



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**

**CEFET-MG / UNIDADE ARAXÁ**

**ENGENHARIA DE MINAS**

**PATRÍCIA APARECIDA BORGES**

**EFEITO DA GRANULOMETRIA NA FILTRAÇÃO DE REJEITO**

**ARAXÁ-MG**

**2025**

**PATRÍCIA APARECIDA BORGES**

**EFEITO DA GRANULOMETRIA NA FILTRAÇÃO DE REJEITO**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador (a): Michelly dos Santos Oliveira

Coorientadora (a): Renata Keila Santos

**ARAXÁ-MG**

**2025**

**PATRÍCIA APARECIDA BORGES**

## **EFEITO DA GRANULOMETRIA NA FILTRAÇÃO DE REJEITO**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador (a): Michelly dos Santos Oliveira

Coorientadora (a): Renata Keila Santos

Data de defesa: Araxá, 14 de Fevereiro de 2025.



---

Presidente e Orientador(a): Prof. (a) Dra. Michelly dos Santos Oliveira  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



---

Coorientador(a): Renata Keila Santos  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



---

Membro Titular: Ma. Kelly de Souza Pires  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



---

Membro Titular: Prof. Dr. Natal Junio Pires  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

*Dedico este trabalho aos meus pais, Ivone e  
Sebastião, pelo incentivo e apoio.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à Deus, por me conceder saúde, força, motivação e sabedoria durante toda a jornada acadêmica.

À minha família, pelo amor incondicional, paciência e apoio nos momentos de dificuldade. Vocês são e sempre serão minha maior fonte de inspiração e ânimo.

Aos meus amigos, que estiveram presentes nos momentos de dúvida e celebração, sempre oferecendo palavras de incentivo. O suporte de todos vocês foram fundamentais para a realização de mais um sonho.

Aos professores do CEFET-Araxá pelos valiosos ensinamentos, ao Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG e toda equipe dos laboratórios pela contribuição na execução dos ensaios e análises.

Agradecimento especial à orientadora Michelly dos Santos Oliveira, coorientadora Renata Keila Santos, Francisco Gregianin Testa, Natal Junio Pires e Kelly de Souza Pires, pelas contribuições, incentivo e encorajamento.

## RESUMO

O Brasil é um dos principais detentores de reservas de minério de ferro do mundo, produzindo milhões de toneladas anualmente. Devido à alta produção e a exaustão de jazidas com elevados teores, as empresas mineradoras enfrentam desafios devido ao grande volume de rejeitos gerados do beneficiamento de minérios. Uma das alternativas inovadoras para a disposição de rejeitos é o empilhamento a seco em pilhas de rejeito filtrado. Nesse contexto, as partículas finas e ultrafinas podem interferir no desempenho das etapas de separação sólido-líquido. Tendo isso em vista, o presente trabalho buscou estudar o efeito da granulometria na filtração de rejeito de três amostras constituídas essencialmente por quartzo. Para alcançar o objetivo, realizou-se testes de filtração para amostras com distribuições granulométricas distintas, com a finalidade de obter a umidade e taxa unitária de filtração, enquanto o ensaio de compactação Proctor Normal foi empregado para avaliar a umidade ótima para compactação em pilhas. No que se refere a análise granulométrica, ao utilizar o analisador de partículas por difração a laser (CILAS modelo 1090), foi constatado que o parâmetro de tamanho  $d_{50}$  das amostras 1, 2 e 3 foram nessa ordem, 92,51 $\mu\text{m}$ , 72,11 $\mu\text{m}$  e 14,21 $\mu\text{m}$ . Em relação aos testes de filtração para a porcentagem de sólidos correspondente a 65% de sólidos, verificou-se que a amostra 1 (maior granulometria) apresentou maior taxa unitária de filtração (massa de sólidos seco/tempo/área). Além disso, notou-se que a presença de grandes quantidades de finos na amostra 3 fez com que a umidade do teste de filtração apresentasse baixa variabilidade à medida que o tempo de secagem aumentasse. Referente à umidade ótima em base seca obtida pelo ensaio de compactação, as amostras 1, 2 e 3 apresentaram, respectivamente, 12,50%, 11,30% e 15,40%, no qual para a amostra 3 foi verificado elevado tempo necessário para a secagem da torta para chegar próxima à umidade dita ótima do ensaio de compactação. Os resultados de análise de variância utilizando o *Minitab* mostraram que o efeito do diâmetro  $d_{50}$  possui maior contribuição na umidade em base seca, enquanto o tempo de secagem é o fator com maior significância na variabilidade da taxa unitária de filtração.

**Palavras-chave:** Rejeitos; Filtração; Granulometria; Minério de ferro.

## ABSTRACT

Brazil is one of the world's largest iron ore reserve holders, producing millions of tons annually. Due to high production and the depletion of high-grade deposits, mining companies face challenges due to the large volume of waste generated from ore beneficiation. One of the innovative alternatives for waste disposal is dry stacking in filtered waste piles. In this context, fine and ultrafine particles can interfere with the performance of solid-liquid separation steps. With this in mind, this study sought to study the effect of particle size on the filtration of waste from three samples consisting essentially of quartz. To achieve this objective, filtration tests were performed on samples with different particle size distributions, in order to obtain the moisture content and unit filtration rate, while the Proctor Normal compaction test was used to evaluate the optimum moisture content for compaction in piles. Regarding the granulometric analysis, when using the laser diffraction particle analyzer (CILAS model 1090), it was found that the size parameter  $d_{50}$  of samples 1, 2 and 3 were in this order, 92.51 $\mu\text{m}$ , 72.11 $\mu\text{m}$  and 14.21 $\mu\text{m}$ . Regarding the filtration tests for the percentage of solids corresponding to 65% solids, it was found that sample 1 (larger granulometry) presented a higher unit filtration rate (dry solids mass/time/area). In addition, it was noted that the presence of large amounts of fines in sample 3 caused the moisture content of the filtration test to present low variability as the drying time increased. Regarding the optimum moisture content on a dry basis obtained by the compaction test, samples 1, 2 and 3 presented, respectively, 12.50%, 11.30% and 15.40%, in which for sample 3 it was verified a high time required for drying the cake to reach close to the moisture content said to be optimum of the compaction test. The results of the analysis of variance using Minitab showed that the effect of the diameter  $d_{50}$  has a greater contribution to the moisture content on a dry basis, while the drying time is the factor with the greatest significance in the variability of the unit filtration rate.

**Keywords:** Rejects; Filtration; Granulometry; Iron ore.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização do Quadrilátero Ferrífero.....	18
Figura 2 - Etapas de beneficiamento do minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero.	19
Figura 3 - Previsão de geração de rejeitos (2010-2030). .....	21
Figura 4 - Métodos de disposição de rejeito arenoso e lama. ....	21
Figura 5 - Esquema de filtração. ....	22
Figura 6 - Ciclos de filtração.....	23
Figura 7 - Teste de filtração.....	27
Figura 8 – Representação do ensaio de compactação. ....	28
Figura 9 - Redução dos índices de vazios. ....	29
Figura 10 - Curva de compactação. ....	29
Figura 11 - Curva de compactação de diversos solos brasileiros. ....	31
Figura 12 - Teste de abatimento. ....	32
Figura 13 - Representação do teste de abatimento com um cilindro. ....	32
Figura 14 - Tipos de comportamento reológico de polpas. ....	33
Figura 15 - Esquema das principais etapas realizadas. ....	34
Figura 16 - Faixa granulométrica dos principais rejeitos das usinas de ferro do Quadrilátero Ferrífero.....	35
Figura 17 - Pilha alongada para homogeneização do material. ....	36
Figura 18 - Peneirador suspenso. ....	37
Figura 19 - Sequência de pesagem dos picnômetros. ....	39
Figura 20 - Ensaio de compactação.....	39
Figura 21 - Sistema de filtração.....	41
Figura 22 - Curvas granulométricas obtidas após o peneiramento a úmido. ....	47
Figura 23 - Curvas granulométricas obtidas por granulômetro a laser.....	48
Figura 24 - Curvas de compactação das amostras. ....	51
Figura 25 - Fenômeno "borrachudo". ....	52
Figura 26 - TUF média em relação ao tempo de secagem. ....	53
Figura 27 - TUF média em relação ao tempo de secagem. ....	54
Figura 28 - Umidade em base seca em função do tempo.....	54
Figura 29 - Torta obtida durante o teste de filtração – Amostra 3. ....	55
Figura 30 - Regressão linear para TUF.....	57

Figura 31 - Gráfico de efeitos principais para umidade em base seca.....	59
Figura 32 - Gráfico de efeitos principais para taxa unitária de filtração.....	60
Figura 33 - Comportamento da polpa após teste de abatimento.....	61
Figura 34 - Distribuição granulométrica das amostras. ....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Conteúdo teórico dos principais minerais portadores de ferro. ....	17
Tabela 2 - Classificações dos minerais de acordo com a granulometria.....	25
Tabela 3 - Energias de compactação - Cilindro pequeno.....	30
Tabela 4 – Energias de compactação - Cilindro grande.....	30
Tabela 5 - Referência para composição das amostras. ....	36
Tabela 6 - Peneiras utilizadas na análise granulométrica das amostras. ....	37
Tabela 7 - Especificações técnicas do meio filtrante 4400-T.....	42
Tabela 8 - Nível codificado e real. ....	44
Tabela 9 - Matriz de planejamento fatorial. ....	45
Tabela 10 - Distribuição granulométrica: Amostra 1.....	46
Tabela 11 - Distribuição granulométrica: Amostra 2.....	46
Tabela 12 - Distribuição granulométrica: Amostra 3.....	47
Tabela 13 – Diâmetros obtidos por peneiramento a úmido. ....	48
Tabela 14 - Diâmetros obtidos por granulômetro a laser. ....	49
Tabela 15 - Resultado da picnometria: Amostra 1 ( $d_{50}= 92,51\mu\text{m}$ ). ....	49
Tabela 16 - Resultado da picnometria: Amostra 2 ( $d_{50}= 72,11\mu\text{m}$ ). ....	50
Tabela 17 - Resultado da picnometria: Amostra 3 ( $d_{50}= 14,21\mu\text{m}$ ). ....	50
Tabela 18 - Resultados do ensaio de compactação.....	51
Tabela 19 - Comparação das umidades determinadas. ....	56
Tabela 20 - Regressão linear simples. ....	57
Tabela 21 - ANOVA para a umidade em base seca (%). ....	58
Tabela 22 - ANOVA para a TUF ( $\text{kg/h/m}^2$ ). ....	60
Tabela 23 - Resumo dos resultados do teste de abatimento. ....	62
Tabela 24 - Resultados da filtração: Amostra 1.....	71
Tabela 25 - Resultados da filtração: Amostra 2.....	72
Tabela 26 - Resultados da filtração: Amostra 3.....	72

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BIFs – Formações Ferríferas Bandadas

CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Fe – Ferro

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

NBR – Norma brasileira

nº – Número

PDRs – Pilhas de rejeito filtrado

pH – Potencial Hidrogeniônico

PNSB – Política Nacional de Segurança das Barragens

SiO<sub>2</sub> – Dióxido de silício

TUF – Taxa unitária de filtração

## LISTA DE SÍMBOLOS

% – Porcentagem

# – Mesh

$\mu\text{m}$  – Micrômetros

$\text{cm}^3$  – Centímetro cúbico

$\text{m}^2$  – Metro quadrado

g – Grama

$\text{g}/\text{cm}^3$  – Grama por centímetro cúbico

kg – Quilograma

h – Hora

$\rho_d$  – Massa específica aparente seca

t – Tonelada

$d_s$  – Densidade dos sólidos

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>16</b>
2.1. Objetivo geral.....	16
2.2. Objetivo específico .....	16
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
3.1. Minério de ferro.....	17
3.1.1. Rejeito.....	20
3.2. Filtração .....	22
3.2.1. Mecanismo de filtração .....	24
3.2.2. Granulometria das partículas.....	25
3.2.3. Teste de filtração .....	26
3.3. Ensaio de compactação .....	27
3.4. Teste de abatimento .....	31
<b>4. METODOLOGIA .....</b>	<b>34</b>
4.1. Preparação das amostras.....	34
4.2. Caracterização das amostras .....	36
4.2.1. Distribuição granulométrica .....	36
4.2.2. Determinação da massa específica dos sólidos .....	38
4.3. Ensaio de compactação .....	39
4.4. Separação sólido-líquido .....	41
4.4.1. Preparação da polpa .....	41
4.4.2. Teste de filtração .....	41
4.5. Teste de abatimento – <i>Slump Test</i> .....	43
4.6. Análise de regressão linear simples .....	43
4.7. Planejamento fatorial.....	44
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>46</b>
5.1. Distribuição granulométrica das amostras .....	46
5.2. Massa específica dos sólidos .....	49
5.3. Ensaio de compactação .....	51
5.4. Teste de filtração .....	53

5.4.1	Análise de regressão linear .....	56
5.4.2	Análise de variância - Umidade B.S (%).....	58
5.4.3	Análise de variância – TUF (kg/h/m <sup>2</sup> ) .....	59
5.5.	Teste de abatimento – <i>Slump Test</i> .....	61
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>63</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>64</b>
	<b>APÊNDICE A – Classificação textural das amostras .....</b>	<b>71</b>
	<b>APÊNDICE B – Resultados da filtração .....</b>	<b>71</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A disposição e destinação de rejeitos provenientes da mineração passou a ser uma preocupação ainda maior nos últimos anos. Esse tema ganhou destaque após as tragédias envolvendo o rompimento de barragens de Fundão e da Mina Córrego do Feijão nas cidades de Mariana (2015) e Brumadinho (2019), ambas localizadas no estado de Minas Gerais. Em 30 de setembro de 2020, uma nova Política Nacional de Segurança das Barragens (PNSB) foi determinada com o objetivo de reduzir a probabilidade de novos acidentes. A Lei nº 14.066 estabeleceu a proibição de instalações de barragens a montante. Diante disso, novas alternativas mais seguras e sustentáveis para a disposição de resíduos estão sendo buscadas pelas empresas mineradoras (TESSAROTO, 2015).

Dentre diversas metodologias, atualmente destaca-se o empilhamento a seco, que consiste na acomodação do rejeito filtrado em pilhas após a redução da umidade, popularmente conhecido pela expressão em inglês “*dry stacking*”. Nesse método, a operação de filtração é empregada para o desaguamento de polpas de rejeito utilizando equipamentos tais como filtros a vácuo ou pressão. Dessa forma, parte da água filtrada é destinada para ser reutilizada no processo produtivo da usina de beneficiamento de minérios, enquanto o sólido com baixa umidade segue geralmente por correia transportadora ou caminhão, sendo disposto em pilhas para que ocorra a compactação. Autores como Guimarães (2011) e Wisdom (2017) ressaltam que uma das grandes vantagens desse método consiste na recuperação da água no processo de filtração, que pode ser utilizada novamente durante o processo de beneficiamento.

Nesse contexto, o conhecimento da distribuição granulométrica dos rejeitos é um dos fatores que podem influenciar no comportamento reológico do material. As partículas finas e ultrafinas podem interferir no desempenho das etapas de separação sólido-líquido de polpas, tornando o processo de filtração mais difícil em termos de redução da umidade (GUIMARÃES, 2011). Diante disso, o presente estudo tem como objetivo avaliar o efeito da granulometria de amostras de rejeito constituídas essencialmente por quartzo, simulando o comportamento de materiais descartados pelas mineradoras de minério de ferro.

Como forma de atingir os objetivos traçados, para a execução dessa pesquisa foi realizada uma breve revisão bibliográfica no terceiro capítulo, seguido dos procedimentos experimentais para coleta de dados. Por fim, os capítulos quinto e sexto, apresentam respectivamente, os resultados, discussão e as conclusões obtidas.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

A realização desse estudo tem como objetivo investigar o efeito da granulometria na filtração de um rejeito constituído essencialmente de quartzo.

### **2.2. Objetivo específico**

- Simular a composição do rejeito de minério de ferro em diferentes faixas granulométricas;
- Verificar a umidade ótima por meio do ensaio de compactação Proctor Normal;
- Realizar os testes de filtração para cada faixa granulométrica visando obter a umidade;
- Avaliar as variáveis de granulometria e tempo de secagem da torta por meio do planejamento experimental.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é abordado de forma breve sobre o minério de ferro e o rejeito proveniente do beneficiamento desse recurso mineral. Além disso, discorre sobre a filtração, ensaio de compactação e o teste de abatimento.

#### 3.1. Minério de ferro

O Brasil é um dos principais produtores de minério de ferro, ocupando a segunda colocação no ranking mundial (MORAES; RIBEIRO, 2018; SILVA; MAZZINGHY, 2021). A primeira posição é ocupada pela China.

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2022), o ferro é um dos elementos que ocorrem em maior abundância na crosta terrestre, sendo encontrado em cerca de 300 minerais como componente essencial. Todavia, para fins de beneficiamento os óxidos possuem maior viabilidade econômica por apresentarem concentração de ferro significativas. A Tabela 1 apresenta os principais minerais portadores de ferro.

Tabela 1 – Conteúdo teórico dos principais minerais portadores de ferro.

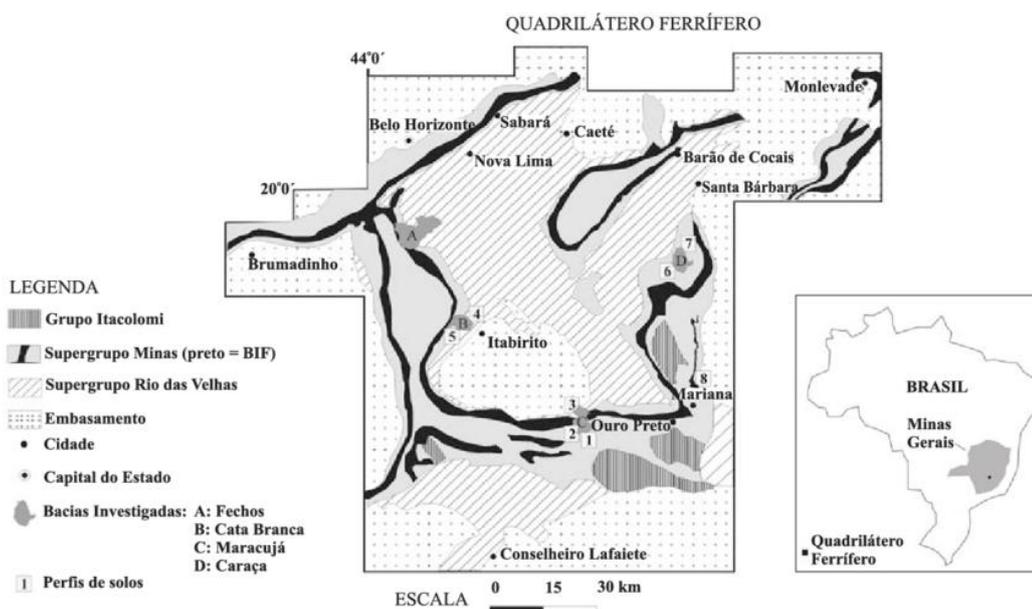
Mineral	Fórmula química	Conteúdo teórico de ferro (%)
Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	72,40
Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	69,90
Goethita	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	62,90
Limonita	$2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	59,80
Ilmenita	$\text{FeTiO}_3$	36,80
Siderita	$\text{FeCO}_3$	48,20
Pirita	$\text{FeS}_2$	46,50
Pirrotita	$\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$	61,00

Fonte: Adaptado de BNDES Setorial, 2014.

