drenados realizados por Freire (2022), que identificou transição de comportamento dilatante para contrátil conforme aumentavam as tensões confinantes.

Quando os finos preenchem eficientemente os vazios entre as partículas maiores, observa-se ganho de resistência devido ao efeito de intertravamento. Entretanto, quando o material apresenta excesso de finos e baixa permeabilidade, sua estabilidade é consideravelmente prejudicada. Esse comportamento já foi relatado em estudos sobre rejeitos de minério de ferro, nos quais teores moderados de finos melhoram a resistência ao cisalhamento, enquanto teores elevados comprometem a estabilidade do material (FREIRE, 2022).

A hipótese central deste estudo é que diferentes proporções de lama e rejeito granular influenciam de forma significativa o comportamento geomecânico e as propriedades hidráulicas do rejeito total. Essa influência decorre, principalmente, das variações granulométricas e do teor de finos, que afetam diretamente os parâmetros de resistência, permeabilidade e estabilidade do material sob diferentes condições de tensão e umidade.

1.1. OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é analisar a influência a fração de finos no comportamento geomecânico de um rejeito de minério de ferro, visando sua disposição em pilhas de rejeitos desaguados.

1.1.1. Objetivos específicos

- Fazer a caracterização física e mecânica de um rejeito de minério de ferro por meio de ensaios laboratoriais.
- Avaliar a influência da fração de finos no comportamento geomecânico do rejeito, com base nos resultados de ensaios de adensamento e triaxiais realizados em amostras reconstituídas com diferentes proporções.
- Investigar o efeito das tensões confinantes no comportamento mecânico do rejeito.

1.2. JUSTIFICATIVA

A disposição de rejeitos de mineração representa um dos principais desafios da indústria mineral, sobretudo após os desastres ocorridos em Minas Gerais e as subsequentes restrições normativas ao uso de barragens de rejeito (ICMM, 2020; ANM, 2019). Nesse contexto, técnicas alternativas de disposição de rejeitos filtrados, como o empilhamento drenado (*dry*

stacking), têm ganhado destaque por oferecerem maior segurança e sustentabilidade. No entanto, a efetividade e estabilidade dessas estruturas dependem do entendimento detalhado do comportamento geomecânico dos materiais que as compõem.

A composição granulométrica e, em especial o teor de finos dos rejeitos têm influência direta nos parâmetros de resistência ao cisalhamento e permeabilidade. Estudos indicam que proporções adequadas de finos podem melhorar a coesão e a densificação do material. Por outro lado, teores excessivos, sobretudo de finos plásticos, podem comprometer a resistência e favorecer a ocorrência de instabilidades, especialmente sob condições de elevada saturação. (SILVA, 2017; FREIRE, 2022; SANTOS et al., 2020).

Diante disso, este estudo se justifica pela necessidade de investigar, de forma sistemática e experimental, como variações no teor de finos afetam o desempenho mecânico e hidráulico dos rejeitos. Os resultados obtidos poderão fornecer subsídios técnicos para o projeto e a operação de pilhas de rejeitos desaguados, contribuindo para a elaboração de diretrizes mais seguras e eficazes no âmbito da Geotecnia aplicada à mineração.

Além da relevância técnica, a pesquisa também assume um papel estratégico ao apoiar a gestão sustentável dos rejeitos, minimizando impactos ambientais e sociais associados a atividade mineral. A geração de dados confiáveis sobre o comportamento desses materiais pode fortalecer a segurança das operações e ampliar a adoção de tecnologias alternativas às barragens convencionais.

1.3. ESTRUTURA DO TEXTO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, além dos elementos pré e pós-textuais. O **Capítulo 1** apresenta a introdução, contextualizando o tema, os objetivos da pesquisa, sua justificativa e a organização do trabalho. O **Capítulo 2** corresponde à revisão da literatura, abordando os principais conceitos relacionados aos rejeitos de mineração, às formas de disposição e ao comportamento geomecânico desses materiais. O **Capítulo 3** descreve os materiais utilizados e os procedimentos metodológicos adotados para a execução dos ensaios laboratoriais. O **Capítulo 4** apresenta e discute os resultados obtidos, com base na comparação com dados da literatura. Por fim, o **Capítulo 5** traz as conclusões do estudo, destacando as principais contribuições da pesquisa, suas limitações e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A disposição de rejeitos de mineração é um dos principais desafios enfrentados pela indústria mineral, devido à necessidade de garantir estruturas seguras e minimizar os impactos ambientais. Para compreender o comportamento mecânico e hidráulico dos rejeitos, é essencial analisar suas características físicas e mineralógicas, além das diferentes formas de disposição utilizadas na indústria. Este capítulo aborda, inicialmente, a definição e classificação dos rejeitos de mineração, considerando a influência da granulometria e do teor de finos nas propriedades físicas e mecânicas. Em seguida, são apresentadas as principais formas de disposição de rejeitos, incluindo barragens, empilhamento drenado e disposição em cava, destacando as vantagens e desafios associados a cada método. Por fim, discute-se o comportamento geomecânico dos rejeitos, com ênfase nos parâmetros de resistência ao cisalhamento e permeabilidade, considerando a influência das tensões confinantes e da interação entre as partículas.

2.1. REJEITOS DE MINERAÇÃO

Os rejeitos de mineração são materiais descartados após o processo de beneficiamento do minério, gerados principalmente por processos como flotação, separação magnética e britagem (GUIMARÃES, 2011). Sua origem está diretamente relacionada à separação das partículas de maior interesse econômico do material bruto, constituindo-se em um dos principais desafios ambientais e geotécnicos da indústria mineral.

Quanto à granulometria, os rejeitos podem ser classificados em dois grupos principais: rejeitos arenosos, compostos principalmente por partículas mais grossas como areia ($> 0,075$ mm), e rejeitos argilosos, formados predominantemente por partículas finas de tamanho silte e argila ($< 0,075$ mm) (GUIMARÃES, 2011; SILVA, 2017). Essa classificação tem implicações diretas nas propriedades hidráulicas e mecânicas do material.

A mineralogia dos rejeitos de minério de ferro inclui predominantemente hematita e magnetita, que apresentam comportamentos geotécnicos distintos (GUIMARÃES, 2011). A presença de minerais acessórios, como quartzo, caulinita e goethita, altera substancialmente suas propriedades. O quartzo aumenta a permeabilidade dos rejeitos grossos, enquanto a caulinita, presente na fração fina, eleva a plasticidade e capacidade de retenção hídrica (SILVA, 2017). Rejeitos arenosos, com composição granulométrica mais grossa, possuem

maior permeabilidade, o que facilita a drenagem. Por outro lado, rejeitos argilosos apresentam menor permeabilidade, maior retenção de água e, consequentemente, maior risco de instabilidade (GUIMARÃES, 2011; FREIRE, 2022). Silva (2017) destaca que a presença de minerais argilosos, como a caulinita, agrava esses efeitos devido à sua elevada retenção hídrica e comportamento plástico.

A umidade e o teor de finos nos rejeitos são fatores determinantes para o comportamento geomecânico dos rejeitos. Materiais com alta umidade e elevado teor de finos tendem a apresentar menor resistência ao cisalhamento e maior compressibilidade, comprometendo a estabilidade quando dispostos em pilhas (GUIMARÃES, 2011). Freire (2022) mostra que essa relação não é linear: a natureza dos finos - plásticos ou não plásticos - influencia significativamente o desempenho do material. Finos não plásticos, em proporções adequadas (20-30%), podem melhorar as propriedades geotécnicas por efeito de intertravamento entre partículas de diferentes tamanhos. Já os finos plásticos (presença de argilominerais) reduzem a resistência e aumentam a susceptibilidade à liquefação (FREIRE, 2022). A saturação também surge como fator crítico, podendo reduzir drasticamente a resistência ao cisalhamento (FREIRE, 2022).

Essas propriedades físicas e mineralógicas influenciam diretamente na escolha das técnicas de disposição e as estratégias a fim de se garantir a segurança das estruturas de contenção. A caracterização adequada dos rejeitos, considerando aspectos granulométricos, mineralógicos e de umidade, é essencial para mitigar os riscos geotécnicos e ambientais, especialmente em métodos alternativos como o empilhamento desaguado, que vem ganhando destaque frente às barragens convencionais (SILVA, 2017; FREIRE, 2022).

2.2. FORMAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

A disposição adequada de rejeitos de mineração constitui um desafio complexo, exigindo soluções técnicas que conciliem segurança operacional e sustentabilidade ambiental. Guimarães (2011) destaca que a escolha do método de disposição deve considerar não apenas aspectos econômicos, mas principalmente as características físico-químicas e geotécnicas dos materiais, com especial atenção à distribuição granulométrica e sua influência na permeabilidade (SILVA, 2017). Nesse contexto, a indústria mineral dispõe de diferentes alternativas, cada uma com suas vantagens e limitações.

As barragens de rejeitos representam o método tradicionalmente mais utilizado no Brasil, consistindo na contenção de materiais em suspensão aquosa por meio de estruturas de terra compactada. Segundo Guimarães (2011), essa técnica permite o armazenamento de grandes volumes a custos relativamente baixos, porém apresenta riscos geotécnicos crescentes com o aumento do teor de finos. Freire (2022) complementa que a heterogeneidade dos rejeitos, com variações significativas na granulometria e no teor de umidade, pode comprometer a estabilidade das estruturas ao longo do tempo, exigindo sistemas de monitoramento sofisticados e manutenção constante (SILVA, 2017).

Como alternativa mais segura, o empilhamento de rejeitos desaguados vem ganhando espaço na indústria mineral, especialmente para materiais com teores de finos entre 20-35% (FREIRE, 2022). Nesse método, os materiais passam por processos de desaguamento antes da disposição, resultando em um produto com menor teor de umidade e maior estabilidade geotécnica. Freire (2022) ressalta que essa técnica permite um controle mais preciso dos parâmetros do material, exigindo cuidados em relação à umidade durante a compactação e em sistemas de drenagem dimensionados conforme a condutividade hidráulica específica (SILVA, 2017). A compactação em camadas é essencial para o sucesso dessa abordagem, (GUIMARÃES, 2011), cujas principais vantagens incluem redução do risco de liquefação e da área necessária para disposição (até 70% menos em relação às barragens convencionais).

A disposição em cavas exauridas é outra opção viável, especialmente em minerações a céu aberto. Essa técnica aproveita os espaços já impactados pela lavra, reduzindo a necessidade de novas áreas. No entanto, como alerta Freire (2022), exige cuidados especiais com a impermeabilização da cava e monitoramento da qualidade das águas subterrâneas, sendo fundamental a compatibilidade entre a mineralogia dos rejeitos e a rocha encaixante, para evitar contaminação de aquíferos (SILVA, 2017).

A comparação entre esses métodos revela que o empilhamento desaguado apresenta vantagens significativas em relação às barragens convencionais, sobretudo em termos de segurança operacional e uso do solo. Guimarães (2011) destaca a redução de até 70% na área ocupada, além da diminuição significativa nos riscos de acidentes catastróficos. Por outro lado, Freire (2022) ressalta que o empilhamento de rejeitos filtrados exige investimentos iniciais mais elevados em equipamentos (para o desaguamento e filtragem) e gastos com transporte, além de um controle rigoroso das características do material ao longo de todo o processo.

