



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



GABRIELA SILVA CASTELO BRANCO

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA, MINERALÓGICA E GEOTÉCNICA
DE REJEITO ULTRAFINO DE MINÉRIO DE FERRO VISANDO APLICAÇÕES
EM EMPILHAMENTO A SECO**

GABRIELA SILVA CASTELO BRANCO

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA, MINERALÓGICA E
GEOTÉCNICA DE REJEITO ULTRAFINO DE MINÉRIO DE FERRO VISANDO
APLICAÇÕES EM EMPILHAMENTO A SECO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito para a obtenção de título de bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Manejo de Rejeitos;
Geotecnia

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Tatiana Barreto dos Santos



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gabriela Silva Castelo Banco

Caracterização física, química, mineralógica e geotécnica de rejeito ultrafino de minério de ferro visando aplicações em empilhamento a seco

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 27 de abril de 2026

Membros da banca

Dr^a Tatiana Barreto dos Santos - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Eng. José Matheus Vieira MATos -Universidade Federal de Ouro Preto
Eng. Bruno Ancheita Viana -Universidade Federal de Ouro Preto

Tatiana Barreto dos Santos, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 01/06/2026



Documento assinado eletronicamente por **Tatiana Barreto dos Santos, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/06/2026, às 15:34, 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 **1117520** e o código CRC **65E4957B**.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à minha mãe, Marcia, por sempre ter me incentivado e apoiado incondicionalmente, por sempre ter estado presente e nunca me deixar desamparada, meu eterno obrigada, tudo foi por você e por nós.

Agradeço às mulheres com quem dividi meus dias e sempre farão parte da minha vida, às moradoras e ex-alunas da República Água na Boca, aprendi boa parte do que sou com elas, meu eterno amor por vocês e por nossa bandeira.

Agradeço ao NUGEO, em especial aos técnicos que contribuíram para a realização deste trabalho: Breno, Diogo e Whilison, trabalhar com vocês foi um prazer, agradeço toda a ajuda e conversas.

Agradeço também às engenheiras com quem pude trabalhar: Sara Corrent e Karine Gabrielle, vocês são inspirações profissionais e pessoais, poder contar com o conhecimento de vocês foi uma honra.

Por fim, agradeço à minha orientadora Tatiana Barreto, por ter confiado e acreditado no meu trabalho, a minha admiração pela sua trajetória não tem fim.

RESUMO

A caracterização de rejeitos vem ganhando notoriedade no que diz respeito à segurança e estabilidade de estruturas geotécnicas uma vez que o conhecimento de suas propriedades permite uma maior previsibilidade de comportamento através das suas características. Foi realizada a caracterização física, química, mineralógica e geotecnicamente um rejeito ultrafino de minério de ferro proveniente do Quadrilátero Ferrífero a fim de se avaliar sua aptidão para o empilhamento a seco. Os resultados indicaram um material de granulometria ultrafina, classificado como silto-argiloso de baixa permeabilidade e alta retenção de água. A massa específica dos grãos encontrada foi de $3,685 \text{ g/cm}^3$, compatível com a presença de minerais como hematita e goethita, identificados por difração de raios X, juntamente com quartzo e caulinita. O teor de umidade que o rejeito final apresenta é na ordem de 35%, um valor elevado visto que o empilhamento a seco exige uma quantidade de água menor. Através dos limites de Atterberg (limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade) classificaram o rejeito como um silte de baixa compressibilidade. No ensaio de compactação Proctor Normal, obteve-se a umidade ótima de compactação no valor de 28,32% enquanto a massa específica aparente seca máxima assumiu valor de $1,68 \text{ g/cm}^3$, o que confirma que a umidade natural com que o rejeito final sai da planta de beneficiamento não é o ideal para uma compactação eficiente. A análise química foi feita através da fluorescência de raios-X e revelou a predominância de Fe_2O_3 (44,82%) e SiO_2 (23,39%) com Al_2O_3 (3,88%) associados à fração argilosa. Embora o material apresente potencial para o empilhamento, sua aplicação direta é impraticável nas condições apresentadas, sendo necessárias etapas complementares de desaguamento, condicionamento com floculantes e controle rigoroso da umidade durante todo o processo de disposição de rejeitos.

Palavras-chave: Disposição de rejeitos; empilhamento; caracterização; estabilidade; Proctor Normal

ABSTRACT

The characterization of tailings has been gaining prominence in relation to the safety and stability of geotechnical structures, since understanding their properties allows for greater predictability of behavior based on their characteristics. An ultrafine iron ore tailings deposit from the Iron Quadrangle was characterized physically, chemically, mineralogically, and geotechnically to assess its suitability for dry stacking. The results indicated a material with ultrafine grain size, classified as silty clay with low permeability and high water retention. The specific gravity of the grains was found to be 3.685 g/cm^3 , which is consistent with the presence of minerals such as hematite and goethite, which were identified via X-ray diffraction along with quartz and kaolinite. The moisture content of the final tailings is approximately 35%, a high value given that dry stacking requires a lower amount of water. Using Atterberg limits (liquid limit, plastic limit, and plasticity index), the tailings were classified as a low-compressibility silt. In the Standard Proctor compaction test, the optimum compaction moisture content was found to be 26.85%, while the maximum dry bulk density was 1.708 g/cm^3 , confirming that the natural moisture content of the final tailings as they leave the processing plant is not ideal for efficient compaction. The chemical analysis was performed using X-ray fluorescence and revealed a predominance of Fe_2O_3 (44.82%) and SiO_2 (23.39%), with Al_2O_3 (3.88%) associated with the clay fraction. Although the material shows potential for stacking, its direct application is impractical under the conditions presented, requiring additional steps such as dewatering, conditioning with flocculants, and strict moisture control throughout the tailings disposal process.

Keywords: Tailings disposal; stacking; characterization; stability; Standard Proctor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema ilustrativo de um cicloclassificador.	12
Figura 2: Carta de plasticidade.....	14
Figura 3: Aspecto da curva de compactação do solo.	17
Figura 4: Influência da energia de compactação na curva de compactação do solo.....	17
Figura 5: Representação esquemática da geometria Bragg-Brentano.	19
Figura 6: Fenômeno da difração de raios-X em um cristal.....	19
Figura 7: Fenômeno da difração de raios-X em um cristal.....	23
Figura 8: Difratoograma da lama de rejeito de Conceição.	24
Figura 9: Caracterização granulométrica dos rejeitos RMFA e RMFB.....	26
Figura 10: DRX dos rejeitos: (a) RMFA e (b) RMFB.....	27
Figura 11: a) bombona entregue na UFOP; b) rejeito nas bandejas para secagem.....	34
Figura 12: a) amostra após a secagem; b) amostra destorroada.....	34
Figura 13: Fluxograma de atividades.....	39
Figura 14: cyclosizer utilizado para a determinação da distribuição granulométrica do rejeito.	40
Figura 15: a) despressurização dos balões volumétricos; b) balões volumétricos em banho maria.....	42
Figura 16: a) amostra utilizada para o teste de umidade 1; b) amostra para o teste de umidade 2.....	43
Figura 17: Calibração do equipamento.	45
Figura 18: a) peneira utilizada para a preparação da amostra; b) amostra sendo peneirada; c) homogeneização da amostra.	45
Figura 19: Placa de vidro fosco e gabarito utilizados.	46
Figura 20: “molde” comparado ao gabarito.....	46
Figura 21: Floculante com a cadeia aberta.....	48
Figura 22: a) slump test sem a adição de reagentes, dentro do molde; b) resultado do slump test sem a adição de reagentes.	48
Figura 23: Corpo de prova resultante do ensaio de compactação.....	52
Figura 24: Difratoograma de raios-X gerado.....	54
Figura 25: Lista de picos obtidos no DRX.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais mecanismos de filtração.	7
Tabela 2: Definição das grandezas básicas descritivas do estado físico dos solos.	10
Tabela 3: Principais classes de rejeitos.	11
Tabela 4: Valores dos parâmetros característicos D10, D50 E D90 do rejeito de minério de ferro na forma de lama e na forma seca.	23
Tabela 5: Análise mineralógica quantitativa pelo método Rietveld.	24
Tabela 6: Composição química (em teor de óxidos) da lama de rejeito de Conceição, determinado pelo método fundido e prensado.	25
Tabela 7: Caracterização física dos rejeitos RMFA e RMFB.	27
Tabela 8: Composição química elementar dos rejeitos RMFA e RMFB.	27
Tabela 9: Relação das amostras estudadas.	28
Tabela 10: Resultados das análises químicas por ICP das amostras globais.	28
Tabela 11: Resultados das análises químicas por ICP por frações do cyclosizer.	29
Tabela 12: Resultados da análise granulométrica pelo cyclosizer.	32
Tabela 13: Levantamento do D ₈₀ do cyclosizer e das amostras analisadas no Cilas com e sem o uso de dispersante.	32
Tabela 14: Minerais identificados através da difração de raios-X.	33
Tabela 15: Distribuição granulométrica do rejeito.	41
Tabela 16: Resultados da determinação de densidade dos sólidos.	42
Tabela 17: Resultados do ensaio de umidade.	44
Tabela 18: Resultado do ensaio de Casagrande para a determinação do Limite de Liquidez.	46
Tabela 19: Resultado para determinar o limite de plasticidade do rejeito.	47
Tabela 20: Resultados do slump test para o floculante 1.	49
Tabela 21: Resultados do slump test para o floculante 2.	50
Tabela 22: Resultados do ensaio Proctor de Compactação.	52
Tabela 23: Composição química da alimentação e da torta do decanter.	56

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. JUSTIFICATIVA.....	2
3. OBJETIVOS	2
3.1 Objetivo geral	2
3.2 Objetivos específicos	2
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
4.1 Geração de Rejeitos de Minério de Ferro.....	4
4.2 Métodos de Disposição de Rejeitos	5
4.3 Empilhamento a Seco e Drenado	6
4.4 Caracterização de Rejeitos	8
4.4.1. Parâmetros Físicos	9
4.4.2. Floculação e Clarificação	15
4.4.3. Compactação	16
4.4.4. Parâmetros Mineralógicos	18
4.5 Propriedades Geotécnicas Relevantes	21
4.6 Trabalhos Anteriores (Estado da Arte)	22
4.6.1. Caracterização do rejeito de minério de ferro (IOT) e avaliação da sua influência no comportamento físico-químico e mecânico de pastas de cimento (Bezerra, 2017).....	22
4.6.2. Caracterização física, química e mineralógica de rejeitos de minério de ferro (Martinatto, 2024).	25
4.6.3. Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale (Wolff, 2009)...	27
5. METODOLOGIA	34
5.1. Determinação de Distribuição Granulométrica.....	35
5.2. Determinação da Massa Específica dos Grãos	35
5.3. Determinação da Massa Específica Aparente	35
5.4. Teor de Umidade.....	36
5.5. Limites de Atterberg	36

5.6. Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone - <i>Slump Test</i>	37
5.7. Ensaio Proctor Normal de Compactação	38
5.8. Difração de Raios-X e Análise Química.....	38
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
6.1. Distribuição Granulométrica.....	40
6.2. Massa Específica dos Grãos e Massa Específica Aparente	41
6.3. Teor de Umidade.....	43
6.4. Limites de Atterberg	44
6.5. Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone - <i>Slump Test</i>	47
6.6. Ensaio Proctor de Compactação	51
6.7. Difração de Raios-X.....	53
6.8. Análise Química.....	55
7. CONCLUSÃO	57
8. REFERÊNCIAS	59

1. INTRODUÇÃO

O setor mineral desempenha um papel fundamental no desenvolvimento econômico e social, sendo responsável pelo fornecimento de matérias-primas essenciais para diversas cadeias produtivas. No entanto, as atividades de mineração são também caracterizadas pela geração de grandes volumes de resíduos, especialmente estéreis e rejeitos, cuja gestão adequada representa um dos principais desafios da indústria.

De acordo com Alvarenga (2023), os rejeitos são resultantes das etapas de beneficiamento mineral e correspondem à fração do material processado que não apresenta teor econômico viável para recuperação. Em operações de minério de ferro, esses rejeitos frequentemente apresentam granulometria de fina a ultrafina, ou seja, em forma de lamas, elevada umidade e comportamento geotécnico complexo, fatores que influenciam diretamente sua disposição e estabilidade.

Rodrigues (2017) cita em sua monografia que os rejeitos de mineradoras brasileiras foram dispostos preferencialmente em barragens, devido à sua viabilidade econômica e operacional. Entretanto, eventos recentes envolvendo falhas estruturais, como os rompimentos de barragens em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), evidenciaram a necessidade de adoção de métodos mais seguros e sustentáveis.

Nesse contexto, técnicas como o empilhamento drenado e o empilhamento a seco têm se destacado como soluções promissoras no que diz respeito às operações de desaguamento visando o reaproveitamento da água, contribuindo para uma mineração mais sustentável, além de serem técnicas que aumentam a estabilidade das estruturas, como é apontado por Alvarenga (2023). No entanto, a viabilidade dessas técnicas depende diretamente das características físicas, químicas, mineralógicas e geotécnicas do rejeito, com destaque para parâmetros como granulometria, teor de umidade, densidade e comportamento de compactação.

Schulz (2025) aponta que rejeitos ultrafinos, em particular, apresentam desafios adicionais, como baixa permeabilidade, elevada retenção de água e dificuldades de desaguamento, o que pode comprometer sua aplicação em técnicas de empilhamento. Dessa forma, a caracterização detalhada desses materiais torna-se essencial para a compreensão de seu comportamento e para a definição de estratégias de disposição mais eficientes.

No contexto da mineradora fornecedora da amostra deste estudo, o rejeito é submetido a processo de desaguamento por centrifugação, resultando em um produto com teor de umidade

ainda elevado, da ordem de 35%, o que pode limitar sua aplicabilidade em empilhamento. Assim, torna-se necessário aprofundar o conhecimento sobre as propriedades desse material, de modo a subsidiar melhorias nos processos de desagüamento e na sua disposição final.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar, sob os aspectos físico, químico, mineralógico e geotécnico, um rejeito de minério de ferro proveniente do Quadrilátero Ferrífero, visando contribuir para a avaliação de sua aptidão para técnicas alternativas de disposição, em especial o empilhamento a seco.

2. JUSTIFICATIVA

Com as reservas minerais cada vez mais pobres ou de difícil acesso, a geração de grandes volumes de rejeito têm se tornado uma problemática visto que o método de disposição de rejeitos mais utilizado ao longo dos últimos anos, por conta de viabilidade econômica e operacional, é a disposição em barragens. Com o fortalecimento das políticas relacionadas à segurança de barragens e a falta de espaço físico para expansão das estruturas, torna-se necessário o estudo e avaliação de métodos alternativos de disposição que permitam o aproveitamento posterior do espaço e garanta a estabilidade e segurança de grandes estruturas na mineração.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Caracterizar física, química, mineralógica e geotecnicamente um rejeito ultrafino de minério de ferro proveniente do Quadrilátero Ferrífero, visando avaliar sua aptidão para técnicas de disposição em pilhas, com ênfase no empilhamento a seco.

3.2 Objetivos específicos

- Determinar a distribuição granulométrica do rejeito, com ênfase na fração ultrafina e suas implicações no comportamento hidráulico e geotécnico;
- Determinar a massa específica dos grãos e a massa específica aparente do material;
- Determinar o teor de umidade do rejeito e avaliar sua influência na trabalhabilidade e no processo de desaguamento;
- Determinar os limites de consistência (limites de Atterberg), visando avaliar a plasticidade e o comportamento do material;
- Realizar o ensaio de compactação Proctor, com o objetivo de determinar a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima;
- Caracterizar a composição mineralógica por meio de difração de raios-X (DRX);
- Determinar a composição química por meio de fluorescência de raios-X (FRX);
- Comparar os resultados obtidos com dados da literatura técnica, visando contextualizar o comportamento do rejeito estudado;
- Avaliar, de forma integrada, a influência das propriedades determinadas na viabilidade do empilhamento a seco.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Geração de Rejeitos de Minério de Ferro

Em 2018, Andrade apontou que a produção brasileira de minério de ferro em 2016 foi responsável por 17,5% da produção mundial e até os dias de hoje é responsável por uma parte considerável da economia nacional. O minério de ferro é altamente utilizado para cumprir as demandas de aço no setor siderúrgico e os principais minerais de ferro são magnetita, hematita, goethita, limonita, siderita, pirita e pirrotita cujas reservas são localizadas nos estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Pará, sendo o Quadrilátero Ferrífero (QF), a porção central do estado de Minas Gerais, caracterizada por possuir vastos depósitos de minério de ferro que foram responsáveis por quase toda a produção nacional até 1986.