De acordo com Takehara e Junior (2013), os depósitos de minério de ferro podem ser agrupados nas seguintes categorias principais em relação a geologia: sedimentares acamadados ou formações ferríferas bandadas; depósitos formados devido a atividades magmáticas e/ou vulcano-sedimentar, depósitos formados por metamorfismo de contato e ainda, depósitos resultantes de alteração e acúmulo na superfície. Carmignano (2021) enfatiza que os minérios de ferro brasileiros são predominantemente de depósitos sedimentares acamadados hematíticos, comumente denominadas como BIFs (Formações Ferríferas Bandadas).

Quanto à localização, os depósitos de minério de ferro no Brasil estão em grande maioria no estado de Pará e no centro-sul do estado de Minas Gerais na região do Quadrilátero Ferrífero (Figura 1). A província mineira representa uma das áreas mais importantes geologicamente. Oliveira (2011) destaca-se que as reservas de ouro e ferro foram as responsáveis pelo desenvolvimento dessa região, com o ciclo do ouro a partir do século XVII e o ciclo do ferro a partir de 1917.

Figura 1 - Localização do Quadrilátero Ferrífero.



Fonte: Varajão *et al.*, (2009).

De acordo com Cordeiro *et al.*, (2022) o minério de ferro explorado no Quadrilátero Ferrífero pode ser classificado em dois grupos principais: o minério itabirítico e minério de alto teor (corpos de hematita). O itabirito corresponde ao minério com teor de ferro intermediário entre 52% e 64%, enquanto os corpos minerais de alto teor são constituídos basicamente de hematita e ricos em Fe (>64%) (TAKEHARA, 2004).

Rodrigues (2024, p.290) salienta que:

A exploração no Quadrilátero Ferrífero, embora massiva, enfrenta o desafio da redução progressiva do teor nas jazidas. Parece que esse movimento cumulativo ao longo dos anos foi um dos principais fatores que levaram à construção e expansão das barragens.

Guimaraes (2011) afirma que as instalações de minério de ferro da empresa VALE localizadas no Quadrilátero Ferrífero são denominadas Sistema Sul, compreendendo os complexos mineradores da cidade de Itabira, Mariana, Minas Centrais, Paraopeba, Vargem Grande e Itabiritos. Referente as etapas de beneficiamento do Sistema Sul os fluxogramas possuem geralmente as etapas de britagem, classificação, concentração por métodos gravíticos e/ou separação magnética e/ou flotação reversa.

A Figura 2 apresenta a fração do produto, o método de concentração, o produto, o rejeito e a destinação do rejeito do minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Segundo Araujo (2006) as lamas são constituídas de partículas de ultrafinos (-10+1 $\mu$ m) e coloidais (-1 $\mu$ m), entretanto, em uma operação usual nas usinas, denomina-se lamas toda a massa de partículas do rejeito do circuito de deslamagem.

Figura 2 - Etapas de beneficiamento do minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero.

Fração	Método de Concentração	Produto	Rejeito	Destinação do Rejeito
<i>(-31,5+6,3)mm</i>	-	granulado	-	-
<i>(-6,3+1)mm</i>	jigagem	<i>sinter feed</i>	rejeito da jigagem	pilhas de rejeitos ou moagem e incorporação ao circuito
<i>(-1+0,15)mm</i>	concentração magnética ou espirais		produto não magnético ou rejeito de espirais	pilhas de rejeitos ou barragens
<i>(-0,15)mm</i>	concentração magnética e/ou flotação	<i>pellet feed</i>	produto não magnético e/ou rejeito de flotação	barragens
<i>(-0,010)mm</i>	-	-	lamas	barragens

Fonte: Guimarães, 2011.

### 3.1.1. Rejeito

O beneficiamento de minério de ferro produz elevado volume de rejeito, reflexo da exaustão das jazidas de elevados teores e das composições mineralógicas complexas. Edraki *et al.*, (2014) definem os rejeitos da mineração como o material sem aproveitamento econômico agregado, podendo conter metais dissolvidos e reagentes previamente utilizados, resultantes de processos de beneficiamento mineral.

Devido à grande demanda por minério de ferro para comercialização, algumas rochas anteriormente com teores de ferro indesejáveis passaram a ter sua exploração viável para atender o mercado, o que contribuiu para o crescimento na geração desses rejeitos (ANDRADE, 2014).

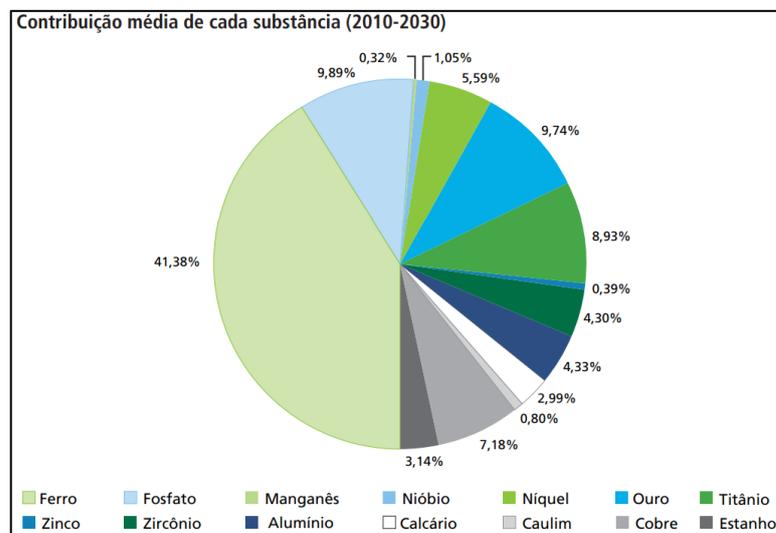
Moraes (2024, p.142) destaque que:

Os minerais são recursos naturais e finitos. O empobrecimento das jazidas tem levado ao processamento de minérios cuja granulometria passou de cerca de 100 µm para algo da ordem de 100 µm a 10 µm. No entanto, as plantas de beneficiamento mineral foram dimensionadas para operar em faixas granulométricas entre 50 µm e 100 µm. Esse fato, aliado ao teor do bem mineral contido e outros fatores relativos à eficiência do processo, fazem com que os rejeitos tenham alto percentual de material de interesse que não foram recuperados e são descartados em pilhas ou barragens de rejeitos.

O dióxido de silício, popularmente conhecido como sílica, é um dos compostos químicos com maior representatividade nos rejeitos de minério de ferro. A sua fórmula química é representada por SiO<sub>2</sub>, sendo um dos óxidos mais abundantes na crosta terrestre. De acordo com Della *et al.*, (2006), a sílica pode ser encontrada em seu estado natural em diversas formas cristalinas. No estado puro é encontrado em rochas de quartzo, areia, arenitos e quartzitos, enquanto como mineral apresenta-se em associações que dão origem a feldspatos, silicatos de magnésio e zircônia.

Silva *et al.*, (2012) destacam no relatório desenvolvido pela Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, que o minério de ferro possui alta contribuição na geração de rejeitos. Para o período de 2010-2030, estima-se que a participação da substância ferro corresponda em média a 41,38% quando comparado a outros minérios como fosfato (9,89%), ouro (9,74%), titânio (8,93%), entre outros, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Previsão de geração de rejeitos (2010-2030).



Fonte: IPEA, 2012.

Em relação a disposição de rejeitos, o descarte pode ser realizado em diferentes concentrações de sólidos na consistência de polpa, pasta ou torta (rejeito filtrado). Gomes (2009) em seus estudos apresenta alguns parâmetros geotécnicos que podem auxiliar na escolha do método, conforme a tabela da Figura 4.

Figura 4 - Métodos de disposição de rejeito arenoso e lama.

Parâmetro Geotécnico	Características	Forma de Disposição Aplicável
Granulometria	Rejeito arenoso: 90% acima de 0,074 mm	Barragem convencional Barragem alteada com rejeito Empilhamento drenado Rejeito filtrado
	Lama: 90% abaixo de 0,074 mm	Barragem convencional Rejeito espessado
Massa específica dos grãos ( $\rho_s$ )	Rejeito arenoso: $\rho_s < 4\text{g/cm}^3$	Barragem convencional Barragem alteada com rejeito Empilhamento drenado Rejeito filtrado
	Lama: $\rho_s > 4\text{g/cm}^3$	Barragem convencional Rejeito espessado
Permeabilidade (k)	Rejeito arenoso: $k = 10^{-2}$ a $10^{-4}$ cm/s	Barragem convencional Barragem alteada com rejeito Empilhamento drenado Rejeito filtrado
	Lama: $k = 10^{-6}$ a $10^{-11}$ cm/s	Barragem convencional Rejeito espessado
Coesão (c)	Rejeito arenoso: c = 0 kPa	Barragem convencional Barragem alteada com rejeito Empilhamento drenado Rejeito filtrado
	Lama: c > 0 kPa	Barragem convencional Rejeito espessado

Fonte: GOMES, 2009.

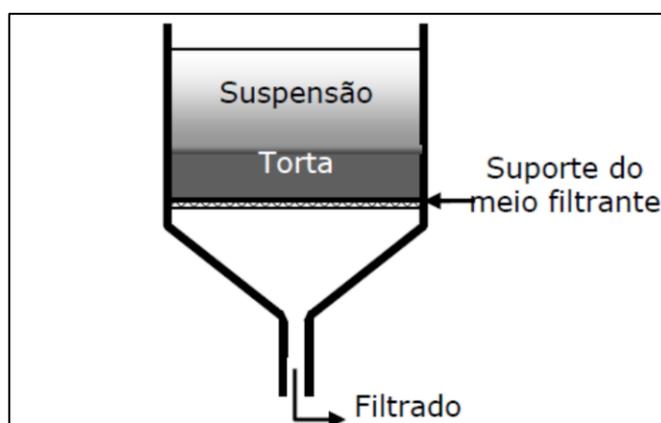
De acordo com Pereira (2024, p.37):

Entre 2016 e 2018, a Vale S.A. construiu aterros experimentais no Complexo Itabiritos – Mina do Pico para avaliar o comportamento in situ dos rejeitos filtrados finos e granulados, separados e misturados, com o objetivo de viabilizar a disposição em PDRs para reduzir a disposição de rejeitos em barragens, reduzir impactos ambientais e aumentar o aproveitamento hídrico nos processos de beneficiamento do minério de ferro. Analisaram-se principalmente a trabalhabilidade na construção dos aterros e os resultados geotécnicos em função da disposição mecânica da pilha de rejeito.

### 3.2. Filtração

As etapas de separação sólido-líquido buscam adensar os sólidos, separando as partículas em suspensão do líquido, para que seja obtido um produto com menor umidade. A filtração é uma das operações unitárias desse processo, no qual a polpa é submetida a um meio filtrante poroso resultando em dois produtos, sendo o filtrado composto pelo líquido e a torta corresponde aos sólidos que ficam retidos ao meio filtrante (CHAVES, 2013). Na Figura 5 é possível visualizar o esquema simplificado da filtração de polpas com formação de torta.

Figura 5 - Esquema de filtração.



Fonte: Oliveira e Luz, 2007.

Segundo Oliveira e Luz (2007), a filtração pode ocorrer por gravidade quando a pressão hidrostática da suspensão atua sobre o meio filtrante. Por outro lado, quando a operação é realizada por alguma ação externa são possíveis as seguintes alternativas:

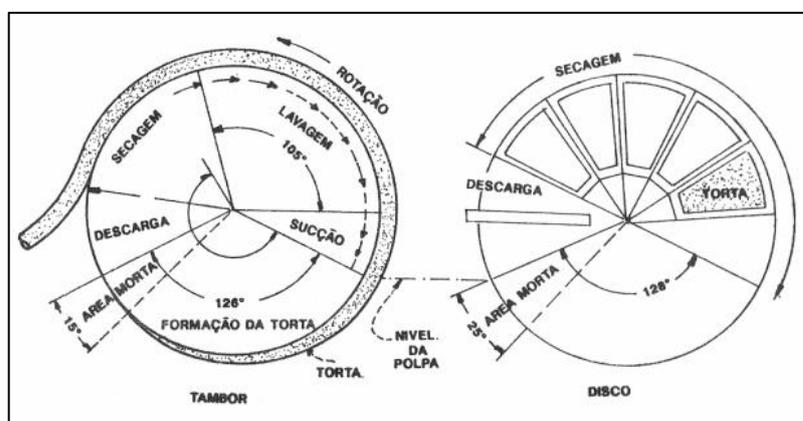
- Filtração a vácuo: utiliza-se pressão negativa abaixo do meio filtrante;

- Filtração sob pressão: aplica-se pressão positiva do lado da torta;
- Filtração centrífuga: a centrifugação é utilizada para forçar a passagem do líquido;
- Filtração hiperbárica: consiste na combinação da filtração a vácuo e pressão;
- Filtração capilar: é empregado a ação de capilares dos meios cerâmicos porosos.

A filtração pode ser realizada de forma contínua ou por batelada, mas é sempre cíclica. De acordo com Chaves (2013), apesar dos equipamentos de filtração explorarem princípios físicos de funcionamento distintos, todos eles seguem o ciclo com as seguintes fases (Figura 6):

- Formação da torta: adensamento de material sobre o meio filtrante;
- Secagem: retirada da água do material, direcionando o líquido para o filtrado;
- Descarga: desprendimento da torta empregando sopro ou raspagem e em alguns casos a lavagem da tela se necessário.

Figura 6 - Ciclos de filtração.



Fonte: Chaves, 2013.

De acordo com Braga (2021), no processamento de minério de ferro, as tecnologias mais utilizadas para filtrar concentrados e rejeitos são os filtros a vácuo convencionais, os filtros tipo prensa e os filtros cerâmicos. Oliveira e Luz (2007) destacam que a operação de filtração é usualmente realizada após o espessamento de polpa com concentração de sólidos superior a 60%.

Em termos de desempenho, os parâmetros monitorados durante a operação de filtração são:

- Taxa unitária de filtração (t/h/m<sup>2</sup>) ou razão de filtragem: refere-se à produtividade do filtro (razão entre a tonelada hora de sólido seco filtrada pela área de filtração);
- Umidade (%): indica a quantidade de água presente na torta filtrada, podendo ser expressa em base seca, que consiste na relação da massa de água da torta e a massa seca (sólidos) ou em base úmida pela razão da massa de água e a massa úmida (torta);
- % de sólidos no filtrado: representa a massa de sólidos presente no filtrado (fase líquida).

### 3.2.1. Mecanismo de filtração

Segundo Valadão (2008), a teoria clássica de filtração considera como princípio o fluxo de líquido através de um meio poroso (torta) não compressível, descrito por uma relação empírica conhecida como Lei de Darcy, conforme mostrado na Equação 1.

$$Q = \frac{K * \Delta P * A}{\mu * L}$$

Equação 1

Em que:

- Q: fluxo de filtrado (cm<sup>3</sup>/s);
- K: permeabilidade do leito (cm/s);
- ΔP: diferencial de pressão através da torta e do meio filtrante (KPa);
- A: área disponível para filtração (cm<sup>2</sup>);
- μ: viscosidade do filtrado (cm<sup>2</sup>/s);
- L: espessura do meio filtrante e da torta (cm);

Na Equação 1 é demonstrado que a velocidade de filtração “Q” (volume de filtrado que atravessa a tela na unidade de tempo) é diretamente proporcional aos parâmetros de permeabilidade do leito, ao diferencial de pressão e a área disponível para filtração. Por outro lado, é inversamente proporcional a viscosidade do filtrado e a espessura do meio filtrante e da torta.

De acordo com Chaves (2013), a velocidade de filtração pode ser influenciada por alguns fatores como:

- Ciclo: um ciclo de filtração curto favorece a produtividade, contudo gera uma maior umidade da torta e com maior espessura;
- pH da polpa: esse fator está relacionado ao estado de dispersão das partículas, cuja utilização de floclantes promove a aglomeração das partículas, aumentando a razão de filtração;
- Porcentagem de sólidos: em geral, quanto maior a densidade da polpa, maior a produtividade e menor a velocidade de filtração;
- Granulometria das partículas: as partículas mais grosseiras favorecem a razão e a velocidade de filtração, formando tortas com menor umidade. Contudo, polpas com partículas muito finas dificultam a operação, diante disso, uma prática comum é a realização do *pre-coating* que consiste em formar um leito de partículas grossas para que seja assegurado a razão de filtração, impedindo que as partículas mais finas causem entupimento do meio filtrante. Após a formação desse leito a polpa com as partículas finas alimentam o sistema;
- Temperatura da polpa: a temperatura influencia na viscosidade e na taxa de sedimentação das partículas, desse modo, polpas aquecidas tendem a ter menor viscosidade, favorecendo a filtração.

### 3.2.2. Granulometria das partículas

A produção involuntária de partículas finas durante as etapas de cominuição para a liberação dos minerais de interesse representa um dos principais desafios na indústria mineral, principalmente em virtude das jazidas de teores mais baixos. Segundo Lins e Adamian (2000), os minerais quanto a granulometria podem ser classificados conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Classificações dos minerais de acordo com a granulometria.

<b>Partículas</b>	<b>Tamanho</b>
Grossos	> 500 $\mu$ m
Médios	< 500 $\mu$ m
Finos	< 100 $\mu$ m
Superfinos/pré-coloidais	< 20 $\mu$ m
Ultrafinos/quase-coloidais	< 10 $\mu$ m
Coloidais	< 1 $\mu$ m
Supercoloidais	< 0,2 $\mu$ m

Fonte: Adaptado de Lins e Adamian, 2000.

