

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Departamento de Engenharia de Minas
Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais

Gabriel Carmo Moreira

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS E DAS PROPRIEDADES DO
REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO NO DESEMPENHO DA FILTRAGEM
VISANDO A DISPOSIÇÃO À SECO: uma revisão**

Belo Horizonte

2024

Gabriel Carmo Moreira

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS E DAS PROPRIEDADES DO
REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO NO DESEMPENHO DA FILTRAGEM
VISANDO A DISPOSIÇÃO À SECO: uma revisão**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia de Recursos minerais da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia de Recursos Minerais.

Orientador: Prof. Dr. George Eduardo Sales Valadão

Belo Horizonte

2024

M838i	<p>Moreira, Gabriel Carmo. Influência dos parâmetros operacionais e das propriedades do rejeito de minério de ferro no desempenho da filtragem visando a disposição à seco [recurso eletrônico] : uma revisão / Gabriel Carmo Moreira. – 2024. 1 recurso online (43 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: George Eduardo Sales Valadão.</p> <p>“Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais, como requisito parcial à obtenção do Título de Especialista em Engenharia de Recursos Minerais”.</p> <p>Bibliografia: f. 41-43.</p> <p>1. Minas e recursos minerais. 2. Barragens. 3. Resíduos – Minérios de ferro. 4. Quadrilátero Ferrífero (MG). I. Valadão, George Eduardo Sales. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 622</p>
-------	---

Ficha catalográfica elaborada pelo bibliotecário Marcio A. A. Gomes CRB/6 2812
Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MINAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MONOGRAFIA/ARTIGO

Aos vinte e três dias do mês de novembro do ano de dois mil e vinte e quatro, de 08h:00min às 11h:15min, o estudante Gabriel Carmo Moreira, matrícula 2023662464, defendeu o Trabalho intitulado “**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS E DAS PROPRIEDADES DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO NO DESEMPENHO DA FILTRAGEM VISANDO A DISPOSIÇÃO À SECO: UMA REVISÃO**”.

Participaram da banca examinadora os professores abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar, assinam eletronicamente a presente ata.

Nota: 94

Situação: Aprovado

Orientador: Professor George Eduardo Sales Valadão

Examinador: Professor Luciano Fernandes Magalhães

Examinadora: Professora Geriane Macedo Rocha



Documento assinado eletronicamente por **Luciano Fernandes de Magalhães, Professor(a)**, em 16/01/2025, às 10:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **George Eduardo Sales Valadão, Professor Magistério Superior - Voluntário**, em 16/01/2025, às 17:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Geriane Macedo Rocha, Professora do Magistério Superior**, em 17/01/2025, às 20:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3806951** e o código CRC **C0A16E8A**.

INSTRUÇÕES

RESUMO

A disposição de rejeitos de mineração tem sido frequentemente discutida pelo setor industrial e pela sociedade civil, principalmente após as rupturas das barragens das minas de Germano e de Córrego do Feijão localizadas no Estado de Minas Gerais. Novas técnicas de disposição de rejeitos já vinham sendo estudadas no setor mineral a fim de encontrar alternativas mais seguras, entretanto, após essas rupturas a busca foi potencializada. Dentre as alternativas, destaca-se o *dry stacking* por ser uma técnica mais segura e que demanda menor área quando comparada com a disposição em barragens. Nesse sentido, o uso da filtração vem ganhando destaque para adequar a umidade do rejeito a fim de realizar a disposição a seco além de possibilitar a recuperação de água de processo. O presente trabalho mostra a influência das características operacionais e das propriedades físicas e químicas do rejeito no desempenho da operação de filtração para rejeitos de minério de ferro localizadas no Quadrilátero Ferrífero. A partir de uma revisão da literatura avaliou-se o pré-tratamento químico do rejeito na performance da filtração. Verificou-se a influência do pH da polpa, uso e dosagem de floculantes, coagulantes e surfactantes na velocidade de formação da torta, resistência da torta e a umidade residual da torta. Para mais, foi avaliado a influência da adição de lama na filtração de rejeitos de flotação, a filtração de rejeito de separação magnética, bem como de rejeitos finos e ultrafinos. Os resultados dos ensaios de filtração tanto em escala de bancada quanto em planta piloto apresentaram umidade residual entre 8,8 e 15,6%. Resultados esses promissores para o empilhamento de rejeitos filtrados.

Palavras-chave: Minério de Ferro; Rejeito; Quadrilátero Ferrífero; *Dry Stacking*; Filtração; Pré-tratamento Químico.

ABSTRACT

The disposal of the tailings has been frequently discussed by the industrial sector and civil society, especially after the ruptures of the dams of the mines of Germano and Córrego do Feijão located in Minas Gerais, Brazil. New techniques of the disposal of the tailings were already being studied in the mineral sector to find safer alternatives, however, after these ruptures the search was potentialized. Among the alternatives, dry stacking stands out as a safer technique and requires less area when compared to the arrangement in dams. In this way, the use of filtration has been gaining prominence to adapt the moisture of the tailings in order to perform dry disposal and enable the recovery of process water. The present work shows the influence of operational characteristics and physical and chemical properties of the tailings on the performance of the filtration operation for iron ore tailings located in the Quadrilateral Ferrífero. Based on a literature review, the chemical pre-treatment of tailings in the filtration performance was evaluated. The influence of pulp pH, use and dosage of flocculants, coagulants and surfactants on cake formation rate, specific cake resistance and residual moisture of the cake was verified. In addition, the influence of slimes addition on filtration of flotation tailings, filtration of the magnetic separation tailings, as well as fine and ultrafine tailings. The results of the filtration tests both in laboratory scale and in pilot plant showed residual moisture between 8.8 and 15.6%. These results are promising for the stacking of filtered tailings.

Key-words: Iron ore; Tailings; Quadrilátero Ferrífero; *Dry Stacking*; Filtration; Chemical pre-treatment.

LISTA DE FIGURA

Figura 1 - Visão sistêmica de mineração	13
Figura 2 – Curvas granulométricas dos principais rejeitos das usinas de concentração de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero da empresa Vale S/A	16
Figura 3 – Composição química dos rejeitos de flotação das usinas de concentração de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero da empresa Vale S/A	20
Figura 4 – Composição química das lamas das usinas de concentração de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero da empresa Vale S/A	21
Figura 5 – Diagrama simplificado (a) e esquema típico de operação de filtro rotativo a vácuo (b)	27
Figura 6 – Fluxograma de instalação industrial com filtro rotativo a vácuo.....	28
Figura 7 – Esquema de um filtro prensa em operação	29
Figura 8 – Filtro hiperbárico de disco: (A) visão frontal da parte interna do filtro (B) visão lateral	30
Figura 9 – Diagrama esquemático com as etapas operacionais de filtro de disco cerâmico	31

LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Rejeitos de minério de ferro gerados de acordo com o método de concentração empregado	15
Tabela 2 – Fases mineralógicas de lamas oriundas de diferentes minas da empresa Vale S/A localizadas em Minas Gerais	19
Tabela 3 – Variáveis que afetam a taxa volumétrica de filtração e o processo	24
Tabela 4 – Tipos de filtros e principais características	25
Tabela 5 – Estudos para avaliar o desempenho da filtração de rejeitos oriundos de usinas de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais.....	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	11
3	MINÉRIO DE FERRO E SEUS RESÍDUOS.....	12
4	CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA.....	15
4.1	Caracterização Física	15
4.2	Caracterização Mineralógica.....	17
4.3	Caracterização Química.....	20
5	FILTRAGEM	21
5.1	Filtragem a vácuo.....	26
5.2	Filtragem sob pressão	28
5.3	Filtragem hiperbárica.....	29
5.4	Filtragem capilar.....	30
6	EFEITO DE PARÂMETROS QUE AFETAM A FILTRAGEM	31
7	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o Quadrilátero Ferrífero (QF) localizado em Minas Gerais é conhecido por suas importantes reservas de minério de ferro, mas ao passar do tempo vem se tornando gradativamente mais pobres em virtude de itabiritos com teores de ferro cada vez menores (Gomes, 2009). Por consequência, uma elevada porção da rocha minerada não tem aproveitamento atualmente. O volume total de rejeito gerado em uma indústria mineral pode atingir cerca de 95% do volume total de minério processado (Adiansyah *et al.*, 2015).

As rotas de processamento a úmido, em geral, possuem basicamente quatro operações unitárias: cominuição, separação por tamanho, concentração e separação sólido-líquido. A separação sólido-líquido muitas vezes é empregada para preparar a polpa mineral para as etapas subsequentes, realizar o desaguamento final de concentrados e rejeitos, bem como a recirculação e recuperação de água. Entretanto, o desaguamento vem sendo pouco estudado e existe um elevado consumo de água no processamento mineral, geralmente uma tonelada de minério a ser beneficiado necessita de 0,8 m³ de água (Concha, 2014).

Desse modo, ao considerar a escassez de água como um problema global o desaguamento de rejeitos e concentrados a fim de recuperar e recircular esse recurso. Atrelado a isso, a presença de água no rejeito influencia na escolha do método de disposição desse resíduo. Devido elevada umidade, o rejeito tende a apresentar elevada mobilidade e pequena resistência ao cisalhamento. Por conseguinte, em muitos casos, a disposição dos rejeitos é realizada em barragens.

Todavia, a história vem mostrando que as barragens de rejeitos possuem considerável risco associado, como comprovam as rupturas e acidentes ocorridos com essas estruturas (Alves, 2020). Os mais graves desastres relacionados com barragens de rejeitos de mineração do século XXI ocorreram no Brasil entre 2015 e 2019. Em novembro de 2015, ocorreu o rompimento da barragem da Mineradora Samarco localizada em Mariana nos Estado de Minas Gerais ocasionando a morte de 19 pessoas e o derramamento de mais de 50 milhões de m³ de rejeito no meio ambiente, que percorreu um trajeto de 650 km ao longo da bacia do rio Doce alcançando o oceano Atlântico no estado do Espírito Santo. Em janeiro de 2019 ocorreu o rompimento da barragem de Feijão da Vale S/A também no Estado de Minas Gerais acarretando a morte de 270 pessoas, o desaparecimento de 3 pessoas e o derramamento no meio ambiente de 13 milhões de m³ de rejeitos que atingiram cerca de 18 municípios ao longo do rio Piracicaba (Freitas *et al.*, 2022). Após a ocorrência desses desastres, foram

promulgadas leis mais rígidas relacionadas com a disposição de resíduos, além da Agência Nacional de Mineração (ANM) aumentar o nível de fiscalização, exigir declarações periódicas de estabilidade e conformidade operacional, bem como o descomissionamento de barragens classificadas de alto risco e a proibição do método de disposição em barragens a montante (Cruz, 2023).

Em vista disso, a disposição de rejeitos tornou-se um dos principais desafios da indústria mineral e, por isso vêm sendo estudadas alternativas para disposição de rejeitos. Dentre as técnicas, o empilhamento a seco vem ganhando destaque por possibilitar uma maior gestão da água de processo e reduzir os custos relacionados com a disposição mais segura dos rejeitos (Davies, 2011). Sendo esses, importantes aspectos para uma mineração cada vez mais sustentável.

