



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ

NATALIA PEREIRA DOS REIS GONÇALVES

**OTIMIZAÇÃO DA FILTRAGEM DE REJEITO DO MINÉRIO DE
FERRO VISANDO A DISPOSIÇÃO EM PILHAS**

ARAXÁ-MG

2023

NATALIA PEREIRA DOS REIS GONÇALVES

**OTIMIZAÇÃO DA FILTRAGEM DE REJEITO DO MINÉRIO DE
FERRO VISANDO A DISPOSIÇÃO EM PILHAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas
Gerais - Unidade Araxá, como
requisito parcial para obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia
de Minas.

Orientador: Dr. Leandro Henrique
Santos.

Coorientador: Me. João Victor da
Silva Alves.

ARAXÁ-MG

2023

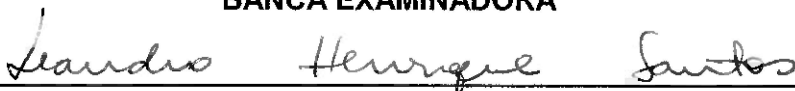
NATALIA PEREIRA DOS REIS GONÇALVES

**OTIMIZAÇÃO DA FILTRAGEM DE REJEITO DO MINÉRIO DE
FERRO VISANDO A DISPOSIÇÃO EM PILHAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Centro Federal de Educação Tecnológica
de Minas Gerais - Unidade Araxá, como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Minas.

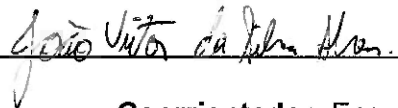
Araxá, 06 de julho de 2023.

BANCA EXAMINADORA



Presidente e Orientador: Prof. Dr. Leandro Henrique Santos

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá.



Coorientador: Eng. João Victor da Silva Alves

Documento assinado digitalmente

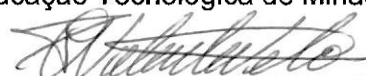


FERNANDO BRANDÃO RODRIGUES DA SILVA
Data: 11/07/2023 20:51:39-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Mosaic Fertilizantes.

Membro Titular: Prof. Me. Fernando Brandão Rodrigues da Silva

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá.



Membro Titular: Prof. Me. Francisco de Castro Valente Neto.

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por abençoar e me suportar em minha caminhada.

À minha mãe Zilda Inez e meu irmão Igor Gonçalves, por serem meu alicerce, sempre confiando e incentivando meus sonhos.

Aos professores, pelo conhecimento compartilhado. Em especial ao meu orientador, Leandro Santos, e ao meu coorientador, João Victor Alves, que tanto admiro pela disponibilidade, atenção, paciência e por me guiarem na realização desse trabalho. Aos professores, Francisco e Fernando, pelas contribuições.

Ao Vitor Diniz e à Maria Eduarda, pelo apoio ao uso do Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET.

Ao CEFET pela oportunidade de aprender e conquistar meus sonhos.

Aos meus colegas e amigos do curso, pelo companheirismo. Sou muito grata às amigas de Geovanna, Sofia e Thais, que estiveram ao meu lado durante por todos estes anos. À Maryanara e Guilherme Silva que fizeram-se presentes na realização deste trabalho. Vocês foram Essenciais.

A empresa Minerita pela oportunidade de realização deste trabalho, através das amostras e informações cedidas.

Por fim, meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que, de alguma forma, me ajudaram na realização deste trabalho.

RESUMO

Com o crescente desenvolvimento das atividades de mineração e a grande geração de rejeitos, torna-se fundamental a otimização da operação de armazenamento destes resíduos com maior segurança. O método mais utilizado nos tempos atuais é a disposição de rejeitos em barragens. Diante deste cenário, uma alternativa ao uso de barragens de rejeito é o processo de filtração destes e sua disposição em pilhas. Dito isto, este trabalho consiste em avaliar os parâmetros de filtração, a vácuo e por pressão, visando a disposição do rejeito de minério de ferro em pilhas. Avaliando o efeito das variáveis pH, porcentagem de sólidos e reagentes auxiliares de filtração no intuito de obter as condições otimizadas para o ensaio, levando em conta os parâmetros umidade da torta, altura da torta, tempo de filtração e turbidez do filtrado. Durante os ensaios, realizados com rejeito de minério de ferro com 67,3% das partículas passantes em 0,0037mm, foi possível definir que para os testes de filtração a pressão, o reagente catiônico Magnafloc 504 apresentou melhores resultados comparados com os resultados do reagente aniônico Magnafloc 10. Em relação ao método de filtração a vácuo, os resultados a pressão apresentaram uma melhor otimização trabalhando com as variáveis de dosagem no nível máximo de 70 g/t, pH no nível mínimo (pH 5) e a porcentagem de sólidos no nível máximo (65% sólidos), gerando uma resposta, de Taxa Unitária de Filtração de 684 kg/h/m², de Turbidez de 219,0 FTU e 13,52% (b.u) de Umidade, em comparação ao método de filtração a vácuo. Concluiu-se que é possível alcançar a otimização dos parâmetros avaliados com a filtração a pressão combinado com o uso do Magnafloc 504.