França e Massarani (2010) destacam que a presença de partículas ultrafinas ( $< 10\mu\text{m}$ ) afeta na eficiência da separação sólido-líquido, reduzindo a taxa unitária de filtração, resultando em um acúmulo de umidade superior ao desejado nas tortas geradas nos filtros. Baltar (2010) destaca que as forças de natureza física se tornam desprezíveis à medida que as partículas diminuem sua granulometria. Desse modo, as forças de superfície aumentam a importância, passando a determinar o comportamento dos sistemas coloidais.

Todavia, Guimarães (2011) afirma que as partículas com distribuição granulométrica grossa apresentam maiores interstícios. Logo, a passagem do líquido pelo meio filtrante ocorre com maior facilidade e conseqüentemente, propicia o aumento na velocidade de filtração e redução da umidade da torta.

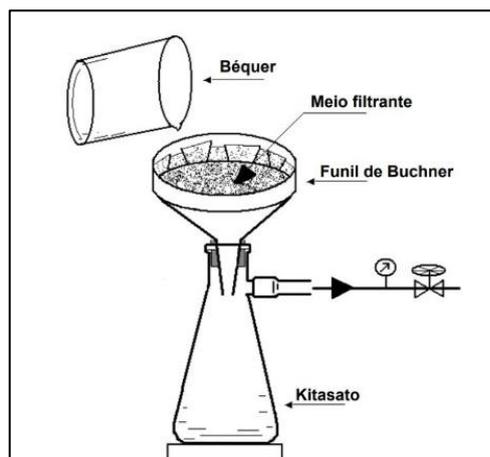
Lins e Adamian (2000, p.4) destacam que a forma das partículas também influencia na eficiência da filtração:

A forma das partículas também é importante, pois aquelas lamelares ou aciculares apresentam maior relação superfície/massa e, portanto, maior sensibilidade a forças superficiais que, por exemplo, partículas esféricas. Em um processo industrial as partículas minerais dificilmente alcançam dimensões inferiores a 0,5 mm; assim, as partículas supercoloidais não seriam normalmente encontradas nas lamas.

### **3.2.3. Teste de filtração**

Em escala laboratorial é empregado o teste de filtração, popularmente conhecido como teste de folha ou *leaf test*. De acordo com Chaves (1996), para realizar esse teste é utilizado um suporte de filtração revestido com o meio filtrante. O suporte deve ser ligado por meio de uma mangueira a um kitassato, a uma bomba de vácuo e um rotâmetro (Figura 7).

Figura 7 - Teste de filtração.



Fonte: França e Casqueira, 2007.

Nesse ensaio obtêm-se os parâmetros quantificadores para o dimensionamento de filtros contínuos industriais como taxa unitária de filtração, velocidade de filtração, umidade final da torta, tempo de ciclo, espessura da torta, turbidez e volume do filtrado. Para definir a área filtrante considera-se um fator de escala. Conforme Oliveira e Luz (2007), para o dimensionamento de filtros industriais a Door Oliver recomenda um fator de escala de 1,65 da razão de filtração e a Eimco de 1,8.

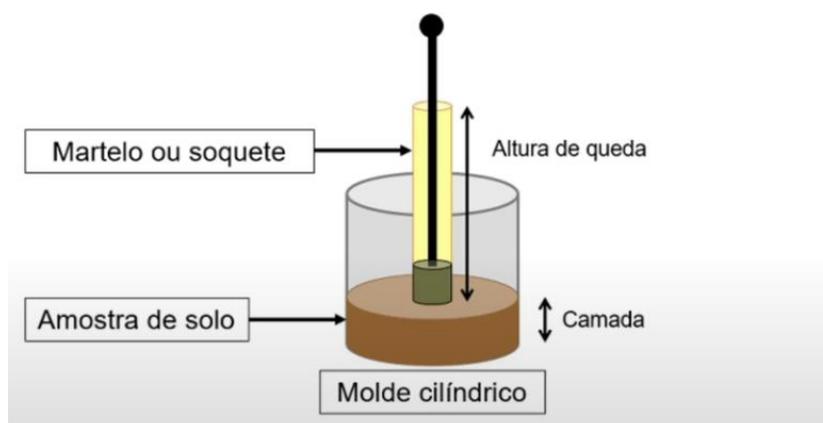
De acordo com Guimarães (2011), o tempo de ciclo em escala laboratorial consiste na soma do tempo de formação de torta e o tempo de secagem. O tempo de formação é considerado como aquele em que a torta pode ser visualizada sem a presença de líquido em sua superfície e o tempo de secagem corresponde ao tempo ainda sob ação do vácuo, para a retirada da água presa à estrutura da torta. Referente a produtividade ou taxa unitária de filtração (TUF), Araujo Junior (2014) afirma que esse parâmetro quantifica a massa seca produzida em relação à área filtrante por unidade de tempo.

### 3.3. Ensaio de compactação

A compactação é um procedimento utilizado em engenharia civil e geotécnica e consiste na aplicação de forças externas ao solo (Figura 8), de forma a comprimi-lo e reduzir seu volume por meio da expulsão do ar dos poros. De acordo com Romanini (2024), a compactação é aplicada em diversas obras como aterros, construção de

estradas, barragens, fundações, na indústria de mineração e mais recentemente no empilhamento de rejeitos.

Figura 8 – Representação do ensaio de compactação.



Fonte: Fernandes, 2020.

Romanini (2024) afirma que o tipo de solo, teor de umidade, energia de compactação e número de passadas influenciam na eficiência da compactação:

- Tipo de solo: cada tipo de solo apresenta diferentes características, como granulometria, umidade, plasticidade, entre outras, que afetam diretamente o processo de compactação;
- Teor de umidade: o teor de umidade do solo é um fator crítico na compactação, pois influencia diretamente a resistência à compressão e a capacidade de suporte do solo. Solos muito secos ou muito úmidos podem dificultar a compactação;
- Energia de compactação: a energia de compactação é a quantidade de energia necessária para comprimir o solo. Ela varia de acordo com o tipo de equipamento utilizado e com o tipo de solo;
- Número de passadas: o número de passadas do equipamento sobre o solo também é um fator importante na compactação. O número ideal de passadas depende do tipo de solo e do equipamento utilizado.

O ensaio de compactação Proctor Normal foi padronizado no Brasil pela ABNT (NBR 7182/2016) e se baseia em uma técnica proposta pelo engenheiro americano Ralph Proctor em 1933. De acordo com Caputo (1988), o ensaio de compactação tem como finalidade reduzir o índice de vazios dos solos (Figura 9), aumentar o contato

entre os grãos, de modo a aumentar a massa específica, a resistência e a estabilidade do solo. Alguns parâmetros geotécnicos como massa específica aparente seca e umidade ótima são determinados por meio da realização desse teste.

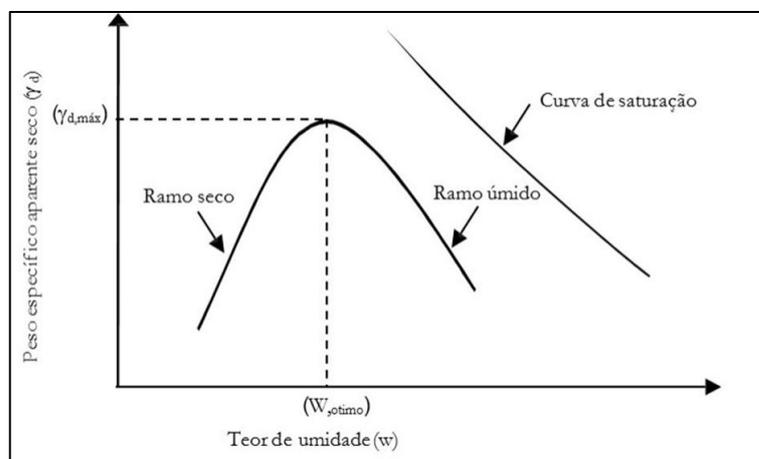
Figura 9 - Redução dos índices de vazios.



Fonte: Montor, 2018.

As curvas de compactação são obtidas após as realizações dos ensaios e representam as variações dos pesos específicos em função de diferentes condições de umidade de um solo, no qual a energia de compactação é previamente padronizada. Conforme Caputo (1988), para o traçado da curva é essencial a determinação de, pelo menos, cinco pontos (Figura 10), de forma que dois deles se encontrem no ramo ascendente (zona seca), um próximo à umidade ótima e os outros dois no ramo descendente da curva (zona úmida).

Figura 10 - Curva de compactação.



Fonte: Romanini, 2024.

De acordo com Viana (2017, p.4):

O peso específico do solo aumenta e depois diminui devido ao acréscimo de água e a compactação. Pois, inicialmente, abaixo da umidade ótima, a água e a energia de compactação causam, juntamente, uma aglutinação (ou uma ligação) entre as partículas do solo, o que causa o aumento do peso específico do solo. Posteriormente, o excesso de água além da umidade ótima, não causa mais aglutinação entre as partículas do solo, mas causa um rearranjo (ou nova orientação) das partículas de solo, o que gera (ou causa) a diminuição do peso específico do solo mesmo com o aumento de água.

De acordo com ABNT (NBR 7182:2016), as energias de compactação podem ser classificadas entre normal, intermediária e modificada. Na Tabela 3 e 4 são representadas as características inerentes a cada energia.

Tabela 3 - Energias de compactação - Cilindro pequeno.

Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27

Fonte: Adaptado de ABNT (NBR 7182:2016).

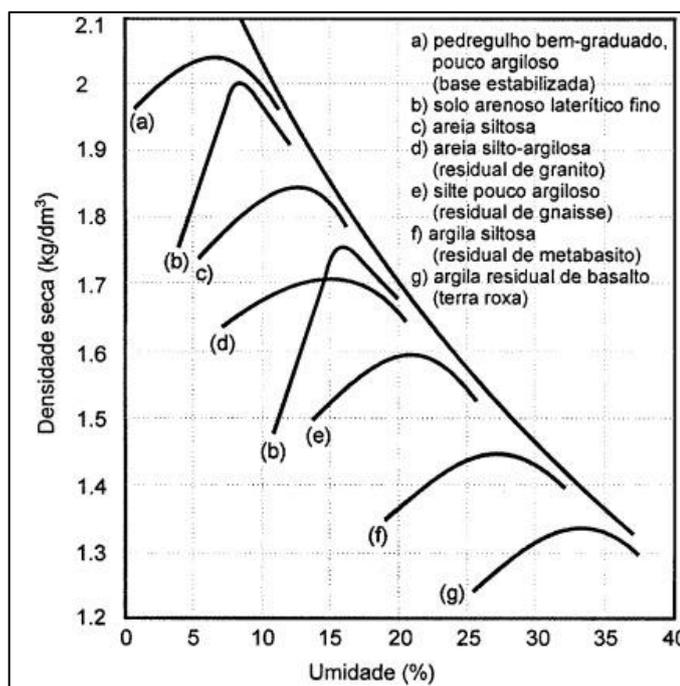
Tabela 4 – Energias de compactação - Cilindro grande.

Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Grande	Soquete	Grande	Grande	Grande
	Número de camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador (mm)	63,5	63,5	63,5

Fonte: Adaptado de ABNT (NBR 7182:2016).

Na Figura 11 são representadas diversas curvas de compactação de diversos solos, sendo esses valores meramente indicativos. De acordo com Pinto (2012), os solos argilosos (finos) apresentam baixa densidade seca e umidade ótima elevada, por outro lado, solos mais arenosos apresentam uma densidade seca mais elevada e umidade ótima baixa.

Figura 11 - Curva de compactação de diversos solos brasileiros.



Fonte: PINTO, 2012.

Rocha Filho (2021, p.40) destaca que os dois principais parâmetros críticos para a compactação dos rejeitos são:

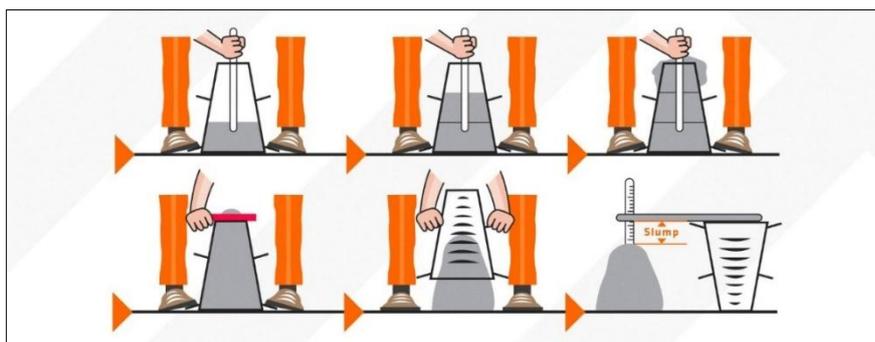
O primeiro é espessura das camadas compactadas, que quanto mais finas, melhor será a uniformidade da compactação e garantia de que a camada terá as características geotécnicas ideais. Entretanto, nesta medida o problema é o custo de operação, que pode até inviabilizar o projeto. Outro fator é a umidade do material compactado, quanto mais próxima do teor de umidade ótima, melhor será a compactação [...].

### 3.4. Teste de abatimento

O *Slump Test*, conhecido como teste de abatimento consiste no procedimento padronizado pela ABNT NBR 16889 empregando um molde tronco-cônico. Por meio desse ensaio é medido a consistência, coesão e a observação da existência de segregação do concreto fresco antes da sua aplicação.

De acordo com ABNT NBR 16889, o teste é feito despejando o concreto em um molde padrão em formato de cone truncado (Figura 12), após o golpeamento para compactar o material com uma haste metálica essa forma é removida. O grau de abatimento é medido pela diferença entre a altura original do molde e a altura do concreto após a remoção do cone.

Figura 12 - Teste de abatimento.

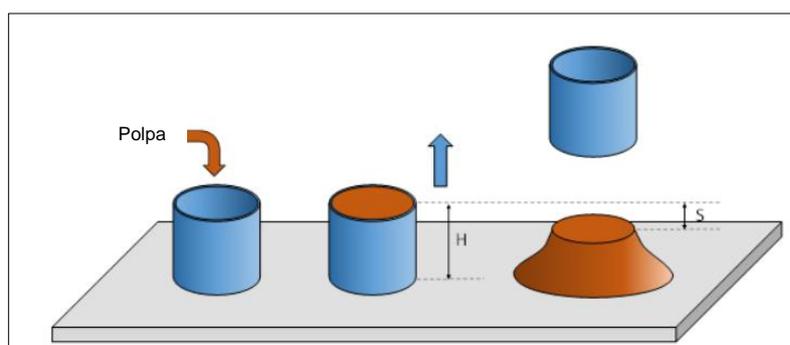


Fonte: Queveks, 2021.

Segundo Clayton *et al.*, (2003), o teste de abatimento possui grande aplicação para monitoramento da consistência de rejeitos nas operações de disposição utilizando uma geometria cilíndrica para avaliação das consistências das polpas minerais.

Portes (2013) afirma que os parâmetros relacionados a tensão de escoamento e consistência dos rejeitos espessados podem ser obtidos por esse teste. O teste de abatimento com geometria cilíndrica (Figura 13) deve apresentar a medida do tubo, geralmente de PVC, igual à altura (BARREDA *et al.*, 2011).

Figura 13 - Representação do teste de abatimento com um cilindro.



Fonte: Adaptado de Traballi, 2017.

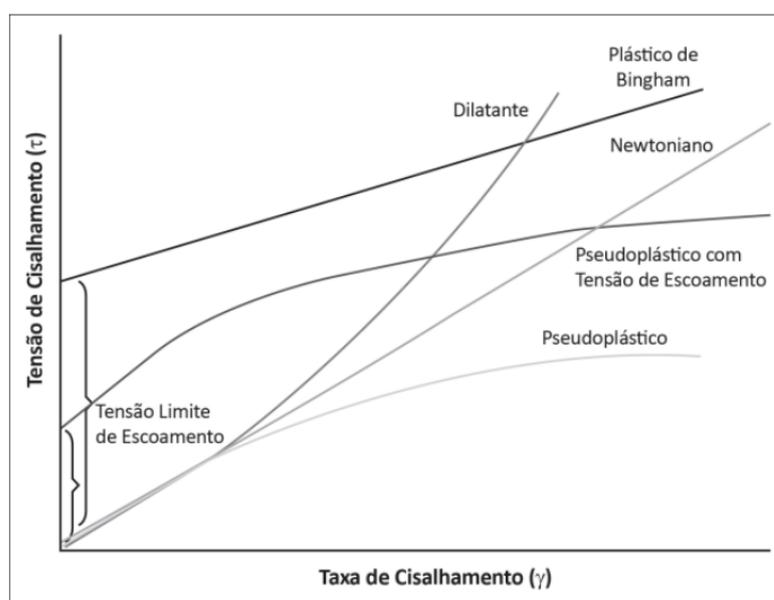
A tensão de escoamento ( $\tau_0$ ) refere-se ao esforço mínimo que deve ser fornecido para iniciar o deslocamento de um fluido. Martins (2022, p.36) destaca que:

Como as polpas, tanto de minérios quanto de rejeitos são uma combinação de partículas sólidas com água, pode-se assim dizer, que esse material ao ser exposto ao meio ambiente e submetidos a forças externas se comporta como um fluido a partir do ponto em que é superada a tensão limite de escoamento.

De acordo com Trampus e França (2019), a tensão de escoamento é um fator importante para caracterizar o fluido como pasta, polpa ou torta, tendo em vista que não há uma concentração de sólidos definida para estabelecer esse limite entre as fases. Segundo Rocha Filho (2021), a tensão de escoamento quantifica a tensão necessária a ser aplicada em equipamentos para bombeamento das pastas por meio de tubulação.

A Figura 14 apresenta os diferentes tipos de comportamento de polpas realizados para fluidos. De acordo com Chaves (1996), a maioria das polpas do beneficiamento de minérios apresenta o comportamento de plástico de Bingham.

Figura 14 - Tipos de comportamento reológico de polpas.