A escolha do método mais adequado deve considerar aspectos técnicos, econômicos e ambientais. Como destacam Guimarães (2011), Freire (2022) e Silva (2017), fatores como a vida útil da mina, volume de rejeitos gerados, clima regional, aspectos sociais e propriedades hidráulicas do material devem ser criteriosamente avaliados. Independente da técnica adotada, o monitoramento contínuo das propriedades geotécnicas e hidráulicas é requisito essencial para a segurança das estruturas (GUIMARÃES, 2011), sendo a abordagem integrada um pilar da sustentabilidade da mineração.

2.3. COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO

O comportamento geomecânico dos rejeitos de mineração apresenta complexidades que exigem análise criteriosa (GUIMARÃES, 2011; FREIRE, 2022; SILVA, 2017). Esses materiais possuem características que influenciam diretamente sua resposta mecânica quando submetidos a esforços, sendo essa resposta determinada pela interação entre as partículas.

Guimarães (2011) aponta que as propriedades geotécnicas dos rejeitos são definidas principalmente por sua composição granulométrica e mineralógica. O autor ressalta que rejeitos arenosos, com predominância de partículas grossas, tendem a apresentar comportamento mais estável e boa drenagem. Já os materiais ricos em frações finas exibem maior compressibilidade e retenção hídrica, o que afeta negativamente sua estabilidade em pilhas de disposição.

Freire (2022) aprofunda essa análise ao demonstrar, por meio de ensaios laboratoriais, que a microestrutura dos rejeitos – especialmente o arranjo partícula-partícula – é sensível à presença de finos plásticos, que formam estruturas instáveis quando saturados. Rejeitos ricos em argilas apresentam maior susceptibilidade à liquefação, fenômeno que compromete a estabilidade das estruturas, sobretudo em ambientes com alta pluviosidade.

Ensaio triaxiais realizados por Freire (2022) revelaram que a resistência ao cisalhamento varia de forma não linear com o teor de finos. Materiais com proporções balanceadas (20-35% de finos) apresentam desempenho superior devido ao preenchimento eficiente dos vazios entre as partículas grossas. Contudo, em tensões confinantes elevadas, pequenos aumentos no teor de umidade podem resultar em quedas significativas na resistência (SILVA, 2017).

A umidade é outro fator determinante. Guimarães (2011) destaca que a água interfere diretamente na resistência ao cisalhamento, particularmente em rejeitos finos. Freire (2022)

mostra que a umidade não afeta apenas a resistência imediata, mas também a estabilidade a médio e longo prazo, podendo causar deformações progressivas. A permeabilidade, fortemente influenciada pela granulometria (SILVA, 2017), é menor em materiais mal graduados e com excesso de finos, o que favorece a saturação e aumenta o risco de instabilidade (GUIMARÃES, 2011).

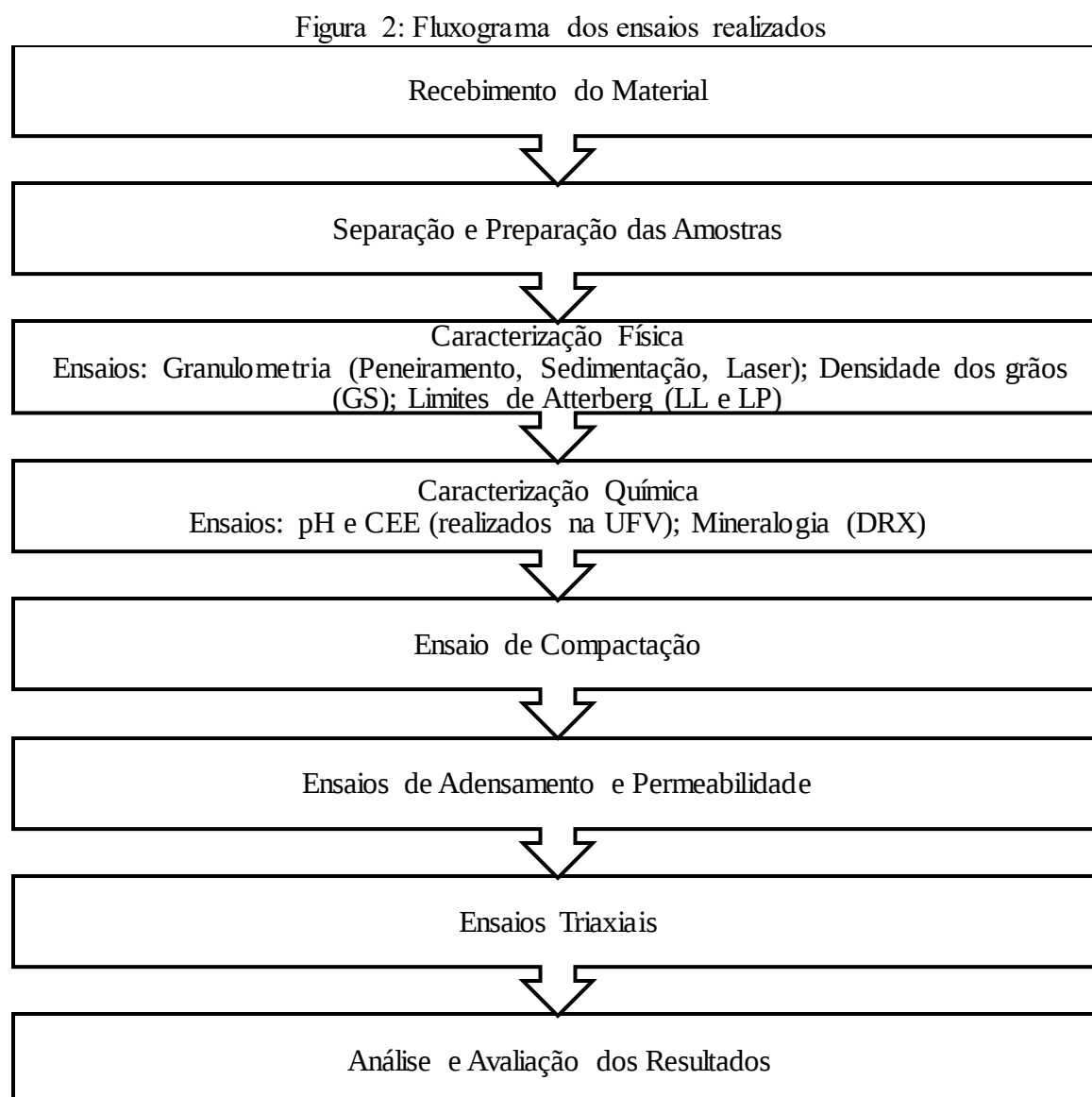
Dessa forma, a interação entre granulometria, teor de finos e umidade configura um cenário complexo, que demanda uma abordagem multidisciplinar. Guimarães (2011) defende que a caracterização geotécnica dos rejeitos deve contemplar não apenas os parâmetros convencionais, mas também aspectos como a mineralogia das frações finas e sua resposta às variações de umidade. Essa perspectiva é reforçada pelos trabalhos de Freire (2022), cujos ensaios em condições controladas permitiram estabelecer correlações entre a composição do material e seu desempenho mecânico, assim como pelos estudos de Silva (2017), que destacam a influência da mineralogia fina nas propriedades hidráulicas.

A compreensão desses fatores torna-se fundamental para a escolha adequada dos métodos de disposição. Como ressaltam ambos os autores mencionados, o comportamento geomecânico dos rejeitos deve ser considerado desde a fase de projeto das estruturas de contenção, com especial atenção ao controle da superfície freática e às condições locais que possam comprometer a estabilidade do sistema. Essa abordagem integrada, que reúne análise microestrutural, caracterização hidráulica e avaliação de parâmetros mecânicos, revela-se essencial para assegurar a segurança e o desempenho das estruturas ao longo de sua vida útil.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais utilizados neste estudo, os procedimentos de preparação dos corpos de prova e a metodologia empregada para a realização dos ensaios laboratoriais. A investigação incluiu ensaios de caracterização física, química e tecnológica das amostras, bem como ensaios triaxiais do tipo CID (*Consolidated Isotropically Drained*), que em conjunto foram fundamentais para a avaliação do comportamento mecânico dos rejeitos.

A Figura 2 apresenta o fluxograma das etapas experimentais realizadas para o desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os rejeitos analisados foram provenientes de usinas de beneficiamento localizadas no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. A investigação foi conduzida basicamente com duas amostras de rejeito de minério de ferro. A primeira contém partículas mais grossas ($>0,075$ mm) e foi denominada Rejeito Grosso (Rg) e a segunda amostra corresponde ao Rejeito Total (RT), que apresenta predominância de finos e foi utilizada na composição das misturas na posição de fração fina. A partir dessas amostras, foram preparadas cinco composições de misturas conforme as seguintes proporções:

- i. 100% Rg
- ii. 90/10% (Rg/RT)
- iii. 80/20% (Rg/RT)
- iv. 50/50% (Rg/RT)
- v. 100% RT

Apesar dos ensaios triaxiais terem sido realizados apenas nas composições puras (100% Rg e 100% RT), as demais misturas foram submetidas aos ensaios de caracterização granulométrica, determinação da massa específica dos sólidos (Gs) e ensaios de compactação. Além disso, também foram estudadas as frações retida e passante na peneira #200 do rejeito total, a fim de conhecer e caracterizar o comportamento individual de cada uma. Essa abordagem permitiu uma avaliação mais abrangente da influência da fração de finos no comportamento geomecânico dos rejeitos, fornecendo subsídios para a análise comparativa de seu comportamento e contribuindo para compreensão da estabilidade das pilhas de rejeitos desaguados.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO UTILIZADO

Os ensaios de caracterização do rejeito de mineração foram realizados nos laboratórios de mecânica dos solos do Centro Tecnológico de Geotecnia Aplicada (CTGA), centro de pesquisa que congrega os laboratórios do Núcleo de Geotecnia Aplicada da Universidade Federal de Ouro Preto (NUGEO).

Todos os ensaios foram realizados segundo procedimentos padronizados por normas técnicas que se encontram descritas no Quadro 1.

Quadro 1: Relação das normas técnicas de referência para os ensaios realizados

Ensaio	Norma
Granulometria	ABNT NBR 7181/2016
Limite de Liquidez (LL)	ABNT NBR 6459/2016
Limite de Plasticidade (LP)	ABNT NBR 7180/2016
Massa Específica dos Grãos	ABNT NBR 6458/2016
Compactação	ABNT NBR 7182/2016
Permeabilidade	ABNT NBR 14545/2021
Adensamento	ABNT NBR 16853/2020
Triaxial CID	ASTM D7181/2020

As análises químicas do Rejeito Total e suas frações (retidas e passantes na peneira #200) foram feitas no laboratório de Análises de Solo, Tecido Vegetal e Fertilizante da Universidade Federal de Viçosa, sendo utilizados os métodos descritos no Manual de Métodos de Análise de Solo da EMBRAPA (Embrapa, 1997). As análises consistiram na determinação do pH (em água, soluções de KCl e CaCl₂) e condutividade elétrica equivalente (CEE).

Adicionalmente, foram realizados ensaios mineralógicos por difração de raios X (DRX) nas amostras de RT, Rg e no passante na #200, no Laboratório de Polímeros e Microestrutura do CTGA/NUGEO.

3.2. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras foram inicialmente recebidas no laboratório em grandes volumes, acondicionadas em sacos conforme a coleta realizada em campo. A fim de garantir a representatividade e homogeneidade do material, foi realizada a etapa de quarteamento (Figura 3) conforme as normas técnicas vigentes. O procedimento consistiu em distribuir o material em uma superfície limpa e plana, dividindo-o em quatro partes iguais, descartando duas partes opostas e reunindo as duas partes restantes para formar uma nova amostra representativa. Esse processo foi repetido até se obter a quantidade necessária de amostra para os ensaios.