Palavras-chave: Mineração. Rejeito. Filtração. Disposição.

ABSTRACT

With the growing development of mining activities and the large production of tailings, it is essential to optimize the operation of processing waste with greater safety. The most used method nowadays is the disposal of tailings in dams. Given this scenario, an alternative to the use of tailings dams is their filtering process and their disposal in piles. That said, this work consists of evaluating the filtration parameters, vacuum and pressure, aiming at the disposal of iron ore tailings in piles. Evaluating the effect of the variables pH, percentage of solids and filter aids in order to obtain the optimized conditions for the test, taking into account the parameters of cake moisture, cake height, filtration time and filtrate turbidity. During the tests, carried out with waste from an iron container with 67.3% of the particles passing through 0.0037mm, it was possible to define that for the pressure filtration tests, the cationic reagent Magnafloc 504, presented better results compared to the results of the Magnafloc 10 anionic reagent, in relation to the vacuum filtration method, the pressure results demonstrated a better optimization working with the dosage variables at the maximum level of 70 g/t, pH at the minimum level (pH 5) and the perspective of solid at the maximum level (65% solid), generating a response, of Unitary Filtration Rate of 684 kg/h/m², of Turbidity of 219.0 FTU and 13.52% (b.u) of Humidity, in comparison to the method from filtering to . Aiming at stacking, it was concluded that it is possible to optimize the evaluated parameters with pressure filtration combined with the use of Magnafloc 504

Palavras-chave: Mining. Tailings. Filtration. Disposition

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Principais Substância Metálicas no Brasil.	13
Figura 2: Fluxograma Típico de Beneficiamento de Minérios.	16
Figura 3: Método de Alateamento a montante.	18
Figura 4: Alateamento método a jusante.	19
Figura 5: Alateamento método a linha de centro.	20
Figura 6: Representação esquemática do Empilhamento.	21
Figura 7: Empilhamento de rejeitos em La Coipa.	22
Figura 8: Empreendimentos com Pilhas de rejeito filtrado.	22
Figura 9: Filtro de disco.	24
Figura 10: Filtro de prensa.	25
Figura 11: Filtro de Tambor.	25
Figura 12: Filtro de correia.	26
Figura 13: Meios Filtrantes.	27
Figura 14: Processo de Homogeneização da Amostra.	31
Figura 15: Pilha Alongada.	31
Figura 16: Peneirador vibratório suspenso, adaptado para o peneiramento a úmido.	33
Figura 17: Unidade de Filtragem a Pressão.	34
Figura 18: Unidade de Filtragem a Vácuo.	36
Figura 19: Massa de polpa para filtro a pressão.	37
Figura 20: Massa de polpa para filtro a vácuo.	37
Figura 21: Preparação do volume de solução do reagente.	38
Figura 22: Turbidímetro para Análise de Turbidez.	39
Figura 23: Composição química.	41
Figura 24: Análise Granulométrica.	42
Figura 25: Resultados da Picnometria.	42
Figura 26: Resultados da Filtragem a Pressão com Magnafloc 10.	43
Figura 27: Filtragem a pressão com Magnafloc 10.	44
Figura 28: Torta seca da filtragem a pressão com Magnafloc 10.	44
Figura 29: Gráfico de Pareto para Umidade.	45
Figura 30: Gráfico Normal dos Efeitos Padronizados.	46
Figura 31: Resposta de Otimização para umidade.	46
Figura 32: Gráfico de Pareto para Turbidez.	47
Figura 33: Gráfico normal dos efeitos padronizados.	47
Figura 34: Resposta de Otimização da Turbidez.	48
Figura 35: Gráfico de Pareto para TUF.	49
Figura 36: Gráfico dos efeitos padronizados.	49
Figura 37: Otimização de resposta para TUF.	50
Figura 38: Otimização da Resposta de Filtragem com Magnafloc10.	51
Figura 39: Resultados da Filtragem a Pressão com Magnafloc 504.	52
Figura 40: Filtragem a pressão com Magnaflog 504.	53
Figura 41: Torta seca do filtrado com Magnafloc 504.	53
Figura 42: Gráfico de Pareto para Umidade.	54
Figura 43: Gráfico normal dos efeitos padronizados.	55
Figura 44: Otimização da Resposta de Umidade.	55
Figura 45: Gráfico de Pareto para TUF.	56
Figura 46: Gráfico normal dos efeitos padronizados.	57
Figura 47: Otimização da Resposta para TUF.	57
Figura 48: Gráfico de Pareto para Turbidez.	58
Figura 49: Gráfico normal dos efeitos padronizados.	58
Figura 50: Resposta de Otimização para Turbidez.	59
Figura 51: Otimização da Resposta de Filtragem com Magnafloc 504.	60
Figura 52: Resultados da Filtragem a Vácuo.	61
Figura 53: Filtragem a Vácuo com Magnafloc 504.	62
Figura 54: Gráfico de Pareto para Umidade.	63
Figura 55: Gráfico normal dos efeitos padronizados.	63
Figura 56: Otimização de Resposta para umidade.	64
Figura 57: Gráfico de Pareto para Turbidez.	65
Figura 58: Otimização de resposta para Turbidez.	65