Ainda de acordo com Andrade (2018), pode-se definir a caracterização mineralógica como um estudo tecnológico de um determinado minério que envolve análises qualitativas e quantitativas acerca dele. Para a definição de um fluxograma de processamento de minério de ferro são considerados fatores inerentes e também alheios a ele. Como fatores intrínsecos, a distribuição granulométrica, o grau de liberação das partículas, os teores químicos e associações mineralógicas são características determinantes e, como fatores extrínsecos têm-se as características desejadas para o seu transporte e destinação nas etapas metalúrgicas subsequentes além dos aspectos econômicos que envolvem as operações necessárias para a adequação do produto para seus devidos fins. Sendo assim, cada planta de beneficiamento possui um fluxograma ideal que depende das características específicas do minério.

Usualmente, os minérios de ferro de alto teor contam com operações de fragmentação, classificação granulométrica e desaguamento, enquanto para minérios mais pobres, há a operação de concentração por métodos gravíticos, quando a liberação dos minerais ocorre em faixas granulométricas mais grosseiras; magnéticos ou por flotação (direta ou indireta) quando o material requer moagem fina para a liberação de partículas, sendo comum a combinação dos métodos (Andrade, 2018).

Quando o minério de ferro é submetido ao processo de beneficiamento, passando pelas operações unitárias que compõem o seu fluxograma de tratamento, gera-se um subproduto denominado rejeito que é composto por água, reagentes químicos e partículas finas de minério. De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010), o que pode ser definido como rejeito são:

“[...]resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada.”

A gestão de rejeitos é uma fase que concentra diversas áreas do conhecimento que devem ser avaliadas juntas como hidrologia, geotecnia, meio ambiente e legislação.

4.2 Métodos de Disposição de Rejeitos

Existem algumas maneiras de se fazer a disposição dos rejeitos gerados pela mineração, os métodos mais populares são: disposição em barragens, que é a técnica mais empregada no cenário nacional, onde são construídos diques de contenção ou barragens com o próprio rejeito ou de solo natural que devem permanecer estáveis por longos períodos de tempo; em minas subterrâneas, onde o rejeito funciona como um preenchimento de cavidades que promove a sustentação das aberturas a fim de se evitar o colapso destas, oferecendo a possibilidade de atuar como piso para o próximo nível da lavra; em cavas exauridas, chamadas de disposição em “pit”, onde o rejeito é lançado em áreas já explotadas onde não há mais valor agregado ao material, com o rejeito podendo passar ou não pelo processo de adensamento; o empilhamento drenado é adequado para rejeitos arenosos, sem retenção de água livre, que por sua vez é liberada através de um sistema de drenagem de grande capacidade de vazão; também há o empilhamento a seco, onde o rejeito é geralmente espessado ou filtrado, resultando em um baixo teor de umidade e manuseio e trabalhabilidade próximos ao de um sólido, com maior resistência ao cisalhamento e condição autoportante; e também há a técnica de codisposição de rejeito e estéril, que consiste na disposição dos dois resíduos gerados na mineração de forma a compartilhar o espaço físico, de acordo com Figueiredo (2007), esse método de disposição promove a melhoria nas propriedades resistivas e drenabilidade do material, além de exigir um espaço menor de disposição visto que os finos do rejeito podem ocupar os vazios dos estéréis granulares (Trampus e França, 2018).

As tragédias ocorridas envolvendo barragens em Mariana e Brumadinho, em 2015 e

2019, despertou uma necessidade da reavaliação da disposição de rejeitos no Brasil, além do aumento constante de rejeito produzido, atribuído às reservas minerais cada vez mais pobres e/ou menos acessíveis, o que afeta principalmente questões ambientais que envolvem o setor. De acordo com o engenheiro de minas, Wagner Nascimento, em uma entrevista para a Revista Mineração e Sustentabilidade em 2021, para atender as exigências estabelecidas pela Política Nacional de Segurança de Barragens, o setor minerário têm enfrentado grandes desafios financeiros ao passo que a disposição de rejeitos de forma fluida sempre foi considerada a mais econômica dentre as disponíveis e, para realizar a transição para a disposição em pilhas pode exigir um grande investimento em tecnologias inovadoras, além de estudos mais aprofundados relacionados ao rejeito final. Em contrapartida, para Wagner, a longo prazo o investimento nessa mudança de processo para empilhamento pode ser mais economicamente viável do que o atendimento às imposições legais que o novo sistema de gerenciamento de barragens determina.

O objeto do presente estudo é subproduto de uma mina a céu aberto, ainda em atividade, o que descarta a possibilidade de disposição do rejeito em cava subterrânea ou em pit, restando somente as seguintes opções de disposição: barragem, empilhamento e codisposição. Como já foi apresentado, as barragens vêm se tornando obsoletas no cenário mineral por fatores relacionados à segurança e a codisposição de rejeitos com estéril apresenta desafios como por exemplo a diferença de propriedades físicas, químicas e geotécnicas entre os materiais que apresentam uma complexidade técnica e operacional para a viabilidade do método (Alvarenga, 2023). Por fim, restam duas alternativas: o empilhamento drenado e a seco.

4.3 Empilhamento a Seco e Drenado

A técnica de empilhamento de rejeitos não é novidade em território nacional, entretanto, especialmente o empilhamento de finos tem representado um desafio para os engenheiros, que vêm se dedicando a encontrar soluções viáveis que garantam a segurança e estabilidade das pilhas. Por se tratar de materiais que variam de argilas a siltes, o fator que preocupa o setor é a drenagem interna das pilhas uma vez que é a principal influência na estabilidade de estruturas geotécnicas, como foi apontado por Nascimento (2021), associado é claro, a diversos outros fatores como a eficiência da compactação, a granulometria do rejeito, as características mineralógicas, entre outras que devem ser investigadas profundamente para a garantia da boa execução do projeto, além de estudos acerca de possíveis reagentes que condicionem um

melhor empilhamento em condições mais favoráveis.

O método de empilhamento de rejeito a seco consiste na disposição do material previamente desaguado, com baixa umidade e consequentemente uma alta resistência ao cisalhamento. A técnica foi desenvolvida na intenção de minimizar o problema gerado pelas lamas das refinarias de bauxita. Patock (2021) qualificou o método *dry stacking* como a melhor tecnologia empregada na gestão de rejeitos de mineração e, ainda que essa alternativa apresente um aumento nos custos envolvidos atribuída ao manejo recorrente de material, a técnica permite que a operação de mineração siga o cronograma regular (Lugão *et al.* 2023).

A filtragem é um processo de separação sólido-líquido cujas partículas sólidas são retidas em um meio filtrante de forma que somente o líquido passe por ele (Guimarães, 2011) e pode ser realizada por variadas técnicas, que estão apresentadas na tabela 01, onde se faz necessária a aplicação de uma força externa para que a filtragem ocorra, essa força pode ser a gravidade, um vácuo, pressão ou ação centrífuga.

Tipos	Características	Modelos de Filtros
Filtragem a vácuo	Criada uma pressão negativa debaixo do meio filtrante	Filtro de tambor, disco convencional, filtro horizontal de mesa, e filtro horizontal de correia
Filtragem sob pressão	Uma pressão positiva é aplicada na polpa	Filtro prensa horizontal, filtro prensa vertical
Filtragem centrífuga	Utiliza força centrífuga para forçar a passagem do líquido	Centrífugas verticais e Decanters
Filtragem hiperbárica	Em que se combinam vácuo e pressão	Filtro de disco encapsulado ou hiperbárico
Filtragem capilar	Utiliza a ação de capilares de meios cerâmicos porosos para efetuar o desaguamento	Ceramec

Tabela 1: Principais mecanismos de filtragem.

Fonte: Guimarães, 2011 (Adaptado).

No empilhamento drenado de rejeitos, a própria estrutura age como sistema drenante, possibilitando a passagem de água de forma gravitacional e subvertical no seu interior,

associada a uma técnica de drenagem interna com grande capacidade de vazão. A associação dos sistemas de drenagem proporciona um depósito praticamente isento de livre acúmulo de poropressões, resultando em uma maior estabilidade para o empilhamento. Em geral, após a disposição e compactação do rejeito, ele se transforma em uma estrutura autoportante, podendo exigir pequenas estruturas de retenção de fluidos superficiais a depender da umidade e da plasticidade do depósito (Vasconcelos, 2021).

Chama-se torta o material resultante da filtração da lama e é composta principalmente de partículas sólidas com pouca ou nenhuma água livre. As tecnologias empregadas em rejeitos da classe lama apresentam, em geral, baixa taxa unitária de filtração e umidade da torta alta mas ainda assim, resultam em umidades melhores para o empilhamento do que quando submetidas somente ao espessamento. Como as lamas representam um efeito negativo na operação de filtração, são adicionados aos tanques, floculantes para a formação de flocos que visam evitar o entupimento dos meios filtrantes (Guimarães, 2011).

4.4 Caracterização de Rejeitos

A caracterização de rejeitos contribui para o conhecimento de suas características físicas, químicas e mineralógicas e também de sua resposta ao processo de refino, consequentemente, favorece a viabilização do seu posterior aproveitamento, como por exemplo, em obras civis (Borges *et al.*, 2008). Em geral, rejeitos podem apresentar características diversas de acordo com o tipo de mineral lavrado e do beneficiamento ao qual foi submetido. Eles podem apresentar granulometria fina, de silte à argila, apresentando alta plasticidade e compressibilidade e dificuldade de sedimentação, ou podem ser arenosos, com alta permeabilidade e maior resistência ao cisalhamento. Comumente, os rejeitos originados no tratamento de minério de ferro apresentam granulometria de areias finas e médias, de alta permeabilidade e baixa compressibilidade, ao passo que ao aumentar a proporção de partículas siltosas no material, a plasticidade do rejeito é elevada (Rafael, 2012). Além disso, outra tendência presente nos rejeitos de minério de ferro é a de apresentar maior densidade em relação a rejeitos de outros tipos de mineração por conta da presença de minerais mais densos nas rochas hospedeiras como goethita e hematita.

Se o rejeito não está saturado, os seus poros se encontram preenchidos de ar, que podem se apresentar em forma de bolhas ou de pequenos canais interligados, o que resulta em uma espécie de membrana formada pela água na superfície, fenômeno causado pela tensão

superficial da água, que causa uma diferença de pressão entre os fluidos denominada tensão de sucção, que é responsável por variados fenômenos associados ao comportamento mecânico dos solos. Quando partículas argilosas entram em contato com a água, as moléculas são orientadas em relação aos grãos e aos íons que o contornam. Por conta das forças eletroquímicas, as camadas mais próximas às partículas estão mais aderidas a elas, o que promove um comportamento conhecido como “água sólida” cuja mobilidade das moléculas dos fluidos não existe e o contato entre as partículas podem ser feitos pela própria água. Esse comportamento afeta diretamente a deformação e a resistência dos solos quando solicitados por forças externas (Pinto, 2006).

4.4.1. Parâmetros Físicos

Há uma série de grandezas consideradas básicas para se descrever o estado físico de um solo, essas grandezas estão diretamente interligadas, por exemplo se o índice de vazios (e) aumenta, a porosidade (n) também aumenta ao passo que o peso específico (γ) diminui. Utilizando as simbologias de Fernandes (2016), os volumes de sólidos, água e ar são representados por V_s , V_w e V_a , respectivamente, e os pesos por W_s , W_w e W_a . Observa-se na tabela 02 que o peso do ar não é determinante na definição das grandezas físicas pois é desprezível.

Grandeza	Símbolo	Definição	Observações
Índice de Vazios	e	$\frac{V_v}{V_s}$	Em %
Porosidade	n	$\frac{V_v}{V}$	Em %
Grau de Saturação	S_r	$\frac{V_w}{V_v}$	Em %
Teor de Umidade	ω	$\frac{W_w}{W_s}$	-
Peso Específico	γ	$\frac{W_s + W_w}{V}$	-
Peso Específico dos sólidos	γ_s	$\frac{W_s}{V_s}$	Em geral, está no intervalo 25,5 – 27,5

Tabela 2: Definição das grandezas básicas descritivas do estado físico dos solos.

Fonte: Fernandes, 2016 (Adaptado).

GRANULOMETRIA

A distribuição granulométrica é uma das principais propriedades de identificação de um solo, visto que os processos aos quais o material será submetido e os equipamentos a serem utilizados dependem, usualmente, do tamanho dos grãos. A análise dos tamanhos das partículas de uma determinada amostra envolve a determinação da porcentagem, em massa, dos grãos em faixas de tamanho diferentes em relação ao peso total da amostra. Em termos de distribuição granulométrica, os rejeitos apresentam as seguintes classes:

Classe de Rejeito	Símbolo	Descrição	Exemplos
Rejeitos granulares (<i>Coarse tailings</i>)	CT	Areia siltosa não plástica	Sal, areias minerais, rejeito grosseiro de carvão mineral, material arenoso de minério de ferro
Rejeitos de rocha dura (<i>Hard rock tailings</i>)	HRT	Silte arenoso	Cobre, sulfeto, níquel, ouro
Rejeitos de rochas alteradas (<i>Altered rock tailings</i>)	ART	Silte arenoso, vestígio de partículas de argila	Cobre pórfiro com alteração hidrotermal, rocha oxidada
Rejeitos finos (<i>Fine tailings</i>)	FT	Silte com vestígio de partículas de argila	Rejeitos finos de carvão, resíduo de bauxita (lama vermelha)
Rejeitos ultrafinos (<i>Ultra fine tailings</i>)	UFT	Argila siltosa, alta plasticidade, densidade e condutividade hidráulica muito baixas	Areia betuminosa (<i>mature fine tailings</i> – MFT), finos de kimberlito e de carvão

Tabela 3: Principais classes de rejeitos.

Fonte: Alvarenga, 2023.

Para solos grosseiros, ou seja, de maior dimensões, o método de classificação utilizado é o de peneiramento, regido pela ABNT NBR 7181:2025, onde a amostra é passada por uma série de peneiras padronizadas com aberturas sucessivamente menores. Ao fim do ensaio, pesa-se a massa de material retida em cada peneira e se determina a porcentagem cumulativa do passante em cada uma. Já para solos finos, há algumas opções para a determinação da distribuição granulométrica como por exemplo a sedimentação, granulometria a laser, *cyclosizer*, entre outras.

O rejeito caracterizado para a realização deste trabalho apresentava uma granulometria fina, por se tratar da lama proveniente do beneficiamento de minério de ferro e o método escolhido para a determinação da sua distribuição foi o hidroclassificador (*cyclosizer*). O equipamento conta com uma sequência de cicloclassificadores ligados em série que vão reduzindo a tubulação de alimentação de saída na direção do fluxo da polpa. Essa redução dos diâmetros resulta em maiores velocidades de suspensão e maiores forças centrífugas no interior de cada cicloclassificador, o que promove um decréscimo do tamanho de separação dos grãos (Braga *et al.*, 2007). Para a realização da classificação, uma suspensão de partículas é introduzida sob pressão através da abertura de alimentação do equipamento, que pela entrada tangencial e forma cilíndrica, promovem uma aceleração centrífuga em que as partículas de maior diâmetro sejam direcionadas para as paredes externas do classificador mais rapidamente e em função do movimento helicoidal ascendente, o equipamento descarrega essas partículas pela abertura do *apex* (abertura circular na parte terminal da seção cônica) enquanto a polpa contendo as partículas mais finas é descarregado no *vortex* (tubo que sobressai do classificador) e segue para as espirais descendentes.

Dessa forma, há para cada cicloclassificador um diâmetro de separação que age da mesma forma que as aberturas das peneiras. À medida em que os ciclos aumentam, as dimensões das partículas retidas se aproximam da dimensão limite de separação, ou seja, do diâmetro de separação.