A utilização de espessadores seguidos de operações de filtração para o desaguamento da polpa de rejeitos pode reduzir a umidade do rejeito, possibilitando a recuperação de grande volume de água de processo e permitindo o empilhamento a seco (Fitton; Roshdieh, 2012). A demanda por sistemas eficientes de separação sólido-líquido na indústria mineral é cada vez maior, procura-se por sistema de filtração que possibilite atingir baixo teor de umidade na torta, baixo consumo energético e alta produtividade (Luz; Sampaio; França, 2010).

2 OBJETIVOS

Constitui como objetivo geral desse trabalho avaliar a influência das variáveis operacionais do processo de filtragem e das características do rejeito de minério de ferro a fim de permitir o empilhamento do rejeito a seco.

Para alcançar esse objetivo foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Procurar na literatura dados de caracterização física, química e mineralógica dos rejeitos de minério de ferro com foco em estudos de rejeitos obtidos no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais.
- Análise de dados da aplicação de processos de filtragem para o desaguamento de rejeitos de minério de ferro para o empilhamento a seco com foco em estudos de rejeitos obtidos no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais.

3 MINÉRIO DE FERRO E SEUS RESÍDUOS

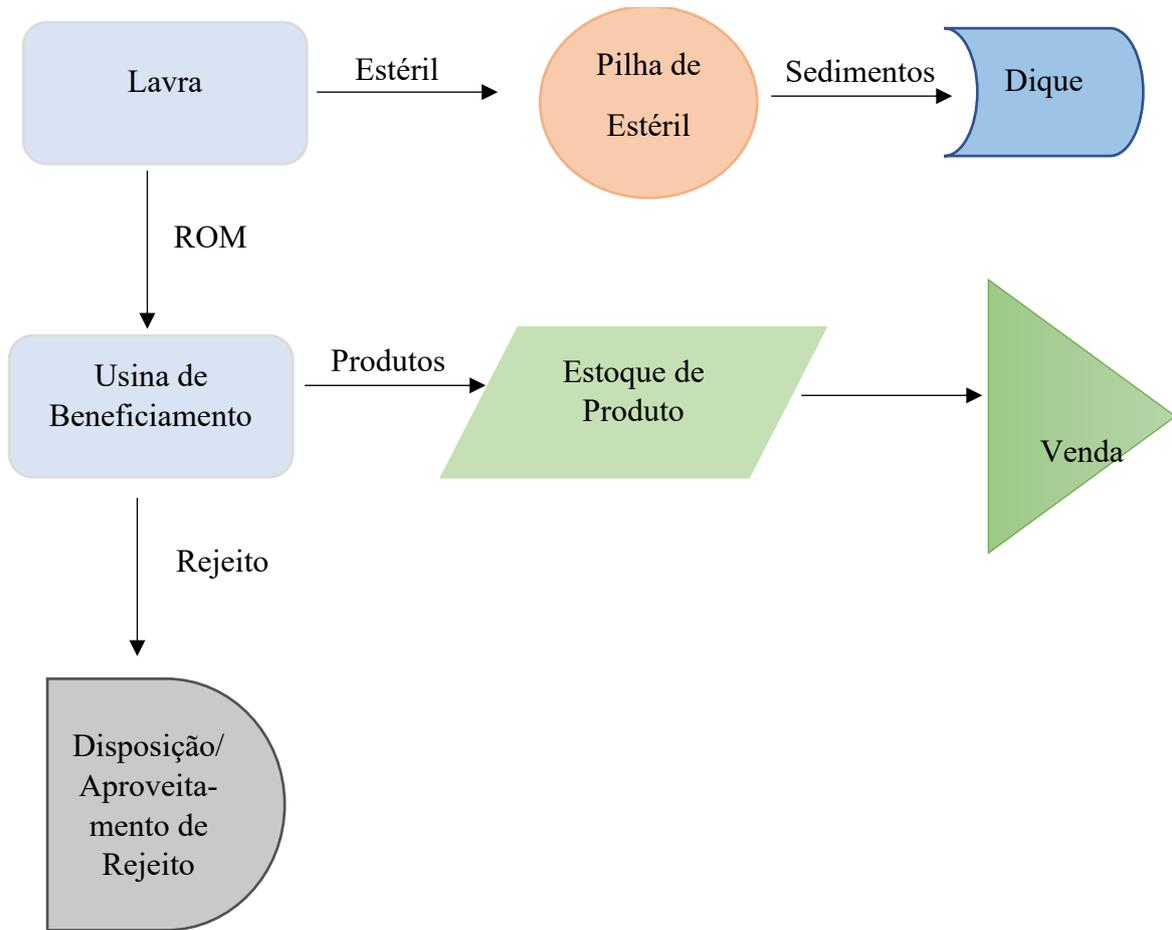
A mineração é uma atividade crucial ao ser humano além de ser crucial para o desenvolvimento industrial, econômico e social. O minério de ferro é um dos principais recursos minerais explorados no mundo, sendo essencial na fabricação de aço (Jesus, 2013; Cruz, 2023).

De acordo com *United States Geological Survey*, USGS (2023), o planeta possui cerca de 180 bilhões de toneladas métricas de minério de ferro. Os principais países detentores das maiores reservas são a Austrália, com 51 bilhões; o Brasil, com 34 bilhões; a Rússia, com 29 bilhões; e a China, com 20 bilhões.

O minério de ferro é um dos principais produtos exportado pelo Brasil. Conforme a ANM (2020), o país exporta os seguintes produtos obtidos a partir do beneficiamento do minério de ferro: *granulado*, *sínter feed* e *pellet feed*, além de pelotas. No primeiro semestre de 2023 houve um faturamento de 70,1 bilhões de reais com a produção de minério de ferro em território nacional e o Brasil exportou 169 milhões de toneladas de minério de ferro, um aumento de 9,8% em relação ao primeiro semestre de 2022. Entretanto, houve uma queda de 9% em termos financeiros, no primeiro semestre de 2022 a exportação totalizou US\$ 15 bilhões e no mesmo período em 2023 foi de US\$ 13,7 bilhões. Além disso, a China é responsável pela compra de 65% do total de minério de ferro exportado pelo país, seguido pela Malásia com 6,3% (IBRAM, 2023).

Entretanto, como qualquer processo industrial a produção de minério de ferro gera resíduos. As principais etapas geradoras de resíduos são a lavra e o beneficiamento, como pode ser observado pela Figura 1 (Barbosa, 2021).

Figura 1 - Visão sistêmica de mineração



Fonte: Leão, 2022 *apud* Cruz, (2023).

Conforme Cruz (2023) a geração de resíduos será cada vez maior tendo em vista o crescimento da mineração concomitantemente ao empobrecimento das jazidas de minério de ferro. De acordo com a Resolução nº 29 de 11 de dezembro de 2002, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH – define estéril como qualquer material não aproveitável economicamente e descartado antes da etapa de beneficiamento, em caráter definitivo ou temporário. Ademais, em conformidade com a Lei Federal nº 12.305 de 02 de agosto de 2010, os rejeitos são definidos, como: “resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente aquedada”.

De acordo com informações obtidas no relatório referente a Análise de Impacto Regulatório da ANM (2020), o Brasil entre os anos de 2010 e 2019 gerou cerca de 3,4 bilhões de

toneladas de rejeitos e 8,2 bilhões de toneladas de estéril considerando a produção de minerais metálicos – ferro, ouro, cobre, alumínio, níquel, manganês, zinco, cromo e vanádio – além de fosfato e carvão. Para mais, a distribuição espacial de rejeitos no país está concentrada na região sudeste. Esta região foi responsável por 61,2% de todo o rejeito gerado no país e, desse montante, 60,3% estão concentrados no Estado de Minas Gerais. Em contrapartida, a distribuição espacial de geração de estéril está menos concentrada em relação ao rejeito, porém a região sudeste e o Estado de Minas Gerais continuam em primeiro lugar, com participação de 44,3% e 43,4%, respectivamente. Considerando-se as massas de rejeito e estéril geradas por substância, a produção de minério de ferro foi a principal geradora desses resíduos, com participação de 40,9% e 47,9%, respectivamente.

As propriedades físicas e químicas do rejeito dependem não apenas do tipo de minério, mas também das operações realizadas durante o beneficiamento. Desse modo, os rejeitos apresentam variadas granulometrias, formas e composição mineralógicas e, por conseguinte, apresentam características geotécnicas variadas e distintas do solo natural (Chaves, 2023). Por exemplo, um minério de ferro com alto teor de argila e mais brando, em geral, gera partículas mais finas durante os processos de cominuição (Srivastava *et al.*, 2001). Os rejeitos podem ser classificados em conformidade com o tamanho das partículas, em: rejeitos grossos ou granulares, rejeitos finos e rejeitos ultrafinos ou lamas. Apesar de existir algumas discordâncias entre os autores a respeito da classificação quanto ao tamanho, rotineiramente no setor mineral os rejeitos grossos ou granulares são denominados como aqueles que são essencialmente constituídos por sólidos com tamanho maior que 50 μm . Os rejeitos finos compostos por partículas com tamanho abaixo de 50 μm e as lamas ou rejeitos ultrafinos constituídos por partículas menores que 10 μm (Wolff, 2009).

O rejeito e o estéril geralmente costumam ser dispostos separadamente e de formas diferentes. O estéril é comumente disposto em pilhas contendo estéril com material com granulometria de dimensões centimétricas, constituído por solos, fragmentos de rochas e outros materiais. Já os rejeitos requerem um maior cuidado para disposição, devido a dois principais fatores: granulometria variada e o grande volume de resíduo (Cruz, 2023). Em geral, os rejeitos são dispostos em barragens com alteamento a montante, entretanto outros métodos de disposição de rejeitos vêm sendo desenvolvidos e aplicados, dentre eles, o empilhamento de rejeito a seco (*dry stacking*).

4 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

Nesse item será abordado a caracterização física, química e mineralógica do rejeito de minério de ferro. A caracterização é uma etapa de suma importância para otimizar a rota tecnológica do processamento mineral, pois permite identificar e quantificar os minerais, determinar a distribuição granulométrica e suas propriedades físicas e químicas com precisão (Neumann; Scheneider e Neto, 2004).

4.1 Caracterização Física

Os rejeitos de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero, geralmente, são gerados durante a etapa de classificação e concentração do minério de ferro (Araújo, 2006). Em geral, as lamas de rejeito contêm de 30% a 50% de sólidos em massa, e suas partículas são essencialmente finas com granulometria abaixo de 10 μm (Hernandez *et al.*, 2005; Wolf, 2009). A Tabela 1 apresenta a fração granulométrica, método de concentração, bem como os produtos e rejeitos formados.