Figura 59:Gráfico de Pareto para TUF.....	66
Figura 60:Otimização da Resposta para TUF.....	66
Figura 61: Otimização de Resposta para Filtragem a Vácuo com Magnafloc 504.	67

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	Minério de Ferro no Brasil	12
2.2	Beneficiamento do Minério de Ferro	14
2.3	Disposição de rejeitos em barragens.	17
2.4	Empilhamento de Rejeito Filtrado.	20
2.5	Estudo de filtração de rejeitos.	23
2.6	Equipamentos de filtração.....	24
2.7	Meio filtrante.	26
2.8	Mecanismo de filtração.	27
2.9	Reagentes auxiliares.....	28
3	METODOLOGIA.....	30
3.1	Preparação da amostra.....	30
3.2	Caracterização de Amostra.....	31
3.3	Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX).	31
3.4	Picnometria a água.	32
3.5	Análise granulométrica a úmido.	33
3.6	Unidade de filtração a Pressão.	34
3.7	Unidade de filtração a vácuo.....	35
3.8	Preparação de Polpa	36
	Preparação de Polpa (Filtro a pressão)	37
	Preparação de Polpa (filtro a vácuo).....	37
3.9	Aplicação de Diferentes reagentes auxiliares de filtração no Método de Filtro a Pressão.	37
3.10	Planejamento Fatorial a dois níveis com Ponto Central.....	38
3.13	Análise dos Resultados	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
4.1	Composição	41
4.2	Análise de Granulometria.....	41
4.3	Picnometria.....	42
4.4	Resultados do Planejamento Experimental – Filtração a Pressão utilizando MAGNAFLOC 10.....	42
4.4.1	Análises Estatísticas.....	44
4.4.1.1	Umidade	45
4.4.1.2	Turbidez.....	46
4.4.1.3	Taxa Unitária de Filtração.....	48
4.5	Resultados do Planejamento Experimental – Filtração a Pressão utilizando MAGNAFLOC 504.....	52
4.5.1	Análises Estatísticas.....	54
4.5.1.1	Umidade	54
4.5.1.2	Taxa Unitária de Filtração (TUF).....	55
4.5.1.3	Turbidez.....	57
4.6	Resultados do Planejamento Experimental – Filtração á Vácuo utilizando	

MAGNAFLOC 504.....	61
4.6.1 Análises Estatísticas.....	62
4.6.1.1 Umidade	62
4.6.1.2 Turbidez.....	64
4.6.1.3 Taxa Unitária de Filtragem (TUF).....	65
5. CONCLUSÃO.....	68
6. REFERENCIAS	69

1. INTRODUÇÃO

A evolução e o desenvolvimento humano impulsionaram uma crescente exploração de matérias-primas ao longo dos tempos, especialmente dos minerais (IBRAM, 2016). Com o passar das eras, a mineração vem se desenvolvendo e aprimorando as tecnologias envolvidas na atividade, no qual no tempo da pré-história utilizavam principalmente o sílex e cherte para a fabricação de ferramentas, armas e utensílios. Atualmente a mineração é uma atividade econômica importante para a economia global e protagonista na produção da maioria dos bens materiais mais relevantes para a sociedade.

A mineração também é uma atividade industrial importante para a economia global. Entretanto, esta atividade gera alguns resíduos, dentre eles os rejeitos, que são produtos do processo de beneficiamento de minérios, sendo compostos essencialmente por água e minerais sem valor econômico. O método mais utilizado nos tempos atuais é a disposição de rejeitos em barragens. Estas, por sua vez, apresentam um alto custo, impactos ambientais e situações de risco. Levando em conta as circunstâncias mencionadas, uma alternativa ao uso de barragens de rejeito é o processo de filtragem de rejeito e sua disposição em pilhas (FIGUEIREDO, 2018).