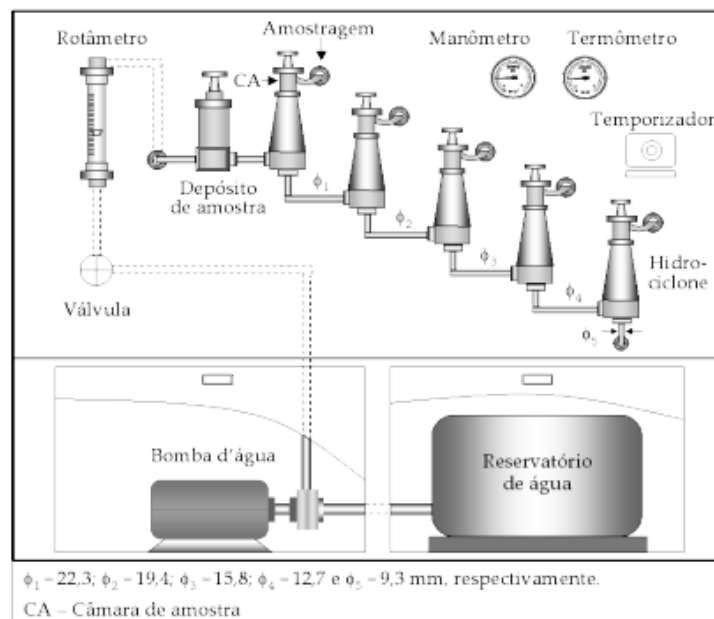


Figura 1: Esquema ilustrativo de um cicloclassificador.

Fonte: Braga *et al.*, 2007.

DENSIDADE OU MASSA ESPECÍFICA

Para a determinação da densidade de um solo granular, existem diversos tipos de ensaio que fornecem variados resultados de densidade máxima e mínima. Em materiais que apresentam uma grande porcentagem de sedimentos areno-siltosos, a densidade pode ser consideravelmente menor do que seria a densidade mínima desse solo. A quantidade de água presente em solos granulares pode variar entre menos de 0,1% e 40%, enquanto para solos coesos, a água contida varia dentro de um intervalo consideravelmente maior (Lambe e Whitman, 1969).

A densidade é uma propriedade que independe do tamanho da partícula e é intrínseca ao material analisado e pode ser definida como a razão entre a massa de uma determinada substância e o seu volume. Como no beneficiamento mineral, as amostras utilizadas costumam corresponder a grandes volumes de grãos, é exigido o conhecimento da densidade real ou relativa, que considera o volume de grãos sem o espaço vazio existente entre eles; e a densidade aparente, que considera esse espaço cujo valor sempre será menor que a densidade real, para um mesmo material.

A densidade relativa é uma razão entre a densidade do material analisado e a de uma substância conhecida, usualmente água cuja densidade corresponde à $1,0 \text{ g/cm}^3$, sendo assim, quando se afirma que densidade real da hematita, por exemplo, tem valor de 5 g/cm^3 , quer dizer

que ela é correspondente à 5 vezes a densidade da água. Em contrapartida, a densidade aparente é medida a vácuo pois é determinada no ar.

Essa propriedade é utilizada como ferramenta auxiliar na identificação de substâncias, além de ser a característica diferenciadora nas operações de concentração de minerais. Além disso, a densidade real é utilizada para a determinação da densidade de polpas enquanto a aparente é aplicada para se determinar o volume de minério ou do produto de um determinado processo (alimentação, rejeito, concentrado e etc).

Na NBR 6458, é descrito o método de determinação da massa específica dos grãos (ou densidade real) através do método do balão volumétrico (ou picnômetro) que é realizado com a ausência de ar, como foi dito anteriormente. Ainda na mesma norma, é descrito que a densidade aparente é o quociente entre a massa e o volume do agregado analisado, ou seja, pela seguinte relação:

$$\rho = \frac{\text{massa [g]}}{\text{volume [mL]}} \quad (1)$$

TEOR DE UMIDADE

O uso da água no tratamento de minérios é muito vantajoso pois ela funciona como meio de transporte do minério, minimiza o calor gerado pelas operações e impede a suspensão de particulados no ambiente. Sendo assim, ao fim do ciclo de tratamento, o rejeito gerado pode se apresentar de três maneiras, descritas pelo *Australia's Department of Industry Innovation and Science* (2016): num estado mais disperso, em forma de polpa; em consistência de uma lama ou pasta, quando ele é parcialmente desaguado; e por fim, quando ele é filtrado, gera-se a torta, que apresenta, normalmente, um teor bem baixo de água. A quantidade de líquido presente no rejeito tem influência direta na forma de transporte utilizada, o que é responsável por elevar os custos de forma prejudicial ao empreendimento.

De acordo com Sampaio *et al.* (2007), a umidade pode ser definida como a água de superfície dividida pelo peso do minério seco. O cálculo do teor de umidade em uma amostra é expresso em % e é a razão entre a diferença da massa úmida e a massa seca sobre a massa úmida multiplicada por 100.

LIMITES DE ATTERBERG

De acordo com Craig (2007), o termo plasticidade é definido como a capacidade do solo e/ou rejeito sofrer uma deformação irreversível sem se romper ou esfarelar, e está intimamente ligada à quantidade de água presente no material analisado. Se um solo no estado líquido tiver a quantidade de água que o compõem reduzida gradualmente, o estado desse material mudará passando pelo plástico, semi-sólido até atingir o estado sólido. A plasticidade de um solo fino é atribuída à presença significativa de partículas de argila e material orgânico presentes nele, visto que os espaços vazios entre os grãos cujos tamanhos são bem pequenos, resultam na água que os ocupa exercendo uma pressão negativa em razão das tensões capilares presentes, culminando numa coesão que permite a moldagem do material.

Os valores que delimitam o intervalo que representa o teor de umidade onde o solo se comporta plasticamente são definidos como os limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP). A diferença entre os dois valores representa o índice de plasticidade (IP) do solo e sua classificação é realizada baseada no IP e na divisão destes em grupos que levam em consideração sua granulometria. Essa classificação é indicada por meio de letras que representam os termos principais que o qualifica, baseado na norma britânica (*British Standards*) BS 5930:1999. Os limites de liquidez e plasticidade são utilizados para classificar solos finos através da carta de plasticidade cujos eixos são referentes ao IP, no eixo y, e ao LL, no eixo x e, a depender da zona do gráfico onde o ponto correspondente aos valores encontrados nos ensaios cair, as letras correspondentes melhor descrevem o solo analisado. As duas primeiras letras são referentes à fração de tamanho predominante no solo e, caso houver, as letras seguintes se referem a outras descrições “extras”.

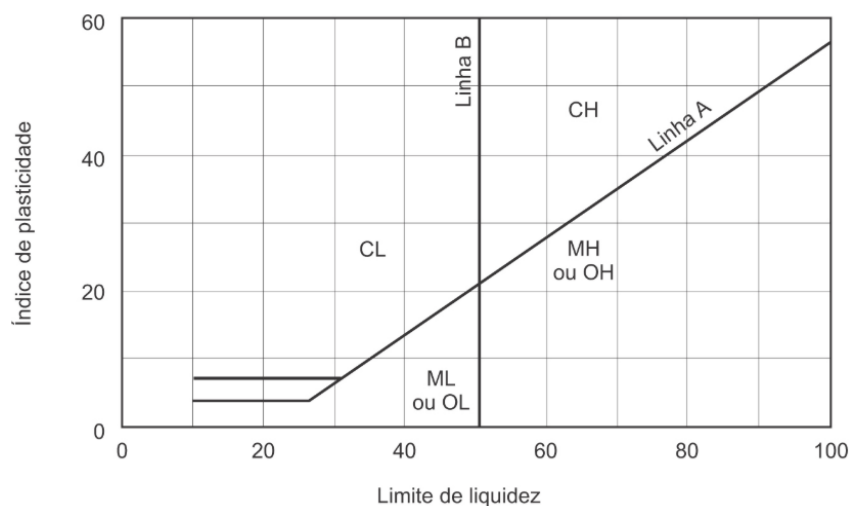


Figura 2: Carta de plasticidade.

Fonte: Pinto, 2006.

Os limites de Atterberg são utilizados para se indicar a influência de finos silto-argilosos no comportamento dos solos e/ou rejeitos e o principal objetivo da determinação deles dentro da classificação dos solos é poder prever prováveis comportamentos dos materiais ou pelo menos direcionar a análise de possíveis problemas futuros. Nos trabalhos de Pereira (2024) e Martinatto *et al.* (2024) os rejeitos avaliados foram classificados como não plásticos, não apresentando limites de consistência e foram classificados como um silte de baixa compressibilidade (ML) e como uma areia siltosa (SM), respectivamente.

4.4.2. Floculação e Clarificação

Na fase de caracterização de rejeitos, também são avaliadas as possibilidades de se adicionar reagentes às lamas que condicionem um melhor empilhamento em condições mais favoráveis. As interações entre superfícies são determinantes para o processo de agregação de partículas e atuam diretamente sobre os custos relacionados a coagulantes e floculantes. O uso de polímeros para a floculação de partículas de argila para melhorar a eficiência da separação sólido-líquido tem sido bastante estudado no setor mineral visto que as forças entre o empacotamento das argilas estão intimamente ligadas à eficiência do espessamento e compressão das partículas agregadas e, se não forem devidamente estudadas, as consequências podem ser instalações de armazenamento de rejeitos cada vez maiores, com chances crescentes de falhas geotécnicas (Liu *et al.* 2020).

Além da melhor estabilidade, permite também a clarificação da água, que é a operação de sedimentação das partículas com o objetivo de produzir um líquido isento de sólidos denominado clarificado, que promove o reaproveitamento da água utilizada no processo, formando assim um ciclo sustentável sem desperdício (Sampaio *et al.*, 2018).

Para a avaliação da eficiência do processo de floculação, utiliza-se a análise da turbidez do líquido clarificado. A turbidez é definida como “a dificuldade que a luz tem de atravessar uma certa quantidade de água, conferindo uma aparência turva à mesma. Mostra visualmente o quanto de sólido está presente no filtrado” (Cruz, 2023, p. 28). Durante a fase de testes, o *slump test* é uma técnica que, embora seja aplicada a concretos normalmente, mostrou-se eficiente para espécies de polpas e pastas minerais como foi observado por Águido *et al.* (2022), é um ensaio que possibilita tanto a avaliação da consistência do material floculado, ou seja, da eficiência do floculante na agregação das partículas, quanto do clarificado que é coletado ao

final do ensaio, sendo direcionado para o turbidímetro para a análise da turbidez.

4.4.3. Compactação

A compactação é um processo que ocorre devido a uma ação mecânica que resulta em uma redução do índice de vazios, aumento da resistência ao cisalhamento e redução da compressibilidade de um determinado material, como solos e rejeitos. Para compactar um solo, podem ser utilizados vibração, impacto, amassamento ou pressão e a compactação pode ser classificada como estática ou vibratória. O procedimento depende diretamente da energia aplicada e da umidade do solo no momento da compactação. A umidade exerce forte influência no processo devido à ação da água intersticial entre as partículas, sendo assim, se o solo apresentar umidade muito baixa, o atrito entre as partículas dificulta a sua redução de vazios e a água fica retida por forças de absorção, efeito capilar e tensão da água, o que dificulta a desagregação e o rearranjo dos grãos com menor porosidade, já o inverso, ou seja, em que a umidade é muito elevada, a água age como um lubrificante entre as partículas, promovendo uma espécie de “prisão” para o ar contido no solo.

Sendo assim, pode-se concluir que existe uma determinada energia de compactação ideal que deve ser aplicada a uma chamada umidade ótima ($h_{ót}$) desconhecida, que corresponde à uma massa específica seca máxima do solo ($\gamma_{dmáx}$) que é determinada através da realização do ensaio Proctor. É possível realizar a compactação de um mesmo solo com variadas energias e, ao passo em que se aumenta essa energia, o teor de umidade ótima tende a diminuir e a densidade aparente máxima seca a aumentar.

O engenheiro Ralph Proctor (1933) publicou uma série de artigos onde pela primeira vez se enuncia um dos princípios fundamentais da mecânica dos solos, em sua obra, Proctor destaca que os fatores fundamentais na determinação da compactação ideal são: o tipo de solo, o teor de umidade e o esforço empregado. O ensaio de compactação mais amplamente utilizado, que foi realizado no presente trabalho, carrega seu nome e é regido pela ABNT NBR 7182.

O ensaio Proctor com energia normal de compactação, como descrito por Craig (2007), é realizado em camadas, dentro de um cilindro de dimensões conhecidas, onde a primeira camada é compactada através de 27 golpes com um soquete de 2,5 kg de massa que cai livremente de uma altura de 300 mm na superfície e o processo se repete por mais duas vezes até que o cilindro esteja completamente preenchido. O corpo de prova (CP) compactado é então retirado do interior do cilindro, dividido em partes e pequenas frações são recolhidas do CP,

pesadas, submetidas à secagem em estufa e após completamente secas são pesadas novamente para se atestar a umidade real do material. Esse procedimento se repete por, pelo menos 5 vezes, ou seja, resultam em 5 corpos de prova sendo que a cada teste adiciona-se mais água ao material. Ao final, plota-se um gráfico cuja abscissa corresponde ao teor de umidade enquanto a ordenada corresponde à massa específica aparente seca máxima, o resultado é uma curva que pode ser observada na figura 03. A partir da curva encontrada, é possível encontrar a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima daquele solo sob àquela energia, que corresponde ao ponto onde a curva deixa de ser crescente e passa a ser decrescente.

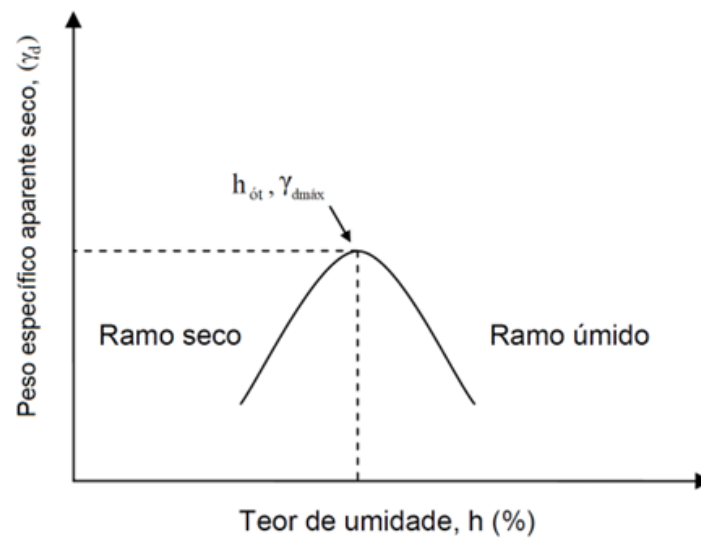


Figura 3: Aspecto da curva de compactação do solo.

Fonte: Vasconcelos, 2021.

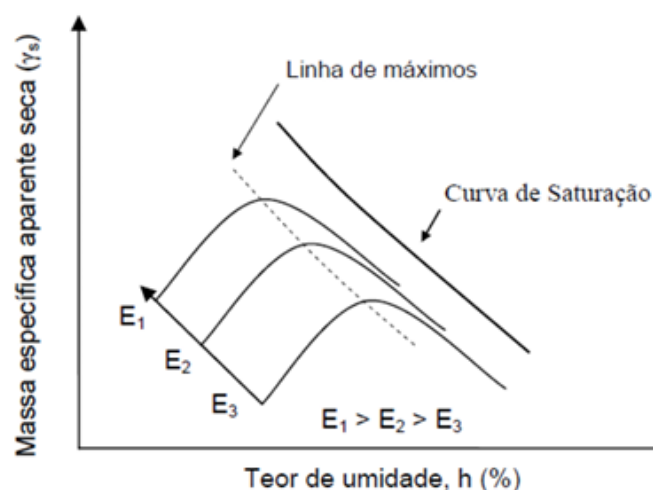


Figura 4: Influência da energia de compactação na curva de compactação do solo.

Fonte: Vasconcelos, 2021.

A curva de saturação observada na figura 04 representa o limite teórico máximo que um solo pode atingir, ou seja, caso o ar presente em um solo seja completamente expulso por compactação, esse solo se encontraria em estado de saturação completa e a massa específica aparente seca assumiria seu valor máximo possível para uma umidade específica, no entanto, na prática, atingir esse grau de compactação é impraticável.

4.4.4. Parâmetros Mineralógicos

Rejeitos de minério de ferro comumente são associados a caulinita, gibbsita, goethita, hematita, magnetita e quartzo e apresentam uma composição mista, na faixa de 30 a 50% de matéria sólida que absorvem variadas características físico-químicas advindas da composição química e processos anteriores pelos quais tenha passado durante o beneficiamento (Wolff, 2009). O conhecimento dessas características, atreladas tanto ao rejeito quanto à água que preenche seus poros, são de extrema importância para a gestão e tratamento de água do projeto final de disposição. Vários são os fatores a serem analisados, como por exemplo, o tipo e a concentração de minerais e sulfetos que podem vir a contaminar a água, a composição química do minério, a geologia local, a rota de processamento do mineral, os reagentes utilizados no beneficiamento, entre outras (Alvarenga, 2023).