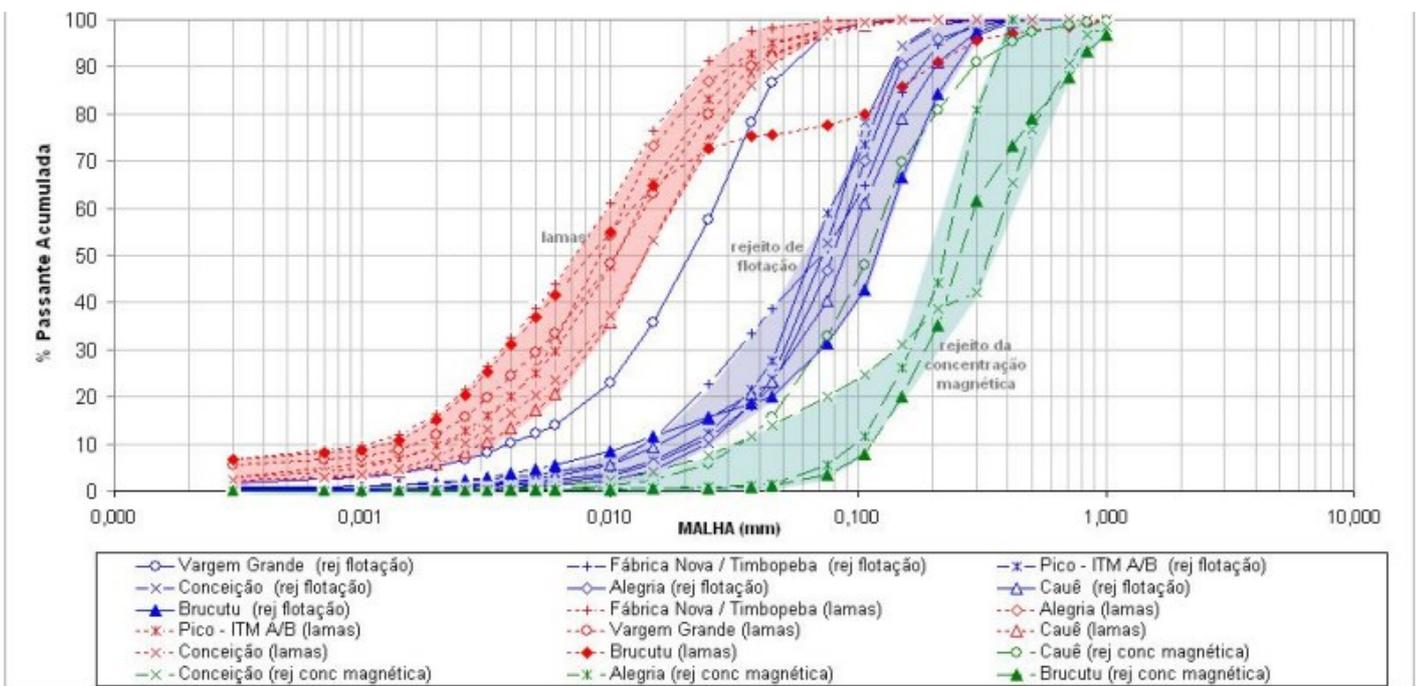
Tabela 1 – Rejeitos de minério de ferro gerados de acordo com o método de concentração empregado

Fração	Método de Concentração	Produto	Rejeitos
(-31,5+6,3) mm	-	Granulado	-
(-6,3+1) mm	jigagem	<i>Sinter feed</i>	Rejeito de jigagem
(-1+0,15) mm	Concentração magnética ou espirais		Produto não magnético ou rejeitos espirais
(-0,15) mm	Concentração magnética e/ou flotação	<i>Pellet feed</i>	Produto não magnético e/ou rejeito de flotação
(-0,010) mm	-	-	Lamas

Fonte: Araújo, (2006).

No trabalho de Guimarães (2011) foi avaliada a distribuição granulométrica dos rejeitos referentes às usinas de beneficiamento de minério de ferro localizadas no QF. Essas usinas referem-se as minas de: Alegria, Brucutu, Cauê, Conceição, Fábrica Nova/Timbopeba, Pico – ITM A/B e Vargem Grande. Como apresentado na Figura 2 a granulometria do rejeito de flotação da usina de Vargem Grande apresentou a granulometria mais fina, o diâmetro médio (D_{50}) das partículas foi de 20 μm e, o que apresentou granulometria mais grosseira foi a usina de Brucutu, $D_{50} = 130 \mu\text{m}$. As demais usinas apresentaram D_{50} entre 70 e 90 μm . Pode-se observar que entre 38% e 60% das lamas possuem granulometria inferior a 10 μm . O comportamento da curva granulométrica foi semelhante para todas as usinas, exceto para Brucutu. A lama de Brucutu apresentou maior porcentagem de grossos que as demais, cerca de 20% do material ficou retido em 100 μm . Em relação ao rejeito de concentração magnética a usina de Cauê apresentou uma curva granulométrica mais fina, $D_{50} = 100 \mu\text{m}$, comparada as usinas de Conceição, Alegria e Brucutu com D_{50} variando entre 200 μm e 300 μm . Por fim, de modo geral, verificou-se uma crescente ao comparar as curvas granulométricas das lamas, rejeitos de flotação e rejeitos de concentração magnética.

Figura 2 – Curvas granulométricas dos principais rejeitos das usinas de concentração de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero da empresa Vale S/A



Fonte: Guimarães, (2011).

No trabalho realizado por Souza (2020) foi estudado o rejeito coletado a partir da etapa de deslamagem, *overflow* do circuito de hidrociclones, de uma usina de minério de ferro

localizada no Quadrilátero Ferrífero. A análise granulométrica foi realizada utilizando o método de granulometria a *laser* e o material que se encontrava abaixo de 45 μm foi analisado por meio do Cyclosizer. Desse modo, a partir da granulometria a *laser* verificou-se que o diâmetro médio das partículas do rejeito é de 51,35 μm . Além disso, os resultados obtidos com o Cyclosizer indicaram que 43,5% da porção abaixo de 45 μm possui granulometria inferior a 22,2 μm e 19,1% inferior a 10 μm .

No estudo de Ávila (2018) foi avaliada a granulometria de diferentes rejeitos de flotação catiônica reversa provenientes de rochas itabiríticas oriundas de diferentes mineradoras do QF em Minas Gerais. As amostras foram nomeadas como AM1, AM2, AM3, AM4, AM5, AM6 e AM7. A análise granulométrica foi realizada pela técnica de Mineralogia Quantitativa Eletrônica. Verificou-se que a curva granulométrica das amostras AM1 e AM5 são bem semelhantes apesar de serem de diferentes localidades, bem como AM4 e AM7. Além disso, a curva granulométrica das sete amostras evidencia que o D_{50} varia entre 25 μm e 80 μm . As amostras AM4 e AM7 possuem uma distribuição mais fina, cerca de 60% das partículas tem tamanho inferior a 37 μm , sendo 10% deles abaixo de 8 μm . Em contrapartida, as amostras AM1 e AM5 possuem maior massa de partículas grossas, com 20% e 14% de massa retida na abertura de 149 μm , respectivamente.

A partir dos estudos apresentados, foi observado que há variações nas curvas granulométricas nos rejeitos de diferentes localidades. Essas variações estão principalmente relacionadas com à composição mineralógica dos resíduos, pois dependendo das fases minerais presentes, os rejeitos podem ser mais friáveis ou mais compactos. Ademais, as operações de beneficiamento são projetadas em conformidade com o grão de liberação do mineral de interesse, bem como em relação as associações das fases minerais e as suas propriedades diferenciadoras.

4.2 Caracterização Mineralógica

Os depósitos de minério de ferro no Brasil apresentam composição química relativamente homogênea, porém os minerais possuem uma elevada variedade na textura devido aos diferentes eventos geológicos envolvidos na formação das jazidas (Cerqueira, 2023). Os eventos geológicos ocorridos na formação dos corpos minerais geraram depósitos com mineralogia e seqüências de cristalização distintas e, por consequência, há diferenças na

morfologia, no tamanho, na textura dos minerais, na distribuição e arranjos de cristais, como também nos poros das fases minerais presentes (Morris, 1980 *apud* Cerqueira, 2023).

A hematita, Fe_2O_3 , é o principal mineral presente nos minérios de ferro no Brasil. Na natureza é encontrada tanto isolada quanto associada com outras partículas. É comum a hematita estar associada ao quartzo, goethita e limonita. No Quadrilátero Ferrífero a hematita é encontrada desde cristais lamelares e bem orientadas até cristais granulares com granulação média a fina (Cerqueira, 2023).

Além de caracterizar e quantificar os minerais de interesse de uma jazida é importante para etapa de processamento mineral caracterizar e quantificar também os minerais de ganga visando avaliar o impacto desses na rota tecnológica de beneficiamento (Cerqueira, 2023). No trabalho de Zinato *et al.* (2013) foi quantificado as principais espécies minerais que compõe a assembleia mineralógica de rejeito de uma mina de minério de ferro localizada no Quadrilátero Ferrífero. O ensaio de minerografia quantitativa volumétrica determinou as espécies por faixa granulométrica. A hematita granular monocristalina é predominante no rejeito de minério de ferro com 66,75% em volume, seguida do quartzo com 16,60% e goethita com 3,38%. Ademais, verificou a presença de hematita lamelar monocristalina, hematita granular policristalina e hematita granular monocristalina, principalmente no passante em 44 μm . Os autores verificaram que em faixas inferiores a 44 μm , o quartzo e os minerais de ferro têm liberação de 100%.

No estudo realizado por Wolff (2009) foi feita a caracterização de rejeitos de minério de ferro das minas da Vale S/A no QF. A Tabela 2 apresenta os minerais associados aos rejeitos de minério de ferro identificados por difratometria de raios X de amostras dessas usinas. A análise mineralógica foi realizada por faixa e global. As faixas granulométricas foram: + 15 μm , -15+10 μm e -10 μm . Com os resultados foi constatado que à medida que a granulometria diminui as intensidades dos picos de quartzo diminuem, os picos de goethita elevam-se, sendo mais intensos na faixa de menor granulometria (-10 μm) e os picos da caulinita também são intensificados.

Tabela 2 – Fases mineralógicas de lamas oriundas de diferentes minas da empresa Vale S/A localizadas em Minas Gerais

Amostras	Fases Mineralógicas
Mina Brucutu (<i>Underflow</i> do espessador de rejeitos)	Hematita, Goethita, Quartzo, Moscovita e Gibbista.
Mina Conceição (<i>Underflow</i> do espessador de rejeitos)	Hematita, Goethita, Caulinita, Quartzo, Talco e Moscovita.
Mina Cauê (<i>Underflow</i> do espessador de rejeitos)	Hematita, Goethita, Caulinita, Quatzo, Talco, Gibbsita e Moscovita.
Mina Fabrica Nova (<i>Underflow</i> do espessador de rejeitos)	Hematita, Goethita, Caulinita, Quartzo, Gibbsita e Moscovita.
Mina de Alegria IBII e IBIII (Rejeito de hematita: <i>underflow</i> do espessador)	Hematita, Goethita, Caulinita, Quartzo, Gibbsita e Moscovita.
Mina de Alegria IBII e IBIII (Rejeito de itabirito: <i>underflow</i> do espessador)	Hematita, Goethita, Caulinita, Quartzo, Gibbsita e Moscovita.

Fonte: Wolff, (2009).

Outros estudos também evidenciam a presença majoritária de quartzo e hematita no rejeito de minério de ferro. Bezerra (2017) caracterizou mineralogicamente amostra oriunda da etapa de deslamagem da usina Conceição II. A análise mineralógica quantitativa pelo método de *Rietveld* apresentou 50,6% de hematita, 31,5% de quartzo, 9,5 % de caulinita, 4,2% de Goethita, 1,5 % Biotita 1M Mica, 1,3 % de Clorita e 1,3% de Talco.