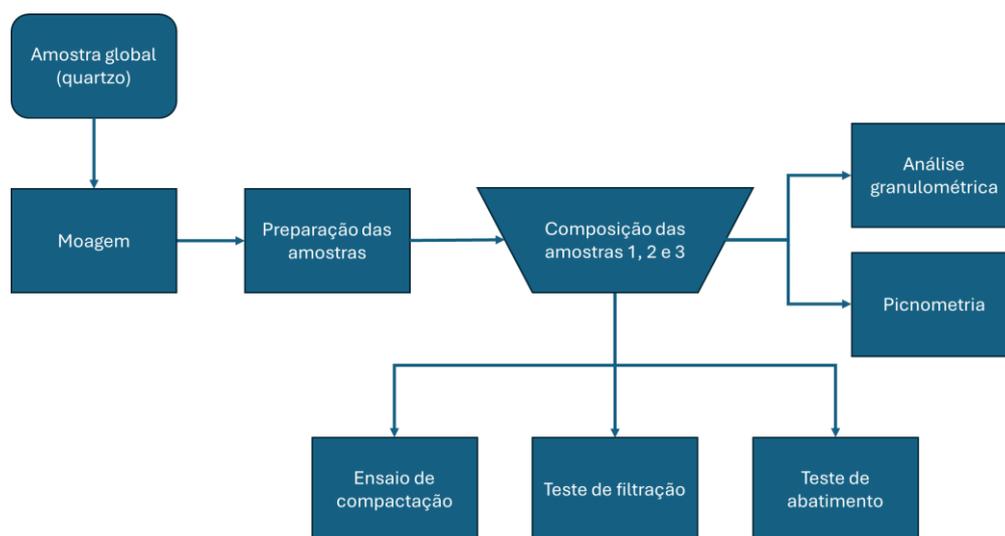


Fonte: Kawatra e Bakshi, 1996.

## 4. METODOLOGIA

Neste tópico são apresentados os procedimentos experimentais realizados durante a pesquisa. As etapas incluem a preparação das amostras e os ensaios realizados para obtenção da umidade ótima, conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Esquema das principais etapas realizadas.



Fonte: Própria autora, 2023.

A metodologia de pesquisa a ser utilizada quanto a finalidade consiste na pesquisa aplicada, no qual busca-se investigar o efeito da variação de granulometria na filtração de rejeito. Referente ao objetivo, o presente trabalho possui caráter exploratório, visando avaliar os tempos ótimos de filtração obtidos durante a realização de testes. Em síntese, quanto aos campos da ciência a pesquisa classifica-se como multidisciplinar, sendo de abordagem quali-quantitativa, no qual os procedimentos a serem realizados atribuí-se a pesquisa experimental.

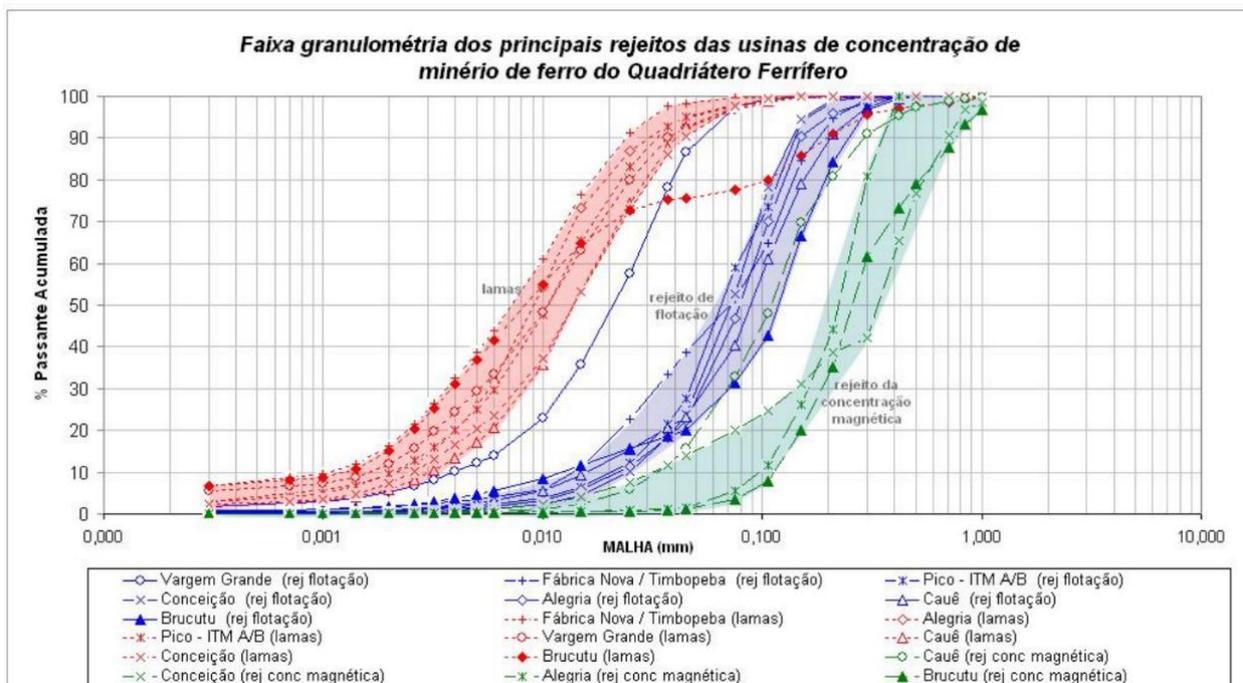
### 4.1. Preparação das amostras

Neste estudo foi utilizado o quartzo que se encontrava no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG/Unidade Araxá. Para a execução da pesquisa, realizou-se a composição de três amostras com granulometrias distintas para simular o comportamento de rejeito de minério de ferro constituído essencialmente por quartzo.

Para composição das amostras, usou-se como parâmetro as curvas granulométricas dos principais rejeitos das usinas de minério de ferro do Quadrilátero

Ferrífero (Figura 16), apresentadas no estudo de Guimarães (2011) em sua dissertação intitulada “Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas”. A partir dessas curvas, obteve-se as massas de referência da Tabela 6.

Figura 16 - Faixa granulométrica dos principais rejeitos das usinas de ferro do Quadrilátero Ferrífero

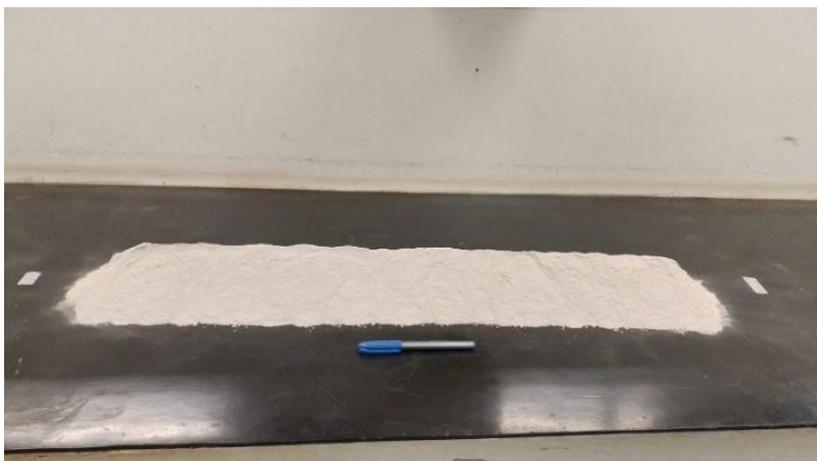


Fonte: GUIMARÃES, 2011.

A adequação do tamanho para obter as faixas granulométricas para cada amostra final foi feita utilizando o moinho de jarro e o pulverizador. Após a fragmentação do material foi feita a separação por ordem de tamanho empregando o peneiramento a úmido com as peneiras das marcas Granutest e Bronzinox, com aberturas entre 419 $\mu$ m (35#) e 37 $\mu$ m (400#). Diante disso, o material retido nas peneiras foi levado à estufa para secagem.

Perante o exposto, as frações necessárias foram pesadas e adicionadas em um saco plástico e posteriormente, homogeneizadas adotando a técnica de pilha alongada, conforme pode ser visualizado na Figura 17.

Figura 17 - Pilha alongada para homogeneização do material.



Fonte: Própria autora, 2023.

Com a formação da pilha alongada, retirou-se alíquotas para os testes de análise granulométrica e picnometria. A composição das amostras finais baseou-se em porções de 5kg para as amostras 1 e 2 e 4kg para a amostra 3, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Referência para composição das amostras.

Frações	Abertura ( $\mu\text{m}$ )	Amostra 1 (g)	Amostra 2 (g)	Amostra 3 (g)
- 35 + 48 #	296	200	0	0
- 48 + 65 #	209	600	550	0
- 65 + 100 #	148	1150	850	0
- 100 + 150 #	105	800	850	40
- 150 + 200 #	74	750	750	60
-200 + 270 #	52	400	500	220
- 270 + 325 #	44	100	150	280
- 325 + 400 #	37	100	100	122
- 400 #	-	900	1250	3278
Total		5000	5000	4000

Fonte: Própria autora, 2025.

## 4.2. Caracterização das amostras

A caracterização das amostras foi realizada a partir da análise de distribuição de tamanho das partículas e determinação da massa específica dos sólidos.

### 4.2.1. Distribuição granulométrica

A análise da distribuição de tamanho das partículas foi realizada pela técnica de peneiramento a úmido e por meio do granulômetro a laser. Os testes do

granulômetro a laser foram executados com um analisador de tamanho de partículas modelo CILAS 1090 pelo Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG.

Para o peneiramento a úmido foram utilizadas peneiras vibratórias e o peneirador suspenso (CDC, modelo PV-08), mostrado na Figura 18. Esse ensaio teve como objetivo verificar se as amostras foram bem homogeneizadas, certificando as faixas granulométricas da alíquota amostrada.

Figura 18 - Peneirador suspenso.



Fonte: Própria autora, 2023.

A Tabela 6 mostra o detalhamento da quantidade de massa representativa das amostras para cada um dos testes e as peneiras empregadas na execução da análise granulométrica.

Tabela 6 - Peneiras utilizadas na análise granulométrica das amostras.

<b>Amostras</b>	<b>Amostra 1</b>	<b>Amostra 2</b>	<b>Amostra 3</b>
<b>Alíquota (g)</b>	284,25	291,84	200,00
<b>Peneiras (#)</b>	35 , 48, 65, 100, 150, 200, 270, 325 e 400	48, 65, 100, 150, 200, 270, 325 e 400	100, 150, 200, 270, 325 e 400
<b>Peneiras (mm)</b>	0,419; 0,296; 0,209; 0,148; 0,105; 0,074; 0,052; 0,044 e 0,037	0,296; 0,209; 0,148; 0,105; 0,074; 0,052; 0,044 e 0,037	0,148; 0,105; 0,074; 0,052; 0,044 e 0,037

Fonte: Própria autora, 2025.

Com o acionamento do peneirador, o material da alíquota alimentou o conjunto de peneiras, em que o tempo de peneiramento durou até que o líquido passante na última peneira estivesse clarificado, visto que a água foi adicionada ao processo com auxílio de uma mangueira.

Em seguida, mediante separação das partículas, as massas retidas em cada peneira foram retiradas e colocadas em pratos para que fossem levados à estufa para secagem a 100°C durante 24 horas. Passado esse tempo, os materiais dos respectivos pratos foram pesados e as massas anotadas.

#### 4.2.2. Determinação da massa específica dos sólidos

Com a finalidade de determinar a massa específica do sólido empregou-se o método da picnometria. O procedimento consistiu em utilizar o picnômetro de vidro de fundo chato com uma tampa superior, no qual por meio dessa passa um canal capilar. A capacidade do recipiente correspondia a 50mL. Logo, efetuou-se a pesagem seguindo cada um dos parâmetros da Equação 2 para calcular a densidade das amostras.

$$d_s = \frac{(A_2) - (A_1)}{(A_4 + A_2) - (A_1 + A_3)}$$

Equação 2

Em que:

- $d_s$ : densidade dos sólidos (g/cm<sup>3</sup>);
- $A_1$ : massa do picnômetro (g);
- $A_2$ : massa do picnômetro + amostra (g);
- $A_3$ : massa do picnômetro + amostra + água (g);
- $A_4$ : massa do picnômetro + água (g).

Como ilustrado na Figura 19, inicialmente, pesou-se o picnômetro vazio, seco e tampado, obtendo-se a massa correspondente ao valor  $A_1$ , em seguida, foi pesado o conjunto da vidraria mais a quantidade representativa da amostra, em que a porção foi colocada até que o fundo do balão de vidro fosse totalmente coberto, dessa forma foi aferido o valor  $A_2$ . Posteriormente, foi adicionado água ao conjunto contendo a amostra até completar todo o volume do frasco e anotado a massa  $A_3$ . Por último,

para obter o valor  $A_4$ , pesou-se o picnômetro que foi lavado e preenchido somente com água até transbordar.

Figura 19 - Sequência de pesagem dos picnômetros.



Fonte: Própria autora, 2023.

Esse procedimento foi repetido por 4 vezes para cada uma das amostras, tendo como a densidade do sólido a média dessas 4 medidas.

### 4.3. Ensaio de compactação

Para realizar o ensaio de compactação seguiu-se as normas técnicas da ABNT NBR 7182:2016. Para o ensaio geotécnico de Proctor Normal, utilizou-se um cilindro pequeno de volume correspondente a  $998,81\text{cm}^3$  acoplado a um cilindro complementar, como ilustra a Figura 20 e um soquete metálico pequeno de 2,50kg para golpear a amostra.

Figura 20 - Ensaio de compactação.



Fonte: Própria autora, 2023.

Inicialmente preparou-se o material acrescentando cerca de 2% de água a massa inicial (cerca de 3,5kg), feito isso, realizou-se a homogeneização e foi colocado uma certa quantidade de material no cilindro para formar a primeira camada, golpeando o material com o soquete por 26 vezes. Antes de preencher com as camadas sucessivas, realizou a escarificação (ranhuras) no topo da primeira camada para que essas atuassem como elemento de ligação. Na sequência, repetiu-se o mesmo procedimento de formação da camada por mais duas vezes para preencher o cilindro. Com o volume do cilindro preenchido, retirou-se o cilindro complementar e nivelou-se a altura com uma espátula.

Para determinar a massa úmida do rejeito compactado, pesou-se o conjunto cilindro mais rejeito, em seguida, retirou-se uma alíquota do material para que fosse determinado a umidade em base seca. Em seguida, novos ensaios foram feitos com o reuso do material para determinar a umidade ótima e obter os cinco pontos da curva, sendo adicionado 2% de água a cada novo ensaio.

Com a obtenção dos dados, foi possível determinar a massa específica aparente seca (Equação 3), umidade em base seca (Equação 4), umidade em base úmida (Equação 5) e plotar as curvas de compactação para as três amostras utilizando o Excel.

$$\rho_d (g/cm^3) = \frac{\text{massa úmida (g)} \times 100}{\text{Volume}_{molde} (cm^3) \times (100 + \text{umidade}_{b,s} (\%))}$$

Equação 3

$$\text{umidade}_{b,s} (\%) = \frac{\text{massa úmida (g)} - \text{massa seca (g)}}{\text{massa seca (g)}} \times 100$$

Equação 4

$$\text{umidade}_{b,u} (\%) = \frac{\text{massa úmida (g)} - \text{massa seca (g)}}{\text{massa úmida (g)}} \times 100$$

Equação 5

#### 4.4. Separação sólido-líquido

Para a realização da separação sólido-líquido, primeiramente foi feito a preparação da polpa, seguido dos testes de filtração.

##### 4.4.1. Preparação da polpa

Para a preparação da polpa com a finalidade de uso na filtração, foi feito o reuso do material utilizado no ensaio de compactação. Definiu-se como parâmetro a proporção de 65% de sólidos, no qual cada uma das amostras foi empalpada na respectiva percentagem. Dessa forma, para o preparo da suspensão, misturou-se cerca de 216,95g de sólidos com um volume de água correspondente a 116,82mL em um béquer de vidro. A polpa foi agitada manualmente no recipiente com auxílio de uma colher metálica e para a verificação do pH empregou-se o pHmetro da marca *Hanna Instruments*.

##### 4.4.2. Teste de filtração

Na realização dessa etapa empregou-se o teste de filtração com alimentação por cima. O conjunto utilizado foi composto por uma bomba de vácuo (Primatec, modelo 131) conectada por meio de uma mangueira ao kitassato. No topo do kitassato foi acoplado na abertura um funil de *Buchner* cerâmico com o meio filtrante colado (Figura 21).

Figura 21 - Sistema de filtração.



Fonte: Própria autora, 2023.

O meio filtrante utilizado nos testes foi cedido pela empresa Remae com as especificações descritas na Tabela 7.

Tabela 7 - Especificações técnicas do meio filtrante 4400-T.

<b>Referência</b>	<b>4400 - T</b>
Fibra	Polipropileno
Tipo de fio	Multifilar
Acabamento	Termofixado
Permeabilidade ao ar com 1/2" C.A	0,4 - 1,5 m <sup>3</sup> /min/m <sup>2</sup>
Espessura	0,84 mm
Gramatura	Aprox. 385g/m <sup>2</sup>
Resistência à temperatura	Até 100°C quando seco
Resistência química	Ácidos.....ótima
	Solventes.....regular
	Álcalis.....ótima

Fonte: Adaptado de Remae, 2015.

Para dar início a filtração o vácuo foi ligado, na sequência a polpa foi despejada com auxílio de um béquer sobre o meio filtrante do funil, diante disso, iniciou-se o processo de filtração e o cronômetro foi acionado para que fosse obtido o tempo de formação da torta até que não houvesse mais água visível na parte superior. Os tempos de secagem da torta foram predeterminados para serem executados com duração de 2, 3, 4, 6, 8 e 10 minutos. Os testes foram feitos em duplicada.

Com a torta formada, mediu-se a espessura com um paquímetro, em seguida, pesou-se a massa úmida e verificou se houve presença de rachaduras. Na sequência, o material foi despejado em pratos para que fossem levados à estufa para secagem por 24 horas. Após secagem da torta, obteve-se a massa seca. Já em relação ao filtrado, mediu-se o volume e a turbidez do líquido clarificado.

A partir dos parâmetros determinados no ensaio, utilizou-se as seguintes equações para determinar o tempo de ciclo (Equação 6), umidade em base seca (Equação 7) e a taxa unitária de filtração (Equação 8).

$$\text{tempo de ciclo (s)} = \text{Tempo de formação (s)} + \text{Tempo de secagem (s)}$$

Equação 6

$$\text{umidade}_{b,s}(\%) = \frac{\text{massa úmida (g)} - \text{massa seca (g)}}{\text{massa seca}} \times 100$$

Equação 7

$$TUF \left( \frac{kg}{m^2} \right) = \frac{massa\ seca\ (kg) \times 3600}{\acute{a}rea\ de\ filtra\ gem\ (m^2) \times tempo\ de\ ciclo\ (s)} \times 100$$

Equação 8

#### 4.5. Teste de abatimento – *Slump Test*

Para a realização do teste de abatimento foi utilizado um cilindro de PVC de 4,74cm de diâmetro e 4,74cm de altura, com volume correspondente a 83,64cm<sup>3</sup>. Para a preparação da polpa determinou-se como parâmetro a porcentagem de sólidos dos testes de filtração (65%). Diante disso, as massas de sólido (90,61g) e de água (48,79g) foram determinadas e pesadas de acordo com o volume do cilindro e posteriormente, adicionados e misturados em um béquer para formar uma suspensão homogênea.