Uma das tecnologias mais amplamente utilizada para a caracterização mineralógica na mineração é a difração de raios-X (DRX) que foi desenvolvida por Laue, em 1912, e é descrita por Silva (2020) e seu funcionamento trabalha com a incidência de feixes de raios-X sobre uma amostra cristalina, em formato de pó pulverizado, de modo que, quando um cristal com distância interplanar d é irradiado por uma radiação de comprimento γ , a radiação é difratada representando uma característica única da amostra cristalina ao satisfazer a Lei de Bragg, que relaciona esse comprimento de onda da radiação eletromagnética ao ângulo de difração e ao espaçamento do retículo cristalino. A varredura da amostra é realizada em um intervalo de ângulos 2θ , com a rotação da amostra, o que promove a difração em todas as direções possíveis da rede cristalina no material.

O equipamento utilizado para a realização dessa técnica é o difratômetro de raios-X (método do pó), que possui três elementos básicos: uma Fonte ou tubo de raios-X (comumente de cobre), um porta-amostra e um detector de raios-X; pode-se adicionar outros acessórios, associados à esses componentes para adequar o ensaio ao objetivo pretendido (Silva, 2020).

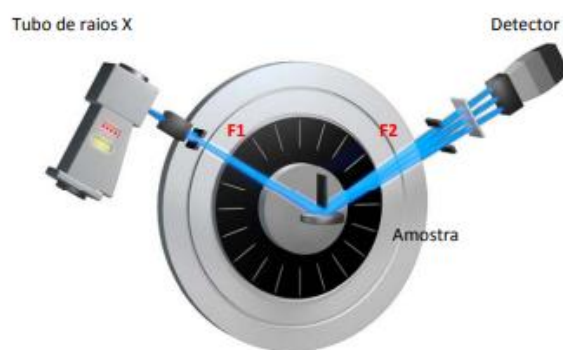


Figura 5: Representação esquemática da geometria Bragg-Brentano.

Fonte: Silva, 2020.

Os raios-X são gerados pelo tubo de raios catódicos através do aquecimento de um filamento que produz elétrons, passam por um filtro a fim de produzir uma radiação monocromática, são colimados e direcionados para a amostra. Quando o feixe de raios-X atinge o material, ocorre um espalhamento coerente do feixe a partir da interação deste com os elétrons dos átomos que compõem esse material. Em uma amostra que apresenta átomos arranjados periodicamente no espaço, característica de estruturas cristalinas, a difração ocorre em direções específicas que atendem a Lei de Bragg, descrita pela equação (2).

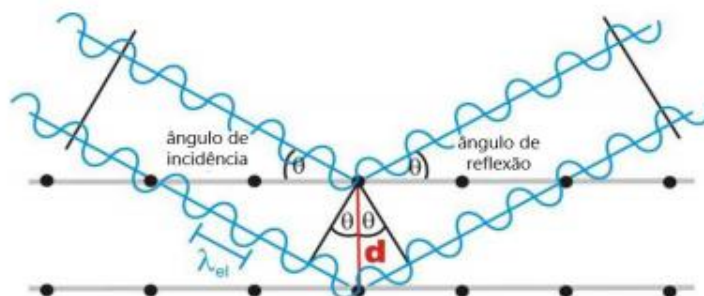


Figura 6: Fenômeno da difração de raios-X em um cristal.

Fonte: Silva, 2020.

$$n\gamma = 2d \sin\theta \quad (2)$$

Onde:

n = ordem de difração;

γ = comprimento de onda da radiação incidente;

θ = ângulo entre o feixe incidente e os planos do cristal;

d = distância interplanar dos átomos do cristal.

Quando a geometria dos raios-X incidentes satisfazem a condição imposta pela equação (2), ocorre a interferência construtiva entre os raios-X monocromáticos espalhados elasticamente e a estrutura cristalina que resulta na produção de picos de intensidade detectáveis. Ao satisfazer a Lei de Bragg, espectros de raios-X são produzidos e apresentam componentes variados dos quais $K\alpha$ e $K\beta$ se destacam. A radiação $K\alpha$ consiste em dois comprimentos de onda $K\alpha_1$ e $K\alpha_2$, sendo $K\alpha_1$ um comprimento de onda menor com o dobro da intensidade do outro e são utilizados filtros específicos para a produção da radiação monocromática. Cada composto cristalino possui um conjunto específico de espaçamentos que geram um padrão único de difração que funciona como uma “impressão digital” do material. Um detector registra e processa os picos detectáveis enviando para um sistema de processamento de dados que gera o chamado **difratograma** de raios-X.

A conversão dos picos de difração para espaçamentos d é o que possibilita a identificação do composto, uma vez que o conjunto de espaçamentos de um composto é único e característico. Após a geração do difratograma, este é comparado com padrões de referência gerados pelo *Crystallographic Opened Database* (COD) que se trata de um banco de dados gratuito ou pelo *Powder Diffraction File* (PDF) que já é um banco de dados pago do *International Centre for Diffraction Data* (ICDD).

A mistura de minerais e matéria orgânica que compõem um rejeito reflete diretamente nas suas propriedades e uma das aplicações do DRX na mineração é a avaliação de argilas presentes nesse tipo de material e como já foi citado anteriormente, as argilas desempenham um papel determinante no comportamento geotécnico de estruturas como pilhas de rejeitos e a identificação de argilominerais que é possibilitada pelo DRX apresenta-se como a melhor ferramenta conhecida para tal finalidade.

Alguns fatores podem causar interferência nos resultados dos difratogramas, como por exemplo a presença de materiais amorfos na amostra, que modifica a linha base dos difratogramas tornando-a não linear. No entanto, a maior Fonte de erro do procedimento é a preparação das amostras, que deve ser feita de forma minuciosa a fim de se minimizar possíveis inexatidões nos resultados, sendo assim a amostra utilizada deve ser muito bem pulverizada e prensada no porta-amostras (Antoniassi, 2010).

O rejeito utilizado para a realização do presente trabalho, vide histórico da empresa, apresenta uma alta perda por calcinação (PPC), que diz respeito à quantificação da variação de massa de uma amostra quando exposta a altas temperaturas e é essencial para o controle de processos.

4.5 Propriedades Geotécnicas Relevantes

Existem muitas variáveis que influenciam o comportamento e as propriedades geotécnicas de um rejeito como por exemplo o tipo de minério a ser extraído, o método de beneficiamento ao qual o minério é submetido e o tratamento químico adotado. Os ensaios laboratoriais e de campo são essenciais para se obter as características geotécnicas de um rejeito, tais como a granulometria, umidade, massa específica, limites de Atterberg, compressibilidade e resistência.

A definição da curva granulométrica é realizada em laboratório e, em rejeitos, costuma possuir predominância de partículas da fração siltes, argilas e areias finas. Nierwinski (2019) comparou curvas granulométricas de rejeitos de mineração de ouro, bauxita e zinco e constatou de maneira geral, que o rejeito correspondente à mineração de ouro possui característica arenosa enquanto os de bauxita e zinco apresentam predominância de partículas siltosas com quantidades menores de partículas de areia e argilas, com plasticidade de mediana a alta.

A permeabilidade de um solo está diretamente ligada à segurança de estruturas de engenharia e diz respeito à quantidade de água que passa pelos vazios de um material granular. O coeficiente de permeabilidade k , tende a ser mais alto em materiais que apresentam partículas grossas como por exemplo pedregulhos e areias, enquanto argilas são praticamente impermeáveis. Rejeitos de mineração em forma de lamas apresentam o coeficiente de permeabilidade na ordem dos 10^{-7} cm/s e pode diminuir a depender do teor de finos, plasticidade, método de disposição e profundidade do depósito (Nierwinski, 2019).

A compressibilidade de um solo diz respeito à redução do seu volume através da aplicação de uma força externa que pode ser promovida pela compactação ou adensamento do solo. Argilas são altamente compressíveis por conta da camada de água que fica adsorvida na superfície das partículas e age como um lubrificante no contato entre elas. Por sua vez, rejeitos de mineração costumam apresentar compressibilidade mais elevada do que os materiais semelhantes naturais graças ao método de disposição ao que são submetidos, que gera materiais que apresentam baixa densidade e alta angularidade.

Pode-se dizer que a resistência ao cisalhamento é uma das mais importantes características referente ao empilhamento de rejeitos, isso porque é correspondente à resistência máxima interna por área específica que o rejeito pode suportar sem sofrer nenhuma ruptura. O cisalhamento ocorre quando há o deslizamento entre corpos sólidos e é relacionado aos

fenômenos de atrito, que é expresso pelo ângulo de atrito (θ) e coesão, expresso pelo intercepto coesivo (c). Os rejeitos de mineração comumente apresentam altos valores de resistência ao cisalhamento em função da alta angularidade dos grãos, trazendo intercepto coesivo igual a zero e ângulos de atrito da ordem de 3 a 5 graus a mais do que solos naturais.

4.6 Trabalhos Anteriores (Estado da Arte)

Neste capítulo serão apresentadas caracterizações de rejeitos de minérios de ferro distintos de variadas mineradoras a fim de ilustrar o comportamento habitual desse tipo de material. Serão apresentados dados retirados de três trabalhos distintos relacionados a caracterização de rejeitos de minério de ferro.

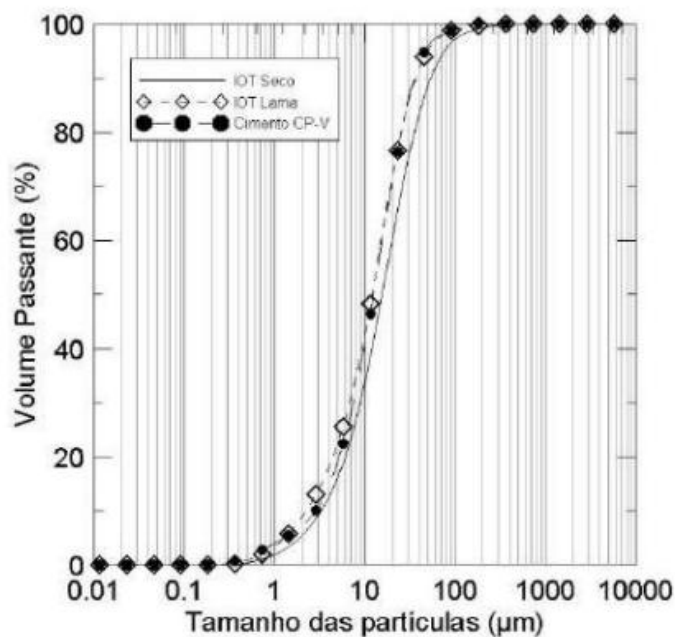
Em geral, os resultados apresentados convergem para os encontrados no presente trabalho, indicando uma consistência da metodologia utilizada com a literatura. A composição química e mineralógica dos rejeitos demonstra que os rejeitos de minério de ferro seguem uma tendência de apresentar as associações citadas na seção 3.3.4. A granulometria dos rejeitos apresentados na literatura apresentou predominância de areia fina e silte, o que já era esperado visto que os rejeitos analisados não possuem as mesmas características do rejeito ultrafino analisado no presente estudo, no entanto a literatura contém valores correspondentes com os apresentados.

4.6.1. Caracterização do rejeito de minério de ferro (IOT) e avaliação da sua influência no comportamento físico-químico e mecânico de pastas de cimento (Bezerra, 2017)

Bezerra (2017) caracterizou o rejeito de minério de ferro proveniente da barragem de Conceição/MG a fim de avaliar o comportamento físico-químico e mecânico para adição em pastas de cimento. Os parâmetros analisados foram a granulometria, massa específica, teor de umidade e composição química.

A classificação granulométrica foi realizada através do método do espalhamento em luz, em granulometria a laser pelo equipamento *Mastersizer 2000*, que é capaz de determinar o tamanho de partículas desde nanômetros a milímetros, na figura 07 é possível observar a distribuição granulométrica do rejeito seco, em forma de lama e do cimento produzido pelo autor, já na tabela 04 é estão apresentados os parâmetros de distribuição de tamanho das partículas abaixo de 10, 50 e 90% do volume submetido ao ensaio. Para a determinação da

composição mineralógica foi utilizada a mesma técnica de DRX descrita anteriormente. A massa específica foi determinada através da picnometria a gás e o teor de umidade foi pelo método descrito na NBR 9939/2011. A lama de rejeito foi submetida à fluorescência de raios-X (FRX) para se determinar a composição química e o PPC. Os demais testes não são relevantes para o presente trabalho, logo não serão descritas.



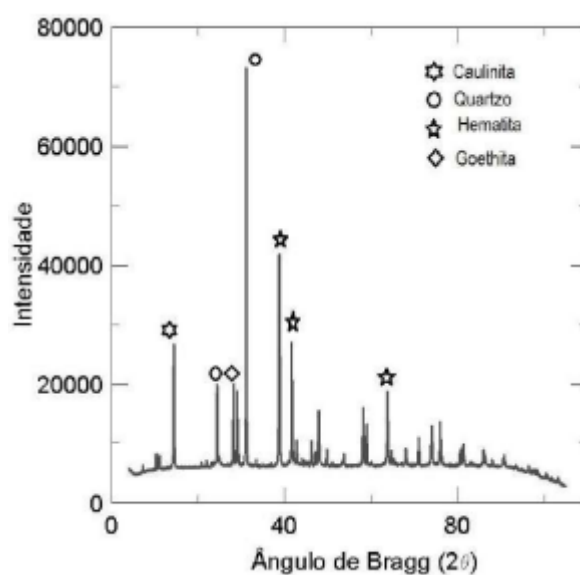


Figura 8: Difratoograma da lama de rejeito de Conceição.

Fonte: Bezerra, 2017.

A figura 08 apresenta os resultados da difração de raios X ao qual o material foi submetido cuja composição identificada foi de caulinita, quartzo, hematita e goethita, já na tabela 05 estão apresentados as proporções de cada mineral na amostra, sendo o resultado compatível com a literatura, com alto teor de hematita presente no rejeito suscedido do quartzo como segundo maior componente.

Mineral	Fórmula Química	Conteúdo (%)
Quartzo	SiO ₂	31,5
Goethita	FeO(OH)	4,2
Hematita	Fe ₂ O ₃	50,6
Caulinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	9,5
Biotita IM Mica	K(Mg,Fe ²⁺ ₃)(Al,Fe ³⁺)Si ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂	1,5
Clorita	(Mg,Fe) ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·(Mg,Fe) ₃ (OH) ₆	1,3
Talco	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	1,3

Tabela 5: Análise mineralógica quantitativa pelo método Rietveld.

Fonte: Bezerra, 2017.

A massa específica encontrada para a lama de Conceição foi de 3,67 g/cm³, como o rejeito de minério de ferro tem hematita na composição, que apresenta uma densidade de 5,25

g/cm³, e quartzo, com massa específica de 2,65 g/cm³, o mesmo tende a ter uma variação de densidade dentro desses dois limites. Já o teor de umidade da lama do rejeito encontrado foi de 296,36 % com desvio padrão de 29,98% e teor de sólidos e líquido correspondem a 25,33% e 74,4%, respectivamente.

Tipo de Óxido	Conteúdo (%)	
	Fundido	Prensado
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃)	50,96	40,64
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	7,92	12,33
Dióxido de silício (SiO ₂)	35,96	41,63
Óxido de magnésio (MgO)	0,43	0,76
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	0,01	0,01
Óxido de fósforo (P ₂ O ₅)	0,18	0,21
Óxido de manganês (MnO)	0,51	0,45
Óxido de titânio (TiO ₂)	0,15	0,13
Óxido de potássio (K ₂ O)	0,18	0,19
Óxido de cálcio (CaO)	0,09	0,08
Óxido de sódio (Na ₂ O)	-	0,09
Perda ao fogo	3,50	3,50

Tabela 6: Composição química (em teor de óxidos) da lama de rejeito de Conceição, determinado pelo método fundido e prensado.

Fonte: Bezerra, 2017.

Além da composição mineralógica do rejeito, a sua composição química foi determinada através da fluorescência de raios X de duas formas: o rejeito prensado e fundido. É possível avaliar os componentes químicos, assim como a proporção de cada um através da tabela 06.

4.6.2. Caracterização física, química e mineralógica de rejeitos de minério de ferro (Martinatto, 2024).

Martinatto *et al.* (2024) caracterizou dois rejeitos de plantas de beneficiamento de ferro

sendo o primeiro denominado como Rejeito de Mineração de Ferro A (RMFA) e o segundo foi um rejeito ultrafino (Lama), produzido na região centro-sul do estado de Minas Gerais, denominado como Rejeito de Mineração de Ferro B, ambas as plantas inseridas no QF.