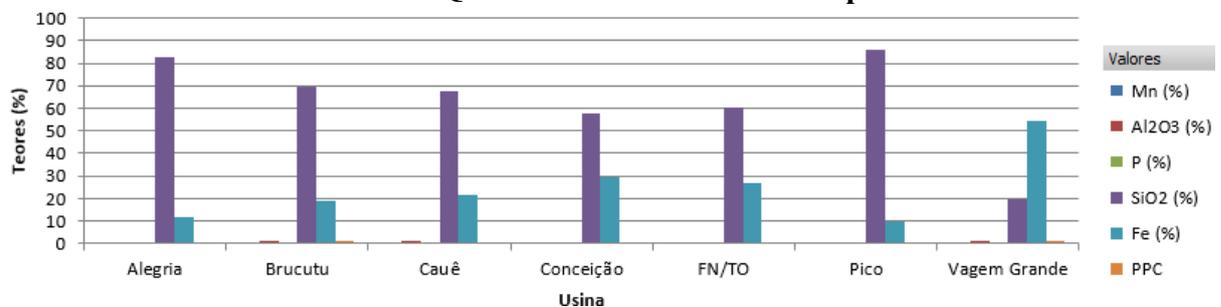
No estudo de Cerqueira (2023) dois diferentes rejeitos foram avaliados, o *underflow* de espessadores de lama da usina de Conceição II e o *underflow* de espessadores da mina de Germano. Para a lama oriunda de Conceição II a análise mineralógica quantitativa pelo método de *Rietvel* apresentou 45,7% de quartzo, 43,6% de hematita, 9,3% de caulinita e 1,4% de dolomita. Em contrapartida, para lama oriunda da mina Germano apresentou 36,2% de hematita, 33,1% de goethita, 17% de caulinita e 13,7% de quartzo. Ao comparar os minerais contidos no rejeito de minério de ferro oriundo da usina Conceição II no trabalho de

Cerqueira e no trabalho de Bezerra é observado que os minerais majoritários são o quartzo, a hematita e a caulinita.

4.3 Caracterização Química

Guimarães (2011) realizou análise química quantitativa utilizando a técnica de espectrometria de plasma. De maneira geral, as seguintes espécies químicas estavam presentes nos rejeitos: sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), ferro (Fe), manganês (Mn) e fósforo (P). A Figura 3 apresenta os teores para os rejeitos de flotação e é possível observar que os teores de sílica e ferro são os mais elevados. A usina de Vagem Grande apresentou o maior teor de ferro (54,37%) e a usina do Pico apresentou maior teor de sílica (86,02%). Ademais, o maior teor de Mn foi em Vagem Grande (0,204%), alumina em Brucutu (1,38 %). O teor de alumina em Vagem Grande e Cauê foram próximos de Brucutu, 1,19 % e 1,09%, respectivamente.

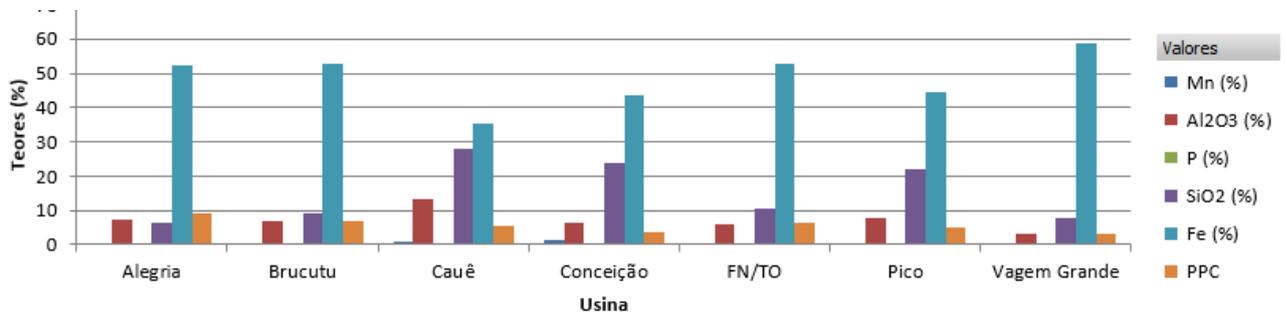
Figura 3 – Composição química dos rejeitos de flotação das usinas de concentração de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero da empresa Vale S/A



Fonte: Adaptado de Guimarães, (2011).

Para o rejeito de concentração magnética os teores de sílica foram elevados para as quatro usinas: Alegria, Brucutu, Cauê e Conceição. O maior teor de sílica foi para a usina de Alegria, 79,44% e o menor teor foi para usina de Brucutu, 45,41%. Além disso, a segunda espécie química com maior teor é o ferro representando 36,7% da composição do rejeito de Brucutu e 13,18% em Alegria. Em contrapartida as lamas, apresentaram, maior diversificação entre os teores das espécies químicas presentes, como apresentado na Figura 4. Foi constatado um elevado teor de ferro entre as usinas, bem como teor expressivo de alumina e sílica. O teor de ferro em Brucutu, Fazendão/Timbopeba, Vagem Grande e Alegria é superior a 50 %. E o teor de alumina entre as usinas variou entre 13,11% e 3,26%.

Figura 4 – Composição química das lamas das usinas de concentração de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero da empresa Vale S/A



Fonte: Adaptado Guimarães, (2011).

No trabalho de Souza (2020) foi caracterizado o rejeito coletado a partir da etapa de deslamagem, *overflow* do circuito de hidrociclones, de uma mina de ferro localizada no Quadrilátero Ferrífero. A composição química foi determinada por meio da técnica de fluorescência de raios X, de volumetria e de gravimetria. O rejeito apresentou 47,92% de teor de SiO₂, 32,29% de Ferro e 2,760% de Alumina e 0,210% de Manganês. Além desses elementos o rejeito possui em sua composição, Fósforo (P), Óxido de cálcio (CaO), Óxido de magnésio (MgO), Dióxido de titânio (TiO₂), Óxido de sódio (Na₂O), Óxido de potássio (K₂O), Óxido de cromo III (Cr₂O₃) e Óxido de ferro (FeO).

Ávila (2018) utilizou diferentes rejeitos de flotação catiônica reversa para concentração do mineral-minério de ferro provenientes de rochas itabiríticas oriundas de diferentes mineradoras do QF. Foram sete amostras e elas foram nomeadas de AM1 a AM7. A composição química também foi determinada por meio da técnica de fluorescência de raios X, de volumetria e de gravimetria. Todas as sete amostras apresentaram em sua composição maior teor de SiO₂ em comparação com as demais espécies químicas. As amostras AM1 e AM5 apresentaram o maior teor de SiO₂, 81,57% e 79,36%, respectivamente. Entretanto, a amostra AM4 apresentou o menor teor, 51,31%.

5 FILTRAGEM

A filtragem refere-se a uma operação unitária que tem por finalidade a separação sólido-líquido. A filtragem de polpas minerais pode ser realizada de duas maneiras: por colmatação, processo em que a polpa percola uma matriz porosa rígida que tem por finalidade a retenção

das partículas sólidas. E por formação de torta, processo em que as partículas sólidas, diferente do processo de colmatação, são acumuladas no exterior do meio filtrante formando um leito de partículas (Luz; Sampaio; França, 2010).

A teoria clássica de filtração é descrita por uma relação empírica denominada como lei de Darcy (Equação 1). Essa teoria parte do princípio que o fluxo de líquido ocorre através de um meio poroso (torta) não compressível. A Equação 1 evidencia que a taxa volumétrica de filtrado que atravessa o meio filtrante, é diretamente proporcional à área de filtração, à permeabilidade do leito e ao diferencial de pressão. Em contrapartida, a taxa volumétrica de filtrado é inversamente proporcional à espessura do conjunto – torta e meio filtrante – bem como da viscosidade do filtrado (Friedmann; Lustenberge; Windhab, 2003; Valadão, 2008).

$$Q = \frac{K \cdot \Delta P \cdot A}{\mu \cdot L} = \frac{\Delta P \cdot A}{\mu \cdot R} \quad (1)$$

Sendo que,

Q = taxa volumétrica de filtrado;

K = permeabilidade do leito (meio filtrante e torta);

ΔP = diferencial de pressão através da torta e do meio filtrante;

A = área transversal ao fluxo (área filtrante);

μ = viscosidade do filtrado;

L = espessura do leito;

R = L/K = resistência oferecida ao leito de filtrado.

A equação Koseny (Equação 2) tem como premissa fluidos não compressíveis e escoamento laminar. A Equação 2 relaciona a permeabilidade do leito com a área superficial específica das partículas minerais e a porosidade da torta (Valadão, 2008).

$$K = \frac{\rho_s \cdot \varepsilon^3}{K_c \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot S E^2} \quad (2)$$

Sendo que,

K = permeabilidade do leito (coeficiente de filtração);

ρ_s = massa específica dos sólidos;

ε = índice de vazios do leito;

K_c = constante de Koseny que depende da granulometria, forma e porosidade;

SE = área superficial específica.

Pode se observar, correlacionando a Equação 2 com a Equação 1, que o fluxo de filtrado (Q) decaí com o aumento da superfície específica, tendo em vista que a área superficial específica (SE) é inversamente proporcional a permeabilidade do leito (K). Desse modo, conclui-se que polpas com partículas muito finas dificultam o processo de filtragem de fluidos não compressíveis e com escoamento laminar (Souza, 2020).

Outrossim, a equação de Ergun (Equação 3) refere-se ao modelamento geral do escoamento de um fluido. Como pode ser visto pela Equação 3, a equação de Ergun é composta por duas parcelas, a primeira representa os termos viscosos representando o escoamento laminar e a segunda parcela corresponde aos termos inerciais, os quais representam o escoamento turbulento (Nunes, 2011).

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2 * \mu}{(\phi * d_p)^2 * \varepsilon^3} * q + 1,75 * \frac{(1-\varepsilon) * \rho}{(\phi * d_p) * \varepsilon^3} * q^2 \quad (3)$$

Sendo que,

ΔP = diferencial de pressão através da torta e do meio filtrante;

L = espessura do meio poroso (meio filtrante + torta);

μ = viscosidade do filtrado (viscosidade dinâmica do fluido);

ρ = densidade do filtrado;

q = velocidade superficial do filtrado;

ε = porosidade no leito;

ϕ = esfericidade das partículas;

d_p = diâmetro efetivo das partículas (diâmetro de Stokes);

150 = constante de Kozeny-Carman;

1,75 = constante de Burke-Plummer.

A Tabela 3 apresenta as variáveis que interferem no desempenho da filtração. Estas estão divididas em 4 grupos: sólidos; torta/filtrado; polpa; e equipamento.

Tabela 3 – Variáveis que afetam a taxa volumétrica de filtração e o processo

Sólido	Torta/Filtrado	Polpa	Equipamento
área superficial específica;	espessura da torta;	taxa de alimentação;	ciclo de Filtração;
distribuição granulométrica;	porosidade do leito;	porcentagem de sólidos;	nível de vácuo e/ou sopro e/ou pressão;
forma geométrica;	permeabilidade do leito;	temperatura;	meio filtrante;
propriedades de superfície;	viscosidade do filtrado;	viscosidade;	geometria dos componentes;
massa específica.		pH;	nível de agitação.
		adição de reagentes auxiliares;	
		presença de sais dissolvidos.	

Fonte: Guimarães, (2011).

O ciclo de filtração na indústria mineral é composto por três etapas: formação de torta, secagem e descarga da torta. Ao correlacionar as variáveis contidas na Tabela 3 pode-se concluir que ao reduzir o ciclo de filtração aumenta a taxa de filtração, entretanto, pode ocorrer o aumento da umidade da torta, ou a obtenção de tortas extremamente finas que podem afetar a etapa de descarga. Outro ponto é a concentração de sólido, polpas com maior porcentagem de sólidos favorece a filtração, visto que ao aumentar a concentração de sólidos acarreta uma maior massa específica e, por conseguinte, eleva o coeficiente de filtração que é diretamente proporcional a taxa de filtração. Vale destacar que a maioria dos filtros, principalmente, os filtros a vácuo, requerem uma concentração de sólidos mínima na alimentação. Por isto, geralmente, é realizado o adensamento da polpa mineral por espessadores ou ciclones antes da filtração (Sampaio; França; Braga, 2007; Valadão, 2008).