A operação de filtragem pode ser realizada através de diversos métodos, sendo cada um destes indicado para tipos de material, granulometria e tipo de mineral distintos, seguindo as características desejadas para os produtos finais utilizando variados meios de promover a separação sólido-líquido. Os meios utilizados para promover a filtragem podem ser através da adição de vácuo, de pressão, de vácuo associado à pressão, por força centrífuga e até mesmo por capilaridade (CHAVES, 2004). Dito isto, a principal finalidade deste trabalho é avaliar os parâmetros de filtragem, a vácuo e por pressão, visando a disposição do rejeito de minério de ferro em pilhas. Neste trabalho foram realizados diversos ensaios explorando as variáveis pH, porcentagem de sólidos e reagentes auxiliares de filtragem no intuito de obter as condições otimizadas para o ensaio, levando em conta os parâmetros umidade da torta, altura da torta, tempo de filtragem e turbidez do filtrado.

A importância desta pesquisa se reflete no crescente desenvolvimento das atividades de mineração e a grande produção de rejeitos. De maneira geral, acredita-se que a presente pesquisa irá contribuir para a otimização do processo

de filtração, e conseqüentemente para o armazenamento destes resíduos. Espera-se, com este trabalho, obter os parâmetros otimizados para a filtração do rejeito do minério de ferro, visando a disposição deste rejeito em pilhas. Contribuindo assim, com alternativas mais seguras para essa operação fundamental, visto o alto custo, impactos ambientais e situações de risco gerados pela disposição dos rejeitos em barragens.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Minério de Ferro no Brasil

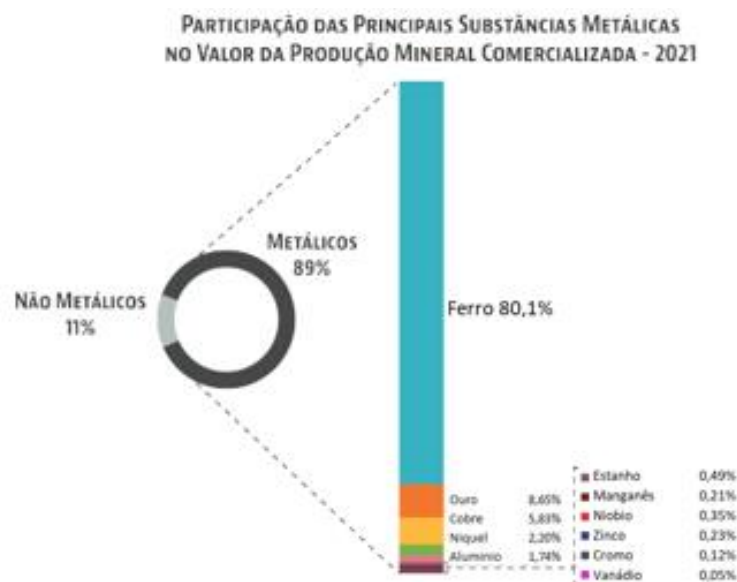
A importância das substâncias metálicas na indústria mineral brasileira remonta aos tempos da Colônia. As incursões dos bandeirantes em busca de metais preciosos definiram novas rotas para a ocupação do interior do Brasil e culminaram com a exploração de ouro, inicialmente na região das Minas Gerais. Ao longo da nossa história, conforme aumentou a ocupação do território e o conhecimento geológico, novos depósitos minerais metálicos foram descobertos, e substâncias como o manganês e o ferro passaram a ter maior importância. Tais descobertas tiveram impacto relevante na economia nacional e foram fundamentais para fomentar o processo de industrialização brasileiro.

O Brasil é um dos principais países com recursos minerais no mundo, possuindo, de maneira geral, altos teores de ferro em seus minérios, sendo assim considerado um produtor em potencial (MUNDIAL, 2009; GOMES, 2009; PONTES e colaboradores. 2015).

Segundo o Anuário Mineral Brasileiro Principais Substancias Metálicas 2022, da ANM referente ao ano de 2021, as substâncias da classe dos metálicos responderam por cerca de 89% do valor total da produção mineral brasileira. Dentre essas substâncias, onze destacam-se por corresponderem a 99,7% do valor da produção da referida classe, quais sejam: alumínio, cobre, cromo, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel, ouro, vanádio e zinco. O valor da produção dessas onze substâncias totalizou 312,9 bilhões de reais, com destaque para a expressiva participação do ferro nesse montante, sendo responsável por 80,1% deste total, conforme mostrado na

Figura 1.

Figura 1: Principais Substância Metálicas no Brasil.



Fonte: ANM (2022).

As principais regiões produtoras de ferro no Brasil são concentradas nos estados do Pará e Minas Gerais. O Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais), a Província Mineral de Carajás (Pará) e a região de Corumbá (Mato Grosso do Sul) apresentam geologias que possuem estruturas ferríferas bandadas, denominadas com Itabirito que são rochas finamente bandadas ou laminada, constituídas de camadas com predominância de minerais de silício (quartzo) e de ferro. O Quadrilátero Ferrífero considerado a maior província de minérios do Brasil, sendo descobertos minérios metálicos e pedras preciosas no fim do século XVII.