A determinação da distribuição granulométrica foi realizada de acordo com a NBR 7181 de peneiramento e sedimentação, os limites de Atterberg foram realizados conforme a NBR 6459 e NBR 7180, peso específico dos grãos de acordo com a NBR 6458. A composição química foi determinada via FRX e a caracterização mineralógica foi feita através de DRX.

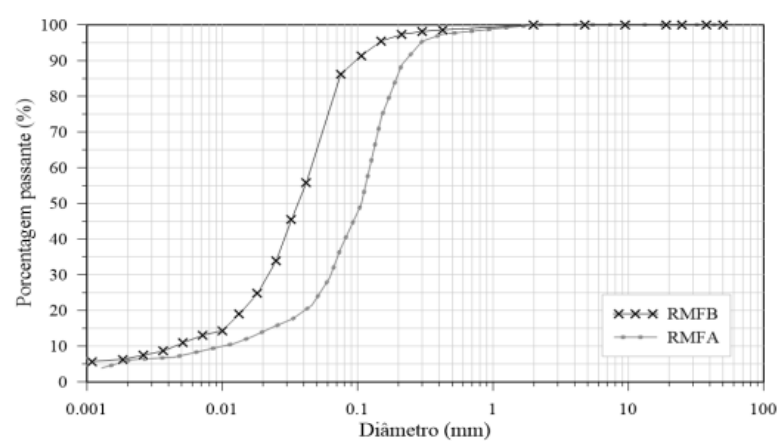


Figura 9: Caracterização granulométrica dos rejeitos RMFA e RMFB.

Fonte: Martinatto et al. 2024.

Característica	RMFA	RMFB	Norma
Limite de Liquidez	-	-	NBR 6459/2017
Limite de Plasticidade	-	-	NBR 7180/2016a
Índice de Plasticidade	NP	NP	-
Peso Específico real dos grãos	2,92	3,92	NBR 6458/2016b
% Pedregulho (d > 2 mm)	0%	0%	NBR 7181/2018
% de Areia Grossa (0,6 < d < 2 mm)	0%	0%	
% de Areia Média (0,2 < d < 0,6 mm)	11%	2,65%	
% de Areia Fina (0,06 < d < 0,2 mm)	60%	41,62%	
% de Silte (0,002 < d < 0,06 mm)	23%	49,42%	
% de Argila (d < 0,002)	6%	6,31%	

Tabela 7: Caracterização física dos rejeitos RMFA e RMFB.

FONTE: Martinatto *et al.* 2024 (Adaptado).

Elemento		Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	P ₂ O ₅	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃
Concentração	RMFA	22,02	69,84	6,26	0,46	0,40	0,44	0,23	0,10	0,07
(%)	RMFB	45,83	36,25	14,66	1,11	0,60	0,52	0,35	0,24	-

Tabela 8: Composição química elementar dos rejeitos RMFA e RMFB.

FONTE: Martinatto *et al.* 2024.

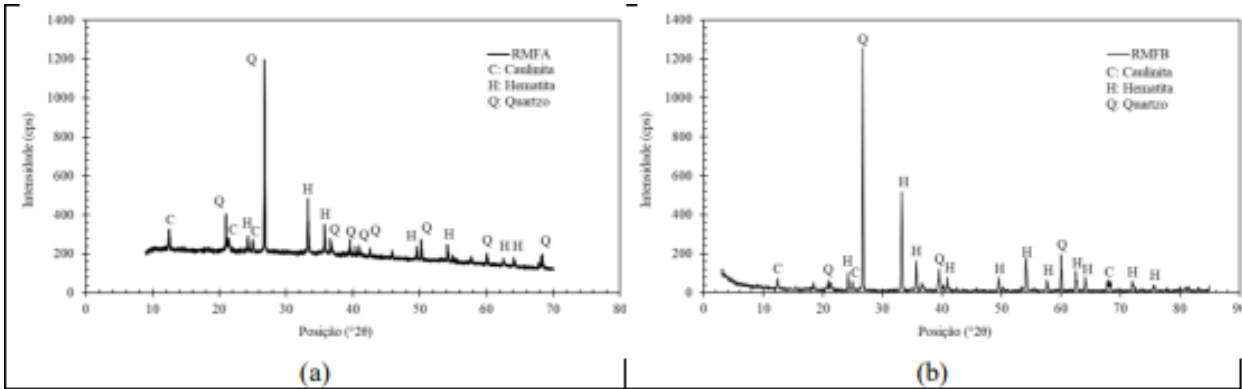


Figura 10: DRX dos rejeitos: (a) RMFA e (b) RMFB.

FONTE: Martinatto *et al.* 2024.

4.6.3. Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale (Wolff, 2009).

Wolff (2009), em sua dissertação de mestrado, caracterizou diversos rejeitos de minério de ferro das minas da Vale que estão relacionadas na tabela 09.

Minas	Amostra (s)	Origem
Mina de Brucutu	Brucutu	<i>Underflow</i> do espessador de rejeitos
Mina do Córrego do Feijão	RH-CF	Rejeito hematita: <i>overflow</i> da deslamagem
	RIL-CF	Rejeito itabirito limonítico: <i>overflow</i> de ciclone + rejeito de separação magnética
Mina da Conceição	Conceição	<i>Underflow</i> do espessador de rejeitos

Mina do Cauê	Cauê	<i>Underflow</i> do espessador de rejeitos
Mina de Fábrica Nova	Fábrica Nova	<i>Underflow</i> do espessador de rejeitos
Mina de Alegria IBII e IBIII	AL-RH	Rejeito de hematita: <i>underflow</i> espessador
	AL-RI	Rejeito de itabirito: <i>underflow</i> espessador
Mina de Carajás	Carajás	<i>Underflow</i> do espessador de rejeitos

Tabela 9: Relação das amostras estudadas.

FONTE: Wolff, 2009.

A análise química foi determinada por ICP (*Inductive Coupled Plasma*) e por Ditionito-Citrato-Bicarbonato (DCB), a determinação da distribuição granulométrica foi feita por peneiramento a úmido, cyclosizer e granulômetro de laser e o rejeito foi caracterizado mineralógicamente pelo DRX.

Amostra	Fe	Al	Mn	P	Ca	K	Mg	Ti
-	%	%	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm
Brucutu	44,8	3,1	0,2	0,16	333	94	121	674
RH-CF	56,3	1,3	4,6	0,27	1483	172	559	287
RIL-CF	46,5	2,0	1,1	0,11	484	193	508	605
Conceição	44,3	1,0	1,9	0,11	458	231	419	247
Cauê	45,6	1,1	2,1	0,12	584	568	715	288
Fábrica Nova	53,4	1,1	0,3	0,17	531	112	309	221
AL-RH	51,8	2,4	0,2	0,21	594	91	460	671
AL-RI	48,6	1,2	0,4	0,17	1061	161	496	315
Carajás	64,0	0,8	0,9	0,081	417	136	193	413

Tabela 10: Resultados das análises químicas por ICP das amostras globais.

FONTE: Wolff, 2009.

Amostra	Fração	Fe	Al	Mn	P	Ca	K	Mg	Na	Ti
-	µm	%	%	%	%	Ppm	ppm	ppm	ppm	ppm

Bucutu	+18	48,9	1,4	0,1	0,074	512	92	121	366	435
	-18+9	52,7	2,0	0,1	0,095	340	57	41	236	485
	-9	42,1	2,6	0,2	0,14	327	61	121	207	566
RH-CF	+16	70,0	0,1	0,4	0,019	375	77	113	272	171
	-16+9	65,4	0,2	1,1	0,082	1251	59	258	266	307
	-9	49,1	1,9	7,4	0,37	2191	302	1709	270	312
RIL-CF	+17	50,6	0,7	0,3	0,038	317	135	208	294	306
	-17+9	52,1	1,3	0,6	0,079	407	72	557	266	561
	-9	47,5	2,3	1,8	0,16	512	173	929	276	860
Conceição	+17	46,9	0,1	0,4	0,016	378	92	30	283	156
	-17+9	56,5	0,3	1,0	0,046	452	115	128	250	267
	-9	33,3	1,6	4,9	0,24	688	346	797	230	338
Cauê	+16	58,8	0,1	0,2	0,020	319	102	29	265	239
	-16+9	58,7	0,3	0,7	0,057	374	324	347	259	362
	-9	27,9	1,5	4,6	0,21	615	884	1229	274	280
Fábrica Nova	+16	59,4	0,3	0,2	0,074	393	97	152	236	177
	-16+9	58,4	0,5	0,2	0,13	472	94	305	189	210
	-9	47,3	1,3	0,4	0,19	674	123	421	263	210
AL-RH	+16	61,4	0,3	0,1	0,058	364	34	99	217	238
	-16+9	60,6	1,1	0,2	0,14	316	87	298	207	320
	-9	47,6	3,4	0,3	0,27	726	89	548	171	893
AL-RI	+16	55,8	0,1	0,1	0,029	279	51	40	234	164
	-16+9	56,2	0,5	0,2	0,084	353	70	178	248	198
	-9	43,1	1,9	0,7	0,22	852	213	541	276	428
Carajás	+16	64,5	0,8	0,6	0,034	523	120	189	310	198
	-16+9	67,3	0,6	0,6	0,047	600	131	282	296	233
	-9	61,1	1,3	1,3	0,12	532	241	303	257	628

Tabela 11: Resultados das análises químicas por ICP por frações do cyclosizer.

FONTE: Wolff, 2009.

Amostra: Brucutu

Amostra: RH-CF

Mícrons	% Retida Simples	% Retida Acumulada	% Passante Acumulada
34	8,2	8,2	91,8
24	1,6	9,8	90,2
18	5,4	15,2	84,8
12	9,8	25,0	75,0
9	7,0	32,0	68,0
-9	68,0	100,0	0,0
Total	100,0	-	-

Amostra: RIL-CF

Mícrons	% Retida Simples	% Retida Acumulada	% Passante Acumulada
33	27,8	27,8	72,7
24	10,1	37,9	62,1
17	8,6	46,5	53,5
12	6,8	53,3	46,7
9	3,9	57,2	42,8
-9	42,8	100,0	0,0
Total	100,0	-	-

Amostra: Cauê

	%	%	%
--	---	---	---

Mícrons	% Retida Simples	% Retida Acumulada	% Passante Acumulada
30	6,6	6,6	93,4
21	1,0	7,6	92,4
16	2,1	9,7	90,3
11	7,8	17,5	82,5
9	8,8	26,3	73,7
-9	73,7	100,0	0,0
Total	100,0	-	-

Amostra: Conceição

Mícrons	% Retida Simples	% Retida Acumulada	% Passante Acumulada
32	8,6	8,6	91,4
23	7,6	16,2	83,8
17	26,2	42,4	57,7
12	16,7	59,1	40,9
9	5,7	64,8	35,2
-9	35,2	100,0	0,0
Total	100,0	-	-

Amostra: AL-RI

	%	%	%
--	---	---	---

Microns	Retida Simples	Retida Acumulada	Passante Acumulada
31	12,9	12,9	87,1
22	4,7	17,6	82,4
16	19,2	36,8	63,2
11	16,8	53,6	46,4
9	5,8	59,4	40,6
-9	40,6	100,0	0,0
Total	100,0	-	-

Amostra: AL-RH

Microns	% Retida Simples	% Retida Acumulada	% Passante Acumulada
30	3,7	3,7	96,3
22	3,0	6,7	93,3
16	5,0	11,7	88,4
11	8,5	20,2	79,8
9	9,0	29,2	70,8
-9	70,8	100,0	0,0
Total	100,0	-	-

Amostra: Carajás

Microns	% Retida	% Retida	% Passante
---------	----------	----------	------------

Microns	Retida Simples	Retida Acumulada	Passante Acumulada
30	4,0	4,0	96,0
22	3,7	7,7	92,3
16	5,9	13,6	86,4
11	11,4	25,0	75,0
9	10,6	35,6	64,4
-9	64,4	100,0	0,0
Total	100,0	-	-

Amostra: Fábrica Nova

Microns	% Retida Simples	% Retida Acumulada	% Passante Acumulada
30	1,1	1,1	98,9
22	1,5	2,6	97,4
16	6,5	9,1	90,9
11	13,5	22,6	77,4
9	10,6	33,2	66,8
-9	66,8	100,0	0,0
Total	100,0	-	-

	Simples	Acumulada	Acumulada
30	4,3	4,3	95,7
22	3,9	8,2	91,8
16	6,0	14,2	85,6
11	9,1	23,3	76,7
9	9,6	32,9	67,1
-9	67,1	100,0	0,0
Total	100,0	-	-

Tabela 12: Resultados da análise granulométrica pelo cyclosizer.

FONTE: Wolff, 2009.

Amostra	D ₈₀ amostra seca (µm)	D ₈₀ dispersante (µm)	D ₈₀ cyclosizer (µm)
Brucutu	17	15	15
RH-CF	10	10	10
RIL-CF	24	22	>33
Conceição	27	29	22
Cauê	25	26	21
Fábrica Nova	14	14	12
AL-RH	14	13	11
AL-RI	17	16	13
Carajás	11	10	13

Tabela 13: Levantamento do D₈₀ do cyclosizer e das amostras analisadas no Cilas com e sem o uso de dispersante.

FONTE: Wolff, 2009.

Amostra	Fases Mineralógicas
---------	---------------------

Brucutu	Hematita, Goethita, Caulinita, Quartzo, Moscovita, Gibbsita
RH-CF	Hematita, Goethita, Magnetita, Caulinita, Quartzo, Talco
RIL-CF	Hematita, Goethita, Caulinita, Quartzo, Talco, Moscovita, Gibbsita
Conceição	Hematita, Goethita, Caulinita, Quartzo, Talco, Moscovita
Cauê	Hematita, Goethita, Caulinita, Quartzo, Talco, Moscovita, Gibbsita
Fábrica Nova	Hematita, Goethita, Caulinita, Quartzo, Moscovita, Gibbsita
AL-RH	Hematita, Goethita, Caulinita, Quartzo, Moscovita, Gibbsita
AL-RI	Hematita, Goethita, Caulinita, Quartzo, Moscovita, Gibbsita
Carajás	Hematita, Goethita, Gibbsita

Tabela 14: Minerais identificados através da difração de raios-X.

FONTE: Wolff, 2009

5. METODOLOGIA

Uma amostra de aproximadamente 20 kg de rejeito de minério de ferro, na forma de lama, correspondente à alimentação do decanter de uma mineradora localizada no Quadrilátero Ferrífero, foi disponibilizada para a realização dos ensaios de caracterização física, química, mineralógica e geotécnica.

Devido ao elevado teor de umidade inicial, o material foi submetido à secagem em estufa a temperatura controlada de aproximadamente 50 °C, com o objetivo de preservar suas características mineralógicas, especialmente em função da elevada perda por calcinação (PPC). Após a secagem até umidade inferior a 3%, o material foi destorroadado manualmente e homogeneizado para a realização dos ensaios.



Figura 11: a) bombona entregue na UFOP; b) rejeito nas bandejas para secagem.



Figura 12: a) amostra após a secagem; b) amostra destorroadada.

5.1. Determinação de Distribuição Granulométrica

O rejeito analisado estava em formato de lama e era considerado ultrafino, de acordo com a classificação da tabela 3, por isso, o ensaio de granulometria por peneiramento não se aplica. Sendo assim, a técnica utilizada para a determinação da distribuição granulométrica foi o *cyclosizer* (hidroclassificador), descrito por Kelsall (1953).

5.2. Determinação da Massa Específica dos Grãos

A massa específica dos grãos foi determinada de acordo com a ABNT NBR 6458, utilizando o método do picnômetro (balão volumétrico), com remoção de ar por aplicação de vácuo.

Foram utilizados:

- Balão volumétrico de 500 mL;
- Bomba de vácuo;
- Balança de precisão (0,01 g);
- Dispersor mecânico;
- Termômetro;
- Estufa.

O ensaio foi realizado em duplicata, visando garantir a reprodutibilidade dos resultados.

5.3. Determinação da Massa Específica Aparente

Para a determinação da densidade aparente, de acordo com a ABNT NBR 6458, foram utilizados:

- Béquer de 1000 mL;
- Balança de precisão (0,01 g);
- Estufa.

O ensaio foi realizado em duplicata, visando garantir a reprodutibilidade dos resultados.