O aumento da temperatura da polpa, apesar de não ser usual por ser excessivamente dispendioso favorece a filtração, pois reduz a viscosidade da polpa. Além disso, partículas com maiores faixas granulométricas formam tortas com interstícios maiores. Isso permite o líquido atravessar o leito com maior facilidade aumentando a velocidade de filtração e

reduzindo a umidade da torta. O valor de pH da polpa está relacionado com o estado de dispersão das partículas, quanto menor a dispersão maior será o fluxo de filtrado. Além disso, vale destacar que a filtração de lamas muitas vezes é realizada adicionando flocculantes nos tanques, a fim de reduzir o efeito negativo das lamas no processo de filtração, visto que a lama tende a entupir os poros do meio filtrantes (Sampaio; França; Braga, 2007; Friedmann; Lustenberge; Windhab, 2003).

O funcionamento dos filtros é realizado por meio de uma força que atua sobre as partículas sólidas. Essa pode ser a força da gravidade, a força centrífuga, a realização de vácuo, a pressão aplicada, a combinação de vácuo e pressão ou a ação de capilares de meios porosos cerâmicos. Os filtros podem ser classificados de acordo com a força motriz e a Tabela 4 apresenta os tipos de filtros, suas principais características e os respectivos modelos de filtros.

Tabela 4 – Tipos de filtros e principais características

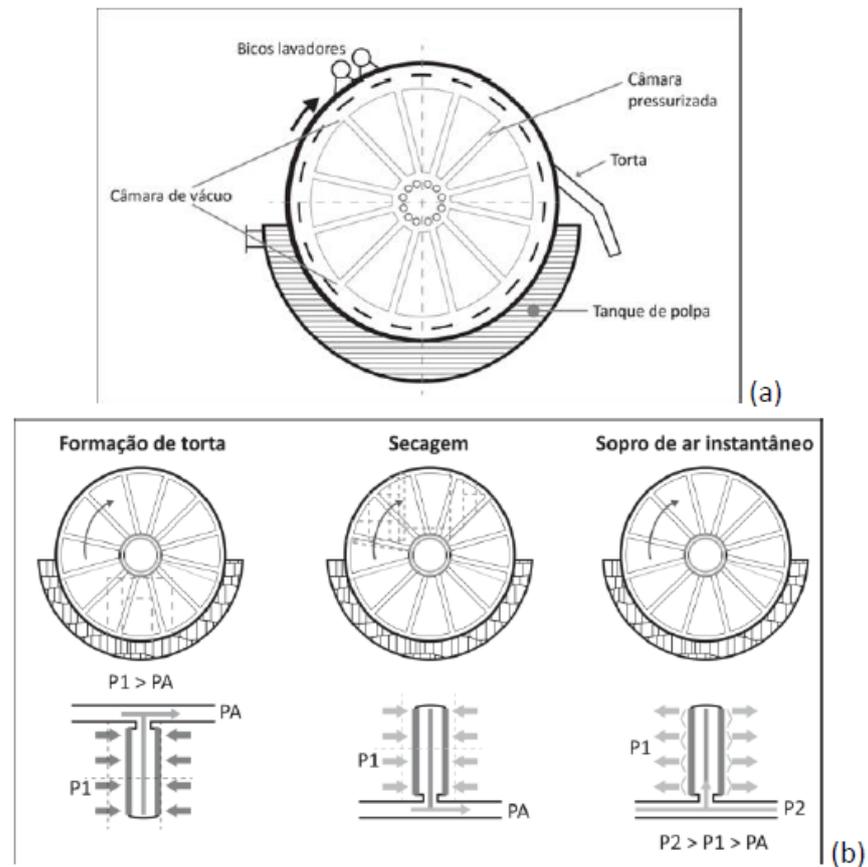
Tipos	Características	Modelos de Filtros
Filtração a vácuo	É criada uma pressão negativa debaixo do meio filtrante.	Filtro de tambor, de disco convencional, filtro horizontal de mesa e filtro horizontal de correia.
Filtração sob pressão	Uma pressão positiva é aplicada na polpa.	Filtro prensa horizontal,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

Fonte: Modificado de Guimarães, (2011).

5.1 Filtragem a vácuo

Os filtros a vácuo possuem o mesmo princípio físico de funcionamento e são operados de forma contínua e cíclica. A filtragem ocorre devido a diferença de pressão entre o tanque de polpa e a superfície do meio filtrante. Essa diferença de pressão é criada por um sistema de vácuo. A Figura 5 apresenta um diagrama simplificado e esquema típico de operação de um filtro rotativo a vácuo. Nos filtros rotativos de tambor e de discos, o meio filtrante recobre toda a superfície do equipamento. A Figura 5 apresenta um dos discos de um filtro de disco convencional. Nesse tipo de equipamento os centros dos discos verticais são ligados a um mesmo eixo, denominado como eixo central. A fim de evitar a sedimentação, a polpa mineral é mantida em suspensão no tanque por meio do uso de agitadores. O disco é setorizado em três regiões – zona de formação, zona de secagem e zona de descarga. A zona de formação refere-se à região do disco imerso na polpa mineral em virtude da rotação do eixo central. As partículas sólidas são aspiradas continuamente formando as tortas filtrantes, isto ocorre em virtude da diferença de pressão entre a polpa (PA) e a pressão sob o meio filtrante (P1). Com a rotação do eixo central, a região do disco em que formou a torta é submersa e a pressão P1 vai se igualando a PA. Esta região é denominada zona de secagem, pois a torta é succionada para retirar mais umidade. A descarrega da torta ocorre pela ação de um sopro de ar. A pressão ocasionada pelo sopro de ar, P2, é superior a pressão a P1 (França; Massarani, 2018).

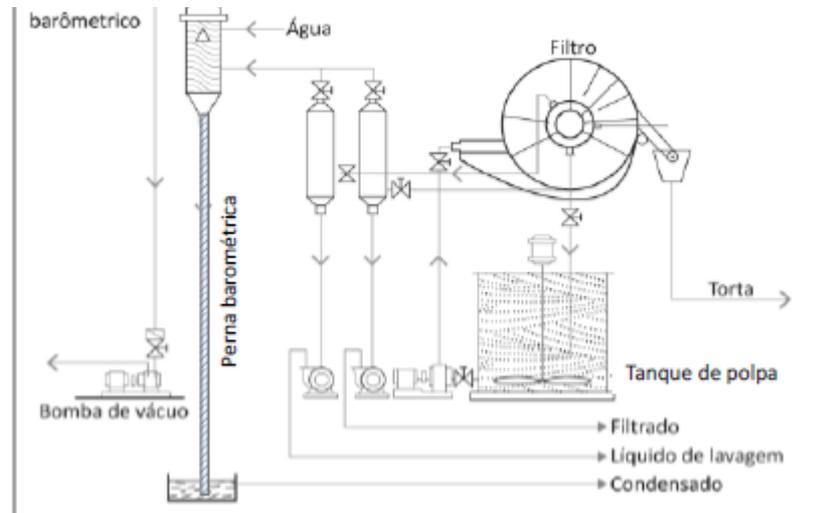
Figura 5 – Diagrama simplificado (a) e esquema típico de operação de filtro rotativo a vácuo (b)



Fonte: França; Massarani, (2018).

Os filtros rotativos a vácuo produzem tortas secas com espessuras inferior a 1 cm e operam com uma pequena diferença de pressão, inferior a 0,8 atm. A Figura 6 apresenta o fluxograma de instalação industrial com filtro rotativo a vácuo. O circuito de filtragem é composto pelos filtros, sistema de transporte da torta e transporte do filtrado, linhas de vácuo e bombas de vácuo, como apresentado na Figura 6. Como pode ser observado a linha de vácuo é composta por um trecho em anel, no qual conecta os filtros com o vaso separador. Do vaso separador saem duas tubulações: uma para as bombas a vácuo e outra para o tanque de condensado. Vale destacar que a altura da tubulação que conectada ao tanque de filtrado deve ser maior que a coluna de água correspondente à depressão do circuito do vácuo (Luz; Sampaio; França, 2010).

Figura 6 – Fluxograma de instalação industrial com filtro rotativo a vácuo

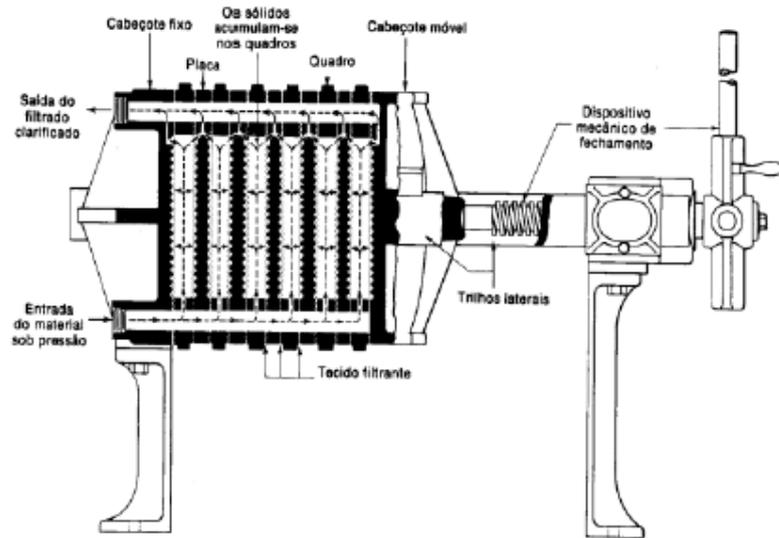


Fonte: França; Massarani, (2018).

5.2 Filtragem sob pressão

Os filtros prensas são operados por batelada e podem ser do tipo câmaras, tipo membranas e filtros prensas com quadros e placas filtrantes (Souza, 2020). A Figura 7 apresenta o esquema de operação de um filtro prensa com quadro e placas filtrantes. O equipamento é constituído basicamente por uma estrutura fixa unida por duas barras, a cabeça móvel e as placas revestidas com o meio filtrante. O filtro é composto por uma grande quantidade de placas de filtração e, como pode ser observado na Figura 7 as placas estão instaladas entre as cabeças - fixa e móvel (França; Massarani, 2018).

Figura 7 – Esquema de um filtro prensa em operação



Fonte: Foust, (1982).

Como ilustrada pela Figura 7 a polpa alimenta simultaneamente o conjunto de câmaras. A torta é formada junto ao meio filtrante e a etapa de filtração é concluída quando a torta ocupa todo o espaço dos quadros. O filtrado percola o meio filtrante e ao escoar pelas ranhuras dos quadros são encaminhados para fora do filtro. Na etapa de filtragem, propriamente dita, as pressões de operação variam entre 7 e 10 bar, e para auxiliar no desaguamento da torta é injetado ar comprimido. Por fim, a torta passa por um processo de lavagem, posteriormente o filtro é aberto e a torta é descarregada. Além disso, simultaneamente com a descarga da torta, o meio filtrante é submetido à jatos de água de alta pressão para manter a permeabilidade do tecido e estender sua vida útil. Vale destacar que o filtro prensa produz tortas com espessuras variando entre 25 e 40 mm (França; Massarani, 2018).