O ferro é geralmente encontrado em óxidos, carbonatos e sulfetos, como hematita, magnetita, limonite, ilmenita, siderita e pirita. No passado, o ferro era obtido somente por meio da redução de óxidos empregando carvão vegetal (NOCITI, 2011; CHAVES, 2009).

Quanto às exportações brasileiras de minerais primários, de acordo com dados do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), o minério de ferro é o principal produtor, representando aproximadamente 80% das exportações.

Segundo o IBRAM, em 2020 a Bahia viu o faturamento de sua produção mineral crescer 62% em relação ao ano anterior, o mesmo movimento positivo se deu em Mato Grosso (58%), Pará (45%), Minas Gerais (31%), Goiás (17%) e São Paulo (7%). Muito deste crescimento é fruto da extração do minério de ferro que contribuiu com 66% do faturamento total do setor (IBRAM,2021).

Segundo IBRAM, Minas Gerais apresentou a maior elevação percentual em faturamento em 2021. Ainda em termos de variação percentual, a Bahia vem logo em seguida, com 67% de aumento de faturamento em 2021, passando de R\$ 5,7 bilhões em 2020 para R\$ 9,5 bilhões. Ainda em termos percentuais, o 3º maior crescimento de faturamento em 2021 foi registrado no Pará, com 51%, passando de R\$ 97 bilhões para R\$ 146,6 bilhões. Com este resultado, o Pará responde por 43% do faturamento da indústria da mineração brasileira em 2021, sendo que esta participação era de 46% em 2020.

As exportações de cerca de 358 milhões de toneladas de minério de ferro em 2021 totalizaram quase US\$ 45 bilhões, resultado acima do ano anterior. Em 2020, a exportação de cerca de 342 milhões de toneladas de minério de ferro totalizou quase US\$ 26 bilhões. Foi um incremento de 73% em US\$ e de quase 5% em toneladas. A CFEM relativa ao minério de ferro mais uma vez foi destaque (R\$ 8,7 bilhões) com crescimento de 80% em relação a 2020. O minério de ferro respondeu por 85% de todo o recolhimento de CFEM no país, em 2021.

2.2 Beneficiamento do Minério de Ferro

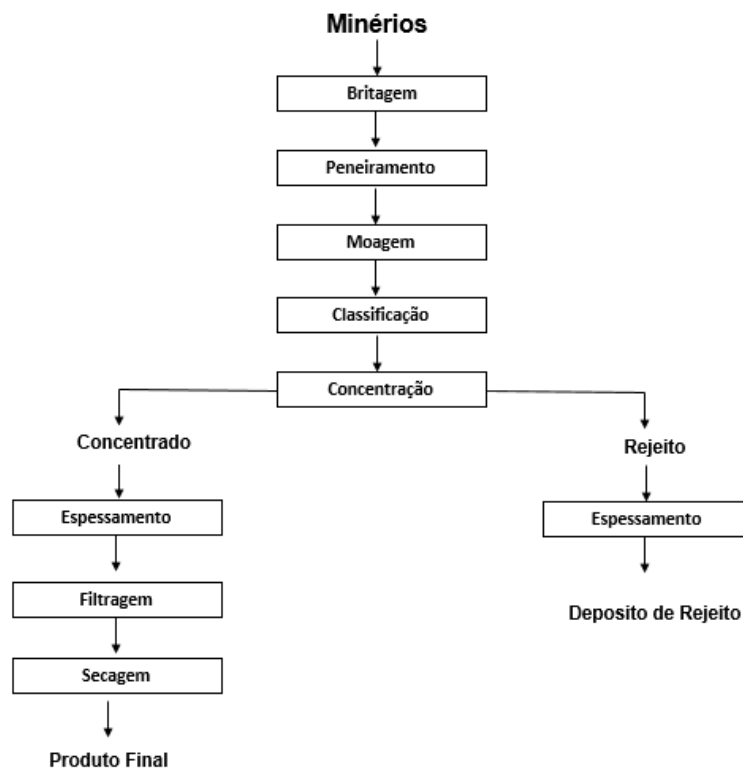
O termo tratamento ou beneficiamento de minério, de acordo com Luz e colaboradores (2004), refere-se ao conjunto de operações, aplicadas aos bens minerais, como objetivo de modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma. As operações ocorrem sem modificar a identidade química ou física dos minerais. Mineral pode ser definido como material inorgânico de composição química e propriedades físicas definidas, encontrado na crosta terrestre. O minério é definido como toda rocha constituída de um mineral ou

Agregado de minerais, que possam ser aproveitados economicamente, e a ganga que é o mineral, ou conjunto deles, sem valor econômico, presentes na rocha. Como sabemos, a maioria dos minérios não trazem benefícios se utilizados tal como são lavrados, uma vez que são constituídos também de ganga ou impurezas, daí a importância de seu beneficiamento.