5.4. Teor de Umidade

O teor de umidade do rejeito foi determinado de acordo com a ABNT NBR 6457 e foram utilizados:

- Recipientes não corrosivos;
- Balança de precisão;
- Estufa.

O ensaio foi realizado duas vezes, porém de amostras distintas.

5.5. Limites de Atterberg

As amostras foram preparadas para a determinação dos limites de consistência de acordo com a norma ABNT NBR 6457 de preparação de amostras.

Para a determinação do limite de liquidez (LL) do rejeito, o ensaio de Casagrande foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 6459, cujos materiais utilizados foram:

- Estufa;
- Recipiente para mistura;
- Espátula;
- Aparelho de Casagrande;
- Cinzel;
- Cápsulas para o recolhimento das amostras;
- Balança de precisão (0,01 g);
- Gabarito do aparato.

Para a determinação do limite de plasticidade (LP) do rejeito, foi realizado o ensaio de acordo com a ABNT NBR 7180. Os materiais utilizados foram:

- Estufa;
- Recipiente para mistura;
- Espátula;
- Balança de precisão (0,01 g);
- Gabarito metálico;
- Placa de vidro de superfície esmerilhada.

5.6. Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone - *Slump Test*

A determinação da consistência do rejeito foi realizada de acordo com a NBR 67:1998, que normatiza o ensaio de abatimento de tronco de cone, foi desenvolvido para concretos, no entanto, o teste é uma maneira mais simples de se obter a tensão de escoamento de fluidos não newtonianos, podendo assim ser aplicado para rejeitos em pasta e/ou lama Águido *et al.* (2022). O ensaio foi realizado para três condições distintas: somente o rejeito sem a adição de floculantes; com a adição de um floculante que será chamado de floculante 1 e com a adição de outro floculante que será chamado de floculante 2, ambos na concentração de 25% de volume de floculante e em diferentes dosagens a fim de se observar a eficiência e desempenho dos floculantes.

Foram utilizados para o ensaio:

- Agitador mecânico;
- Molde para empilhamento;
- Bandeja quadrada;
- Peneira de 75 μm ;
- Recipientes para homogeneizar as amostras.

Com exceção do teste sem a adição de floculantes, os demais foram realizados em triplicata para garantir a reprodutibilidade dos resultados.

5.7. Ensaio Proctor Normal de Compactação

O ensaio de compactação para a determinação da umidade ótima de compactação e massa específica seca máxima do rejeito foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 7182. A energia utilizada para a realização do ensaio foi a normal cujo soquete utilizado possuía 12,75 cm de altura, cerca de 2,5 kg de massa, caindo a uma altura de 30 cm. Foram realizadas 3 camadas sob 26 golpes cada para cada teste.

Foram utilizados:

- Balanças de resoluções de 1 e 0,01 g;
- Estufa;
- Bandejas;
- Cápsulas metálicas;
- Espátulas;
- Cilindro de cerca de 1000 mL;
- Soquete pequeno;
- Extrator do corpo de prova;
- Base rígida;
- Plásticos das dimensões do cilindro;

Foram realizados 5 testes com diferentes teores de umidade, sendo eles: 19, 23, 25, 27 e 29% de água.

5.8. Difração de Raios-X e Análise Química

A caracterização mineralógica do rejeito de minério de ferro foi realizada por meio de Difractometria de Raios X (DRX). A etapa de preparação prévia da amostra, incluindo secagem e pulverização até a granulometria adequada para análise, foi executada pela autora, em conformidade com os procedimentos de amostragem, preparo e manuseio recomendados pela NBR ISO 3082:2003. Após o preparo, as amostras foram acondicionadas em recipientes adequados e encaminhadas ao [Nome do Laboratório/Instituição], onde o ensaio foi executado por técnico especializado utilizando um difratômetro de raios X modelo PowderExpert (PANalytical), seguindo os protocolos operacionais internos e as boas práticas analíticas da instituição. A autora não acompanhou diretamente a operação do equipamento, tendo atuado no planejamento experimental, preparo e envio das amostras, recebimento dos difratogramas e posterior processamento, análise e interpretação dos resultados.

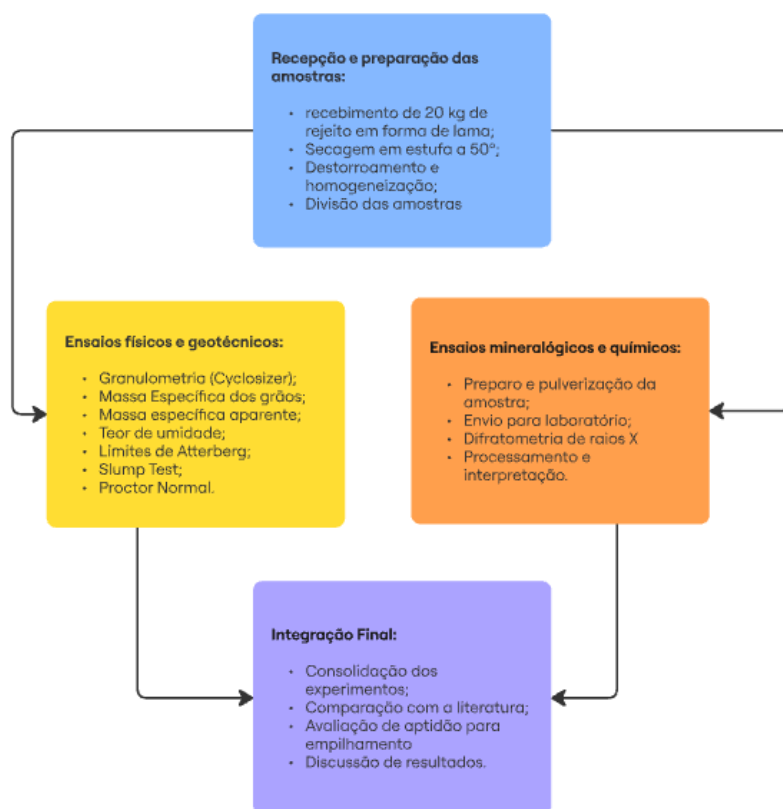


Figura 13: Fluxograma de atividades.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Distribuição Granulométrica

A distribuição granulométrica obtida por meio do ensaio de cyclosizer, cujo equipamento utilizado está ilustrado pela figura 15, confirma a predominância de partículas ultrafinas no rejeito analisado. Observa-se através da tabela 15, que aproximadamente 75% do material apresenta diâmetro inferior a 0,005 mm, caracterizando-o como um rejeito de natureza predominantemente silto-argilosa.

Esse comportamento granulométrico está diretamente associado à baixa permeabilidade do material e à elevada capacidade de retenção de água, fatores que dificultam o processo de desaguamento e impactam negativamente a eficiência do empilhamento a seco. Rejeitos com alta fração de finos tendem a apresentar maior suscetibilidade ao desenvolvimento de poropressões e menor capacidade de drenagem interna.

Os resultados obtidos são consistentes com os apresentados por Wolff (2009), especialmente para rejeitos provenientes das minas RH-CF e AL-RH, que também apresentam elevada fração de partículas finas. Essa similaridade reforça o comportamento típico de rejeitos de minério de ferro submetidos a processos de beneficiamento que envolvem moagem fina.



Figura 14: cyclosizer utilizado para a determinação da distribuição granulométrica do rejeito.

Malha (mm)	% Retido Simples	% Retido Acumulado	% Passante Acumulado
0,045	7,22	7,22	92,78

0,035	1,24	8,46	91,54
0,022	1,13	9,60	90,40
0,016	2,61	12,20	87,80
0,007	5,94	18,15	81,85
0,005	7,19	25,34	74,66
< 0,005	74,66	100,0	0,00
Total	100	-	-

Tabela 15: Distribuição granulométrica do rejeito.

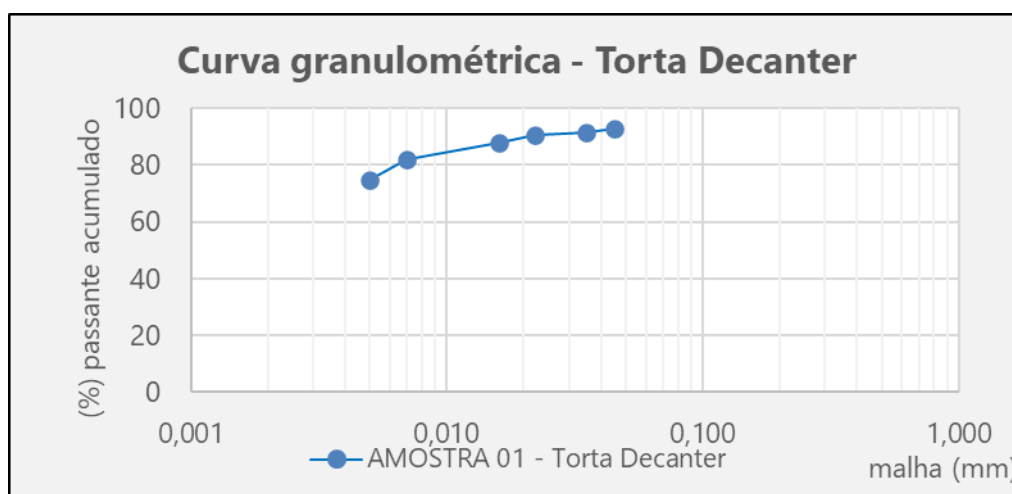


Gráfico 01: Curva granulométrica do rejeito.

6.2. Massa Específica dos Grãos e Massa Específica Aparente

A massa específica dos grãos do rejeito foi determinada como $3,685 \text{ g/cm}^3$, valor compatível com rejeitos de minério de ferro ricos em minerais densos, como a hematita. Esse resultado está em concordância com valores reportados na literatura, como o apresentado por Bezerra (2017), que encontrou massa específica de $3,67 \text{ g/cm}^3$ para rejeito similar e por Nierwinski (2019), que encontrou o valor de $3,06 \text{ g/cm}^3$ para um rejeito de mineração de bauxita.

A elevada massa específica está associada à composição mineralógica do material, influenciando diretamente parâmetros como peso próprio e tensões atuantes em estruturas de disposição. Nas figuras 16 e 17 é possível se observar o procedimento para a determinação da massa específica real do rejeito, o processo ilustrado é o da remoção do ar presente no balão

volumétrico e é possível observar os resultados do ensaio a partir da tabela 16.



Figura 15: a) despressurização dos balões volumétricos; b) balões volumétricos em banho maria.

Determinação N°	1	2
Béquer	6	7
Picnômetro n°	5	3
Massa do pic. + amostra + água (g)	686,54	729,38
Temperatura (°C)	24,2	24
Massa do pic. + água (g)	652,02	694,66
Densidade da água à temperatura (g/cm³)	0,9973	0,9973
Massa do solo úmido (g)	50	50
Massa do solo seco (g)	47,47	47,47
Densidade real dos grãos (g/cm³)	3,656	3,713
Média: densidade real dos grãos (g/cm³)	3,685	

Tabela 16: Resultados da determinação de densidade dos sólidos.

A massa específica aparente apresentou valores de 2,16 e 2,54 g/cm³, evidenciando a influência da estrutura interna do material e da presença de vazios. A diferença entre a massa específica dos grãos e a aparente indica um índice de vazios significativo, o que pode impactar

o comportamento de compactação e a compressibilidade do rejeito.

Sob o ponto de vista geotécnico, esses resultados indicam que o material possui potencial para atingir boas condições de estabilidade quando devidamente compactado, desde que controlados os parâmetros de umidade.

6.3. Teor de Umidade

Os valores de teor de umidade obtidos, de 33,27% e 35,65%, apresentados na tabela 17, estão em concordância com os dados fornecidos pela mineradora, que indicam umidade média de aproximadamente 35% para a torta proveniente do processo de centrifugação.

Esse elevado teor de umidade evidencia a limitação da centrifugação como método único de desaguamento para rejeitos ultrafinos, uma vez que a retenção de água é significativamente influenciada pela granulometria fina e pela presença de partículas argilosas, característica que pode ser observada através das figuras 18 e 19 onde é possível observar a umidade elevada da torta.

Do ponto de vista operacional, teores de umidade nessa faixa comprometem a trabalhabilidade do material e dificultam sua aplicação em empilhamento a seco, podendo resultar em baixa resistência ao cisalhamento e instabilidade da pilha.

Comparativamente, valores mais baixos de umidade são geralmente requeridos para garantir condições adequadas de empilhamento, indicando a necessidade de otimização do processo de desaguamento, seja por filtragem, adição de reagentes ou combinação de técnicas.



Figura 16: a) amostra utilizada para o teste de umidade 1; b) amostra para o teste de umidade 2.

Amostra	Massa _i (g)	Massa _f (g)	Umidade (%)
Torta DC-01	2090	1345	35,65
Torta DC-02	2510	1675	33,27

Tabela 17: Resultados do ensaio de umidade.

A proximidade entre os valores medidos e os dados operacionais evidencia a consistência dos resultados experimentais e confirma a representatividade da amostra analisada. No entanto, observa-se que os teores de umidade obtidos são elevados, o que está diretamente relacionado à granulometria ultrafina do material e à presença de partículas com elevada área superficial, capazes de reter água por forças capilares e adsorção.

Do ponto de vista geotécnico, elevados teores de umidade estão associados à redução da resistência ao cisalhamento e ao aumento da compressibilidade do material, podendo comprometer a estabilidade de estruturas de disposição, especialmente em condições de empilhamento a seco. Além disso, a elevada umidade dificulta a trabalhabilidade do rejeito, impactando diretamente as operações de transporte, espalhamento e compactação.

Os resultados indicam que o processo de centrifugação, quando aplicado isoladamente, pode não ser suficiente para promover níveis de desaguamento adequados para aplicações em empilhamento, sendo necessária a adoção de técnicas complementares, como filtragem ou condicionamento químico, para redução adicional do teor de umidade.

Assim, o controle do teor de umidade se mostra um parâmetro crítico para a viabilidade do empilhamento de rejeitos ultrafinos, devendo ser considerado como um dos principais fatores no dimensionamento e operação dessas estruturas.

6.4. Limites de Atterberg

O teor de umidade é uma característica determinante, que atua sob diversos outros aspectos do rejeito, como por exemplo, os limites de consistência. Esses limites ditam a forma como o rejeito irá se comportar ao passo em que absorve ou perde água.

A preparação das amostras para ambos os testes foram realizadas de acordo com a ABNT NBR 6457 e está ilustrada nas figuras 21, 22 e 23. Ao se obter o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP), nos valores de 36,99% e 28,56%, respectivamente, foi

determinado que o rejeito estudado corresponde a um silte de baixa compressibilidade, de acordo com a carta de plasticidade apresentada na figura 02.

Nas figuras 24 e 25 é possível observar como é a aparência do rejeito no aparato antes e depois da realização do ensaio de Casagrande e os resultados encontrados para o LL estão apresentados na tabela 18 e na curva de fluidez apresentada no gráfico 02.

Já a determinação do LP foi realizada com a moldagem do rejeito até se atingir um comprimento e espessura semelhantes à um gabarito metálico apresentado nas figuras 26 e 27. Na tabela 19 estão apresentado os resultados do ensaio, além do Índice de Plasticidade (IC) que foi utilizado para fins de classificação ao ser aplicado à carta de plasticidade.



Figura 17: Calibração do equipamento.



Figura 18: a) peneira utilizada para a preparação da amostra; b) amostra sendo peneirada; c) homogeneização da amostra.

LIMITE DE LIQUIDEZ						Observação:	
Cápsula nº	48	2	2*	RO5	46	R² = 0,9684	
Cápsula+Solo Úmido (g)	10,04	12,93	12,58	11,33	9,22		
Cápsula+Solo Seco (g)	8,35	11,31	11,33	10,12	7,89		
Peso da Água (g)	1,69	1,62	1,25	1,21	1,33		
Peso da Cápsula (g)	4,15	7,10	7,70	6,69	4,45		
Peso do Solo Seco (g)	4,2	4,21	3,63	3,43	3,44	LL (%)	
Teor de Umidade (%)	40,24	38,48	34,44	35,28	38,66		
Nº de golpes	16	18	34	30	20	36,99	

Tabela 18: Resultado do ensaio de Casagrande para a determinação do Limite de Liquidez.