5.3 Filtragem hiperbárica

Essa categoria de filtros opera a partir da combinação de vácuo e pressão. Os filtros de tambor e discos são instalados em um vaso de pressão o que possibilitam os filtros hiperbáricos a operarem sob pressões de até 6 bar. Devido a possibilidade de operarem sob pressões mais elevadas que os filtros à vácuo é possível obter uma produção de tortas cerca de

três vezes maior que as obtidas com o filtro a vácuo e tortas com umidade bem mais baixa. Ademais, possuem grande aplicação no desaguamento de partículas finas floculadas, gerando tortas com umidade em torno de 10% e baixa turbidez. A Figura 8 apresenta a parte interna de um filtro hiperbárico de disco, a imagem mais à esquerda, a, mostra a parede do vaso de pressão e a imagem mais à direita, b, apresenta os discos conectados em paralelo sobre o eixo horizontal do filtro (França; Massarani, 2018).

Figura 8 – Filtro hiperbárico de disco: (A) visão frontal da parte interna do filtro (B) visão lateral

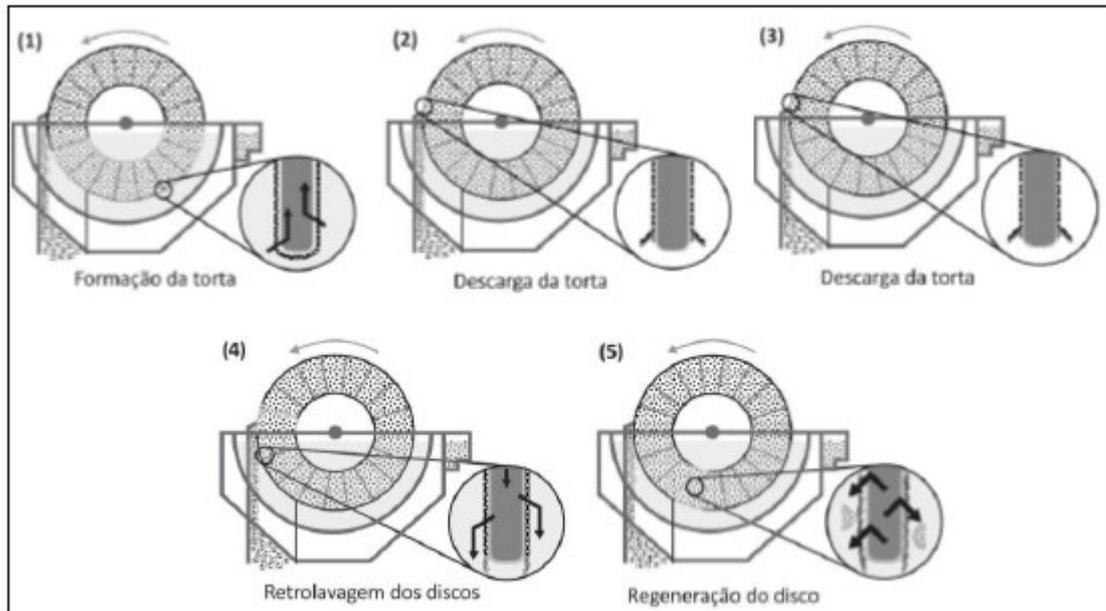


Fonte: França; Massarani, (2018).

5.4 Filtragem capilar

A filtragem capilar baseia-se no uso de materiais cerâmicos em substituição dos tecidos filtrantes. As placas cerâmicas empregadas na confecção de filtros de discos cerâmicos são, em geral, produzidas em alumina sinterizadas com microporos uniformes, com tamanho médio de 1,7 μm . O filtro de disco cerâmico tem um funcionamento semelhante ao de disco a vácuo, como apresentado na Figura 9, a primeira etapa do processo é a formação de torta. Nessa etapa, a estrutura microporosa da região do disco submerso na polpa drena o líquido através de seus poros por ação capilar, sob vácuo. Vale salientar que o nível de vácuo pode atingir até 0,95 bar. Em seguida, o disco é submetido a descarga da torta, retrolavagem dos discos e regeneração de seus microporos (França; Massarani, 2018).

Figura 9 – Diagrama esquemático com as etapas operacionais de filtro de disco cerâmico



Fonte: França; Massarani, (2018).

6 EFEITO DE PARÂMETROS QUE AFETAM A FILTRAGEM

Mamghaderi *et al.* (2021) avaliou os efeitos do pré-tratamento químico em rejeitos de minério de ferro no processo de filtragem. O rejeito é oriundo da planta de beneficiamento Shahrak no Iran. A caracterização mineralógica identificou a presença de hematita, goethita, calcita, quartzo, dolomita, talco e moscovita. Além disso, 80% dos sólidos apresentam tamanho inferior a 41 μm e a área superficial de 1,55 m^2/g . O ponto zero de carga (PZC) foi obtido em pH 6,35.

Os testes foram realizados em escala de bancada usando a técnica de *Leaf Test* para simular a filtragem a vácuo. Avaliou-se o pH, bem como o uso e a dosagem de flocculantes, de coagulantes e de surfactantes. Todos os testes de filtragem foram conduzidos mantendo constantes os parâmetros físicos: tecido do filtro de propileno; 45% de sólidos; 60 kPa de pressão; e 5,6 mm de espessura da torta.

Nos experimentos realizados para avaliar o pH os reagentes utilizados foram o hidróxido de sódio (NaOH), o carbonato de cálcio (CaCO_3) e o ácido clorídrico (HCl). A polpa mineral possui pH natural igual a 7,8 e os valores de pH avaliados foram: 4,6; 7,8; 9 e 11. Com os resultados obtidos nos ensaios, foi constatado que em pH acima de 6,35, pH do PZC, os cátions (íons de cálcio, Ca^{2+} , e de sódio, Na^+) são adsorvidos, devido a carga negativa da

superfície das partículas da polpa mineral e, por conseguinte, ocorre a neutralização das cargas superficiais dos sólidos e a compressão da dupla camada elétrica. Em contrapartida, em pH abaixo do PZC ocorre o aumento da carga superficial das partículas, por consequência, a força de repulsão é elevada entre as partículas o que desfavorece a agregação e reduz a eficiência na filtração.

Em função disso, a partir do experimento de filtração com pH 12 ajustado com CaCO_3 e NaOH constatou-se uma redução da resistência da torta, de 135×10^{10} kg/m para 50×10^{10} kg/m e 101×10^{10} kg/m, respectivamente. E a duração do experimento de filtração reduziu de 15 min para 7 e 12 min, respectivamente. A eficiência na filtração utilizando o carbonato de cálcio pode ser explicada por meio da observação feita a partir da pesquisa feita por Basnayaka, Subasinghe e Albijanic (2018), na qual foi concluído que a adição de íons de cálcio reduz significativamente a resistência de tortas em que a composição do sólido possui argilominerais. Os íons Ca^{2+} substituem os íons monovalentes associados com o subgrupo mais abundante dos argilominerais, a montmorilonita. Esse mineral é constituído por duas folhas tetraédricas de sílica e uma folha central octaédrica de alumina, as quais são unidas por átomos de oxigênio comum as folhas (Jou, 2016). A força de interação entre o íon cálcio e as partículas de montmorilonita previne sua hidratação.

Os experimentos com uso de floculantes no estudo de Mamghaderi *et al.* (2021) foi conduzido utilizando três floculantes diferentes, sendo dois aniônicos acrilamida (A-26 e A-56) e um não iônico acrilamida (N-12). Os ensaios foram realizados com a polpa com 40% de sólidos e a dosagem de floculante de 40 g/t. O teste com o floculante A-56 apresentou flocos mais rígidos, compactos e com uniformidade no tamanho dos grãos. Essas características favorece o processo de filtração por gerar tortas mais porosas quando comparado com uma polpa mineral com sólidos de diferentes tamanhos. Porém, vale destacar que partículas muito pequenas a velocidade de filtração é baixa devido à baixa permeabilidade da torta formada e partículas muito grandes a velocidade de filtração é reduzida devido o caminho de percolação de água ser maior. Desse modo, o uso do floculante aniônico A-56 reduziu a resistência da torta de 118×10^{10} kg/m para 76×10^{10} kg/m, além de um aumento de 92% na velocidade de formação da torta.

Mas em relação a umidade da torta, tanto o estudo realizado por Mamghaderi *et al.* (2021) quanto o estudo realizado por Huang *et al.* (2018) foi observado um aumento na umidade residual da torta de filtração quando comparada com a torta obtida sem o uso de floculante.

Isso ocorre em virtude do aprisionamento de umidade entre os flocos e na estrutura dos flocos.

Os ensaios a fim de avaliar o uso de surfactantes foram realizados avaliando o efeito de três surfactantes, sendo dois não iônicos - *Copolymer* OLP20-101 e *Copolymer* EP2485 - e um aniônico - *Sodium Dodecyl Sulfate* SDS. A dosagem de surfactantes foi de 200 g/ t. O melhor resultado foi utilizando o surfactante OLP20-101, visto que a resistência da torta decaiu de 135×10^{10} kg/m para 95×10^{10} kg/m e a velocidade de formação da torta foi significativa, de 0,31 mm/min para 0,50 mm/min. Esses resultados podem ser atribuídos ao aumento da hidrofobicidade das partículas causada pela adsorção dos surfactantes na superfície dos sólidos, bem como a adsorção dos surfactantes na interface sólido/líquido. Isso, acarreta a redução da tensão superficial do líquido, bem como o aumento da hidrofobicidade das partículas que, por conseguinte, facilita a passagem de água sob o meio filtrante. Entretanto, o uso dos surfactantes não foi capaz de reduzir significativamente a umidade final da torta.

Por fim, os ensaios com uso de coagulantes foram realizados utilizando 1,3 g/t de diferentes coagulantes. Os coagulantes foram: cloreto de potássio (KCl), cloreto de magnésio pentahidratado ($\text{MgCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), sulfato de magnésio (MgSO_4) e cloreto de alumínio (AlCl_3). Após a identificação do melhor coagulante foi avaliado a dosagem. O uso de 1,3 g/t de cloreto de alumínio foi a melhor condição para o processo de filtração, obtendo os seguintes resultados: o tempo de filtração decaiu de 15 min para 8 min; a velocidade de formação da torta aumentou de 0,31 para 0,50 mm/min; e a resistência da torta reduziu de 135×10^{10} kg/m para 80×10^{10} kg/m. Esse resultado pode ser explicado pela elevada atração do cátion trivalente, Al^{3+} , com a superfície das partículas da polpa carregadas negativamente quando se comparado com cátion monovalente, K^+ , e com cátion bivalente, Mg^{2+} . Além disso, vale destacar que após a adição de 1,3 g/t de AlCl_3 o pH da polpa ficou em torno de 6,3. Isso indica que a carga superficial das partículas da polpa foi completamente neutralizada, tendo em vista que no PZC o pH é 6,35. Além disso, Mamghaderi *et al.* (2021) não constatou alteração significativa na umidade das tortas mesmo variando a dosagem e o tipo de coagulante.