O beneficiamento de minérios abrange etapas de cominuição (britagem e moagem), para uma redução de tamanho das partículas; separação por tamanho, através do peneiramento e classificação (hidrociclonagem, classificação em espiral) concentração (gravítica, eletromagnética, eletrostática, por flotação), para remover a maior parte da ganga (impurezas) presente no minério, com finalidade de separar as espécies minerais, obtendo-se um concentrado e um rejeito; desaguamento (espessamento e filtração); secagem (secador rotativo, spray dryer, secador de leito fluidizado) que tendem a diminuir a umidade do material a geração a serem depositados como rejeito (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

A norma NRM 18 define o beneficiamento de minérios como um tratamento que tem por objetivo a preparação granulométrica, concentração ou purificação mineral, utilizando métodos físicos ou químicos, sem que haja alteração da constituição química dos minerais. Na Figura 2, é observado o fluxograma típico do beneficiamento de minérios segundo a norma.

Figura 2: Fluxograma Típico de Beneficiamento de Minérios.



Segundo França e Massarani (2010), a aplicação de processos de separação sólido-líquido vem crescendo cada vez mais no beneficiamento de minérios. Estes processos consistem na concentração de partículas sólidas existentes em polpas, separando assim a fração sólida do fluido em que se encontra. A separação sólido-líquido representa uma etapa muito importante para o tratamento de minérios, permitindo a aplicação de operações cada vez mais complexas e garantindo maiores índices de eficiência para o beneficiamento mineral.

As principais operações de separação sólido-líquido são a secagem, centrifugação, filtragem, espessamento e clarificação, sendo selecionadas de acordo com fatores como o tempo de processo, características do material e investimentos necessários. A aplicação destas operações se justifica principalmente pela crescente exploração de minérios com baixos teores e com partículas liberadas em faixas cada vez mais finas. Aliado a isso, o aumento no rigor das leis ambientais de manejo de efluentes exige a implantação de

processos de separação sólido-líquido capazes de otimizar as etapas de beneficiamento de minérios, recuperando maiores quantidades de partículas sólidas e evitando o descarte de efluentes em condições inadequadas (OLIVEIRA *et al.*, 2010).

Na atividade de mineração, grandes volumes e massas de materiais são extraídos. O processo de beneficiamento gera grandes volumes de resíduos (rejeitos) sob forma de polpa ou lama, sendo uma mistura de sólido-água, que são dispostos usualmente em reservatórios, conhecidos como barragens de contenção de rejeitos. (BRASIL, 2012; SILVA, VIANA, CAVALCANTE, 2011; FONTES, 2013).

2.3 Disposição de rejeitos em barragens.

A forma mais comum aplicada à deposição de rejeitos são as barragens, sendo estas estruturas que aproveitam de formações topográficas favoráveis (vales com pequenas bacias de drenagem) em regiões próximas as usinas de beneficiamento, utilizando-as como reservatório. Nestas formações topográficas, diques são construídos como meio de contenção, transformando os vales em uma espécie de grandes tanques onde os rejeitos serão depositados (MILONAS, 2006). A construção dessas estruturas ocorre com o mesmo procedimento utilizado para estruturas de acumulação de água, entretanto são interceptados por maciços de terra, e construídos em diferentes técnicas de alteamento (LEMOS, 2012).

Os métodos de alteamento das barragens são determinantes para a segurança das estruturas, onde a seleção de cada um é feita a partir de fatores financeiros e geotécnicos. Basicamente, o alteamento dos diques de barragens de rejeitos pode ser realizado por meio de três métodos: método de montante, de jusante e de linha de centro (FIGUEREIDO, 2019).

Figura 3: Método de Alçamento a montante.



Fonte: Gomes, 2006

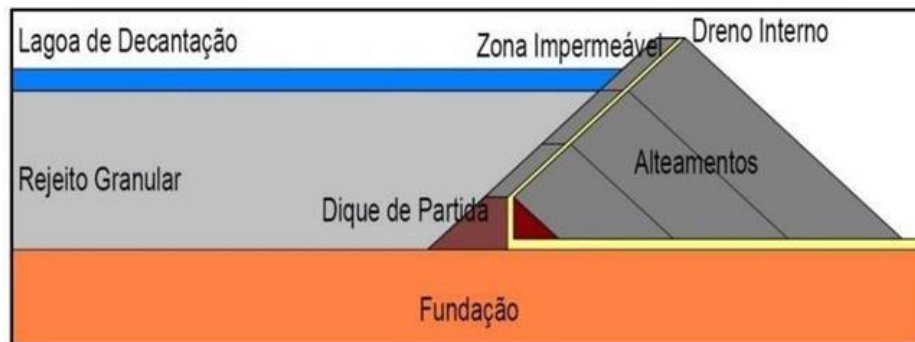
O método de alçamento para montante, conforme mostrado na Figura 3, consiste na tecnologia mais antiga e simples para a construção de barragens, sendo considerado como uma evolução natural do processo empírico de disposição de rejeitos. A primeira etapa deste método é a construção de um dique de partida, normalmente construído de solo ou enrocamento compactado. Após o final desta fase, o rejeito é lançado por espigotes ou hidrociclones a partir da crista do dique, formando uma praia de deposição próxima do aterro, a qual será utilizada como fundação para a próxima etapa de construção. Os alçamentos subsequentes ocorrem sempre que necessário, seguindo a mesma metodologia, até a altura final prevista em projeto (LEMOS, 2012).