Figura 3: Etapa de quarteamento



Fonte: Acervo da autora.

Após o quartejamento, o material foi submetido à secagem ao ar livre, em local coberto e ventilado, até que fosse atingida a umidade higroscópica e iniciada a preparação das amostras para os ensaios de caracterização e compactação. Visando compreender também as frações finas e grossas que compõem o RT, foi realizada a separação granulométrica (Figura 4) do material com base no diâmetro de 0,075 mm (peneira #200).

Figura 4: Separação granulométrica



Fonte: Acervo da autora.

O peneiramento e a separação das frações foram aplicados em alguns ensaios, principalmente para caracterização granulométrica. No entanto, devido ao tempo necessário para esse processo e à grande quantidade de material exigida para a preparação das misturas, optou-se por utilizar o Rejeito Total como substituto da fração fina (Rf) na elaboração das composições, conforme detalhado no item 4.1.1. Já a fração grosseira, utilizada nas misturas, foi obtida a partir de outro rejeito de minério de ferro, conforme já denominado anteriormente.

As misturas foram inicialmente homogeneizadas em estado seco, sendo, posteriormente, umedecidas com água de forma gradual e controlada, conforme os teores de umidade definidos para os ensaios subsequentes. Após a homogeneização, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos selados e mantidos em repouso por, no mínimo, 24 horas, com o objetivo de permitir a distribuição uniforme da umidade antes da moldagem dos corpos de prova.

3.3. ENSAIOS DE GRANULOMETRIA

A caracterização granulométrica das amostras foi realizada com o objetivo de avaliar a distribuição de partículas nos rejeitos e suas frações, bem como analisar a influência da granulometria no comportamento geomecânico do material. Para o Rejeito Total (RT) e suas

frações (retida e passante na peneira #200) e para o Rejeito Grosso (Rg), os ensaios foram conduzidos utilizando três metodologias:

- Peneiramento e sedimentação sem defloculante (S/D) – caracterização das partículas por peneiramento e decantação natural.
- Sedimentação com defloculante (C/D) – utilizando hexametáfosfato de sódio para dispersar partículas finas e evitar agregação, garantindo maior precisão na determinação do teor de finos.
- Granulometria a laser (L) – utilizada para comparação com os métodos de sedimentação e avaliação da consistência dos resultados.

Para as misturas de Rg/RT, a análise granulométrica foi realizada exclusivamente pelo método de granulometria a laser, considerando a praticidade e o caráter comparativo das composições.

Essa abordagem permitiu compreender a distribuição granulométrica das diferentes amostras de rejeito, servindo como base para a interpretação dos resultados obtidos nos ensaios de compactação, adensamento, permeabilidade e triaxiais.

3.4. ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

Os ensaios de compactação foram realizados com o objetivo de determinar os parâmetros ótimos de moldagem das amostras utilizadas nos ensaios de adensamento e resistência. As análises seguiram a metodologia da ABNT NBR 7182/2016, utilizando a energia do ensaio Proctor Normal.

As amostras de rejeito foram moldadas com diferentes teores de umidade, a fim de obter a curva de compactação e determinar os valores do peso específico seco máximo ($\gamma_d \text{ máx.}$) e da umidade ótima (W_{ot}) para cada composição.

Os ensaios de compactação foram realizados em todas as amostras estudadas, abrangendo as frações puras, as misturas preparadas nas proporções 90/10%, 80/20% e 50/50% (Rg/RT), além das frações retida e passante na peneira #200 do rejeito total. Essa abordagem permitiu analisar a influência da proporção de finos nos parâmetros de compactação e no comportamento do material sob densificação mecânica, fornecendo subsídios para a moldagem reproduzível dos corpos de prova e para a interpretação dos resultados obtidos nos ensaios subsequentes.

3.5. ENSAIOS DE ADENSAMENTO

Os ensaios de adensamento foram realizados com as amostras puras de rejeito total e rejeito grosso, previamente compactadas conforme os parâmetros ótimos determinados nos ensaios de Proctor Normal. O objetivo foi avaliar o grau de compressibilidade dos materiais e sua resposta à aplicação de cargas verticais em condições drenadas, simulando o comportamento em campo ao longo do tempo.

A metodologia adotada seguiu os procedimentos da ABNT NBR 16853/2020, com aplicação de cargas sucessivas até uma tensão final de 3200 kPa. Durante os ensaios, foram realizados monitoramento que nos permitiu realizar a determinação de parâmetros como índice de compressão (C_c), índice de recompressão (C_r) e tensão de pré-adensamento do solo.

A realização desses ensaios forneceu subsídios para compreender o comportamento volumétrico dos rejeitos sob diferentes níveis de tensão e serviu como base para a interpretação de resultados em termos de estabilidade e segurança das pilhas de rejeitos desaguados.

3.6. ENSAIOS DE PERMEABILIDADE

A permeabilidade é um dos parâmetros hidráulicos mais relevantes na análise do comportamento de rejeitos de mineração, especialmente em sistemas de empilhamento drenado. Ela influencia diretamente a dissipação de poropressões, a drenagem interna das pilhas e o risco de saturação excessiva, sendo, portanto, fundamental para a avaliação da estabilidade geotécnica de estruturas de disposição.

Neste estudo, o coeficiente de permeabilidade foi determinado para as amostras puras de Rg e RT por três abordagens distintas.

- Ensaio de permeabilidade com permeâmetro de parede rígida, conduzido conforme os procedimentos da ABNT NBR 14545/2021, sendo as amostras previamente compactadas segundo os parâmetros obtidos no ensaio Proctor Normal.
- Estimativa indireta a partir dos resultados do ensaio de adensamento, realizada com base na metodologia de cálculo aplicada após a aplicação de carga vertical de 400 e 800 kPa, permitindo avaliar a permeabilidade equivalente em condições drenadas.

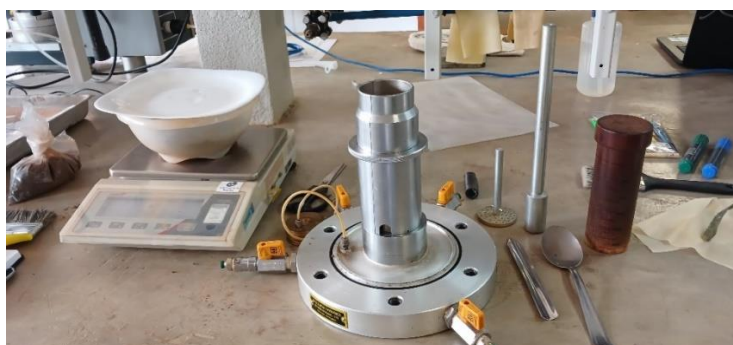
- Permeabilidade em permeâmetro de parede flexível via câmara triaxial, conforme ASTM D5084/2024, recomendado para materiais de baixa a média permeabilidade. Nesse método, as amostras foram compactadas por *moist tamping* (umidade próxima da ótima e grau de compactação de 100% da energia Proctor Normal) e saturadas por contrapressão até atingir diferentes valores do parâmetro B de Skempton ($B \approx 0,8$ e $B \approx 0,9$). O coeficiente de permeabilidade foi calculado pela Lei de Darcy, a partir da vazão determinada em regime de fluxo permanente.

A aplicação dessas metodologias possibilitou a comparação entre diferentes técnicas e forneceu subsídios para a interpretação do comportamento hidráulico dos rejeitos sob diferentes condições de compactação e carregamento.

3.7. MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova utilizados nos ensaios triaxiais foram moldados a partir das frações puras (100%) de rejeito grosso e rejeito total, sendo adotado o método de compactação conhecido como *moist tamping* (MT). Essa técnica consiste na compactação do material em camadas sucessivas, com umidade controlada, dentro de um molde cilíndrico, até a obtenção do peso específico seco máximo estabelecido em ensaios de compactação Proctor Normal. A Figura 5 apresenta os materiais utilizados no processo de moldagem dos corpos de prova.

Figura 5: Materiais utilizados



Fonte: Acervo da autora.

As amostras foram moldadas com 100% do grau de compactação, considerando como referência os parâmetros obtidos para cada composição no ensaio Proctor. O teor de umidade adotado na moldagem foi mantido próximo da umidade ótima do material, previamente determinada, com controle realizado com precisão de $\pm 0,5\%$, de modo a garantir a reprodutibilidade entre os corpos de prova.

As dimensões dos corpos de prova foram padronizadas com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, conforme as exigências dos equipamentos utilizados para os ensaios triaxiais. As amostras foram armazenadas em sacos plásticos e mantidas sob cura úmida por, no mínimo, 24 horas antes da execução dos ensaios, para garantir a homogeneização da umidade e permitir a redistribuição interna da água.

3.8. ENSAIOS TRIAXIAIS

Os ensaios triaxiais foram conduzidos com o objetivo de avaliar o comportamento tensão-deformação e os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos rejeitos sob diferentes condições de carregamento. Para isso, foram realizados ensaios tipo CID (*Consolidated Isotropically Drained*), conforme a norma ASTM D7181/2020, utilizando equipamento com controle automatizado de pressões e volume.

Conforme apresentado anteriormente, os ensaios foram aplicados exclusivamente às amostras puras (100% Rg e 100% RT), moldadas segundo os parâmetros ótimos de cada fração. A Figura 6 apresenta o corpo de prova logo após a retirada do molde tripartido, enquanto a Figura 7 mostra o mesmo corpo de prova preparado para ser inserido na câmara triaxial, já protegido com a membrana e com o top cap e os anéis de vedação (*o-rings*) posicionados.

Figura 6: Corpo de prova desmoldado



Fonte: Acervo da autora.

Figura 7: Corpo de prova pronto para o ensaio



Fonte: Acervo da autora.

As amostras foram inicialmente saturadas por meio da aplicação de contrapressão até atingir o parâmetro de Skempton $B \geq 0,95$, garantindo saturação adequada para o início da etapa de consolidação isotrópica. Em seguida, foram consolidadas sob pressões confinantes médias de 100, 200 e 400 kPa.

Durante a fase de cisalhamento, foi permitida a drenagem, com monitoramento contínuo da variação de volume. As amostras foram carregadas sob uma taxa de deformação axial constante de 0,15mm/min, até atingirem deformações axiais de 20%.

A partir dos resultados obtidos, foram determinadas as envoltórias de ruptura segundo o critério de *Mohr-Coulomb*, possibilitando a obtenção dos parâmetros geomecânicos de resistência ao cisalhamento: ângulo de atrito interno (ϕ) e intercepto coesivo (c).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios laboratoriais realizados com diferentes proporções de rejeitos de minério de ferro. Inicialmente, são apresentados os resultados da caracterização física e mineralógica dos materiais, fundamentais para a compreensão do comportamento geomecânico. Em seguida, são analisados os ensaios triaxiais do tipo CID, realizados exclusivamente para as frações puras.

A discussão dos resultados é feita com base na comparação entre os comportamentos observados para as frações puras, considerando parâmetros como resistência ao cisalhamento, variação de volume e tendência à instabilidade. As misturas intermediárias foram analisadas quanto à granulometria, massa específica dos sólidos e compactação, possibilitando uma avaliação complementar. Os resultados também foram comparados com dados da literatura, buscando validar as observações experimentais e contribuir para o entendimento do comportamento geomecânico do material.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS REJEITOS

A caracterização dos rejeitos de minério de ferro utilizados neste estudo envolveu análises físicas, tecnológicas e químicas, com o objetivo de compreender suas propriedades e subsidiar a avaliação do comportamento geomecânico em diferentes condições de carregamento.