Durante a execução, o cilindro foi disposto sobre a bancada sendo preenchido pela polpa preparada até completar o volume do recipiente de PVC. Em seguida, o cilindro foi erguido. Com isso, mediu-se a altura final do material que estava sobre a bancada com auxílio de um paquímetro, referente à altura inicial essa corresponde à altura do cilindro.

Para fins de cálculo, tomou-se como ferramenta a calculadora de polpa online “*Paterson & Cooke Slurry Slump Calculator*” para estimar a tensão de escoamento da polpa por meio da determinação da altura de abatimento.

#### 4.6. Análise de regressão linear simples

Como forma de efetuar previsões da taxa unitária de filtração (TUF) em relação ao tempo de secagem, realizou-se a análise de regressão linear simples utilizando o *software Minitab*. O modelo de regressão linear simples consiste em uma metodologia estatística que estabelece uma equação descrevendo e quantificando a relação linear entre duas variáveis, sendo usualmente representadas por X e Y.

O termo X corresponde ao termo independente, sendo conhecido como variável preditora, enquanto Y refere-se a variável dependente, também conhecida como resposta. Para execução da análise foi utilizado o tempo de secagem para variável preditora, tendo como resposta a TUF. Desse modo, a equação de regressão permitirá

identificar como as mudanças no tempo de secagem influenciam na produtividade do filtro, permitindo fazer previsões em diferentes condições de secagem.

#### 4.7. Planejamento fatorial

Para a execução dos ensaios de filtração realizou-se o planejamento fatorial completo multinível considerando um nível de confiança de 95%, empregando 2 fatores em níveis diferentes. Esse planejamento permite o estudo dos efeitos que os fatores podem ter sobre as respostas (umidade em base seca e taxa unitária de filtração).

Na Tabela 8 apresentam a codificação dos fatores e dos níveis. Para fator A correspondente ao diâmetro  $d_{50}$ , definiu-se o número 3 níveis (14,21 $\mu$ m, 72,11 $\mu$ m e 92,51 $\mu$ m) das amostras 3, 2 e 1, enquanto para o fator B (tempo de secagem), 6 níveis (2,3,4,6,8 e 10 minutos).

Tabela 8 - Nível codificado e real.

Fator codificado	Fator real	Nível codificado	Nível real
A	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	1	14,21
		2	72,11
		3	92,51
B	Tempo de secagem (min)	1	2
		2	3
		3	4
		4	6
		5	8
		6	10

Fonte: Própria autora, 2025.

A Tabela 9 apresenta a matriz do planejamento fatorial experimental. Os testes foram realizados em duplicata totalizando 36 testes.

Tabela 9 - Matriz de planejamento fatorial.

Teste	Fator	
	A	B
1	1	1
2	1	2
3	1	3
4	1	4
5	1	5
6	1	6
7	2	1
8	2	2
9	2	3
10	2	4
11	2	5
12	2	6
13	3	1
14	3	2
15	3	3
16	3	4
17	3	5
18	3	6
19	1	1
20	1	2
21	1	3
22	1	4
23	1	5
24	1	6
25	2	1
26	2	2
27	2	3
28	2	4
29	2	5
30	2	6
31	3	1
32	3	2
33	3	3
34	3	4
35	3	5
36	3	6

Fonte: Própria autora, 2025.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse tópico os resultados e discussão são apresentados levando em consideração os dados e informações coletadas durante a realização dos testes de caracterização das amostras, ensaio de compactação, teste de filtração e teste de abatimento.

### 5.1. Distribuição granulométrica das amostras

As Tabelas 10, 11 e 12 apresentam a distribuição granulométrica após o peneiramento à úmido para as amostras 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 10 - Distribuição granulométrica: Amostra 1.

<b>Frações</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Massa retida (g)</b>	<b>% Retida simples</b>	<b>% Retida acumulada</b>	<b>% Passante acumulada</b>
- 35 + 48 #	0,296	10,52	3,80	3,80	96,20
- 48 + 65 #	0,209	28,94	10,45	14,25	85,75
- 65 + 100 #	0,148	67,88	24,51	38,76	61,24
- 100 + 150 #	0,105	42,82	15,46	54,23	45,77
- 150 + 200 #	0,074	42,21	15,24	69,47	30,53
-200 + 270 #	0,052	22,99	8,30	77,78	22,22
- 270 + 325 #	0,044	12,42	4,49	82,26	17,74
- 325 + 400 #	0,037	0,21	0,08	82,34	17,66
- 400 #	-	48,91	17,66	100,00	0,00
Total		276,90	100,00		

Fonte: Própria autora, 2023.

Tabela 11 - Distribuição granulométrica: Amostra 2.

<b>Frações</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Massa retida (g)</b>	<b>% Retida simples</b>	<b>% Retida acumulada</b>	<b>% Passante acumulada</b>
- 35 + 48 #	0,296	0,00	0,00	0,00	100,00
- 48 + 65 #	0,209	26,93	9,48	9,48	90,52
- 65 + 100 #	0,148	47,13	16,60	26,08	73,92
- 100 + 150 #	0,105	56,40	19,86	45,94	54,06
- 150 + 200 #	0,074	57,02	20,08	66,02	33,98
-200 + 270 #	0,052	15,84	5,58	71,60	28,40
- 270 + 325 #	0,044	10,99	3,87	75,47	24,53
- 325 + 400 #	0,037	1,01	0,36	75,82	24,18
- 400 #	-	68,65	24,18	100,00	0,00
Total		283,97	100,00		

Fonte: Própria autora, 2023.

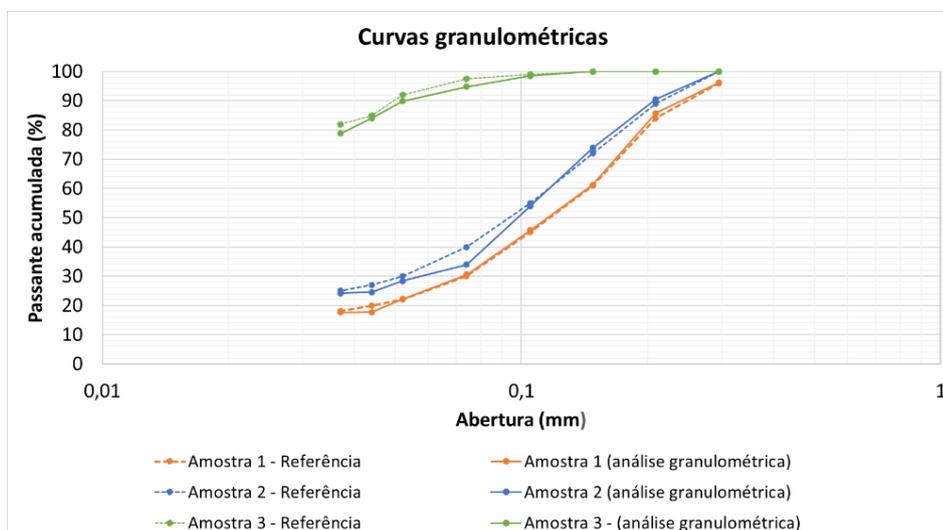
Tabela 12 - Distribuição granulométrica: Amostra 3.

Frações	Abertura (mm)	Massa retida (g)	% Retida simples	% Retida acumulada	% Passante acumulada
- 35 + 48 #	0,296	0,00	0,00	0,00	100,00
- 48 + 65 #	0,209	0,00	0,00	0,00	100,00
- 65 + 100 #	0,148	0,00	0,00	0,00	100,00
- 100 + 150 #	0,105	3,00	1,56	1,56	98,44
- 150 + 200 #	0,074	6,99	3,63	5,19	94,81
-200 + 270 #	0,052	9,58	4,97	10,16	89,84
- 270 + 325 #	0,044	11,17	5,80	15,96	84,04
- 325 + 400 #	0,037	10,08	5,23	21,19	78,81
- 400 #	-	151,81	78,81	100,00	0,00
Total		192,63	100,00		100,00

Fonte: Própria autora, 2023.

Para melhor interpretação e visualização dos resultados, foram plotadas as curvas granulométricas das amostras preparadas (Figura 22) e dos principais rejeitos das usinas de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero (Figura 16), apresentadas no estudo de Guimarães (2011).

Figura 22 - Curvas granulométricas obtidas após o peneiramento a úmido.



Fonte: Própria autora, 2023.

A partir das curvas granulométricas, foram determinados os parâmetros de  $d_{20}$ ,  $d_{50}$  e  $d_{80}$  conforme mostrado na Tabela 13. Sendo o  $d_{50}$  correspondente ao tamanho em que a metade da amostra (50%) é maior e a outra metade é menor. Já o  $d_{20}$  e  $d_{80}$ , nessa ordem, refere-se ao tamanho da partícula indicando que 20% e 80% da amostra são menores que o diâmetro determinado.

Tabela 13 – Diâmetros obtidos por peneiramento a úmido.

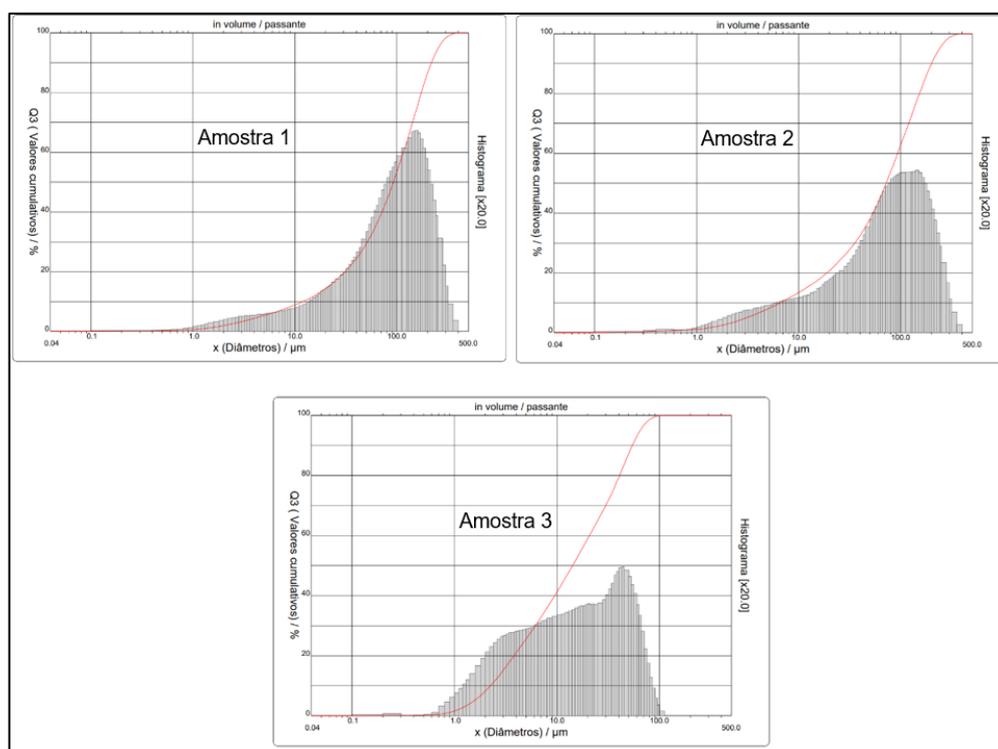
Diâmetros (mm)	$d_{20}$	$d_{50}$	$d_{80}$
Amostra 1	0,049	0,120	0,195
Amostra 2	-	0,099	0,170
Amostra 3	-	-	0,037

Fonte: Própria autora, 2023.

Tendo em vista que o peneiramento limita-se para análise de partículas finas, utilizou-se outro método empregando um analisador de tamanho (CILAS modelo 1090), visto que a amostra 3 apresentava 80% das partículas abaixo de 400# (0,037mm). Limaverde *et al.*, (2013) enfatiza a eficiência do método por difração na medida de partículas de diâmetros pequenos, considerando essa técnica quase específica para a faixa de tamanhos variando entre 0,1-2.000 $\mu$ m.

Na Figura 23 é representada a curva em vermelho e a distribuição de frequência abaixo, bem como o histograma.

Figura 23 - Curvas granulométricas obtidas por granulômetro a laser.



Fonte: Própria autora, 2023.

Por meio das curvas foi possível obter os parâmetros  $d_{20}$ ,  $d_{50}$  e  $d_{80}$  conforme apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 - Diâmetros obtidos por granulômetro a laser.

Diâmetros (mm)	$d_{20}$	$d_{50}$	$d_{80}$
Amostra 1	0,031	0,093	0,175
Amostra 2	0,019	0,072	0,150
Amostra 3	0,004	0,014	0,042

Fonte: Própria autora, 2023.

Ao comparar os diâmetros empregando ambas as metodologias, constatou-se que os valores obtidos no ensaio com peneiramento a úmido foram consistentes com os valores do granulômetro a laser. Oliveira *et al.*, (2017), destacam que a escolha do método a ser utilizado na análise granulométrica está vinculada a diversos fatores como o tipo de medida desejada, as dimensões das partículas, os custos, o tempo gasto, a qualidade amostral, a frequência da análise e o grau de automatização.

## 5.2. Massa específica dos sólidos

Os resultados da picnometria estão apresentados nas Tabelas 15, 16 e 17. Para a amostra 1, a massa específica média apresentou o valor de  $2,60 \text{ g/cm}^3$ , no qual o desvio padrão foi de  $0,03 \text{ g/cm}^3$ . O resultado da massa específica média da amostra 2 foi equivalente  $2,61 \text{ g/cm}^3$ , com o desvio padrão de  $0,04 \text{ g/cm}^3$ . Para a amostra 3, a massa específica média foi de  $2,60 \text{ g/cm}^3$  e o desvio padrão dos testes em relação à média de  $0,11 \text{ g/cm}^3$ .

Tabela 15 - Resultado da picnometria: Amostra 1 ( $d_{50} = 92,51 \mu\text{m}$ ).

Teste	1	2	3	4
$A_1$ (g)	36,69	30,92	29,64	29,27
$A_2$ (g)	38,28	32,78	33,11	32,67
$A_3$ (g)	89,43	81,97	82,60	80,93
$A_4$ (g)	88,45	80,82	80,48	78,82
$ds$ ( $\text{g/cm}^3$ )	2,59	2,62	2,57	2,63

Fonte: Própria autora, 2023.

Tabela 16 - Resultado da picnometria: Amostra 2 ( $d_{50} = 72,11 \mu\text{m}$ ).

<b>Teste</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>A<sub>1</sub> (g)</b>	29,16	29,62	35,87	29,62
<b>A<sub>2</sub> (g)</b>	32,49	32,33	38,84	32,41
<b>A<sub>3</sub> (g)</b>	80,75	82,11	89,63	82,15
<b>A<sub>4</sub> (g)</b>	78,72	80,43	87,81	80,41
<b>ds (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,56	2,63	2,58	2,66

Fonte: Próprio autor, 2023.

Tabela 17 - Resultado da picnometria: Amostra 3 ( $d_{50} = 14,21 \mu\text{m}$ ).

<b>Teste</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>A<sub>1</sub> (g)</b>	29,61	35,79	36,53	29,29
<b>A<sub>2</sub> (g)</b>	32,31	38,79	40,82	33,28
<b>A<sub>3</sub> (g)</b>	82,13	89,5	89,49	81,23
<b>A<sub>4</sub> (g)</b>	80,41	87,66	86,88	78,83
<b>ds (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,76	2,59	2,55	2,51

Fonte: Próprio autor, 2023.

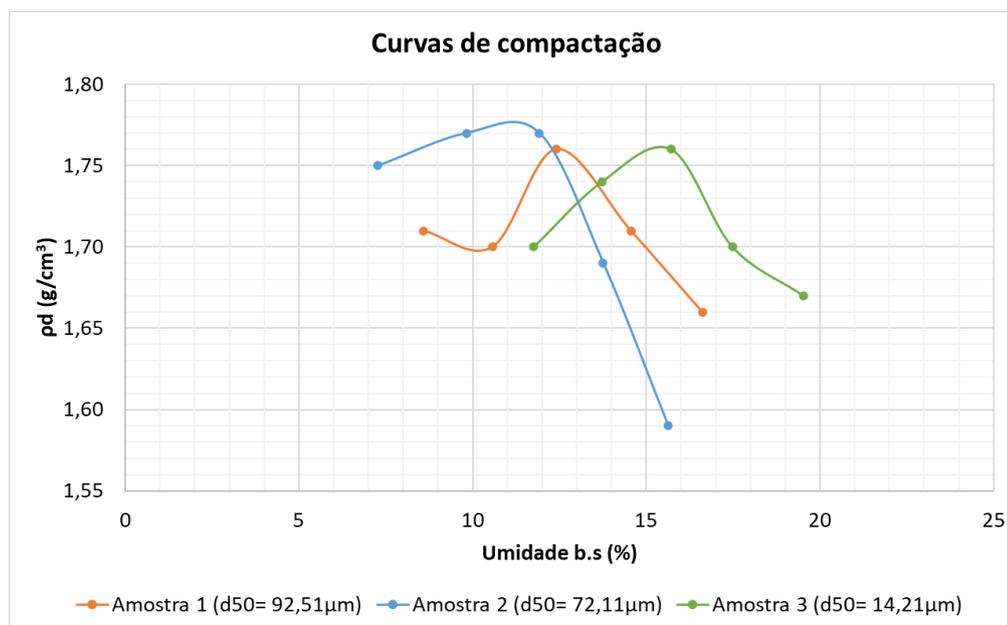
A densidade dos sólidos das amostras resultou em valores próximos ao peso específico do quartzo, confirmando a composição da amostra. De acordo com Klein e Dutrow (2012), ambos autores do livro "Manual de Ciência dos Minerais", o peso específico do mineral quartzo corresponde a  $2,65 \text{ g/cm}^3$ . A divergência dos valores observados refere-se aos erros aleatórios intrínsecos ao método de picnometria.

Em relação a reprodutibilidade dos testes, notou-se concordância dos resultados, visto que o desvio padrão apresentou-se baixo. No que se refere a amostra 3, o desvio padrão apresentou-se maior em relação as amostras 1 e 2.

### 5.3. Ensaio de compactação

A Figura 24 mostra os resultados das curvas de compactação para as três amostras estudadas.