Dias *et al.* (2003) também buscou avaliar o efeito de reagentes químicos como pré-tratamento na filtração a vácuo de ultrafinos de minério de ferro. As amostras são oriundas do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. A partir da caracterização mineralógica da amostra foi observado que sua assembleia mineralógica é constituída majoritariamente por hematita e, em menor quantidade é composta por goethita e quartzo. Isso é confirmado pela

caracterização química, visto que o teor de Fe_2O_3 foi de 64,7%. Ademais, outros compostos químicos foram identificados: SiO_2 (2,12%), Al_2O_3 (2,38%), Mn (0,335%) e P (0,074%). E a área superficial foi de 0,2693 m^2/g .

Os ensaios de filtração foram realizados em escala de bancada e as condições operacionais foram: tecido filtrante de poliamida; 65% em peso de sólidos na polpa; 64,5 kPa de pressão; pH da polpa 7,6; e 15 mm de espessura da torta. Os reagentes empregados foram: um floculante aniônico de alto peso molecular – Flonex 9076/Floeger; e dois surfactantes – CP-00DA038/Nalco (mistura de éster e álcool alifático) e Aerodri 100/Cytec (mistura de éster e etanol).

Nesse estudo Dias *et al.* (2003) avaliaram o efeito do pH, do floculante, dos surfactantes e da combinação entre surfactante e floculante. Os resultados obtidos foram semelhantes ao estudo de Mamghaderi *et al.* (2021). Em relação ao efeito do pH, o PZC da amostra foi determinado em pH 7,2 e a melhor condição de filtração é justamente no pH próximo do pH de neutralização das cargas superficiais das partículas. Os testes envolvendo o uso de floculante evidenciaram a redução no tempo de formação da torta e na resistência da torta, entretanto verificou-se um aumento significativo na umidade final da torta e na porosidade. O emprego de surfactantes separados e combinados com o floculante não reduziu significativamente a umidade final da torta.

Para mais, a Tabela 5 apresenta dados obtidos na literatura de estudos de filtração de rejeitos de minério de ferro provenientes de usinas de beneficiamento localizadas no QF. Como pode ser observado é apresentado o tipo de rejeito, a caracterização física e química, as condições operacionais de filtração, bem como os resultados obtidos em relação a umidade e a taxa unitária de filtração (TUF).

Tabela 5 – Estudos para avaliar o desempenho da filtragem de rejeitos oriundos de usinas de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais

Referência	Tipo de Rejeito	Caracterização		Filtragem					
		Física	Química (%)	Tipo	Agente Auxiliar	Lama e Rejeito Arenoso (%)	Percentual sólido (%)	Umidade (%)	TUF (Kg/m ² h)
Neto; Rodrigues, (2018)	Rejeito arenoso e lama (<i>overflow</i> de ciclone de deslamagem pré-flotação)	Rejeito Arenoso (A): D60 = 45 µm; D10 = 15 µm.	Rejeito Arenoso (A): SiO ₂ - 71,51; Fe - 19,94; Al ₂ O ₃ - 0,30; MgO - 0,060; PPC - 0,33.	<i>Leaf Test</i> com placa cerâmica	-	L - 0; A - 100	55	13,12	1706,67
					-	L - 5; A - 95	55	11,27	1127,91
					-	L - 10; A - 90	55	10,6	1001,24
					-	L - 15; A - 85	55	9,73	906,67
					-	L - 25; A - 75	55	8,99	881,78
					-	L - 35; A - 65	55	8,8	802,58
		Lama (L): D60 = 15 µm; 44% das partículas estão com granulometria abaixo de 10 µm.	Lama (L): Fe - 42,83; SiO ₂ - 33,62; Al ₂ O ₃ - 2,57; TiO ₂ - 0,086; P - 0,080; MgO - 0,030; PPC - 1,88.	Teste de Funil de Buncher	-	L - 0; A - 100	55	13,68	1306,85
					-	L - 5; A - 95	55	13,26	1280,73
					-	L - 10; A - 90	55	13,95	1089,6
					-	L - 15; A - 85	55	13,7	1008,81
					-	L - 25; A - 75	55	14,08	968,18
					-	L - 35; A - 65	55	14,53	783,66
Vieira; Campos, (2015).	Rejeito (Separação magnética)	D50 = 55 µm	Fe - 15,30; SiO ₂ - 73,30; Al ₂ O ₃ - 2,71; P - 0,034; Mn - 0,077; PPC - 2,16.	<i>Leaf Test</i> com placa cerâmica	-	-	55,8	-	1000 a 600
Gomes et al., (2016).	Rejeito ultrafino (deslamagem pré-separação magnética)	D50 = 10 µm	-	Espessador e Filtro prensa horizontal	Floculante RPA-125 (Dosagem: 50 g/t)	-	34	15	128
Silva e Rettore, (2020).	Rejeito Arenoso (Flotação catiônica reversa)	Densidade = 2,90 g/ml	Fe - 12,38; SiO ₂ - 81,19; Al ₂ O ₃ - 0,15; P - 0,009; Mn - 0,001; TiO ₂ - 0,008; CaO - 0,007; MgO - 0,059; PPC - 0,14	<i>Leaf Test</i>	-	-	65	15,61	3200
				Teste Piloto (Filtro a vácuo)	Início da filtragem	-	65	14,87	3430
					Depois de 2 h			14,56	2750
					Depois de 4,8 h			13,95	2300

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como pode ser visto na Tabela 5, Neto e Rodrigues (2018) avaliaram a influência da adição de lama na filtragem a vácuo de rejeito da flotação de minério de ferro. Vale destacar que o teste de funil de *Buncher* acoplado com Kitassato é um teste típico para o dimensionamento de filtros de correia a vácuo e o *Leaf Test* com placa cerâmica é empregado para dimensionar filtros a disco com placa cerâmica. Os ensaios com funil de *Buncher* acoplado com Kitassato foram realizados mantendo pH da polpa próximo do neutro, em média pH 6,63. Os resultados apontaram um aumento no tempo de formação da torta à medida que aumenta o percentual de lama na polpa. O tempo de formação da torta foi de 13 min para a polpa sem lama e de 57 min para a polpa com 35% em massa de lama. Além disso, como pode ser observado na Tabela 5 houve uma queda na taxa unitária de filtragem com o aumento do percentual de lamas na amostra. A queda foi de 40% ao comparar a polpa integralmente composta por rejeito arenoso com a polpa com 35% de lama.

Os experimentos de *Leaf Test* com placa cerâmica foram executados com tempo de ciclo de 30 segundos. Esse tempo está dividido em tempo de formação de torta (10 segundos), tempo de secagem (16 segundos) e tempo de *backwash* (4 segundos). A área da placa cerâmica foi de 0,0135 m² e o pH da polpa foi mantido próximo do neutro, em média 6,63. Como pode ser observado na Tabela 5 também houve uma queda na taxa unitária de filtragem com o aumento do percentual de lamas na amostra. A queda foi mais acentuada que a obtida com o *Buncher* acoplado com Kitassato, o decaimento foi de 52,97% ao comparar o processo de filtragem com a polpa sem lama e com a polpa com 35% de lama. Entretanto, a umidade final da torta foi menor, mas isso era esperado devido o tipo de filtro. Por fim, vale destacar que a umidade residual de todos os testes encontram-se dentro do intervalo, 9 a 17%, empregado em empreendimentos projetados ou em operação no Brasil para o empilhamento a seco de rejeitos (Bowker; Chambers, 2015). Desse modo, apesar da queda da TUF com o aumento do percentual de lama no rejeito arenoso, os testes em escala de bancada mostram que o desaguamento das polpas com as composições avaliadas é eficiente.

Vieira e Gomes (2015) analisaram o processo de filtragem a vácuo, com filtros cerâmicos, do concentrado e do rejeito da separação magnética da empresa Ferro + Mineração S/A. Dentre os estudos apresentados na Tabela 5, esse é o rejeito que possui granulometria mais grosseira, $D_{50} = 55\mu\text{m}$, e 25% dos sólidos possuem tamanho inferior a 25 μm . No estudo, foi avaliado o tempo de estabilização do processo de filtragem a partir de uma série contínua de testes executados com o mesmo percentual de polpa e condições operacionais. A TUF iniciou com 5200 kg/ h/m² e após quinze ensaios a TUF decaiu e estabilizou na faixa de 1000 a 600 kg/

m²h. Porém, segundo Vieira e Gomes (2015), de acordo com alterações do *run of mine* (ROM) a faixa de TUF pode decair para 800 a 400 kg/m²h. A razão para essas variações com a mudança do ROM pode estar relacionada com a alteração na carga superficial das partículas de rejeito e na distribuição granulométrica. Como foi visto nos estudos anteriores o pH da polpa é um parâmetro que afeta o desempenho da filtração e, o pH ideal corresponde ao do PZC. Além disso, a não uniformidade em relação ao tamanho dos sólidos atrelado ao aumento do percentual de ultrafinos na polpa, reduz a porosidade da torta e aumenta a área superficial específica o que reduz a TUF.

Gomes, Tomi e Assis (2016) estudaram técnicas de desaguamento para o rejeito fino e ultrafino de minério de ferro oriundo da mina de Pau Branco localizada no QF para obter produtos secos aptos para o empilhamento a seco. O rejeito ultrafino apresentou granulometria inferior a 45 µm e, como apresentado na Tabela 5, possui 50% de suas partículas com tamanho abaixo de 10 µm. Além disso, vale destacar que conforme Gomes, Tomi e Assis (2016) o rejeito ultrafino de Pau Branco comparado com os rejeitos ultrafinos das outras minas na região do Quadrilátero Ferrífero é um rejeito mais grosso. Em contrapartida, o rejeito fino corresponde ao rejeito obtido na etapa de separação magnética e apresenta granulometria maior que 45 µm. Ademais, diferente do trabalho realizado por Neto e Rodrigues (2018) o desaguamento dos dois tipos de rejeitos foi realizado por técnicas diferentes. O rejeito ultrafino foi proposto o uso do espessador e, posteriormente do filtro prensa horizontal. E para o desaguamento do rejeito fino o uso de peneiras de alta frequência.

Para avaliar a eficácia da rota de desaguamento proposta, testes em escala de bancada foram realizados. Os testes de espessamento determinaram o tipo de floculante e a dosagem com o objetivo de obter flocos com tamanho adequado obtendo um *overflow* clarificado e uma boa sedimentação dos sólidos, além de corroborar com a filtração ao aumentar o tamanho dos sólidos. O melhor floculante foi o aniônico RAP125 (kemira) e a dosagem de 50 g/t.

Os testes de filtração ocorreram com filtro prensa constituído por duas placas dupla face, com área de 30 x 30 cm². As demais condições de operação foram: espessura da torta de filtração de 35 mm; polpa de alimentação, *underflow* do espessador, com 34% de sólidos; e ciclo de filtração de 20 min. Como resultado, obteve-se torta com umidade residual de 15% e taxa unitária de filtração de 128 kg/m²h. Outrossim, vale destacar que os ensaios para o rejeito fino foram satisfatórios obtendo umidade residual de 15%.

Silva e Rettore (2020) estudaram o desempenho do filtro de disco vertical para a filtração de rejeito oriundo da etapa de flotação catiônica reversa de minério de ferro. Como apresentado na Tabela 5, o rejeito apresentou elevado teor de óxido de silício, 81,19%, e densidade de 2,90 g/cm³. Densidade está próxima da densidade do quartzo, 2,65 g/cm³. Testes de filtração foram realizados em escala de bancada para definir o melhor tipo de meio filtrante e, em seguida ensaios em escala piloto foram realizados. Ambos foram realizados com 34% de sólidos e pH 7,0. Como resultados, os testes mostraram que à medida que o tempo de filtração aumenta a TUF decai. Após aproximadamente 5 h a taxa unitária de filtração reduziu cerca de 33%. Em contrapartida, a umidade final da torta não apresentou alterações significativas.