Foram realizados ensaios de caracterização física, conforme as normas técnicas vigentes, para determinação da massa específica dos grãos e limites de Atterberg. Os resultados obtidos estão sintetizados na Tabela 1.

Na Tabela 1, são apresentados os percentuais das diferentes frações granulométricas das amostras, considerando ensaios executados sem defloculante (S/D), com defloculante (C/D) - hexametáfosfato de sódio - e análises via granulometria a laser (L). Estas últimas foram utilizadas apenas para comparação entre metodologias de sedimentação e laser.

Verifica-se que, em todos os materiais, as partículas estão predominantemente concentradas nas faixas de areia fina (AF) e silte (S). Todas as frações avaliadas são não plásticas e não apresentaram limite de liquidez mensurável, o que indica a ausência de comportamento coesivo típico de solos finos argilosos. Do ponto de vista químico, os rejeitos apresentaram

pH próximo da neutralidade em todas as soluções testadas (água, KCl e CaCl₂), e os valores de condutividade elétrica equivalente (CEE) indicam baixa concentração de sais solúveis, caracterizando materiais com potencial de baixa reatividade química.

Tabela 1: Resumo das propriedades geotécnicas dos materiais utilizados

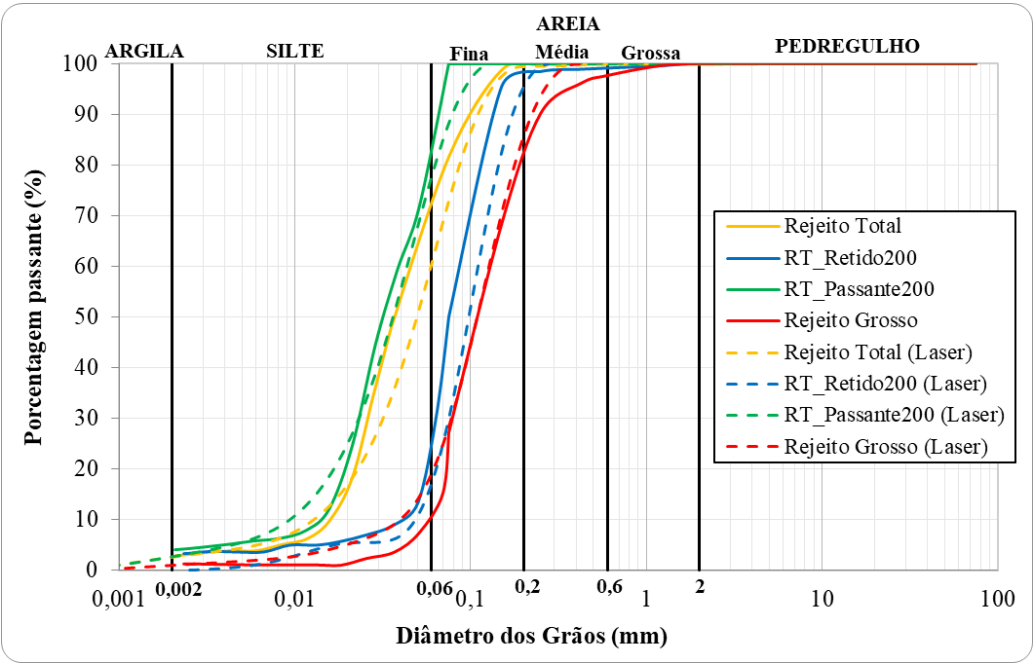
Ensaio	Rejeito Total (RT)			RT - Passante #200			RT - Retido #200			Rejeito Grosso (Rg)		
	Granulometria											
	C/D	S/D	L	C/D	S/D	L	C/D	S/D	L	C/D	S/D	L
P (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AG (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5	0,0	0,0
AM (%)	0,0	0,0	0,51	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3	15,0	16,0	12,6
AF (%)	28,0	52,0	38,7	19,0	13,0	22,1	78,0	85,0	79,1	71,5	72,0	68,2
S (%)	69,2	48,0	58,4	77,0	87,0	75,4	19,0	15,0	17,6	10,0	10,0	18,3
A (%)	2,8	0,0	2,5	4,0	0,0	2,5	3,0	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0
LL	NL			NL			NL			NL		
LP	NP			NP			NP			NP		
pH (H ₂ O)	6,25			6,38			6,40			-		
pH (KCl)	6,07			6,04			5,98			-		
pH (CaCl ₂)	5,55			5,69			5,68			-		
CEE	52 µS/cm			45 µS/cm			48 µS/cm			-		

* P: pedregulho; AG: areia grossa; AM: areia média; AF: areia fina; S: silte; A: argila; LL: limite de liquidez; LP: limite de plasticidade; pH: Potencial Hidrogeniônico (em água, soluções de KCl e CaCl₂); CEE: condutividade elétrica equivalente.

Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 8 apresenta as curvas granulométricas dos rejeitos. Observa-se que o rejeito grosso e o retido #200 apresentam distribuição relativamente ampla de partículas, com predomínio de areia fina a média, enquanto o rejeito total e o passante #200 são compostos predominantemente por partículas de silte.

Figura 8: Curvas granulométricas.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 2 apresenta o resumo das análises químicas realizadas por difração de raios X (DRX), com os valores estimados dos percentuais em peso dos principais óxidos constituintes dos rejeitos.

Tabela 2: Resumo da análise mineralógica dos rejeitos

Material	Composição	% peso
Rejeito Total	Quartzo (SiO ₂)	85,3
	Hematita (Fe ₂ O ₃)	14,0
	Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	0,6
	Goethita (FeHO ₂)	0,2
RT - Passante #200	Goethita (FeHO ₂)	59,3
	Quartzo (SiO ₂)	34,1
	Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	3,8
	Hematita (Fe ₂ O ₃)	2,9
Rejeito Grosso	Quartzo (SiO ₂)	93,8
	Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	3,2
	Manganês (MnO ₂)	2,1
	Hematita (Fe ₂ O ₃)	0,8
	Goethita (FeHO ₂)	0,1

Fonte: Elaborado pela autora.

A caracterização evidencia o contraste entre os comportamentos típicos das frações granular e fina, reforçando a importância de se avaliar sua influência na resistência ao cisalhamento e na estabilidade de estruturas de disposição, como as pilhas de rejeitos desaguidos. Esses dados

servirão de base para a interpretação dos ensaios mecânicos apresentados nas seções seguintes.

4.1.1. Caracterização das misturas

Para analisar a influência do teor de finos no comportamento dos rejeitos, foram preparadas misturas em diferentes proporções de materiais. Considerando a semelhança, em especial da curva granulométrica, entre o material passante na peneira #200 e o Rejeito Total (RT), optou-se por empregar o RT como representante da fração fina nas misturas estudadas. Essa decisão também visou otimizar o processo experimental, uma vez que a separação das frações exige elevado tempo de preparo e grande quantidade de material. A fração grosseira, por sua vez, foi mantida a partir do rejeito grosso (Rg), conforme definido anteriormente.

A caracterização física das misturas contemplou a determinação da massa específica dos grãos (Gs) e a análise granulométrica por granulometria a laser, procedimento que permite uma avaliação precisa da distribuição de partículas em materiais com ampla faixa granulométrica, especialmente na fração fina.

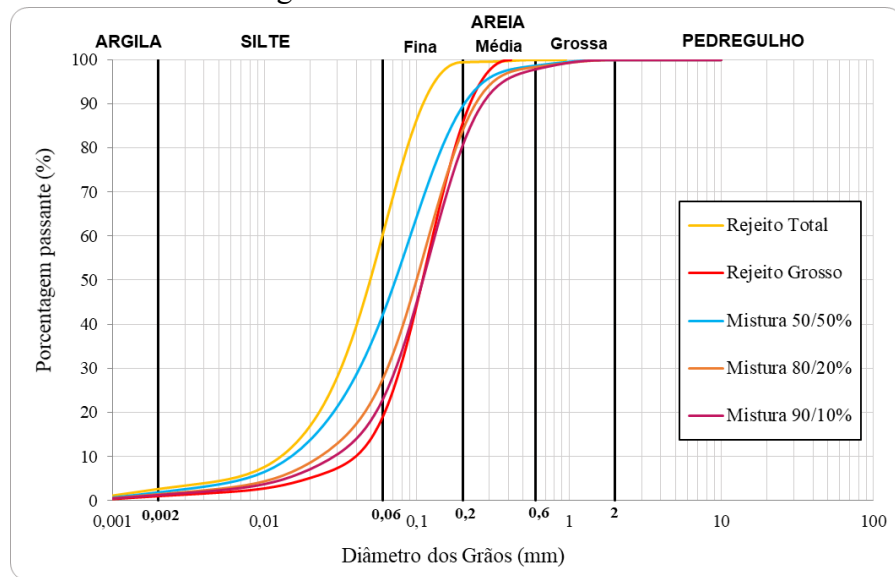
A Tabela 3 apresenta a composição das misturas estudadas, e a Figura 9 ilustra as respectivas curvas granulométricas obtidas por laser. Esses resultados constituem a base para a interpretação do desempenho das misturas nos ensaios mecânicos subsequentes.

Tabela 3: Composição das Misturas

Misturas	% Rg	% RT
Rejeito Grosso	100	0
90/10%	90	10
80/20%	80	20
50/50%	50	50
Rejeito Total	0	100

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 9: Granulometria à Laser

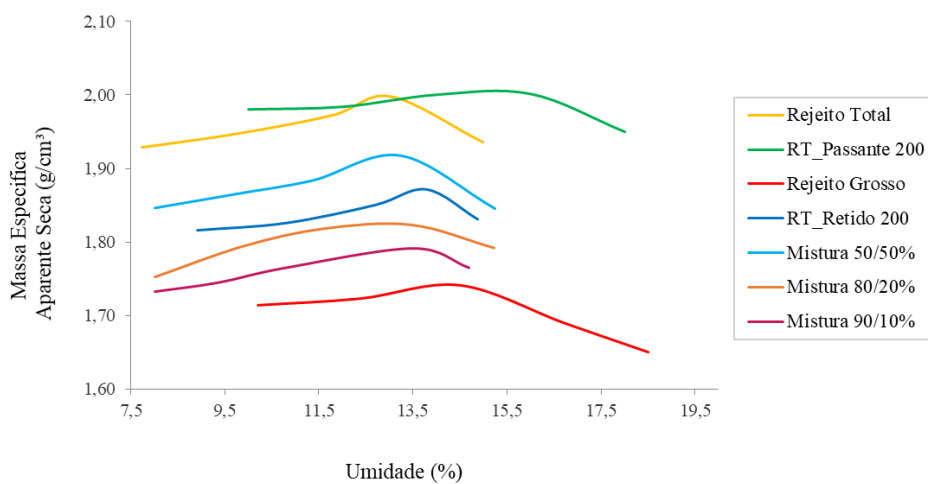


Fonte: Elaborado pela autora.

4.2. ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

Os ensaios de compactação foram realizados com o objetivo de determinar os parâmetros ótimos de moldagem das amostras utilizadas nos ensaios de adensamento e resistência. A partir deles, obteve-se a curva de compactação, apresentada na Figura 10, bem como os valores de peso específico seco máximo (γ_d máx.) e da unidade ótima (W_{ot}) para cada composição, cujo os resultados estão apresentados na Tabela 4.