Figura 24 - Curvas de compactação das amostras.



Fonte: Próprio autor, 2023.

Por meio da análise das curvas do ensaio de compactação, obteve-se os resultados descritos na Tabela 18. Notou-se que a massa específica aparente seca foi próxima para as três amostras. Pela análise das informações, observa-se que a amostra 2 atinge um valor maior de massa específica aparente seca, indicando uma maior resistência das partículas que compõe a amostra.

Tabela 18 - Resultados do ensaio de compactação.

Parâmetros	Amostra		
	1	2	3
<b>pd, máx (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,76	1,78	1,76
<b>Umidade ótima b.s (%)</b>	12,50	11,30	15,40
<b>Umidade ótima b.u (%)</b>	11,11	10,15	13,34

Fonte: Próprio autor, 2023.

Para a amostra 3, observa-se um alto valor de umidade ótima em base seca, esse efeito foi ocasionado devido a água do material provocar lubrificação entre as

partículas. Além disso, observou-se o fenômeno denominado “borrachudo” devido ao excesso de água, no qual o material foi comprimido, mas logo dilatou-se, apresentando pequenas trincas na parte superior (Figura 25). De acordo com Toledo *et al.* (2022), camadas que possuem esse aspecto são mais propensas a infiltração de água em virtude das trincas.

Figura 25 - Fenômeno "borrachudo".



Fonte: Própria autora, 2023.

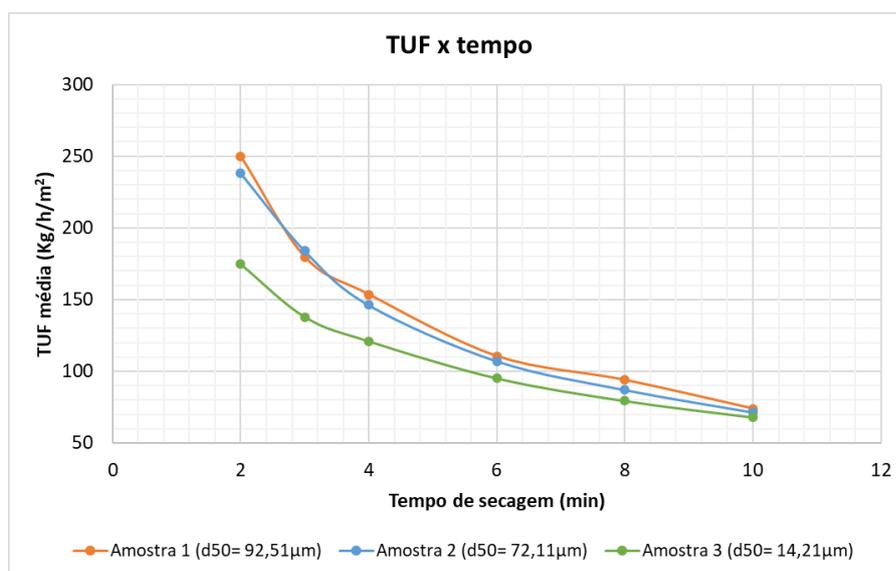
Conforme gráfico da Figura 34 do Apêndice, é possível classificar as amostras por meio da distribuição granulométricas das partículas. Logo, de acordo com a análise textural, as amostras 1 e 2 foram nomeadas como areia siltosa, enquanto a amostra 3 como silte arenosa, essas nomenclaturas referem-se aos parâmetros granulométricos como porcentagem de frações de silte e areia e da consistência nas respectivas composições.

Referente a umidade ótima no empilhamento a seco, essa corresponde ao teor de umidade que favorece o grau de compactação máximo do material, reduzindo significativamente o vazio entre os grãos. Davies (2011) enfatiza que para o empilhamento de rejeito filtrado, o teor de umidade das tortas obtidas durante a filtração deve ser equivalente a umidade ótima de compactação que são definidas por meio de ensaios, com uma pequena variação a depender do clima da região. Em climas mais secos, 1% acima da umidade ótima é aceitável, enquanto para climas mais úmidos uma variação de 1 a 2% abaixo são admissíveis.

#### 5.4. Teste de filtração

Ao plotar o gráfico da taxa unitária média em função do tempo de secagem (Figura 26), foi verificado que a produtividade foi semelhante para as amostras 1 e 2, isso pode ser explicado devido à similaridade das amostras em termos de granulometria, no qual a semelhança pode ser certificada pelos parâmetros  $d_{50}$  e  $d_{80}$  da Tabela 15.

Figura 26 - TUF média em relação ao tempo de secagem.

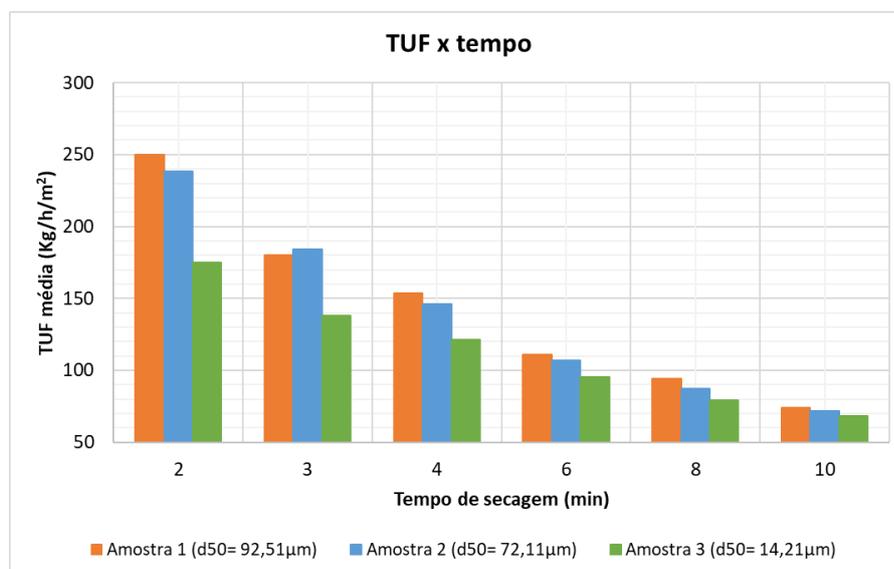


Fonte: Próprio autor, 2023.

A amostra 3 apresentou uma diminuição da taxa de filtração em comparação as amostras 1 e 2, indicando que a presença de grandes quantidades de finos diminui consideravelmente a produtividade à medida que o tempo de secagem aumenta. Conforme Chaves (2013), polpas com partículas muito finas dificultam a filtração, consequentemente, maiores são a umidade da torta. Dessa forma, nota-se que a permeabilidade diminui com o aumento da área superficial das partículas.

A Figura 27 apresenta a relação da TUF média em função do tempo de secagem em um gráfico de barras, representando o comportamento de cada amostra para cada um dos tempos. Nota-se que a variação da TUF com a granulometria é maior para 2 e 3 minutos de secagem.

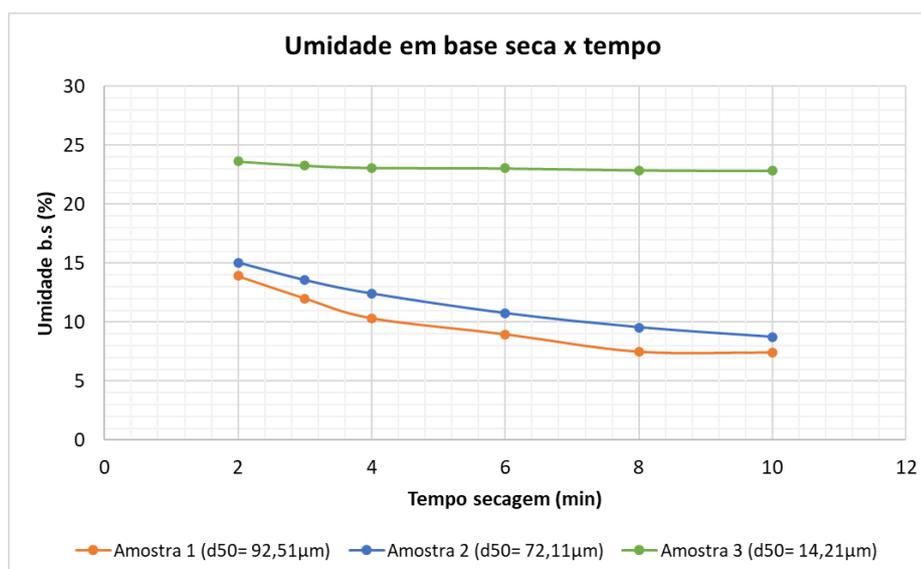
Figura 27 - TUF média em relação ao tempo de secagem.



Fonte: Própria autor, 2023.

Em relação a umidade em base seca em função do tempo de secagem, verificou-se que as amostras 1 e 2 também apresentaram comportamentos similares (Figura 28). No tempo de secagem igual a 2 minutos, a umidade em base seca para as amostras 1 e 2 foram próximas a 15%. Nos demais tempos de secagem observa-se a continuidade da semelhança no comportamento dessas amostras.

Figura 28 - Umidade em base seca em função do tempo.



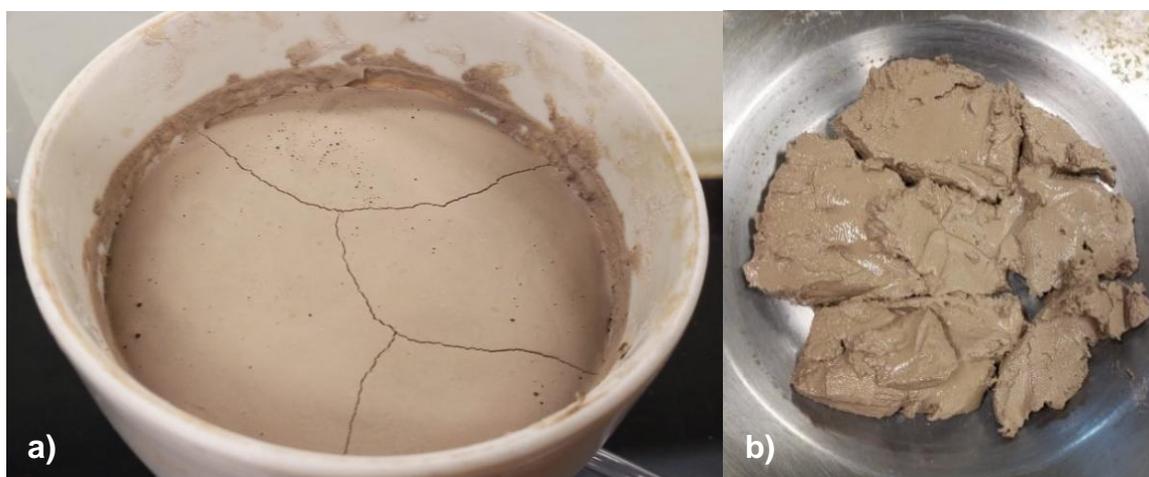
Fonte: Própria autora, 2023.

Referente a amostra 3 (amostra mais fina), essa apresentou a umidade em base seca relativamente constante ao longo do tempo de secagem avaliado, de 2 a 10 minutos, ou seja, o aumento do tempo de secagem pouco interferiu na redução da umidade da torta. Em 10 minutos de secagem, a torta apresentou umidade em base seca de 22,83%, sendo esse valor 48,25% maior que a umidade ótima obtida no ensaio de compactação (15,40%). Para a obtenção da umidade em base seca da torta na filtração próxima à umidade ótima seria necessário um elevado tempo de secagem ou até mesmo não seria possível atingir esse valor. Turrer *et al.*, (2011) verificou em seus estudos com goethita que o baixo desempenho na filtração pode ser atribuído a existência de elevada porosidade, resultando numa retenção da umidade na torta não sendo vencida nem com elevados tempos.

No que tange a presença de rachadura, somente a amostra 3 apresentou fissuras na torta durante a secagem, conforme ilustrado na Figura 29.

Figura 29 - Torta obtida durante o teste de filtração – Amostra 3.

- a) Torta durante o tempo de secagem de 10 minutos. b) Descarga da polpa no prato.



Fonte: Própria autora, 2023.

Portanto, de acordo com a premissa de Davies (2011), o teor de umidade obtida na etapa de filtração deve ser equivalente a umidade ótima obtida por meio do ensaio de compactação de Proctor Normal, considerando uma variação de 1 a 2% da umidade ótima. Diante do exposto, nota-se pela Tabela 19, a comparação das umidades determinadas.

Tabela 19 - Comparação das umidades determinadas.

Ensaio	Parâmetros	Amostra		
		1	2	3
Compactação	Umidade ótima b.s (%)	12,50	11,30	15,40
Filtragem	Média umidade b.s (%)	12,02	12,42	22,83
Filtragem	Tempo de secagem para atingir a umidade ótima (min)	entre 2 e 3	entre 4 e 6	Acima de 10

Fonte: Própria autora, 2023.

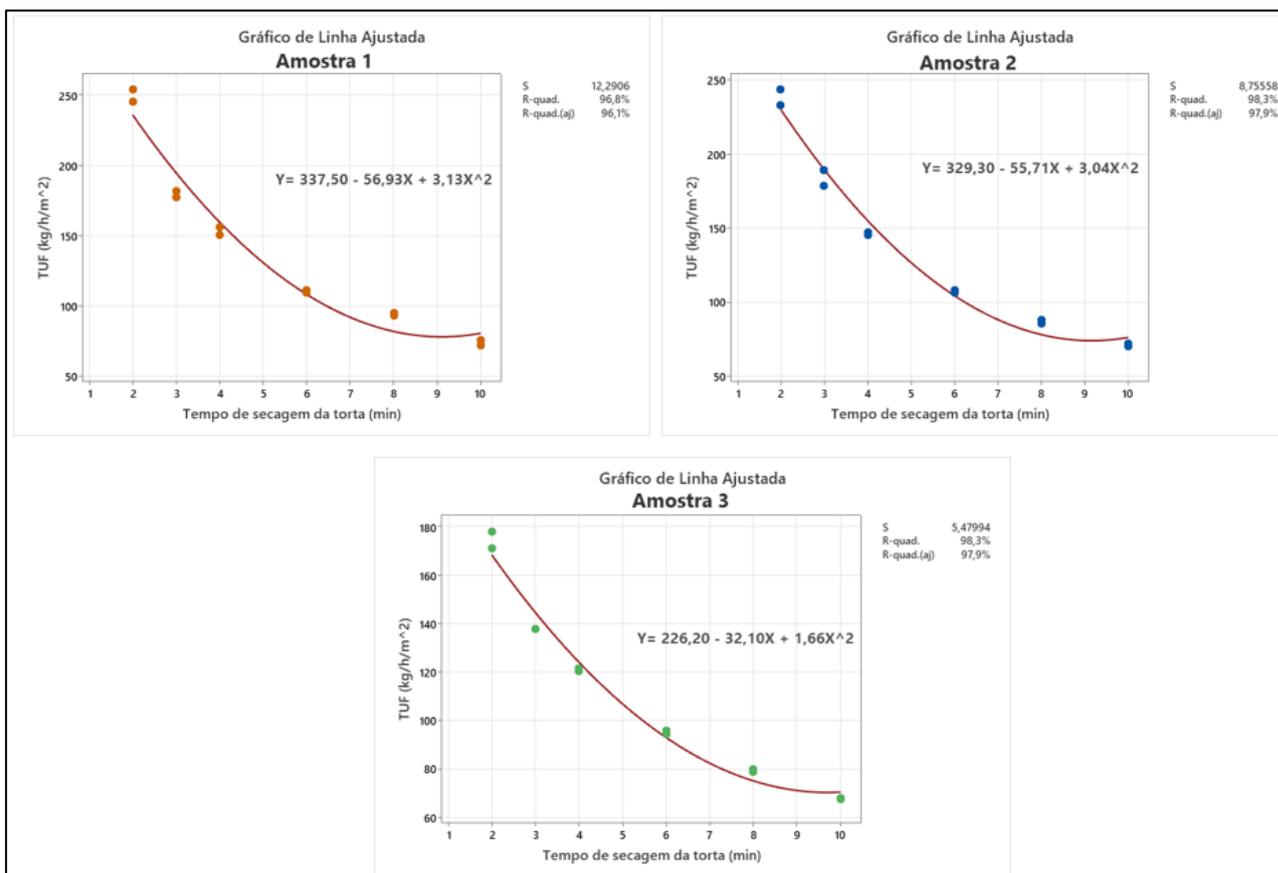
Logo, por meio da interpretação da Tabela 19, foi verificado que o tempo de secagem para a umidade dita ótima para a amostra 3 não foi alcançado no teste de filtração, ultrapassando o tempo de 10 minutos. Em relação as amostras 1 e 2, determinou-se as umidades próximas a ótima, respectivamente, nos tempos de entre 2 e 3 minutos e 4 e 6 minutos. Esse resultado está em concordância com Guimarães (2011), que afirma que as partículas com distribuição granulométrica grossa apresentam maiores interstícios. Logo, a passagem do líquido pelo meio filtrante ocorre com maior facilidade e conseqüentemente, propicia o aumento na velocidade de filtração e redução da umidade da torta.

#### 5.4.1 Análise de regressão linear

A partir das análises realizadas no *Minitab*, obteve-se a equação ajustada que descreve a relação entre a variável preditora (X) e variável resposta (Y) para cada amostra, em que X corresponde ao tempo de secagem (min) e Y a taxa unitária de filtração ( $\text{kg/h/m}^2$ ). Para as três amostras o modelo quadrático adequou-se melhor aos resultados.

Na Figuras 30 estão representados os gráficos e a equação de regressão linear.

Figura 30 - Regressão linear para TUF.



Fonte: Própria autora, 2025.

Ao visualizar a Tabela 20 é possível verificar que o R<sup>2</sup> ajustado da análise de regressão das 3 amostras está próximo a 100%, no entanto, destaca-se que o valor previsto de Y refere-se a uma estimativa e não uma correspondência exata dos valores obtidos experimentalmente. Diante disso, os erros aleatórios são intrínsecos aos ensaios experimentais e afetam diretamente no ajuste do modelo.

Tabela 20 - Regressão linear simples.

Amostra	Equação de regressão	R <sup>2</sup> (ajustado)
1	$Y = 337,50 - 56,93X + 3,13X^2$	96,10%
2	$Y = 329,30 - 55,71X + 3,04X^2$	97,90%
3	$Y = 226,20 - 32,10X + 1,66X^2$	97,90%

Fonte: Própria autora, 2025.