Como visto, a filtração de rejeito é impactada pela granulometria do material e, por conseguinte, rejeitos ultrafinos possuem maior dificuldade de filtração por apresentar maior resistência da torta e maior tempo de filtração. Desse modo, técnicas que otimizam o processo de filtração de rejeitos ultrafinos devem ser avaliadas. Diniz, Azevedo e Rubio (2023) discutem o efeito de nanobolhas no processo de filtração de finos de minério. Nesse sentido, foram estudados dois tipos de rejeitos de minério de ferro oriundos do Quadrilátero Ferrífero: o *overflow* no circuito de deslamagem com hidrociclones e o rejeito arenoso da etapa de flotação catiônica reversa. O rejeito ultrafino apresentou 90% de partículas abaixo de 18 µm, sendo 50% das partículas com granulometria abaixo de 5 µm e 10% abaixo de 0,3 µm. Em contrapartida, o rejeito arenoso apresentou 90% de partículas abaixo de 149 µm, sendo 50% das partículas com granulometria abaixo de 89 µm e 10% abaixo de 33 µm. Os ensaios de filtração foram realizados em escala de bancada utilizando filtro prensa com as seguintes condições operacionais: polpa com 50% de sólidos; pH = 7,5; pressão = 8 bar; e temperatura igual a 20 °C. A única variável que foi alterada foi o percentual de rejeito arenoso para compor a polpa mineral em conjunto com o rejeito ultrafino. As proporções, foram: 0, 10, 20, 30, 40 e 50% de rejeito arenoso.

Os resultados mostraram que o tempo de filtração do rejeito ultrafino de minério de ferro assistida com nanobolhas decaiu cerca de 30% quando comparado com a filtração sem a presença de nanobolhas. Entretanto, à medida que se eleva a proporção de rejeito arenoso, a diferença de tempo de filtração com e sem nanobolhas diminui de maneira gradual e significativa. Diniz, Azevedo e Rubio (2023) relataram que não houve agregação das partículas provavelmente devido à alta concentração de sólidos e a não uniformidade da distribuição granulométrica. Com isso, o principal fenômeno que explica o aumento da

velocidade de filtração e a redução do tempo de formação da torta é o aumento da hidrofobicidade das partículas. Isso ocorre, pois as nanobolhas são fortemente atraídas pelas partículas hidrofóbicas e, por consequência, elas formam uma fina camada de ar na superfície dos sólidos o que corrobora com a diminuição da força de capilaridade responsável pela retenção de água no interior da torta. A filtração da polpa com a inserção do rejeito arenoso assistida por nanobolhas não obteve alteração significativa no desempenho da filtração ao comparar com a filtração sem nanobolhas, pois a pressão de capilaridade já é menor visto que ela é inversamente proporcional ao volume dos poros.

7 CONCLUSÃO

De acordo com a revisão bibliográfica realizada neste estudo conclui-se que há variações nas propriedades físicas, químicas e mineralógicas do rejeito de minério de ferro em virtude da característica da rocha e das etapas do processamento mineral. Em particular, para os rejeitos gerados nas usinas localizadas no Quadrilátero Ferrífero, a caracterização química revela que o rejeito de flotação e o rejeito de separação magnética apresentam, em geral, teor de sílica mais elevado seguido do teor de ferro. Em contrapartida, nos rejeitos ultrafinos o teor de ferro, geralmente é mais elevado. Essa interpretação é constatada com a caracterização mineralógica, visto que grande parte dos rejeitos apresentam majoritariamente quartzo e hematita na sua assembleia mineralógica. Em relação à granulometria, observou-se que os rejeitos de separação magnética apresentam partículas com maior tamanho que os rejeitos de flotação, que, por sua vez, são maiores do que as lamas.

Ao avaliar o efeito dos parâmetros que afetam o processo de filtração foi visto que o pré-tratamento químico com floculantes, surfactantes e coagulantes aumenta a eficiência da filtração. Isso ocorre devido à modificação nas propriedades de superfície das partículas e às características da estrutura dos grãos formados. Entretanto, vale salientar que não houve alteração significativa na umidade residual da torta em nenhum pré-tratamento químico estudado e para o pré-tratamento com floculante a umidade residual aumentou. Isso ocorreu, pois moléculas de água foram aprisionadas entre os flocos e na estrutura dos flocos. Além disso, foi constatado que a melhor condição de filtração foi alcançada em pH próximo do pH do ponto zero de carga em virtude da compressão da dupla camada elétrica.

Para mais, estudos na literatura indicaram que a taxa unitária de filtração decai à medida que o tamanho das partículas do rejeito reduz. Mas, isso não inviabiliza o desaguamento de rejeitos ultrafinos, permitindo a geração de tortas com umidade residual dentro da faixa aceitável para o empilhamento a seco. Estudos, em escala de bancada, demonstraram que é possível filtrar com eficiência tanto os rejeitos ultrafinos combinados com rejeitos de partículas maiores, quanto a polpa composta exclusivamente por rejeitos ultrafinos.

REFERÊNCIAS

- ADIANSYAH, J. S. et al. A framework for a sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies. **Journal Cleaner Production**. Elsevier. v 108. p 1050–1062. 2015.
- ALVES, P. I. A. A. **Empilhamento de rejeito filtrados: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2020.
- ANM. Agência Nacional de Mineração. **Análise de Impacto Regulatório**. Sustentabilidade. Brasília: ANM, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/regulacao/analise-do-impacto-regulatorio-air/air_aproveitamento-de-esteril-rejeitos_02-2.pdf. Acesso em: 19 mar. 2024.
- ARAÚJO, A. C. **Métodos de Concentração**. Apostila Introdução ao Tratamento de Minérios. UFMG, p 108-150, 2006.
- ÁVILA, K. S. P. **Caracterização mineralógica de rejeitos de flotação de itabiritos do quadrilátero ferrífero utilizando mineralogia quantitativa eletrônica**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2018.
- BARBOSA, E. P. **Fundamentos básicos de geotecnia em mineração**. 1 ed. Platos Soluções Educacionais S.A, São Paulo: Editora Saraiva, 2021.
- BASNAYAKA, L.; SUBASINGHE, N.; ALBIJANIC, B. Influence of clays on fine particle filtration. **Applied Clay Science**. Elsevier. v. 156, p 45–52. 2018.
- BEZERRA, C. G. **Caracterização do rejeito de minério de ferro (IOT) e avaliação da sua influência no comportamento físico-químico e mecânico de pastas de cimento**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- BOWKER, L.N; CHAMBERS, D.M. The risk, public liability, & economics of Tailings Storage Facility failures. **Earthwork**. 2015.
- CERQUEIRA, E. P. **Avaliação de características mineralógicas, química e física na formação de pasta de minério de ferro**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2023.
- CONCHA, F. A. Fluid mechanics and its applications. In: **Solid-Liquid Separation in the Mining Industry**. V. 105. Springer. Cham, Switzerland, 2014.
- CRUZ, R. C. A. **Análise da disposição de rejeitos a seco relacionada ao projeto, estruturas de empilhamento e métodos de desaguamento do projeto**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2023.

DAVIES, M. Filtered dry stacked tailings – the fundamentals. **Proceedings tailings and mine waste**. Science & Engineering. p 1-11. 2011.

DIAS, C. L. P. et al. The effect of reagents on ultrafine iron ore vacuum filtration. **Filtration and Separation**. Elsevier. v. 40. p 36-39. 2003.

DINIZ, P. H. V.; AZEVEDO, A. C.; RUBIO, J. Filtration on fine mineral particles assisted by nanobubbles. **Minerals Engineering**. Elsevier. v. 204. 2023.

FITTON, T.G.; ROSHDIEH, A. The impact on slurry rheology on tailings and disposal options. In: **Proceedings of the Four Case Studies, Paper Presented at IIR Slurry Pipelines Conference**. p 20–21. 2012.

FOUST, A. S. et al. **Princípios das Operações Unitárias**. 2 ed. aum. [S. l.]: LTC, 1982.

FRANÇA, S. C. A; MASSARANI, G. Separação sólido-líquido. In: LUZ, A. B. SAMPAIO, J. A; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 6 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MTC, 2018, p 597-647.

FREITAS, C. M. et al. Da Samarco em Mariana à Vale em Brumadinho: desastres em barragens de mineração e Saúde Coletiva. Espaço temático: Mineração e desastres ambientais. **CSP Caderno de Saúde Pública**. 2019.

FRIEDMANN, T.; LUSTENBERGE, C.; WINDHAB, E. Filtration experiments with compressible filter cakes in centrifugal fields with superimposed static pressure. **International Journal of Mineral Processing**. Elsevier. v. 73. p 261-267. 2004.

GOMES, M. A. **Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2009.

GOMES, R. B.; TOMI, G.; ASSIS, P. S. Iron ore tailings dry stacking in pau branco mine, Brazil. **Journal of Materials Research and Technology**. 2016. Elsevier. v. 5. p 339-344. 2016.

GUIMARÃES, Nilton Caixeta. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade de Minas Gerais, Minas Gerais, 2011.

HERNANDEZ, C. A. O; ARAÚJO, A. C; VALADÃO, G. E. S; AMARANTE, S. C. Pasting characteristics of hematite/quartz systems. **Minerals Engineering**. v. 18. p 935-939. 2005.

IBRAM. **Primeiro semestre de 2023**. Instituto Brasileiro de Mineração, 2023.

JESUS, C. A. G. Agência Nacional de Mineração. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/3-1-2013-minerio-de-ferro-e-aco/view> . Acesso em: 4 de janeiro de 2024.

JOU, L. M. **Montmorolinita como inibidor de corrosão**. 2016. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Materiais – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

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

MAMGHADERI, H. et al. Investigation on the effects of chemical pretreatment on the iron ore tailing dewatering. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. Eslsevier. v. 625. 2021.

NETO, P. R. M; RODRIGUES, O. M. S. Influência de lamas na filtração de rejeito de minério de ferro. 4 ed. 19º Mineração, **ABM**. 2018.

NUNES, D. M. **Construção de um sistema de filtração de gases para o estudo da formação e remoção de tortas de filtração**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2011.

SAMPAIO, J. A; FRANÇA, S. C. A; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MTC, 2007.

SILVA, M.; RETTORE, A. **Barometric column filtration v/s Filtrate Pump Filtration Comparison: Case Study**. 23º International Conference on Paste. Paste 2020.

SOUZA, A. H. **Estudo comparativo das técnicas de filtração aplicadas a rejeitos de minério de ferro provenientes da etapa de deslamagem**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2020.

USGS. U. S. Geological Survey. **Mineral Commodity Summaries 2023**: U. S. Geological Survey, 2023. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/publication/mcs2023>. Acesso em: 19 mar. 2024.

VALADÃO, G.E.S. **Separação Sólido-líquido**. Belo Horizonte: EEUFMG, 2008.

VIEIRA, J. E.; CAMPOS, J. P. C. O. **Implementação do sistema de filtração a vácuo para concentrado e rejeito de minério de ferro utilizando a tecnologia dos filtros cerâmicos**. XXVI Encontro Nacional de Tratamento de minérios e Metalurgia Extrativa. Poços de Caldas. Minas Gerais. 2015.

WOLFF. A. P. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro de Minas da Vale**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2009.