Figura 10: Curvas de Compactação



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 4: Propriedades das Misturas

Ensaio	RT	Rg	< #200	> #200	Misturas		
					90/10%	80/20%	50/50%
γ_s (kN/m ³)	31,50	28,47	33,28	27,91	28,95	29,37	30,07
γ_d (kN/m ³)	20,0	17,45	20,55	18,75	17,92	18,25	19,20
W_{ot} (%)	12,85	13,95	15,50	13,75	13,50	13,00	13,00

*RT: rejeito total; RG: Rejeito Grosso; < #200: Passante na peneira #200; > #200: retido na peneira #200; γ_s : peso específico dos sólidos; γ_d : peso específico seco máximo; W_{ot} : umidade ótima.

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados mostram que γ_s aumentou com o acréscimo de fração fina, passando de 28,95 kN/m³ (90/10%) para 30,07 kN/m³ (50/50%), podendo estar associado à maior presença de minerais pesados, como goethita, na fração fina. O γ_d máx. apresentou a mesma tendência, variando de 17,92 kN/m³ (90/10%) para 19,20 kN/m³ (50/50%), o que indica melhor rearranjo de partículas e maior densificação com o aumento do teor de finos. A W_{ot} manteve-se praticamente constante, entre 13,0% e 13,5%, sugerindo que as proporções de finos testadas não foram suficientes para alterar de forma relevante a demanda de água.

Comparando frações puras e misturas, nota-se que o rejeito fino puro (<#200) apresentou o maior valor de γ_d máx. e também o maior W_{ot} , indicando maior retenção hídrica e melhor preenchimento dos vazios, favorecendo a densificação. Por outro lado, o rejeito grosso puro apresentou γ_d máx. inferior e menor W_{ot} , o que indica boa acomodação inicial das partículas, mas limitada densificação devido à presença de vazios maiores. As misturas apresentaram comportamento intermediário, com aumento progressivo do γ_d máx. à medida que se eleva o teor de fração fina até 50%, efeito atribuído ao preenchimento de vazios e ao melhor encaixe das partículas. Contudo, teores de finos superiores aos estudados podem resultar em redução de permeabilidade e drenagem, comprometendo o desempenho em campo.

Essa interpretação reforça a importância dos resultados de compactação como base para a análise dos ensaios de adensamento, uma vez que o arranjo inicial das partículas e o grau de densificação influenciam diretamente a compressibilidade e a evolução da permeabilidade sob carga.

4.3. ENSAIOS DE ADENSAMENTO

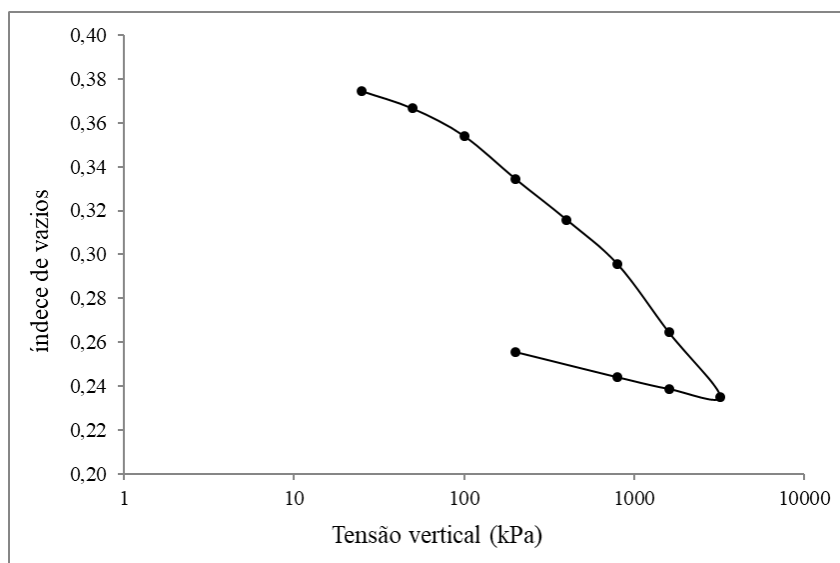
Os ensaios de adensamento foram realizados para avaliar a compressibilidade dos rejeitos, possibilitando a obtenção das curvas de adensamento e dos parâmetros característicos, apresentados a seguir.

Rejeito Total:

A Figura 11 apresenta a curva de adensamento obtida para o rejeito total, a partir da qual foram determinados os seguintes parâmetros:

- Índice de compressão (C_c): 0,0909;
- Índice de recompressão (C_r): 0,0174;
- Tensão de pré-adensamento: 65 kPa (determinada pelo método de Pacheco Silva)

Figura 11: Curva de Adensamento do Rejeito Total



Fonte: Elaborado pela autora.

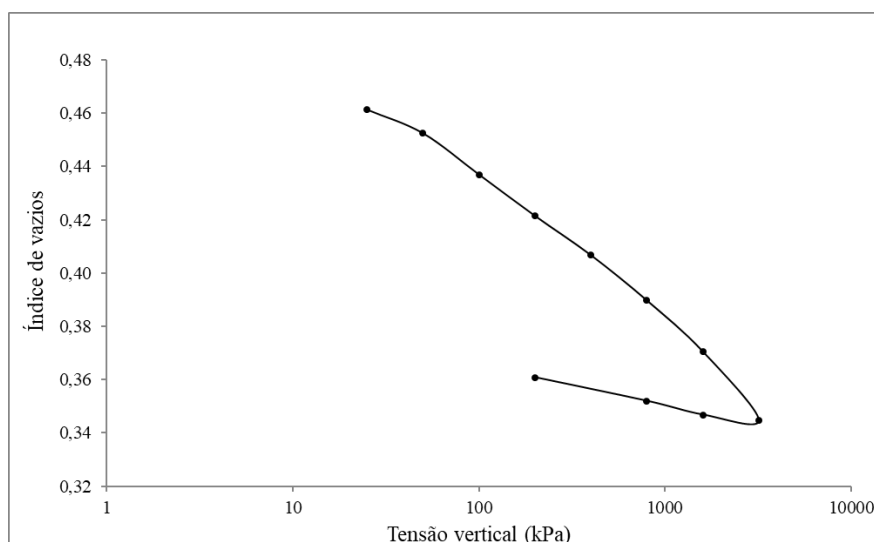
Os valores obtidos indicam comportamento de baixa a moderada compressibilidade, típico de materiais granulares com presença limitada de finos, mas com potencial de adensamento significativo quando submetido a tensões acima de aproximadamente 65 kPa. O valor da tensão de pré-adensamento, relativamente baixo, indica histórico de tensões modesto e ingresso precoce em compressão virgem, o que implica que carregamentos usuais em estruturas de empilhamento podem rapidamente levar o material a deformações mais expressivas.

Rejeito Grosso:

Também foi conduzido o ensaio de adensamento para a fração composta por 100% rejeito grosso (Rg), com o objetivo de compreender o comportamento isolado dessa fração mais arenosa do rejeito. A Figura 12 apresenta a curva de adensamento obtida para essa amostra, cujos principais parâmetros são:

- Índice de compressão (C_c): 0,0565;
- Índice de recompressão (C_r): 0,0299;
- Tensão de pré-adensamento: 58 kPa (método de Pacheco Silva)

Figura 12: Curva de Adensamento do Rejeito Grosso



Fonte: Elaborado pela autora.

A comparação entre os resultados evidencia diferenças importantes:

O RT (Rejeito Total) apresentou C_c superior ao do Rg (Rejeito Grosso), indicando maior compressibilidade. Esse comportamento pode ser atribuído à presença de partículas finas que ocupam os vazios entre os grãos maiores, favorecendo reorganizações estruturais mais pronunciadas durante o adensamento.

O Rg apresentou C_r mais elevado, sugerindo maior rigidez inicial na fase elástica, comportamento esperado em materiais predominantemente arenosos.

As tensões de pré-adensamento do RT (65 kPa) e do Rg (58 kPa) são bastante próximas, o que significa que ambos os materiais iniciam a compressão virgem em níveis de tensão semelhantes. A diferença de comportamento sob cargas maiores está mais associada aos valores de C_c e C_r do que ao histórico de tensões.

4.4. ENSAIOS DE PERMEABILIDADE

Os ensaios de permeabilidade foram conduzidos para determinar o coeficiente de permeabilidade dos rejeitos, sendo os resultados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Valores do Coeficiente de Permeabilidade

Material	Condição	k ₂₀ (cm/s)	k ₂₀ (cm/s)	k (cm/s)	k (cm/s)
		Adensamento	Permeâmetro	Parede Flexível B≈0,8	Parede Flexível B≈0,9
Rg	Pós-Compactação	-	3,65E-04	1,23E-04	2,01E-04
	Pós-Compactação	3,55E-05	1,19E-05	2,36E-05	8,35E-05
RT	400 kPa	2,55E-05	-	-	-
	800 kPa	2,31E-05	-	-	-

*K₂₀: coeficiente de permeabilidade a 20°C obtido em permeâmetro de carga variável

Fonte: Elaborado pela autora.

Nos ensaios de parede flexível, o RT apresentou coeficientes de permeabilidade de $2,36 \times 10^{-5}$ cm/s (B= 0,83) e $8,35 \times 10^{-5}$ cm/s (B = 0,96), evidenciando que o grau de saturação exerce influência direta sobre a condutividade hidráulica. Quanto maior o parâmetro B, maior a permeabilidade observada. Para o rejeito grosso (Rg), os valores foram ainda mais elevados: $1,23 \times 10^{-4}$ cm/s (B = 0,80) e $2,01 \times 10^{-4}$ cm/s (B = 0,91), reforçando essa tendência.

Já nos ensaios de adensamento, observou-se uma redução progressiva no coeficiente de permeabilidade do RT, de $3,55 \times 10^{-5}$ cm/s (após a compactação) para $2,31 \times 10^{-5}$ cm/s ao final da aplicação da tensão vertical de 800 kPa, uma queda de aproximadamente 35% em relação ao valor inicial. Esse comportamento está diretamente relacionado ao rearranjo das partículas e à diminuição da porosidade ao longo do processo de adensamento, o que é confirmado pelos dados do índice de vazios apresentados na Tabela 6, que mostram redução de 0,37 para 0,24 entre 25 e 3200 kPa.

Tabela 6: Variação do índice de vazios em função da tensão vertical

e final	Tensão (kPa)
0,37	25
0,37	50
0,35	100
0,33	200
0,32	400
0,30	800
0,26	1600
0,24	3200
0,24	1600
0,24	800
0,26	200

Fonte: Elaborado pela autora.

De forma geral, os valores obtidos situam-se na faixa típica de materiais arenosos bem compactados, sendo compatíveis com o uso em sistemas de disposição drenada. A permeabilidade relativamente elevada, especialmente na condição saturada observada no ensaio de parede flexível, reforça o potencial do material para empilhamento drenado, desde que sejam adotadas medidas de controle de umidade, compactação adequada e sistemas de drenagem eficientes.