O método de montante, apesar de ser o mais utilizado é também o que oferece menor segurança em suas estruturas. Devido ao alçamento da barragem ser realizado sobre o rejeito lançado, a fundação dos novos diques não é um material totalmente consolidado, apresentando assim propensão à liquefação, além de gerar problemas em relação à tensão induzida na estrutura. Com isso, há uma maior tendência de percolação de água entre as partículas sólidas da fundação dos diques (ARAUJO, 2006). Com os últimos rompimentos de estruturas com este método construtivo, a Agência Nacional de Mineração (ANM), determinou a proibição da operação de novas e estabeleceu que fossem descaracterizadas as estruturas que estivessem dentro das características construtivas deste método.

O método de alçamento para jusante (Figura 4), representa um

desenvolvimento relativamente recente, como alternativa ao procedimento anterior. Esta metodologia surgiu em virtude de alguns tipos de rejeitos não possuírem características geotécnicas adequadas para serem utilizados como fundação. Este processo exige grandes volumes de solo, pois os alteamentos são executados para a jusante, além de grandes áreas para a implantação do maciço.

Figura 4: Alteamento método a jusante



Fonte: Gomes, 2006

Segundo Klohn (1981), as principais vantagens dos maciços alteados para a jusante são que não possuem restrições de altura, além de que suas estruturas são totalmente independentes dos rejeitos. Outro benefício associado ao método de jusante é a possibilidade de redução significativa das dimensões do vertedor de cheias, com a criação da bacia de amortecimento no interior do reservatório (GOMES, 2006).

No entanto, as barragens alteadas pelo método de jusante demandam maiores custos operacionais, tanto para adequação do material para construção dos diques (ciclonagem de rejeitos ou empréstimo de material de outras áreas) quanto pela maior área ocupada por eles, exigindo operações de preparação de grandes terrenos para alteamento das barragens. Além disso, para o alteamento em jusante, volumes consideráveis de material são movimentados para formação dos diques, exigindo operações mais caras e com maior tempo para conclusão (ARAÚJO, 2006).

Segundo o IBRAM (2016), o método da linha de centro pode ser considerado uma operação intermediária entre o alteamento a jusante e o a montante. (Figura 5). Este método foi desenvolvido buscando o aproveitamento das

vantagens dos métodos anteriores ao mesmo tempo em que reduz os efeitos negativos inerentes de cada método de alteamento citado anteriormente.

Figura 5: Alteamento método a linha de centro.



Fonte: Gomes, 2006

Na construção deste tipo de barramento, a parte de montante do aterro é apoiada sobre o rejeito e o talude de jusante tem como fundação o alteamento anterior e o terreno natural. As vantagens do método alteamento por linha de centro são a possibilidade de redução do volume de material de empréstimo necessário para a construção do aterro e também a construção do sistema de drenagem interna em todas as etapas da obra. Por outro lado, nesta metodologia é necessária a formação da praia de rejeitos próxima ao aterro, pois esta afasta o lago do barramento e, assim, torna-se possível controlar a superfície freática no maciço. Como parte do aterro está construída sobre o rejeito, um eventual aumento do nível de água poderia causar uma alteração nas condições de acomodação do rejeito e então, deformações no talude de montante da barragem.

2.4 Empilhamento de Rejeito Filtrado.

Gomes e Pereira (2002), cita que os processos de lavra e beneficiamento do minério de ferro geram um volume de rejeitos da ordem de 40% para minério de ferro. Todavia, este valor percentual dependerá muito do teor de ferro presente nas jazidas e das condições de mercado.

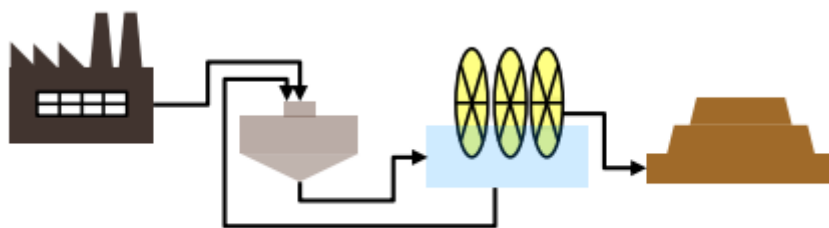
De acordo com a NBR 13028 (ABNT, 2006), rejeito é “todo e qualquer material não aproveitável economicamente, gerado durante o processo de beneficiamento de minérios”. Os rejeitos de minério de ferro, podem ser classificados como sendo inertes, Classe III da NBR 10004 (ABNT, 2004), granulares, de baixa deformabilidade e boas condições de drenagem e

resistência.