### 5.4.2 Análise de variância - Umidade B.S (%)

A Tabela 21 apresenta a análise de variância para a umidade em base seca que foram obtidos por meio do tratamento estatístico dos dados no *software Minitab*. O fator A corresponde a variável  $d_{50}$ , enquanto o fator B ao tempo de secagem.

Tabela 21 - ANOVA para a umidade em base seca (%).

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	17	1350,34	99,92%	1350,34	79,43	1305,72	0,00
Linear	7	1316,60	97,42%	1316,60	188,09	3091,81	0,00
A	2	1222,64	90,47%	1222,64	611,32	10049,04	0,00
B	5	93,96	6,95%	93,96	18,79	308,91	0,00
Interações de 2 fatores	10	33,74	2,50%	33,74	3,37	55,46	0,00
A*B	10	33,74	2,50%	33,74	3,37	55,46	0,00
Erro	18	1,10	0,08%	1,10	0,06		
Total	35	1351,44	100,00%				

Fonte: Própria autora, 2025.

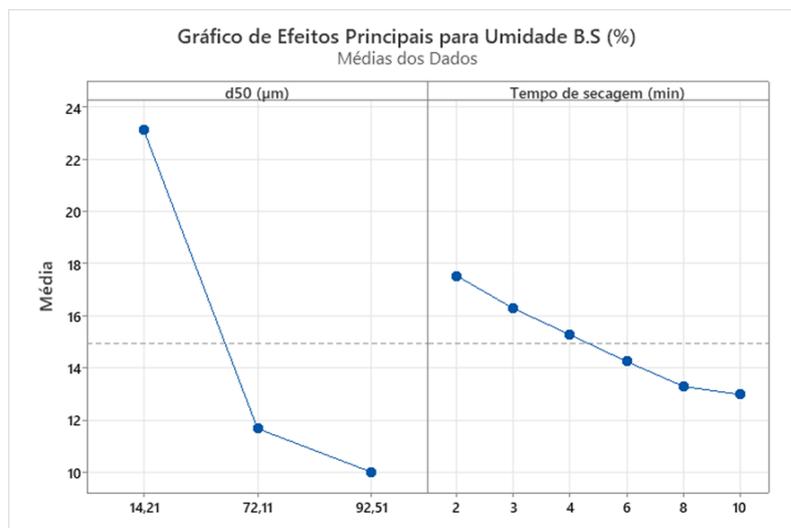
Ao analisar os resultados, nota-se que os efeitos dos fatores A, B e a interação entre eles (A\*B) afetam significativamente na umidade em base seca, visto que o valor-P é menor que o nível de significância de 0,05 em todos os casos. Diante disso, esses efeitos do ponto de vista estatístico são importantes na resposta.

Em relação a contribuição, o fator A possui maior importância com participação de 90,47%, ou seja, 90,47% da variabilidade na resposta do modelo é explicada pela referida variável. Logo, a variação da granulometria ( $d_{50}$ ) promoveu uma alteração maior na resposta. No que diz respeito ao erro aleatório, esse contribuiu apenas com 0,08% na resposta, sendo relativamente pequeno, enquanto para o fator B esse valor foi de 6,95%.

Para avaliar a qualidade do modelo obtido, pode ser analisado o valor de  $R^2$  (ajustado), representando o percentual de variação da resposta que o modelo previsto consegue explicar. Para o sistema analisado, o  $R^2$ (ajustado) foi de 99,84%, mostrando que o modelo está bem ajustado, ao passo que apenas 0,16% das respostas não se encaixam ao modelo.

Ao analisar o gráfico de efeitos principais (Figura 31), observa-se que as linhas não estão na horizontal, evidenciando a existência de efeito principal e que a média da resposta não são as mesmas em todos os níveis de cada um dos fatores.

Figura 31 - Gráfico de efeitos principais para umidade em base seca.



Fonte: Própria autora, 2025.

A maior inclinação da linha indica uma maior magnitude de influência, diante disso, é possível visualizar que a granulometria  $d_{50}$  possui uma inclinação maior. Essa inclinação maior apresenta-se negativa, indicando que quando se passa do nível mínimo (14,21µm) para o nível máximo (92,51µm) ocorre a diminuição na umidade em base seca da torta.

Para fins de comparação, o  $d_{50}$  de 14,21µm correspondente a amostra 3 (maior proporção de finos) apresenta a umidade em base seca média maior em comparação a amostra 2 (72,11µm) e amostra 1 (92,51µm) que apresentam faixas granulométricas mais grossa. Wakeman (2007) em seus estudos avaliou o tamanho e a distribuição das partículas no processo de filtração e constatou que com a diminuição do tamanho da partícula é gerado uma menor taxa de filtração e maior teor de umidade da torta.

#### 5.4.3 Análise de variância – TUF (kg/h/m<sup>2</sup>)

O tratamento estatístico também foi realizado para a taxa unitária de filtração. Com isso, obteve-se a análise de variância da Tabela 22. O fator A corresponde a variável  $d_{50}$ , enquanto o fator B ao tempo de secagem.

Tabela 22 - ANOVA para a TUF (kg/h/m<sup>2</sup>).

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	17	105103,26	99,80%	105103,26	6182,54	516,30	0,00
Linear	7	100977,12	95,88%	100977,12	14425,30	1204,66	0,00
A	2	6689,79	6,35%	6689,79	3344,90	279,33	0,00
B	5	94287,33	89,53%	94287,33	18857,47	1574,79	0,00
Interações de 2 fatores	10	4126,14	3,92%	4126,14	412,61	34,46	0,00
A*B	10	4126,14	3,92%	4126,14	412,61	34,46	0,00
Erro	18	215,54	0,20%	215,54	11,97		
Total	35	105318,80	100,00%				

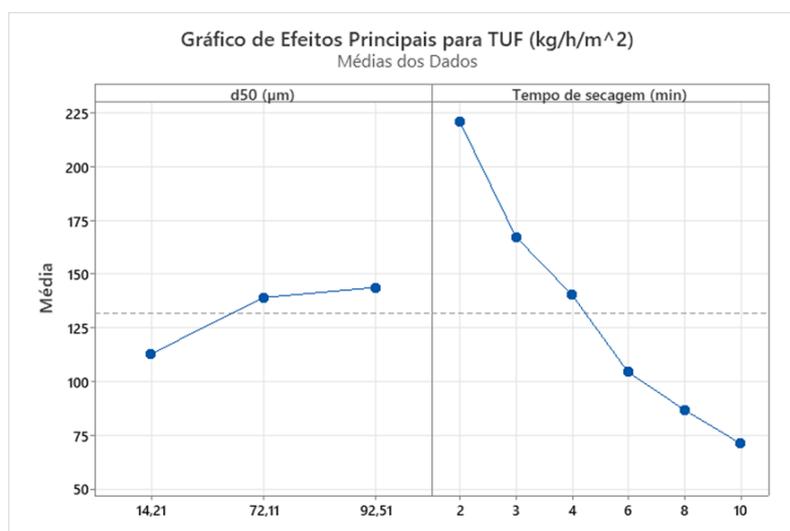
Fonte: Própria autora, 2025.

Ao analisar os resultados, verifica-se que os fatores A, B e a interação entre eles (A\*B) são significativos na variação da TUF. O valor-P para esses fatores são inferiores ao nível de significância de 0,05, desse modo, contribuem significativamente na resposta.

A participação da variável A é de apenas 6,35%, enquanto a variável B contribui na variabilidade da TUF com 89,53%. Referente a interação A\*B, a interferência é de 3,92% e para o erro aleatório a contribuição é de apenas 0,20%. A respeito do R<sup>2</sup> ajustado, pode-se dizer que o modelo está bem ajustado e que consegue explicar 99,60% das variações nas respostas.

O gráfico de efeitos principais da Figura 32 apresenta os efeitos dos fatores A e B na resposta.

Figura 32 - Gráfico de efeitos principais para taxa unitária de filtração.



Fonte: Própria autora, 2025.

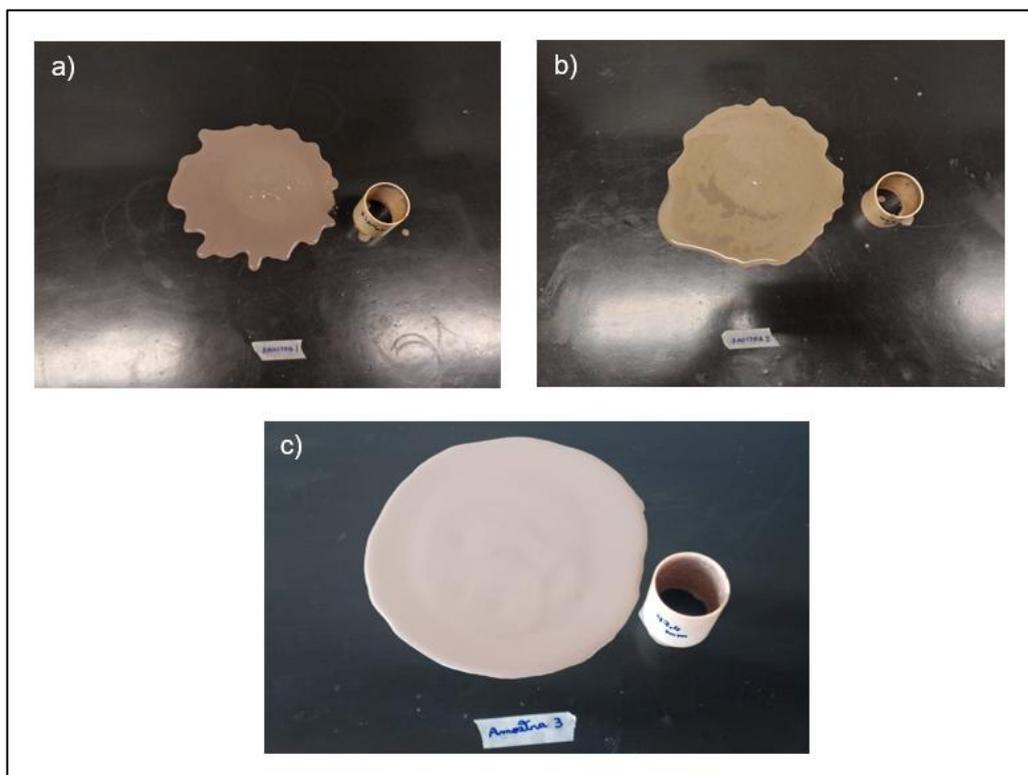
A maior inclinação da linha do tempo de secagem indica que esse fator possui uma maior magnitude de influência sobre a resposta. A inclinação negativa do tempo de secagem demonstra que quando se passa do nível mínimo (2 min) para o nível máximo (10 min) há uma diminuição na TUF.

### 5.5. Teste de abatimento – *Slump Test*

Conforme apresentado na Figura 33, o comportamento das amostras 1 e 2 foram similares em relação a mobilidade sobre a superfície da bancada, observou-se a fluidez e o escoamento pela superfície, em que a primeira apresentou uma segregação maior em comparação com a amostra 2, no qual ambas possuem uma distribuição granulométrica próxima. Para a amostra 3, observou-se que não houve segregação significativa do material e no aspecto da polpa foi percebido homogeneidade.

Figura 33 - Comportamento da polpa após teste de abatimento.

a) Amostra 1 ( $d_{50}= 92,51\mu\text{m}$ ). b) Amostra 2 ( $d_{50}= 72,11\mu\text{m}$ ). c) Amostra 3 ( $d_{50}= 14,21\mu\text{m}$ ).



Fonte: Própria autora, 2023.

A partir dos dados coletados, estimou-se a tensão de escoamento a partir da altura de abatimento, como mostrado na Tabela 23.

Tabela 23 - Resumo dos resultados do teste de abatimento.

<b>Análises</b>	<b>Amostra 1</b>	<b>Amostra 2</b>	<b>Amostra 3</b>
% sólidos da polpa	65	65	65
Densidade da polpa (kg/m <sup>3</sup> )	1670,00	1670,00	1670,00
Altura do cilindro (mm)	47,40	47,40	47,40
Queda medida (mm)	39,55	42,00	44,30
Tensão de escoamento (Pa)	15,60	8,50	4,50
Aspecto da polpa	Houve segregação	Segregação baixa	Homogêneo

Fonte: Própria autora, 2023.

Diante dos resultados obtidos verificou-se que as três amostras apresentaram valores de tensão de escoamento baixos e conseqüentemente, baixa viscosidade devido a menor resistência das partículas da polpa à deformação por cisalhamento, sendo caracterizadas como polpa diluída. Boger (1998) afirma que a tensão de escoamento aumenta exponencialmente com a concentração de sólidos, desse modo, uma pequena mudança na concentração pode resultar em uma grande mudança no limite de escoamento.

Lima e Possa (2010) afirma que antes de estudos mais aprimorados acerca da reologia, considerava-se a percentagem de sólidos como a única responsável pela variação da viscosidade na polpa. No entanto, com o auxílio de instrumentos mais modernos e investimentos em pesquisas, outras variáveis mostraram ser significativas para a viscosidade da polpa como a distribuição de tamanhos das partículas, o ambiente químico e a temperatura das polpas.

## 6. CONCLUSÕES

Com a realização dos testes de filtração, foi avaliado o efeito do tempo de secagem e granulometria na resposta de umidade em base seca e taxa unitária de filtração. Por meio da análise de variância constatou-se o diâmetro  $d_{50}$  possui maior contribuição na variabilidade na umidade em base seca com participação de 90,47%, enquanto o tempo de secagem causa maior efeito na variabilidade na taxa unitária de filtração com 89,53% de contribuição na resposta.

Foi verificado que o efeito da granulometria interfere nos ensaios de filtração, principalmente na variabilidade da umidade, tendo em vista que as partículas com distribuição granulométrica grossa apresentam maiores interstícios, logo, a passagem do líquido pelo meio filtrante ocorre com maior facilidade e conseqüentemente, propicia o aumento na velocidade de filtração e redução da umidade da torta. A pesquisa demonstrou que as amostras 1 e 2 possuem características de granulometria que permitem o empilhamento a seco considerando as premissas de Davies. A amostra 3 apresentou resultados nos testes de filtração e ensaio de compactação que pode inviabilizar esse método de disposição de rejeito.

O baixo desempenho na filtração da amostra mais fina (amostra 3) pode ser atribuído a existência de maior área superficial das partículas, resultando numa retenção da umidade na torta não sendo vencida nem com o maior tempo de secagem avaliado (10 minutos). Em relação ao desprendimento da torta, em nenhum dos testes foi constatado a descarga da torta de maneira fácil, no qual isso pode ter ocorrido por causa do cegamento das aberturas do meio filtrante, diante disso, novos estudos realizando testes com outros tecidos podem ser avaliados por pesquisadores.

Portanto, destaca-se que o conhecimento da distribuição granulométrica do material tem grande influência na produtividade dos equipamentos filtrantes. Salienta-se que o conhecimento dos demais fatores como viscosidade, pH da polpa, tempo de ciclo, % de sólidos, escolha de tecidos filtrantes e uso de reagentes auxiliares também são indispensáveis para a tomada de decisões. A eficiência da filtração permitirá a recuperação de água no processo de beneficiamento de minério e no atendimento de requisitos de projetos geotécnicos de estruturas de pilhas de rejeito filtrado.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, L. C. **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil**. 2014. 96 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

ARAUJO JUNIOR, A. M. **Influência das variáveis de processo na filtragem cerâmica de polpas de minério de ferro**. 2014. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

ARAUJO, A.C. **Métodos de Concentração**. Apostila Introdução ao Tratamento de Minérios: Editora UFMG, 2006. p.108-150

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182: SOLO – Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

BALTAR, C. A. M. **Processos de agregação**. *In.*: LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S. C. A. Tratamento de Minérios. 5 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p. 559-594, 2010.

BARREDA R. H. O; FONSECA C. R. M.; VALADÃO G. E. S. **Principais características de pastas minerais preparadas com rejeitos de manganês**. Encontro Nacional de Tratamento de Minérios: Salvador, p. 741-748, 2011.

BOGER, D. V. **Rheology and the resource industries**. Chemical Engineering Science, v.64, p.4525–4536, 2009.

BOGER, D. V. **Rheology of Slurries and Environmental Impacts in the Mining Industry**. The Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering, v.4, p.239-257, 2013.

BRAGA, F. Y. A. **Utilização de tecnologias de filtragem de rejeitos para empilhamento a seco**. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte, 2021.

BRASIL. **Lei nº 14.066, de 30 de Setembro de 2020**. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) [...]. Brasília, DF, [2020]. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm)>.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Mineração 2050 – Caderno 4: Competitividade da Indústria Mineral Brasileira**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/pnm-2050/estudos/caderno-4-competitividade-da-industria-mineral-brasileira>.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações – Fundamentos**. v.1, 6ª ed. – Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 1988.

CARMIGNANO, O. R. D. R. **Inovação no setor de mineração de ferro em Minas Gerais com foco na destinação de rejeitos**. 113 f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2021.

CARVALHO, P. S. L.; *et al.* **Minério de ferro**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 39, p. 197-200, 2014.

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. Editora Signus, vol. 1, 235 p, 1996.

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: Desaguamento, espessamento e filtragem**. 4ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 240 p, 2013.

CHAVES, D. T. **Separação de resíduos por filtração na fabricação de herbicidas**. Dissertação de Mestrado. UNIUBE. Uberaba, 71 p, 2018.

CLAYTON, S.; GRICE, T.G.; BOGER, D.V. **Analysis of the slump test for on-site yield stress measurement of mineral suspensions**. International Journal of Mineral Processing, v.70, p.3-21, 2003.

CORDEIRO H. T. D. *et al.* **Estudo das minerações de minério de ferro do quadrilátero ferrífero em minas gerais.** *In:* Anais do XXIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2022, Armação dos Búzios. Anais eletrônicos, Galoá, 2022.

DAVIES, M. **Filtered Dry Stacked Tailings – The Fundamentals.** *In:* Proceedings Tailings and Mine Waste, 2011, Vancouver, BC, 9 p, 2011.

DELLA, V. P.; HOTZA, D.; JUNKES, J.; OLIVEIRA, A. P. N. **Estudo comparativo entre sílica obtida por lixívia ácida da casca de arroz e sílica obtida por tratamento térmico da cinza de casca de arroz.** Química Nova, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s0100-40422006000600005>>.

EDRAKI, M.; BAUMGARTL, T.; MANLAPIG, E.; BRADSHAW, D.; FRANKS, D. M.; MORAN, C. J. **Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: A review of alternative approaches.** *Journal of Cleaner Production*, p. 411-420, 2014.