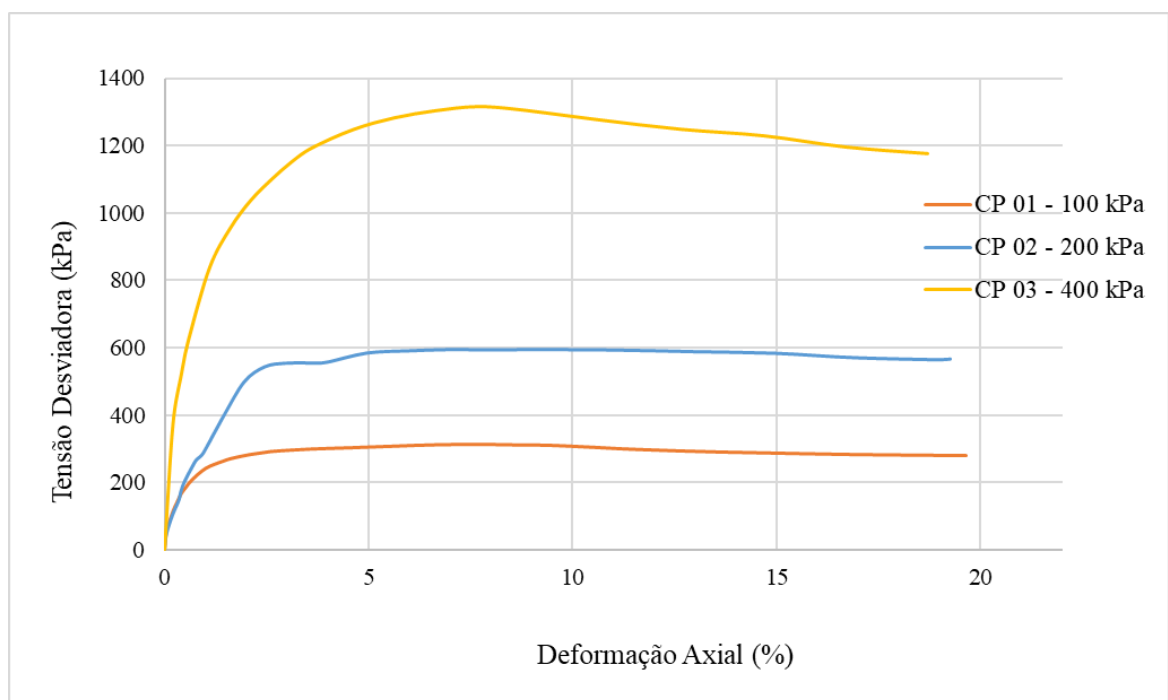
4.5. ENSAIOS TRIAXIAIS

Os ensaios triaxiais foram conduzidos com o objetivo de avaliar o comportamento tensão-deformação e os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos rejeitos de minério de ferro sob condições drenadas. Foram realizados apenas ensaios do tipo CID (Consolidated Isotropically Drained), aplicados exclusivamente às frações puras (100% Rg e 100% RT).

Os resultados dos ensaios são apresentados na sequência de

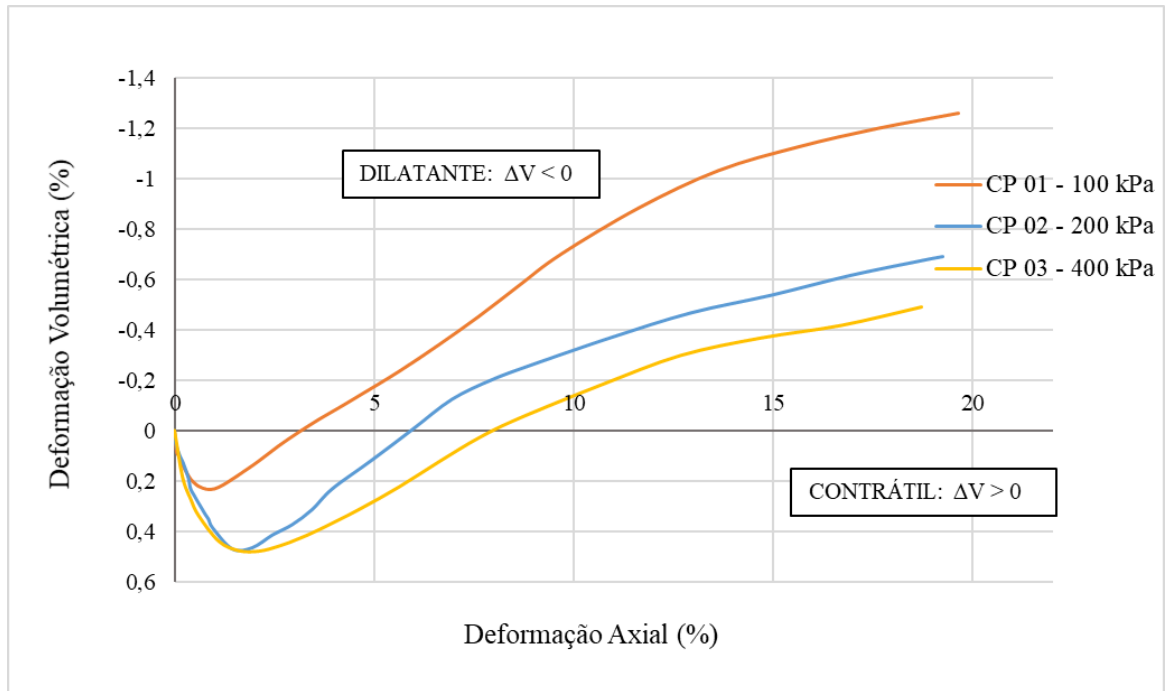
Figura 13 a Figura 20.

Figura 13: Tensão x Deformação – RT CID



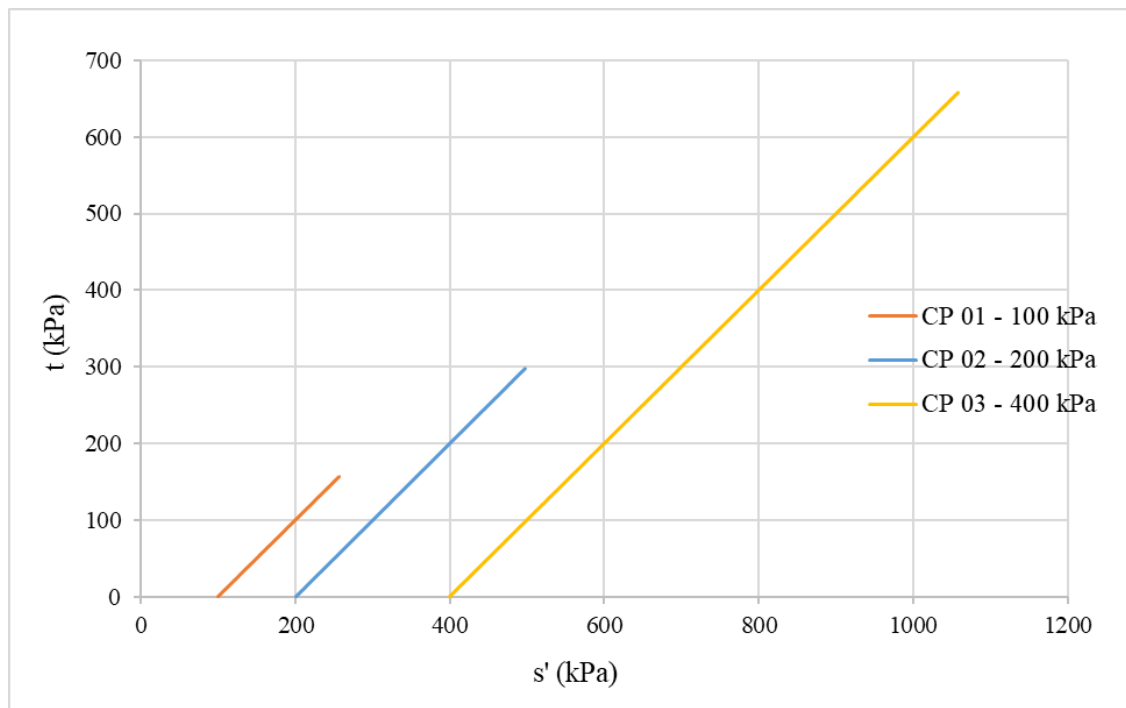
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 14: Variação Volumétrica - RT CID



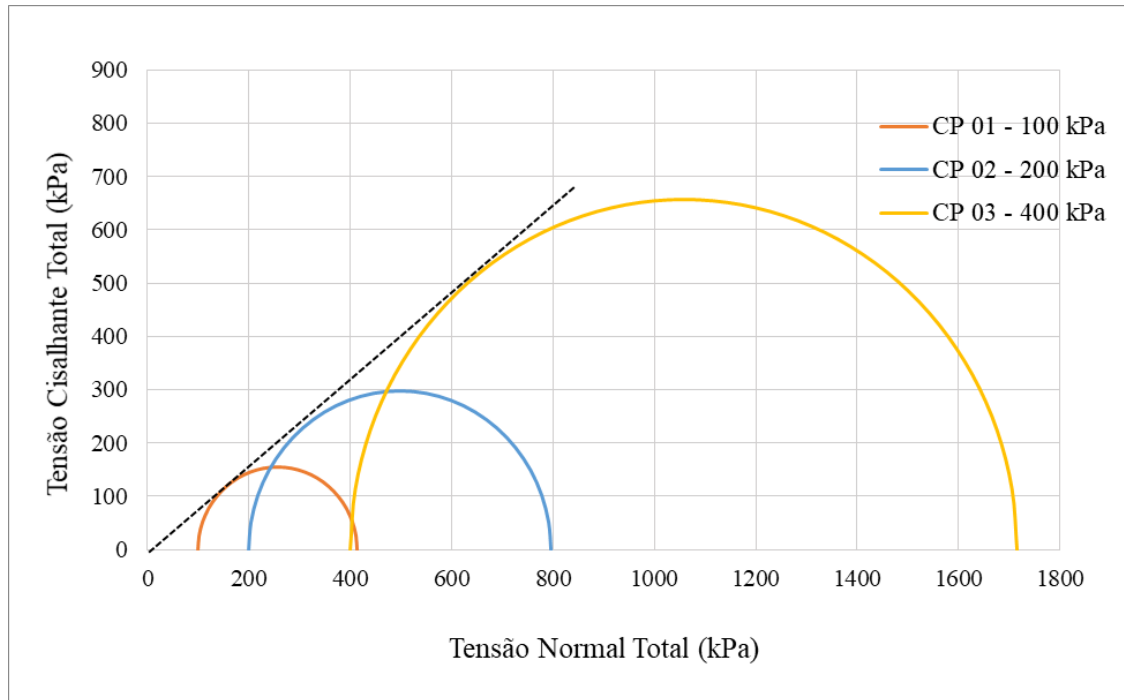
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 15: Trajetória de Tensões - RT CID