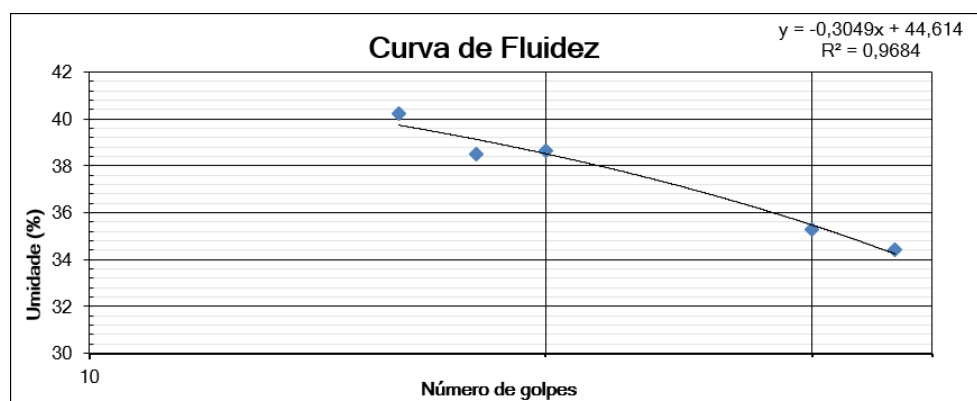


Gráfico 02: Curva de fluidez do ensaio de Casagrande e função obtida.



Figura 19: Placa de vidro fosco e gabarito utilizados.



Figura 20: “molde” comparado ao gabarito.

LIMITE DE PLASTICIDADE							
Cápsula nº	T8	57	xx1	35	604	Observação:	
Cápsula+Solo Úmido (g)	9,88	6,31	8,86	6,81	8,74		
Cápsula+Solo Seco (g)	9,31	5,85	8,46	6,28	8,33		
Peso da Água (g)	0,57	0,46	0,4	0,53	0,41		
Peso da Cápsula (g)	7,29	4,18	7,05	4,45	6,95		
Peso do Solo Seco (g)	2,02	1,67	1,41	1,83	1,38	Limite Superior	29,99
Teor de Umidade (%)	28,22	27,54	28,37	28,96	29,71	Limite Inferior	27,13
Umidade Média	28,56					LP (%)	28,56
Verificação dos Limites	28,22	27,54	28,37	28,96	29,71		
Umidade Natural (h)				Índice de Consistência IC = (LL - h)/IP			
Limite de Liquidez (LL)	37			4,39			
Limite de Plasticidade (LP)	29						
Índice de Plasticidade (IP)	8						

Tabela 19: Resultado para determinar o limite de plasticidade do rejeito.

6.5. Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone - *Slump Test*

O ensaio de abatimento (slump test) foi realizado com o objetivo de avaliar a consistência e a trabalhabilidade do rejeito em diferentes condições de umidade, bem como fornecer uma análise qualitativa da eficiência do processo de floculação e da separação sólido-líquido.

Os resultados obtidos indicaram que o material apresenta elevado grau de deformabilidade, caracterizado por altos valores de abatimento, evidenciando comportamento típico de materiais com elevada umidade e significativa fração de finos. Esse comportamento está diretamente relacionado à granulometria ultrafina do rejeito e à presença de partículas com alta área superficial, que favorecem a retenção de água e reduzem a coesão aparente do material em baixas tensões.

Observou-se que, para maiores teores de umidade, o material apresentou comportamento mais fluido, com perda de forma após a retirada do molde, indicando baixa resistência ao cisalhamento não drenado. Por outro lado, à medida que o teor de umidade foi reduzido, verificou-se maior estabilidade geométrica do tronco de cone, refletindo aumento da consistência e da resistência do material.

Além da avaliação da consistência, o ensaio possibilitou a análise qualitativa do líquido clarificado, o qual apresentou diferentes níveis de turbidez em função das condições de preparo da amostra. A maior clareza do sobrenadante está associada a uma melhor eficiência de agregação das partículas finas, indicando potencial aplicação de agentes floculantes como alternativa para melhoria do processo de desaguamento.

Do ponto de vista aplicado, os resultados do slump test reforçam que o teor de umidade

exerce influência direta na trabalhabilidade e na estabilidade inicial do rejeito. Valores elevados de abatimento indicam limitações para o empilhamento imediato, sendo necessária a redução do teor de umidade ou o condicionamento do material para garantir comportamento mais coesivo e autoportante.

Assim, o ensaio se mostrou uma ferramenta útil para avaliação preliminar das condições de manuseio do rejeito, bem como para subsidiar estratégias de otimização do desaguamento e viabilização do empilhamento a seco.



Figura 21: Floculante com a cadeia aberta.



Figura 22: a) slump test sem a adição de reagentes, dentro do molde; b) resultado do slump test sem a adição de reagentes.

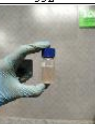
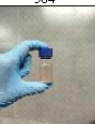
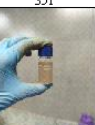
Floculante 1					
Dosagem	Teste	Stacking	Avanço x	Avanço y	Clarificado
150	1				
		1,5	10,1	10	NTU 318
	2				
		1	10	9,3	NTU 425
180	1				
		2	9,3	8,4	NTU 452
	2				
		2	9,2	8,8	NTU 552
210	1				
		1,6	9,6	9,6	NTU 340
	2				
		1,5	9,6	9,8	NTU 504
250	1				
		1	10,7	10,4	NTU 351
	2				
		1,5	9,1	10	NTU 467
300	1				
		1	10,6	10,6	NTU 498
	2				
		1,3	9,6	10,3	NTU 521

Tabela 20: Resultados do slump test para o floculante 1.

Floculante 2					
Dosagem	Teste	Stacking (mm)	Avanço x (mm)	Avanço y (mm)	Clarificado
150	1				
		1,8	9,9	8,8	NTU 766
	2				
		1,9	9,6	8,4	NTU 485
180	1				
		1,7	9,3	8,5	NTU 236
	2				
		1,5	10	9,8	NTU 449
210	1				
		2	8,6	9	NTU 520
	2				
		1,8	9	8,3	NTU 475
250	1				
		1	10,3	10,3	NTU 423
	2				
		1,1	9,4	9,6	NTU 579
300	1				
		1,2	9,6	9,7	NTU 430
	2				
		1,3	9,3	9	NTU 336

Tabela 21: Resultados do slump test para o floculante 2.

6.6. Ensaio Proctor de Compactação

O ensaio de compactação Proctor, realizado com energia normal conforme a ABNT NBR 7182, permitiu a obtenção da curva de compactação do rejeito, a partir da qual foram determinados o teor de umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima.

A curva de compactação obtida apresentou comportamento típico, caracterizado pelo aumento da massa específica seca com o incremento do teor de umidade até atingir um valor máximo, seguido de decréscimo para teores superiores, como é observado na curva de compactação apresentada no gráfico 03. Esse comportamento está associado ao papel da água como agente lubrificante entre as partículas, facilitando o rearranjo e a redução dos vazios até a condição ótima.

O teor de umidade ótima foi determinado como 28,32%, enquanto a massa específica aparente seca máxima foi de 1,68g/cm³. Esses valores refletem a influência da granulometria fina do material, que tende a apresentar maiores teores de umidade ótima em comparação a materiais granulares, devido à maior área superficial e à capacidade de retenção de água.

Observa-se que, para teores de umidade inferiores ao ótimo, a compactação é dificultada pelo atrito entre as partículas, resultando em estruturas mais abertas e menor densidade. Por outro lado, para teores superiores ao ótimo, o excesso de água ocupa os vazios e reduz a eficiência da compactação, promovendo a diminuição da massa específica seca.

Do ponto de vista geotécnico, os resultados indicam que o controle do teor de umidade é um fator determinante para a obtenção de condições adequadas de compactação do rejeito. A compactação na umidade ótima contribui para o aumento da resistência ao cisalhamento e redução da compressibilidade, aspectos fundamentais para a estabilidade de estruturas de empilhamento.

Além disso, considerando que o teor de umidade natural do rejeito ($\approx 35\%$) é significativamente superior à umidade ótima determinada, verifica-se a necessidade de desaguamento adicional do material para viabilizar sua compactação eficiente em campo. Essa condição reforça a limitação do processo atual de centrifugação e a necessidade de adoção de técnicas complementares.

Portanto, os resultados do ensaio Proctor evidenciam que, embora o material apresente potencial para alcançar boas condições de densificação, sua aplicação em empilhamento a seco depende diretamente da redução prévia do teor de umidade e do adequado controle das condições de compactação.



Figura 23: Corpo de prova resultante do ensaio de compactação.

	CP1			CP2			CP3			CP4			CP5		
	Umidade Presumida	19,0%		Umidade Presumida	23,0%		Umidade Presumida	25,0%		Umidade Presumida	27,0%		Umidade Presumida	29,0%	
Cápsula nº	602	XX1	2	11	135	53	R03	XX4	TT	700	R08	R06	3	5	F4
Cápsula+Solo Úmido (g)	25,07	26,83	26,30	18,63	22,23	17,70	31,27	24,97	25,45	27,48	28,12	25,72	25,72	28,89	27,85
Cápsula+Solo Seco (g)	22,14	23,69	23,24	15,99	19,26	15,26	26,30	21,20	21,57	23,09	23,68	21,62	21,57	24,11	23,29
Peso da Água (g)	2,93	3,14	3,06	2,64	2,97	2,44	4,97	3,77	3,88	4,39	4,44	4,10	4,15	4,78	4,56
Peso da Cápsula (g)	7,03	7,05	7,72	3,99	5,98	4,36	6,62	6,66	7,07	6,86	6,84	6,51	7,08	7,23	7,00
Peso do Solo Seco (g)	15,11	16,64	15,52	12,00	13,28	10,90	19,68	14,54	14,50	16,23	16,84	15,11	14,49	16,88	16,29
Teor de Umidade (%)	19,39	18,87	19,72	22,00	22,36	22,39	25,25	25,93	26,76	27,05	26,37	27,13	28,64	28,32	27,99
Teor de Umidade Médio (%)	19,33			22,25			25,98			26,85			28,32		
DADOS DA AMOSTRA E DOS CILINDROS															
Massa Específica dos Grãos (g/cm³)			3,685				Observações			Foi utilizado o mesmo cilindro para cada ponto da curva (CP)					
Cilindros Utilizados	Diâmetro (mm)			Altura (mm)			Tara (g)			Volume (cm³)			ENERGIA DE COMPACTAÇÃO		
Cilindro 2							2296,7			1.001,81			Normal		
													Massa Específica da Água (g/cm³)		
													1,00		
Cilindro + CP (g)	4187,5			4294,0			4444,1			4467,6			4459		
Massa Úmida da amostra (g)	1890,80			1997,30			2147,40			2170,90			2162,30		
Massa espec. seca (g/cm³)	1,582			1,631			1,701			1,708			1,682		
Umidade Média (%)	19,33			22,25			25,98			26,85			28,32		

Tabela 22: Resultados do ensaio Proctor de Compactação.

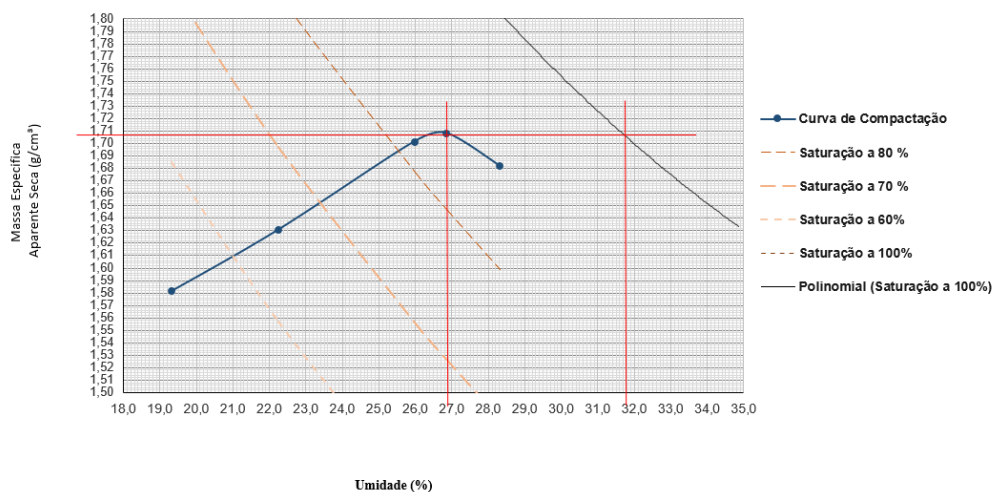


Gráfico 03: Curva de compactação para a determinação da umidade ótima e massa específica aparente seca.

O teor de umidade ótimo de compactação corresponde ao valor em que a massa específica aparente seca máxima é atingida em campo, ou seja, é a compactação máxima que é possível de se atingir. Diante do ensaio Proctor, o rejeito analisado, para se ter o grau de 100% de compactação, ele deve apresentar 26,85% de umidade, que corresponde à uma massa específica aparente seca de 1,708 g/cm³.

6.7. Difração de Raios-X

A análise mineralógica realizada por difração de raios-X (DRX) permitiu a identificação das principais fases minerais presentes no rejeito de minério de ferro. Os difratogramas obtidos indicaram a predominância de minerais como hematita, quartzo e goethita, além da presença de argilominerais, como a caulinita.

A predominância de hematita está diretamente associada à elevada massa específica dos grãos do material, corroborando os resultados obtidos nos ensaios de densidade. Já a presença significativa de quartzo contribui para a composição silicática do rejeito, influenciando suas propriedades físicas e comportamento mecânico.

A identificação de argilominerais, como a caulinita, é particularmente relevante do ponto de vista geotécnico, uma vez que esses minerais apresentam elevada área superficial e capacidade de retenção de água. Essa característica está diretamente relacionada aos elevados teores de umidade observados e ao comportamento plástico do material, influenciando parâmetros como compressibilidade, consistência e resistência ao cisalhamento.

Além disso, a presença de goethita pode estar associada à retenção adicional de água no material, devido à sua estrutura porosa e à afinidade com moléculas de água, o que contribui para a dificuldade de desaguamento do rejeito.

Os resultados obtidos estão em concordância com estudos da literatura, como os apresentados por Bezerra (2017) e Wolff (2009), que também identificaram hematita, quartzo e argilominerais como constituintes predominantes em rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero.

Do ponto de vista aplicado, a composição mineralógica observada explica, de forma integrada, diversos comportamentos identificados ao longo deste estudo, como a elevada massa

específica, o alto teor de umidade e a dificuldade de desaguamento. A presença de argilominerais, em especial, representa um fator limitante para a aplicação direta do rejeito em empilhamento a seco, sendo necessária a adoção de técnicas complementares para melhoria de suas propriedades.

Assim, a análise por DRX se mostra fundamental para a compreensão do comportamento do rejeito, permitindo estabelecer relações diretas entre sua composição mineralógica e suas propriedades físicas e geotécnicas.

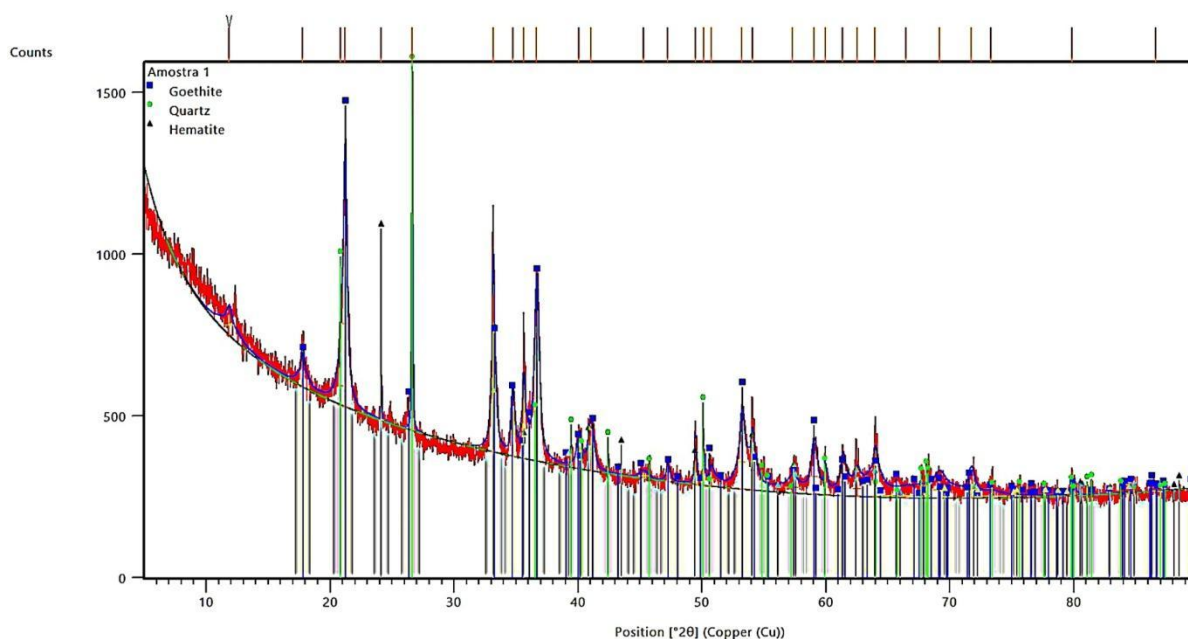


Figura 24: Difratoograma de raios-X gerado.