FERREIRA, L. C. **Influência do cimento Portland no empilhamento do rejeito de barragem de minério de ferro.** 81 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

FRANÇA, S. C. A.; CASQUEIRA, R. G. **Capítulo 24 - Ensaio de filtragem em filtro de folha (Leaf Test).** *In:* FRANÇA, S. C. A.; CASQUEIRA, R. G. Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, p. 411-422, 2007.

FRANÇA, S. C. A.; MASSARANI, R. G. **Capítulo 15 - Separação sólido-líquido.** *In:* LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. Tratamento de minérios. 5 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. Cap. 15, p. 637-678, 2010.

GOMES, M. F. M. **Metodologia de análise hierárquica aplicada para escolha do sistema de disposição de subproduto da mineração com ênfase nos rejeitos de minério de ferro.** 193 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Geotecnia na Escola de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas.** 2011. 114f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

JASKULSKI, F. M. **Análise do Comportamento Mecânico de Rejeito de Minério de Ferro Submetido a Ativação Alcalina pelo método “One-Part”**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2022.

KAWATRA, S. K.; BAKSHI, A. K. **On-line measurement of viscosity and determination of flow types for mineral suspensions**. International Journal of Mineral Processing. vol. 47, no 3-4, p. 275-283, 1996.

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de Ciência dos Minerais**. 23ª ed., Porto Alegre: Bookman, 2012.

LIMAVERDE, M. S. V.; BERGERMAN, M. G.; DELBONI JR., H. **Avaliação de diferentes técnicas de análise de tamanho de partículas para amostras finas de minério de cobre**. *In*: Encontro nacional de tratamento de minérios e metalurgia extrativa, 2013, Goiânia. Anais... Pires do Rio: Gráfica e Editora Pires do Rio LTDA-ME, 2013. 618 p.

LINS, F. A. F.; ADAMIAN, R. **Minerais Coloidais, Teoria DLVO Estendida e Forças Estruturais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, Série Tecnologia Mineral, n.78, 29 p, 2000.

MARTINS, M. **Efeito de flocculantes no espessamento e reologia de polpas de rejeito de minério de ferro**. 2022. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Centro Federal Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Araxá, 2022.

MONTOR, A. **Aula 06: Compactação dos Solos**. FEITEP. Faculdade de Engenharia e Arquitetura 25 p. Disponível em: <https://5semestrecivil.files.wordpress.com/2015/07/aula-6-compactac3a7c3a3o-dos-solos.pdf>.

MORAES, S. L.; RIBEIRO, T. R. **Brazilian iron ore and production of pellets**. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, v. 00, n. 00, p. 1–8, 2018.

MORAES, S. L. **Novas rotas**. *In*: *Panorama Mineração do Brasil 2024*. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo, p. 142, 2024.

OLIVEIRA, M. L. M.; LUZ, J. A. M.; LACERDA, C. M. M. **Espessamento e Filtragem**. Apostila DEMIN UFOP, 2007.

OLIVEIRA, M. S.; SILVA, L. A.; ALVES, L. P. **Importância do uso da técnica adequada de análise granulométrica para caracterização do minério fosfático fino**. Educação&Tecnologia. v. 22, n. 3, p. 9-19, 2017.

OLIVEIRA, O. B. **Aspectos geológicos relacionados às cavernas no Quadrilátero Ferrífero – MG**. In: Anais do 31º Congresso Brasileiro de Espeleologia. Ponta Grossa-PR, p.103-109, 2011.

Paterson & Cooke Slurry Slump Calculator. **Online Slump Calculator**. Disponível em: <<https://www.patersoncooke.com/tools/>>.

PEREIRA, L. M. M. **Estudos de propriedades geotécnicas de um rejeito de minério de ferro**. 104 f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, 2024.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de textos, 2012.

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 180. 2013.

POSSA, M. V.; LIMA, J. B. **Comportamento reológico de polpas de minérios**. Rio de Janeiro: CETEM, 2000. (Série Tecnologia Mineral, 77).

QUEVEKS. **O que é teste de slump e como ele é realizado?**. 2021. Disponível em: <https://www.queveks.com.br/post/o-que-slump-test-como-ele-realizado-49>.

ROCHA FILHO, A. C. **Alternativas para desaguamento e disposição dos rejeitos do Complexo Mineral de Tapira**. 71 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

RODRIGUES, T. V. A. **Quadrilátero Ferrífero, a região catastrófica: interpretações sobre a recorrência dos problemas com barragens entre os anos de 2014 e 2020**. Dissertação (Mestrado em Geografia). 396f. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2024.

ROMANINI, A. **O básico da compactação**. 2024. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/o-b%C3%A1sico-da-compacta%C3%A7%C3%A3o-augusto-romanini-mvxff/?trackingId=7mla3D59QJ2WnPxdJkCGg%3D%3D>.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; LUZ, A. B. DA. **Tratamento de Minérios**. 5ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

SILVA, A. T. **Curso de tratamento de minérios**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, v.1, 1973.

SILVA, A. P. M.; VIANA, J. P.; CAVALCANTE, A. L. B. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas - Relatório de Pesquisa**. Brasília: IPEA, 2012.

SILVA, E. J. D. A.; MAZZINGHY, D. B. **Evaluation of compressive strength in geopolymer mortars produced using iron ore tailings ground by tumbling ball mills**. *Tecnol. Metal. Mater. Min.*, v.18, e2480, p. 1–6, 2021.

TAKEHARA, L.; JUNIOR, F.C. **Minério de ferro: geologia e geometalurgia**. Editora: Blücher Ltda, São Paulo, 2013.

TAKEHARA, L. **Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros – fração Sinter Feed**. 2004. 421 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2004.

TESSAROTO, C. **Empilhamento a seco para rejeitos de processos minerais (Dry Stacking)**. *In: XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa*, 2015, Poços de Caldas-MG. Anais [...]. Poços de Caldas, 2015.

TOLEDO, I. C.; CORREA, A. L. S.; JORGE, G. J. **Estudo de caso de patologias em pavimentos flexíveis: diagnóstico em uma rodovia a partir de avaliação**

**visual no perímetro urbano de uma cidade no interior do Paraná.** Journal of Exact Sciences – JES. v.34, n.1, p. 13-18, 2022.

TRABALLI, L. P. **Utilização de polímero hidrocópio em um minério de alta umidade e sua influência na flotação.** 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Minas). CEFET-Araxá. Araxá, Minas Gerais. 2017.

TRAMPUS, B. C.; FRANÇA, S. C. A. **Aplicação de polieletrólito catiônico para desaguamento de lama vermelha: produção de sedimentos adensados.** Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, São Paulo, v.16, p. 525-531, 2019.

TURRER, H. D. G. *et al.* **Efeito da mineralogia na filtragem de minério de ferro.** p. 272-280. *In:* 41<sup>o</sup> Ironmaking and Raw Materials Seminar and 12<sup>o</sup> Brazilian Symposium on Iron Ore, Vila Velha, 2011.

VARAJÃO, C. A. C; *et al.* **Estudo da evolução da paisagem do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brasil) por meio da mensuração das taxas de erosão (<sup>10</sup>Be) e da pedogênese.** *In:* Revista Brasileira de Ciência do Solo. p.1049-1425, 2009.

VIANA, H. M. F. **Compactação de solos e algumas causas de recalques.** Faculdade de Tecnologia e Ciência (FTC). Bahia, p. 4, 2017. Disponível em: <https://engcivil20142.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/08/notas-de-aulas-parte-10-mec-solos-i.pdf>.

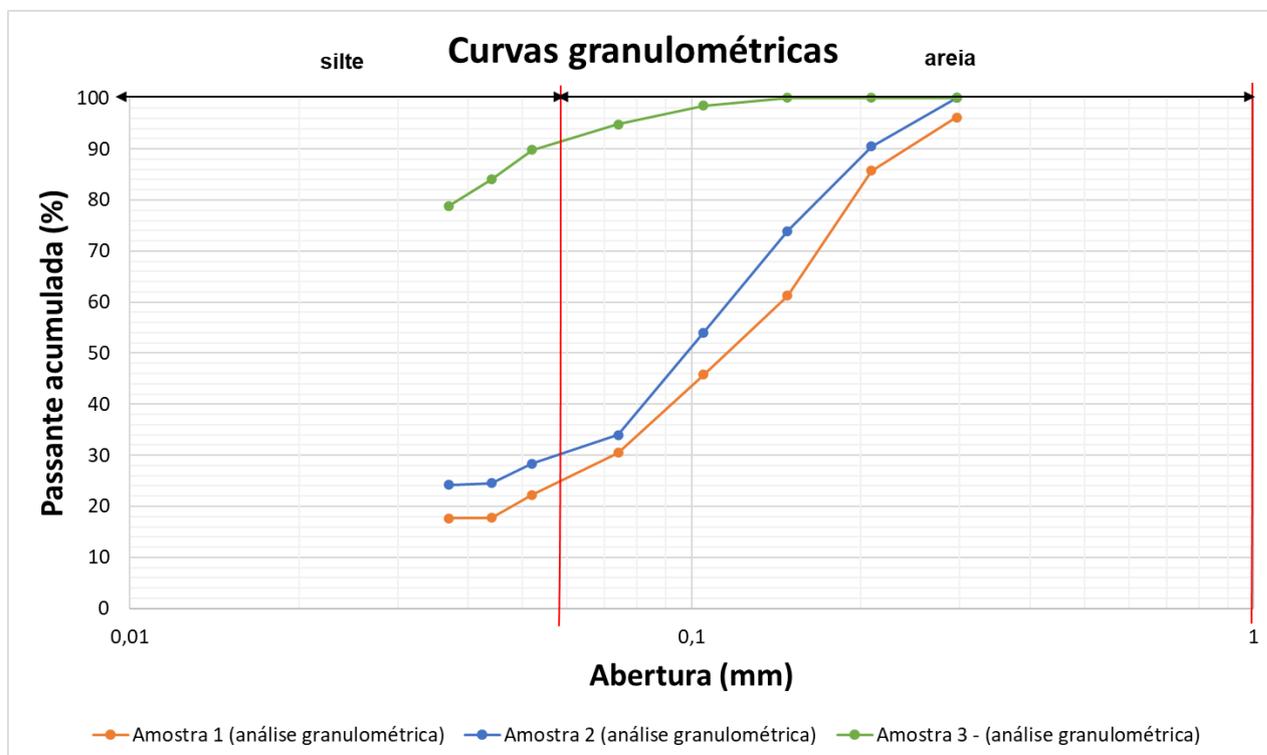
VALADÃO, G. E. S. **Separação Sólido-Líquido.** *In:* VALADÃO, GES; ARAUJO, A. C. (Org.). Introdução ao Tratamento de Minérios. 1<sup>a</sup> ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007, v. 142-161.

WAKEMAN, E. R. **The influence of particle properties on filtration.** Separation Purification Technology, v.58, p. 234-241, 2007. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/222956928\\_The\\_Influence\\_of\\_Particle\\_Properties\\_on\\_Filtration](https://www.researchgate.net/publication/222956928_The_Influence_of_Particle_Properties_on_Filtration).

WISDOM T. **Stacking up the benefits.** Mining Magazine, 2017. Disponível em: <http://www.miningmagazine.com/life-cycle-end-of-life-management/news/1264279/stacking-benefits>.

## APÊNDICE A – Classificação textural das amostras

Figura 34 - Distribuição granulométrica das amostras.



Fonte: Própria autora, 2023.

## APÊNDICE B – Resultados da filtração

Tabela 24 - Resultados da filtração: Amostra 1.

Ensaio n°	Amostra 1											
	1.0	1.1	2.0	2.1	3.0	3.1	4.0	4.1	5.0	5.1	6.0	6.1
Tempo de formação da torta (min)	1'35"	1'45"	2'00"	2'07"	1'50"	2'04"	2'15"	2'20"	1'36"	1'47"	2'05"	2'30"
Tempo de secagem da torta (min)	2'00"	2'00"	3'00"	3'00"	4'00"	4'00"	6'00"	6'00"	8'00"	8'00"	10'00"	10'00"
Pressão (mmHg)	-470,00	-490,00	-490,00	-490,00	-490,00	-490,00	-490,00	-490,00	-490,00	-490,00	-490,00	-490,00
pH da polpa	8,03	8,05	8,06	8,09	8,05	8,06	8,06	8,05	8,13	8,17	8,22	8,13
Presença de rachadura	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Espessura (mm)	10,20	10,65	10,50	10,70	10,90	10,60	10,45	10,40	10,80	10,30	10,10	10,10
Turbidez do filtrado (FTU)	1,94	2,09	0,30	0,88	2,42	2,23	2,75	2,16	3,47	0,84	2,95	2,05
Volume do filtrado (mL)	88,00	87,00	90,00	89,00	94,00	94,00	97,00	96,00	100,00	98,00	101,00	102,00
Massa do filtrado (g)	85,06	83,13	87,03	85,75	90,94	90,55	94,26	93,34	97,73	95,00	97,35	97,77
Massa úmida (g)	242,01	244,46	236,35	238,66	234,56	235,62	233,25	233,11	227,97	229,04	229,39	226,86
Massa seca (g)	212,35	214,65	211,92	212,13	212,78	213,39	214,61	213,43	212,80	212,47	213,59	211,22
Umidade base úmida (%)	12,26	12,19	10,34	11,12	9,29	9,43	7,99	8,44	6,65	7,23	6,89	6,89
Média umidade b.u (%)	12,22		10,73		9,36		8,22		6,94		6,89	
Umidade base seca (%)	13,97	13,89	11,53	12,51	10,24	10,42	8,69	9,22	7,13	7,80	7,40	7,40
Média umidade b.s (%)	13,93		12,02		10,33		8,95		7,46		7,40	
TUF média (kg/h/m <sup>2</sup> )	249,87		179,83		153,68		110,73		94,12		74,16	

Fonte: Própria autora, 2023.

Tabela 25 - Resultados da filtração: Amostra 2.

Amostra 2												
Ensaio n°	1.0	1.1	2.0	2.1	3.0	3.1	4.0	4.1	5.0	5.1	6.0	6.1
Tempo de formação da torta (min)	1'47"	1'55"	1'50"	2'10"	2'17"	2'22"	2'26"	2'39"	2'32"	2'45"	2'43"	3'00"
Tempo de secagem da torta (min)	2'00"	2'00"	3'00"	3'00"	4'00"	4'00"	6'00"	6'00"	8'00"	8'00"	10'00"	10'00"
Pressão (mmHg)	-470,00	-470,00	-470,00	-470,00	-470,00	-470,00	-470,00	-470,00	-470,00	-470,00	-470,00	-470,00
pH da polpa	7,74	7,71	7,71	7,77	7,7	7,73	7,69	7,69	7,7	7,67	7,7	7,69
Presença de rachadura	Não											
Espessura (mm)	10,75	10,90	10,80	10,45	10,35	10,35	10,85	10,60	10,45	10,65	10,85	10,80
Turbidez do filtrado (FTU)	0,35	1,27	0,70	1,31	1,02	1,20	1,90	0,87	0,86	0,54	0,81	0,47
Volume do filtrado (mL)	84,00	84,00	90,00	89,00	91,00	91,00	94,00	93,00	98,00	98,00	98,00	97,00
Massa do filtrado (g)	81,14	81,09	86,60	85,63	87,87	87,64	91,43	89,74	95,35	95,50	95,49	94,56
Massa úmida (g)	247,17	244,57	242,11	244,52	240,02	242,80	234,83	237,62	237,04	236,48	232,42	233,40
Massa seca (g)	214,79	212,61	213,27	215,24	213,69	215,77	212,35	214,22	216,40	215,82	214,16	214,24
Umidade base úmida (%)	13,10	13,07	11,91	11,97	10,97	11,13	9,57	9,85	8,71	8,74	7,86	8,21
Média umidade b.u (%)	13,08		11,94		11,05		9,71		8,72		8,03	
Umidade base seca (%)	15,08	15,03	13,52	13,60	12,32	12,53	10,59	10,92	9,54	9,57	8,53	8,94
Média umidade b.s (%)	15,05		13,56		12,42		10,75		9,56		8,73	
TUF média (kg/h/m <sup>2</sup> )	238,20		183,99		146,22		107,12		87,12		71,47	

Fonte: Própria autora, 2023.

Tabela 26 - Resultados da filtração: Amostra 3.

Amostra 3												
Ensaio n°	1.0	1.1	2.0	2.1	3.0	3.1	4.0	4.1	5.0	5.1	6.0	6.1
Tempo de formação da torta (min)	3'20"	3'05"	3'34"	3'37"	3'35"	3'34"	3'32"	3'43"	3'42"	3'20"	3'33"	3'23"
Tempo de secagem da torta (min)	2'00"	2'00"	3'00"	3'00"	4'00"	4'00"	6'00"	6'00"	8'00"	8'00"	10'00"	10'00"
Pressão (mmHg)	-470,00	-490,00	-490,00	-490,00	-490,00	-490,00	-490,00	-490,00	-490,00	-490,00	-490,00	-490,00
pH da polpa	7,13	7,04	7,06	7,08	7,09	7,04	7,07	7,08	7,07	7,09	7,09	7,14
Presença de rachadura	Sim											
Espessura (mm)	10,90	9,40	9,45	10,45	9,80	10,30	10,20	10,80	10,00	10,80	9,70	10,00
Turbidez do filtrado (FTU)	0,65	1,10	1,20	1,64	1,30	1,14	1,41	1,32	1,16	3,84	2,46	2,24
Volume do filtrado (mL)	66,00	66,00	68,00	66,00	67,00	67,00	68,00	68,00	69,00	66,00	68,00	68,00
Massa do filtrado (g)	62,55	62,04	63,78	62,27	63,03	63,38	64,05	63,92	64,72	61,94	63,76	64,12
Massa úmida (g)	263,29	260,95	260,29	262,61	264,36	261,99	258,83	267,06	264,16	260,13	262,94	261,36
Massa seca (g)	212,86	211,16	211,29	212,87	214,80	212,81	210,19	217,22	215,12	211,56	214,15	212,70
Umidade base úmida (%)	19,15	19,08	18,83	18,94	18,75	18,77	18,79	18,66	18,56	18,67	18,56	18,62
Média umidade b.u (%)	19,12		18,88		18,76		18,73		18,62		18,59	
Umidade base seca (%)	23,69	23,58	23,19	23,37	23,07	23,11	23,14	22,94	22,80	22,96	22,78	22,88
Média umidade b.s (%)	23,64		23,28		23,09		23,04		22,88		22,83	
TUF média (kg/h/m <sup>2</sup> )	174,70		138,02		121,08		95,24		79,47		67,99	

Fonte: Própria autora, 2023.