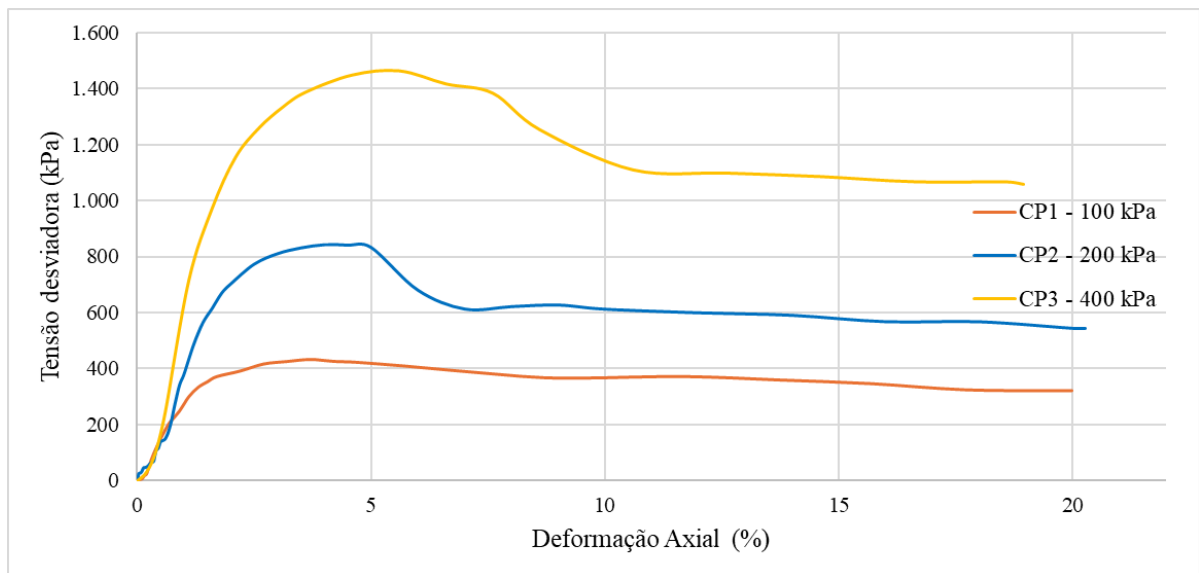
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 16: Círculos de Mohr - RT CID



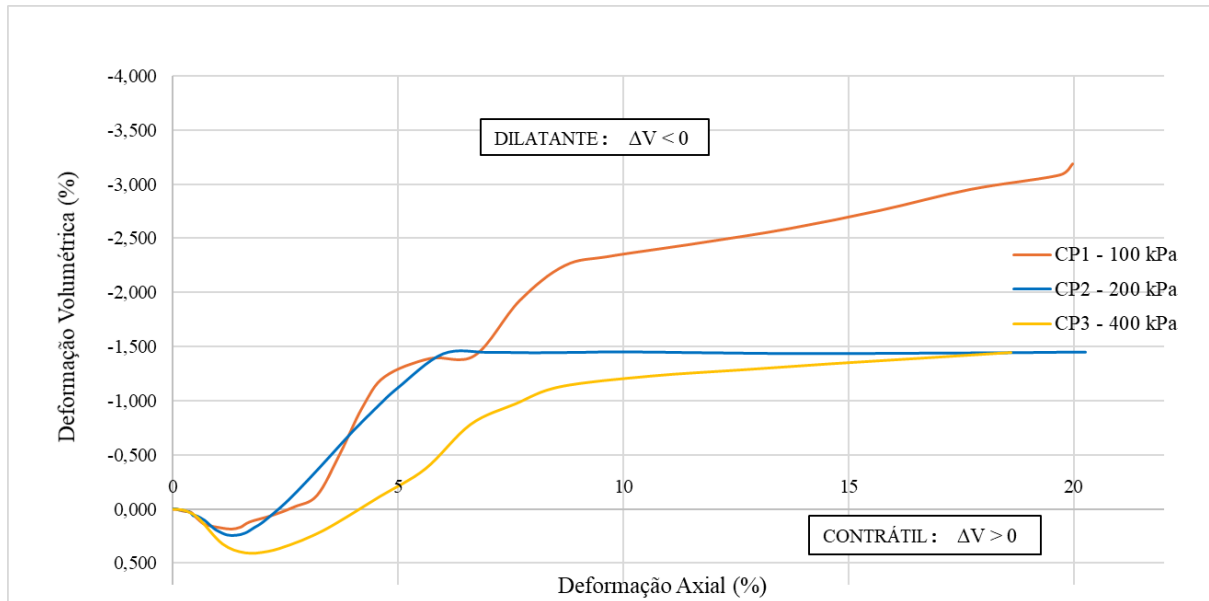
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 17: Tensão x Deformação - Rg CID



Fonte: Elaborado pela autora.

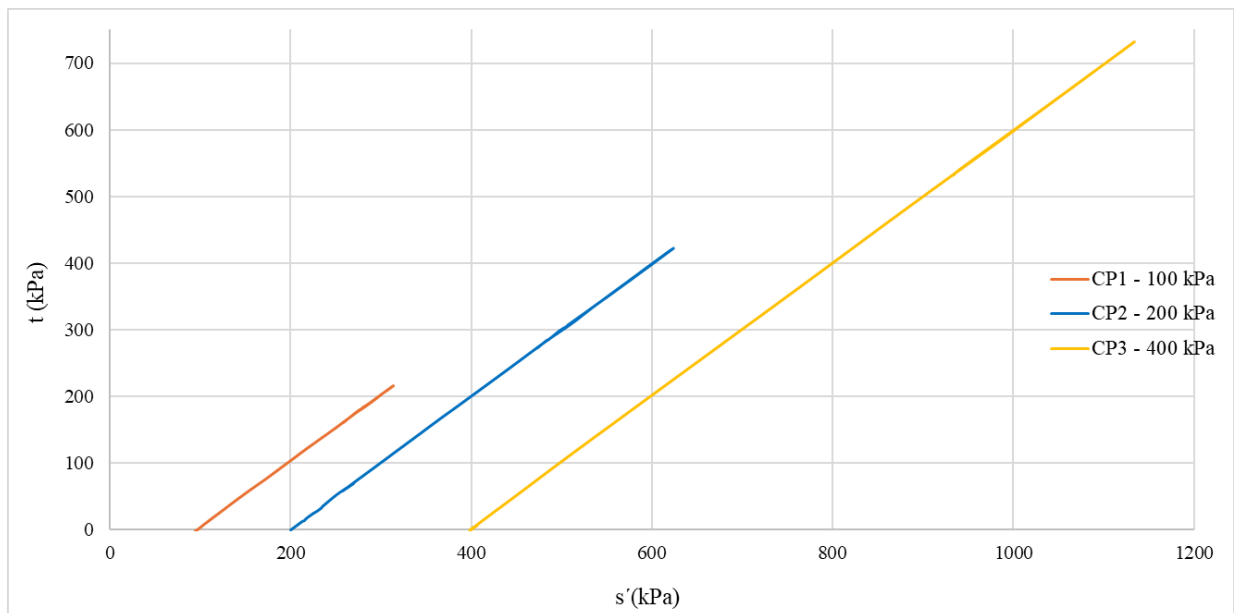
Figura 18: Variação volumétrica - Rg CID



Fonte: Elaborado pela autora.

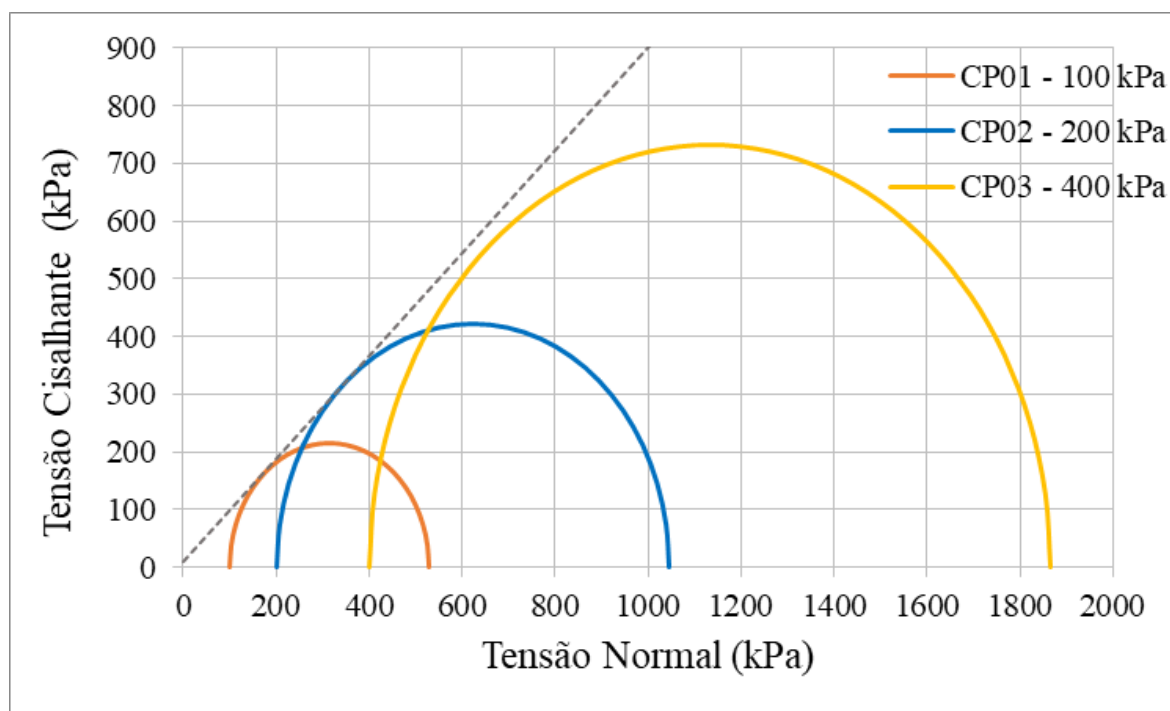
Observa-se que, para as tensões confinantes de 100 e 200 kPa, os gráficos apresentam comportamento atípico, possivelmente decorrente de inconsistências nos ensaios. Ressalta-se que os experimentos correspondentes estão sendo refeitos; entretanto, os resultados finais não estavam disponíveis a tempo de serem incluídos nesta versão do trabalho.

Figura 19: Trajetória de tensões - Rg CID



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 20: Círculos de Mohr - Rg CID



Fonte: Elaborado pela autora.

Com base nas trajetórias de tensões de cada fração, aplicou-se o critério de *Mohr-Coulomb* para estimar os parâmetros de resistência ao cisalhamento (ϕ e c). Os parâmetros consolidados na típicos de materiais granulares.

Tabela 7 indicam comportamentos típicos de materiais granulares.

Tabela 7: Parâmetros de Resistência - CID

Material	Ângulo de Atrito	Intercepto Coesivo
Rejeito Total (RT)	38,96°	0,00 kPa
Rejeito Grosso (Rg)	41,75°	8,68 kPa

Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que o valor de coesão apresentado para o rejeito grosso corresponde a coesão aparente, devendo ser tratado como nulo em análises de projeto. Ambas as frações apresentaram ângulos de atrito elevados, compatíveis com materiais predominantemente arenosos/siltosos pouco plásticos. A fração grosseira (Rg) exibiu ϕ ligeiramente maior em relação ao RT, possivelmente em razão da maior angularidade, melhor intertravamento de grãos e menor influência de finos na zona de contato.

A fração fina (RT) apresentou coesão nula ($c = 0$ kPa), em linha com o comportamento drenado de materiais essencialmente friccionais. Já a fração grossa (Rg) resultou em $c = 8,68$

kPa, valor interpretado como coesão aparente decorrente do ajuste linear das tensões principais no intervalo ensaiado. Em areias e rejeitos granulares, valores pequenos e positivos de coesão são comuns quando a regressão é feita sobre uma faixa limitada de tensões; por isso, para fins de projeto, é prudente tratar a resistência como puramente friccional ($c \approx 0$) e usar a coesão como parâmetro de sensibilidade.

O atrito interno domina a resistência das duas frações; a diferença de ϕ sugere que o Rg oferece resistência um pouco maior sob o mesmo nível de confinamento.