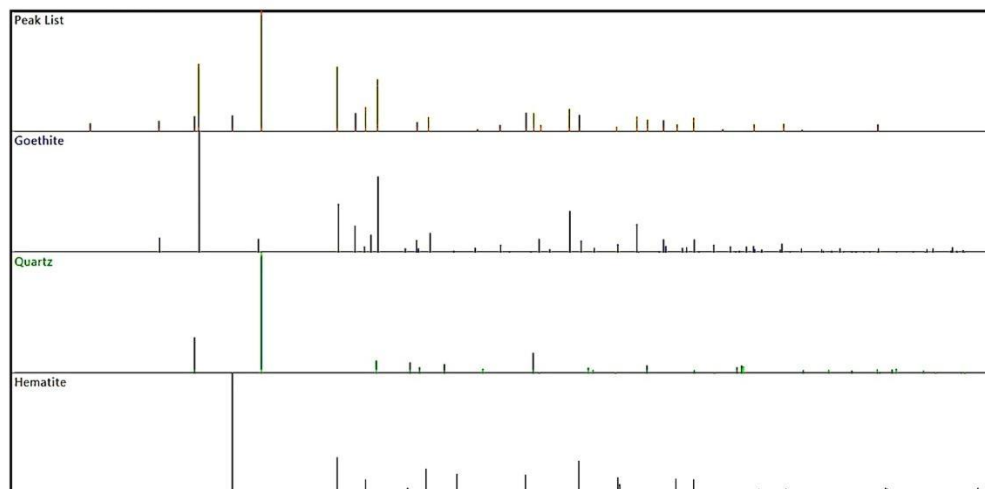


Figura 25: Lista de picos obtidos no DRX.

6.8. Análise Química

A composição química do rejeito, determinada por fluorescência de raios-X (FRX), evidenciou a predominância dos óxidos de ferro (Fe_2O_3) e sílica (SiO_2), com contribuições secundárias de óxido de alumínio (Al_2O_3) e teores menores de outros óxidos.

A elevada concentração de Fe_2O_3 está diretamente associada à presença de minerais como a hematita e a goethita, corroborando os resultados obtidos na análise mineralógica por DRX. Esse comportamento é típico de rejeitos de minério de ferro, nos quais parte significativa do ferro permanece associada a frações finas ou a minerais de difícil recuperação no processo de beneficiamento.

Por outro lado, a presença expressiva de SiO_2 indica a ocorrência de quartzo no material, o que influencia propriedades como abrasividade, densidade e comportamento mecânico. Já o teor de Al_2O_3 está associado à presença de argilominerais, como a caulinita, os quais desempenham papel fundamental no comportamento geotécnico do rejeito.

Do ponto de vista tecnológico, a composição química observada sugere que o rejeito apresenta características típicas de materiais finos provenientes de circuitos de concentração, com potencial influência no desempenho dos processos de desaguamento. A presença de argilominerais, evidenciada pelo teor de Al_2O_3 , contribui para o aumento da retenção de água e da plasticidade do material, dificultando sua aplicação em empilhamento a seco.

Comparativamente, os resultados obtidos estão em concordância com estudos da literatura, como os de Bezerra (2017) e Martinatto et al. (2024), que também reportam composições dominadas por Fe_2O_3 e SiO_2 em rejeitos do Quadrilátero Ferrífero.

Adicionalmente, a análise química permite inferir aspectos importantes relacionados à eficiência do processo de beneficiamento, uma vez que teores elevados de ferro no rejeito podem indicar perdas metalúrgicas associadas à presença de partículas finas ou à baixa eficiência de etapas de concentração.

Assim, a composição química do rejeito, quando analisada em conjunto com os resultados mineralógicos e granulométricos, fornece subsídios importantes para a compreensão de seu comportamento físico e geotécnico, bem como para a avaliação de sua viabilidade em processos de desaguamento e disposição em pilhas.

Química Global		
Produto	Torta do Decanter	Alimentação do Decanter
% Fe	44,82	46,84
% SiO_2	23,39	17,99
%P	0,128	0,171
%Mn	0,947	1,091
% Al_2O_3	3,880	3,960
%PPC	7,050	8,960
% TiO_2	0,065	0,082
%MgO	0,107	0,149
%CaO	0,01	0,01
Fechamento	100,10	99,92

Tabela 23: Composição química da alimentação e da torta do decanter.

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo a caracterização física, química, mineralógica e geotécnica de um rejeito ultrafino de minério de ferro proveniente do Quadrilátero Ferrífero, com ênfase na avaliação de sua aptidão para técnicas alternativas de disposição, especialmente o empilhamento a seco.

A análise integrada dos resultados permitiu identificar que o rejeito é predominantemente composto por partículas ultrafinas, com cerca de 75% do material apresentando diâmetro inferior a 0,005 mm. Essa característica granulométrica exerce influência determinante sobre o comportamento hidráulico do material, resultando em baixa permeabilidade e elevada capacidade de retenção de água. Como consequência, o processo de desaguentamento torna-se limitado, especialmente quando realizado exclusivamente por centrifugação.

A massa específica dos grãos, da ordem de 3,68 g/cm³, reflete a predominância de minerais densos, como hematita e goethita, conforme confirmado pela análise mineralógica por difração de raios-X. Adicionalmente, a presença significativa de quartzo e argilominerais, como a caulinita, foi determinante para a compreensão do comportamento observado. Em particular, os argilominerais desempenham papel fundamental na retenção de água, devido à sua elevada área superficial e às interações físico-químicas com a fase líquida, contribuindo para o aumento da plasticidade e da compressibilidade do material.

Os resultados da análise química corroboram a composição mineralógica identificada, com predominância de Fe₂O₃ e SiO₂ e teores relevantes de Al₂O₃. A presença deste último está diretamente associada à fração argilosa, reforçando a influência dos finos no comportamento geotécnico do rejeito. Além disso, os teores de ferro observados indicam a possibilidade de perdas metalúrgicas associadas à fração ultrafina, o que pode representar oportunidades de otimização do processo de beneficiamento.

O teor de umidade do rejeito, variando entre aproximadamente 33% e 36%, mostrou-se elevado quando comparado às condições ideais para empilhamento a seco. Esse comportamento é consistente com a granulometria fina e com a mineralogia identificada, evidenciando que a retenção de água no material não está associada apenas à água livre, mas também à água adsorvida e capilar, de difícil remoção por métodos convencionais.

Os ensaios de consistência e de abatimento (slump test) evidenciaram comportamento altamente deformável e dependente do teor de umidade, indicando baixa resistência ao

cisalhamento em condições não drenadas. Esse comportamento reforça a necessidade de controle rigoroso da umidade para garantir condições adequadas de manuseio e disposição do material.

Por sua vez, os resultados do ensaio de compactação Proctor demonstraram que o rejeito possui potencial para atingir níveis satisfatórios de densificação e ganho de resistência mecânica quando submetido à compactação em condições ótimas de umidade. No entanto, a discrepância entre a umidade natural do material e a umidade ótima de compactação evidencia a necessidade de etapas adicionais de desaguamento para viabilizar sua aplicação prática.

De forma integrada, os resultados indicam que o comportamento do rejeito é governado principalmente pela interação entre granulometria ultrafina, presença de argilominerais e elevado teor de umidade. Esses fatores atuam de maneira conjunta, influenciando negativamente a drenabilidade, a trabalhabilidade e a estabilidade inicial do material.

Dessa forma, conclui-se que, embora o rejeito apresente características compatíveis com materiais utilizados em empilhamento, sua aplicação direta em empilhamento a seco é limitada pelas condições atuais de umidade e composição. A viabilização dessa técnica requer a adoção de estratégias complementares, tais como a otimização do desaguamento por filtragem, o uso de agentes floclulantes e a adequação dos parâmetros operacionais de disposição e compactação.

Adicionalmente, os resultados obtidos reforçam a importância da caracterização integrada de rejeitos como ferramenta fundamental para o dimensionamento e a gestão de estruturas de disposição, permitindo a previsão de comportamento e a mitigação de riscos geotécnicos.

Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se a investigação de técnicas avançadas de desaguamento aplicadas a rejeitos ultrafinos, bem como a avaliação do comportamento mecânico do material em condições de campo, incluindo ensaios de resistência ao cisalhamento e estudos de estabilidade de pilhas.

8. REFERÊNCIAS

ÁGUIDO, A. C. et al. Determinação da tensão de escoamento de rejeitos de mineração por meio da análise de testes de slump. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE MECÂNICA DOS FLUIDOS E HIDRÁULICA, 1., 2022, Ouro Preto. Anais [...]. Rio de Janeiro: ABRHidro, 2022. p. 1-12. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/179/I-FLUHIDROS0028-1-0-20220723-095345.pdf>.

ALVARENGA, Phillipe Silva. Disposição de rejeitos de mineração: uma revisão. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

ANDRADE, Wellington Fernando de. Beneficiamento de minério de ferro: a importância da caracterização tecnológica na definição de rota de processo. 2018. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Faculdade Presidente Antônio Carlos (UNIPAC), Conselheiro Lafaiete, 2018. Orientador: Paulo Penha Santana.

ANTONIASSI, Juliana Lívi. A difração de raios X com o método de Rietveld aplicada a bauxitas de Porto Trombetas, PA. 2010. 185 f. Tese (Doutorado em Geoquímica) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 3082: minérios de ferro — procedimentos de amostragem e preparação de amostras. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Solos — Preparação de amostras para ensaios de caracterização e determinação de propriedades físicas. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6458: Solos — Determinação da massa específica dos grãos. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solos —

Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 67: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solos — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solos — Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: Solos — Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9939: Minério de ferro — Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2011.

AUSTRALIA. Department of Industry, Innovation and Science. Leading practice sustainable development program for the mining industry: tailings management. [S. l.: s. n.], 2016.

BEZERRA, Carolina Goulart. Caracterização do rejeito de minério de ferro (IOT) e avaliação da sua influência no comportamento físico-químico e mecânico de pastas de cimento. 2017. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

BORGES, Alysson A.; LUZ, José Aurélio Medeiros da; FERREIRA, Eliomar Evaristo. Caracterização da parcela magnética de minério fosfático de carbonatito. REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 61, n. 1, p. 29-34, 2008.

BRAGA, Paulo Fernando Almeida; COUTO, Hudson Jean Bianchini. Ensaio de classificação granulométrica por meio de cicloclassificador. In: SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Sílvia Cristina Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida (Ed.). Tratamento de minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. p. 75-97. Disponível em:

<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1021/1/Cap%204%20Ensaio%20de%20Ciclos%20de%20Classifica%C3%A7%C3%A3o%20Granulom%C3%A9trica%20por%20meio%20de%20Cicloclassificador.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2026.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 16 abr. 2026.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 5930:1999: code of practice for site investigations. London: BSI, 1999.

CRAIG, R. F. Mecânica dos solos. 7. ed. Tradução de Amir Kurban. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 365 p.

CRUZ, Rosy Cristina Amador. Análise da disposição de rejeito a seco relacionada ao projeto, estruturas de empilhamento e métodos de desaguamento do rejeito. 2023. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/17526>. Acesso em: 16 abr. 2026.

FERNANDES, Manuel de Matos. Mecânica dos solos: conceitos e princípios fundamentais. 1. ed. São Paulo: Grupo A, 2016. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 16 abr. 2026.

FIGUEIREDO, Marcelo Marques. Estudo de metodologias alternativas de disposição de rejeitos para a mineração Casa de Pedra – Congonhas/MG. 2007. Monografia (Mestrado Acadêmico) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

FRANÇA, Silvia Cristina Alves; TRAMPUS, Bruna Camara. Desaguamento de rejeitos minerais para aplicação de métodos de disposição alternativos às barragens de rejeito convencionais. 2018. [Artigo/Técnico não publicado]. [S. l.: s. n.], 2018.

GUIMARÃES, Nilton Caixeta; VALADÃO, George S.; PERES, Antônio E. C. Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando à sua disposição em pilhas. REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 65, p. 543-548, 2011.

KELSALL, D. F. A further study of the hydraulic cyclone. Chemical Engineering Science, [S. l.], v. 2, n. 6, p. 254-272, Dec. 1953. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(53\)80044-8](https://doi.org/10.1016/0009-2509(53)80044-8).

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. Soil mechanics. New York: John Wiley & Sons, 1969. 553 p.

LIU, Di et al. Improved water recovery: a review of clay-rich tailings and saline water interactions. Powder Technology, v. 364, p. 604-621, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.01.039>.

LUGÃO, W. G. et al. Dry stacking of cyclone tailings. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON PASTE AND THICKENED TAILINGS, 16., 2013. [Local]. Proceedings [...]. [S. l.]: Australian Centre for Geomechanics, 2013. p. 47-59.

MARTINATTO, Camila da Silva et al. Caracterização física, química e mineralógica de rejeitos de minério de ferro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 21.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MECÂNICA DAS ROCHAS, 10.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHEIROS GEOTÉCNICOS JOVENS, 10., 2024, Balneário Camboriú. Anais [...]. Balneário Camboriú: ABMS, 2024. p. 3730. DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/453.

NASCIMENTO, Wagner Araújo. Empilhar rejeitos finos ainda é um desafio. [Entrevista concedida à Revista Mineração & Sustentabilidade]. Revista Mineração, [S. l.], 10 mar. 2021. Disponível em: <https://revistamineracao.com.br/2021/03/10/empilhar-rejeitos-finos-ainda-e-um-desafio/>. Acesso em: 16 abr. 2026.

NIERWINSKI, Helena Paula. Caracterização e comportamento geomecânico de rejeitos de mineração. 2019. [Tipo de trabalho e instituição não informados]. [S. l.: s. n.], 2019.

PATOCK, Pascal et al. Dry stacking in mine and ore processing waste management: a promising future? A best practice guideline and new approaches. 2021. [Tipo e local não informados]. [S. l.: s. n.], 2021.

PEREIRA, Lucas Mazullo Mascarenhas. *Estudo de propriedades geotécnicas de um rejeito de minério de ferro filtrado compactado para empilhamento a seco*. 2024. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, São Paulo, 2024. Orientadora: Prof^{ra}. Dr^a. Maria Eugenia Gimenez Boscov. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3145/tde-31012025-093926/publico/LucasMazulloMascarenhasPereiraCorr24.pdf>.

PINTO, Carlos de Sousa. Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas: com exercícios resolvidos. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 368 p. eISBN 978-85-79751-16-5. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788579751165>. Acesso em: 16 abr. 2026.

RAFAEL, Herbert Miguel Angel Maturano. Análise do potencial de liquefação de uma barragem de rejeito. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso/Dissertação – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=20720&idi=1>. Acesso em: 16 abr. 2026.

SAMPAIO, João Alves; SILVA, Fernanda Arruda Nogueira Gomes da. Determinação das densidades de sólidos e de polpa. In: SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida (Ed.). Tratamento de minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. p. 37-51. Disponível em: <https://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1019/1/Cap%202%20Densidade%20Final.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2026.

SCHULZ, Luana Rutz. Comportamento geomecânico monotônico e cíclico de rejeito de minério de ferro "ultrafino" artificialmente cimentado ou compactado. 2025. [Tipo e instituição não informados]. [S. l.: s. n.], 2025.

SILVA, R. F. da. A difração de raios X: uma técnica de investigação da estrutura cristalina de materiais. *Revista Processos Químicos*, [S. l.], v. 14, n. 27, p. 73-82, 2020. DOI: <https://doi.org/10.19142/rpq.v14i27.577>.

VASCONCELOS, Guilherme do Carmo. Construção de aterros compactados com rejeito de mineração filtrado. 2021. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021. Orientador: Prof. Dr. Adilson do Lago Leite. Coorientador: Prof. Dr. Waldyr Lopes de Oliveira Filho. Disponível em: https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/3382/6/MONOGRAFIA_Constru%C3%A7%C3%A3oAterrosCompactados.pdf. Acesso em: 16 abr. 2026.

WOLFF, Ana Paula. Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale. 2009. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