A deformação volumétrica observada durante a etapa de cisalhamento demonstra que os materiais apresentam comportamento dilatante em ambas as frações (RT e Rg) sendo mais pronunciada no Rg, compatível com estruturas mais densas/abertas e elevado ϕ . A dilatância contribui para aumento de resistência pós-pico para menores tensões de confinamento, mas tende a reduzir-se com o aumento de tensão confinante. Neste contexto, reforça-se que este comportamento (contrátil ou dilatante) são influenciados pelo nível de tensões aplicados nos ensaios, desta forma, esta análise deve ser condizente ao nível de tensões das estruturas que são analisadas.

4.6. DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS

A análise integrada dos ensaios laboratoriais evidencia de forma clara o papel do teor de finos no comportamento geomecânico dos rejeitos de minério de ferro estudados. De acordo com a literatura (GUIMARÃES, 2011; SILVA, 2017; FREIRE, 2022), a presença de partículas finas influencia diretamente a densificação, a compressibilidade, a permeabilidade e, em consequência, a estabilidade das pilhas de disposição. Os resultados obtidos neste trabalho confirmam essa tendência.

Nos ensaios de caracterização física e mineralógica, verificou-se que as amostras apresentaram comportamento não plástico, com predominância de areia fina e silte. A fração fina mostrou maior teor de minerais pesados, como hematita e goethita, refletindo-se em maiores valores de massa específica dos sólidos. Essa característica justifica a elevação do peso específico seco máximo observada nos ensaios de compactação, onde o acréscimo de finos contribuiu para o preenchimento de vazios e rearranjo mais eficiente das partículas. A umidade ótima, por outro lado, permaneceu praticamente constante, sugerindo que, nos teores avaliados, a demanda de água para a moldagem não foi significativamente alterada.

Os ensaios de adensamento reforçaram a diferença de comportamento entre as frações. O rejeito total apresentou maior índice de compressibilidade, resultado da presença de finos que favorecem reorganizações estruturais sob tensões elevadas. Já o rejeito grosso apresentou maior rigidez inicial, condizente com seu caráter arenoso. Apesar das diferenças, ambos apresentaram tensões de pré-adensamento semelhantes, entre 60 e 70 kPa, indicando que as discrepâncias de comportamento decorrem principalmente da estrutura interna do material e não do histórico de tensões.

A associação entre compressibilidade e condutividade hidráulica foi confirmada pelos resultados de permeabilidade. Observou-se que, no rejeito total, o coeficiente de permeabilidade diminuiu com o aumento da tensão vertical, devido a redução do índice de vazios durante o adensamento. Nos ensaios com o permeâmetro de parede flexível, verificou-se ainda a influência direta do grau de saturação, evidenciada pelo aumento da permeabilidade do material, a partir de valores crescentes do parâmetro B de Skempton. De modo geral, os valores situaram-se na faixa típica de materiais granulares compactados, o que é favorável para aplicação em sistemas de empilhamento drenado, desde que assegurados controle de umidade e drenagem eficiente.

Nos ensaios triaxiais CID, tanto o rejeito total quanto o grosso exibiram ângulos de atrito interno elevados ($\phi > 38^\circ$), caracterizando resistência predominantemente friccional. A fração grosseira apresentou ϕ ligeiramente superior e pequena coesão aparente, atribuída ao melhor intertravamento das partículas. O rejeito total apresentou comportamento puramente friccional, sem coesão aparente, mas com tendência dilatante em baixas tensões confinantes. Esse comportamento é relevante para o desempenho das pilhas, uma vez que dilatância e fricção elevada contribuem para maior resistência pós-pico em condições drenadas.

De forma integrada, os resultados demonstram que teores moderados de finos podem ser benéficos para a compactação e a densificação, favorecendo a estabilidade mecânica. Contudo, o excesso de finos aumenta a compressibilidade e reduz a permeabilidade, o que pode comprometer a dissipação de poropressões e elevar o risco de instabilidade em condições não drenadas ou de carregamento rápido. Assim, confirma-se a hipótese inicial de que o controle da fração fina é determinante para o desempenho geotécnico dos rejeitos em pilhas drenadas.

Essas observações reforçam a importância da caracterização detalhada e do controle tecnológico durante a disposição. Os resultados obtidos fornecem subsídios técnicos relevantes para o projeto e operação de estruturas de empilhamento de rejeitos desagudados, contribuindo para práticas mais seguras e sustentáveis no contexto da mineração.

5. CONCLUSÃO

Os resultados confirmaram que os materiais utilizados neste estudo são predominantemente granulares e não plásticos, ainda que o rejeito total apresente maiores teores de partículas finas e massa específica dos sólidos. Essa característica contribuiu para valores mais elevados de densidade seca máxima nos ensaios de compactação, sem variações significativas na unidade ótima. Do ponto de vista da disposição, esse comportamento favorece processos de adensamento e controle da densificação em campo.

Por outro lado, a presença de finos mostrou-se determinante no aumento da compressibilidade e na redução progressiva da permeabilidade durante o adensamento, implicando maior necessidade de atenção ao controle de drenagem. O rejeito grosso apresentou menor compressibilidade, maior rigidez inicial e ângulo de atrito superior, reforçando seu potencial de aplicação em camadas de suporte estrutural em pilhas drenadas.

Os ensaios triaxiais drenados evidenciaram ângulos de atrito elevados em ambas as frações, confirmando a natureza friccional dos materiais. O desempenho ligeiramente superior do rejeito grosso foi atribuído ao intertravamento das partículas, enquanto o rejeito total apresentou dilatância em baixas tensões confinantes, comportamento que pode favorecer a resistência pós-pico em condições drenadas.

De forma integrada, conclui-se que o teor de finos exerce influência decisiva sobre a compactação, compressibilidade, permeabilidade e resistência ao cisalhamento dos rejeitos estudados. A compreensão desses efeitos é essencial para o projeto e operação de pilhas drenadas, especialmente em um contexto de transição da mineração para métodos de disposição mais seguros e sustentáveis, menos dependentes de barragens convencionais. Cabe destacar que tais conclusões se baseiam na análise experimental das frações puras (Rg e RT) e no comportamento observado em ensaios de compactação e adensamento das misturas intermediárias.

Este estudo contribui, assim, para o avanço da engenharia de rejeitos, fornecendo parâmetros experimentais consistentes e evidências que reforçam a importância do controle granulométrico e da caracterização detalhada no processo de disposição. Essas evidências são especialmente úteis para orientar o projeto de pilhas drenadas, onde o controle do teor de finos e da compactação é determinante para a segurança e desempenho. Nesse sentido, os

resultados apresentados podem subsidiar práticas mais seguras, em consonância com as novas exigências do setor mineral e da sociedade por soluções ambientalmente responsáveis.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apesar de os resultados obtidos terem sido consistentes com os objetivos propostos, este estudo apresenta algumas limitações inerentes às condições de laboratório, abrindo espaço para pesquisas complementares. Os ensaios foram realizados em amostras reconstituídas e sob controle experimental, o que pode não reproduzir integralmente as condições de campo. Além disso, a investigação restringiu-se a duas composições granulométricas extremas — rejeito grosso (Rg) e rejeito fino (Rf, representado pelo rejeito total – RT) —, sem contemplar misturas intermediárias, variações no grau de compactação ou diferentes teores de umidade.

Outro ponto relevante é que não foram conduzidos ensaios triaxiais não drenados (CIU), principalmente em função do tempo disponível para a realização desta pesquisa. Considerando, contudo, a importância desses ensaios para a avaliação do comportamento de rejeitos em condições de carregamento rápido ou saturação súbita - cenários críticos para a estabilidade de estruturas de disposição -, recomenda-se fortemente a sua realização em trabalhos futuros.

Diante disso, sugerem-se as seguintes direções para pesquisas complementares:

- Avaliar o comportamento geomecânico de misturas intermediárias entre as frações Rg e Rf, em diferentes proporções de finos;
- Investigar a influência de distintos graus de compactação e teores de umidade nas propriedades mecânicas e hidráulicas dos rejeitos;
- Conduzir ensaios triaxiais não drenados (CIU), a fim de representar de forma mais realista o desempenho dos materiais em cenários críticos;
- Analisar o efeito da presença de finos plásticos sobre o desempenho mecânico e a susceptibilidade à liquefação;
- Ampliar as investigações para a escala de campo, por meio do monitoramento de pilhas reais ou de modelos físicos reduzidos, a fim de validar os resultados laboratoriais em condições reais de disposição.

Essas linhas de pesquisa poderão complementar os resultados aqui apresentados e fornecer subsídios adicionais para o desenvolvimento de diretrizes mais robustas, seguras e ambientalmente sustentáveis na gestão e disposição de rejeitos de mineração.

REFERENCIAS

ABNT. Solo – Análise Granulométrica. NBR 7181. Associação Brasileira de normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro – RJ, 16 p. 2016.

ABNT. Solo – Determinação do limite de liquidez. NBR 6459. Associação Brasileira de normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro – RJ, 9 p. 2016.

ABNT. Solo – Determinação do limite de plasticidade. NBR 7180. Associação Brasileira de normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro – RJ, 7 p. 2016.

ABNT. 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 6458. Associação Brasileira de normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro – RJ, 14 p. 2016.

ABNT. Solo – Ensaio de adensamento unidimensional. NBR 16853. Associação Brasileira de normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro – RJ, 2020.

ABNT. Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. NBR 14545. Associação Brasileira de normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro – RJ, 2021.

ABNT. Solo – Ensaio de Compactação. NBR 7182. Associação Brasileira de normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro – RJ, 9 p. 2020.

Agência Nacional de Mineração, ANM. Anuário mineral brasileiro principais substâncias Metálicas. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro> [acesso em 11 de junho de 2025].

Agência Nacional de Mineração, ANM. Anuário mineral brasileiro principais substâncias Metálicas. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro> [acesso em 11 de junho de 2025].

Instituto Brasileiro de Mineração, IBRAM. Mineração em números. Disponível em: <https://ibram.org.br/publicacoes/?txtSearch=&checkbox-section%5B%5D=1236> [acesso em 11 de junho de 2025]

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. 2020. ASTM D7181 - 20: Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. In: Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de Métodos de Análise de Solo, 2ª Ed., 1ª reimpressão, Rio de Janeiro, EMBRAPA, 212 p., 1997.

FREIRE, A. S. Influência do teor de finos no comportamento geomecânico de um rejeito de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero. 2022. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

GUIMARÃES, N. C. Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

SILVA, C. G. C. Estudo da influência do teor de finos no comportamento de um rejeito de minério de ferro a partir de ensaios edométricos. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

SANTOS, Evelyn Anne Pereira dos et al. Análise da Influência da Granulometria na Condutividade Hidráulica de um Rejeito de Minério de Ferro. In: ABMS, 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Resolução nº 13, de 8 de agosto de 2019. Estabelece disposições sobre segurança de barragens. Brasília, 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Resolução nº 95, de 7 de abril de 2022. Estabelece regras para as barragens de mineração. Brasília, 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Resolução nº 130, de 30 de janeiro de 2023. Altera e complementa diretrizes sobre descarte de rejeitos. Brasília, 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Resolução nº 175, de 12 de janeiro de 2024. Dispõe sobre novas exigências para disposição de rejeitos. Brasília, 2024.

ICMM – INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS. Global Industry Standard on Tailings Management. Londres, 2020. Disponível em: <https://globaltailingsreview.org/>. Acesso em: 06 jun. 2025.

BOSZCZOWSKI, Roberta B. [et al.]. Laboratório de mecânica dos solos: ensaios especiais. São Paulo: Oficina de Textos, 2023.