A filtragem de rejeitos consiste na separação de sólidos e líquidos através da passagem da polpa em um meio filtrante, que é capaz de reter partículas sólidas e permitir a passagem do líquido. Neste processo, elevadas porcentagens de fração fina podem inviabilizar a técnica de filtragem.

Segundo Santos (2022), o termo dry stacking, traduzido como empilhamento a seco, nomeia a técnica de disposição de rejeitos filtrados em pilhas. Destaca-se que a torta produzida pela filtragem não se apresenta “seca”, mas sim insaturada. Consiste em adensar previamente a polpa dos rejeitos em espessadores até determinada concentração de sólidos e depois filtrar para produzir tortas com certa umidade que posteriormente são transportadas, por caminhões ou transportadores de correia, para uma instalação de contenção para serem empilhadas, conforme representado na Figura 6.

Figura 6: Representação esquemática do Empilhamento.



Fonte: Santos (2022)

A filtragem de rejeitos para a disposição em pilhas é uma prática usual nas minerações do deserto de Atacama e regiões áridas devido à escassez de água. Na mina de ouro de La Coipa, no Chile, mostrado na Figura 7, por exemplo, todo o rejeito é filtrado em filtros de correia, e as tortas produzidas com aproximadamente 20% de umidade são transportadas para serem empilhadas (GUIMARÃES, 2011). Em regiões de climas tropicais, como o Brasil, a aplicação é mais complexa haja vista que as chuvas recorrentes contribuem para o aumento da umidade do rejeito, diminuem a trafegabilidade das vias e na pilha, o que requer um sistema de drenagem bem mais robusto (ALVES, 2020).

Figura 7: Empilhamento de rejeitos em La Coipa.



Fonte: ALVES (2020)

Na Figura 8, Santos (2022) apresenta empreendimentos de pilhas de rejeito filtrado projetadas ou em operação no Brasil. Segundo Alves (2020), os empreendimentos estão localizados em minerações do Quadrilátero Ferrífero, as pilhas apresentadas são compostas principalmente por rejeitos de minério de ferro.

Figura 8: Empreendimentos com Pilhas de rejeito filtrado.

Unidade	Mineradora	Tecnologia de filtragem	Umidade alvo
Mina Casa de Pedra	CSN	Prensa	13 a 16%
Mina Pau Branco	Vallourec	Prensa	15 a 17%
Mina Cuiabá	AngloGold Ashanti	Disco cerâmico	NA
Unidade Vazante	NEXA	Prensa	9 a 11%
Mina do Pico	Vale	Disco convencional	NA
Projeto Aripuanã	NEXA	Prensa	15%
Itatiaiuçu	Usiminas	Prensa	NA
-	Samarco	Disco convencional	NA

Fonte: Santos (2022)

As grandes vantagens desse método em relação ao convencional em barragens são a possibilidade de recuperação de água e redução da área para a disposição. Por outro lado, o elevado custo, pela necessidade de uma planta de desaguamento, transporte e disposição final, sem a geração de receita, é a principal desvantagem.

2.5 Estudo de filtragem de rejeitos.

Entre os métodos de separação sólido-líquido se destaca a filtragem, procedimento que consiste na passagem da polpa mineral por um meio poroso, que é capaz de reter a fração sólida do material, permitindo a saída apenas de água. Esta fração sólida retida pelo meio poroso possui baixa porcentagem de água e consistência firme, sendo denominada torta. O material de saída do meio filtrante, composto basicamente da fração líquida da polpa é denominado filtrado.

O processo de filtragem pode ser realizado por diferentes métodos, utilizando variados meios de promover a separação sólido-líquido. A filtragem pode ser realizada por meio da adição de vácuo, de pressão, de vácuo associado à pressão, por força centrífuga e até mesmo por capilaridade, sendo cada método indicado para diferentes tipos de granulometria de polpa, tipo de mineral e características desejadas para os produtos finais (CHAVES, 2013). A filtragem se divide em três etapas, que devem ser realizadas de forma efetiva para garantir uma separação sólido-líquido eficaz, sendo elas:

- Formação da torta, consistindo na retenção da fração sólida da polpa, reduzindo a concentração de água no material retido;
- Secagem, etapa onde a água restante na torta é aspirada, atravessando o meio filtrante;
- Descarga, etapa onde a torta é despejada, através da inversão do sentido de fluxo de ar no meio filtrante, empurrando a massa sólida.

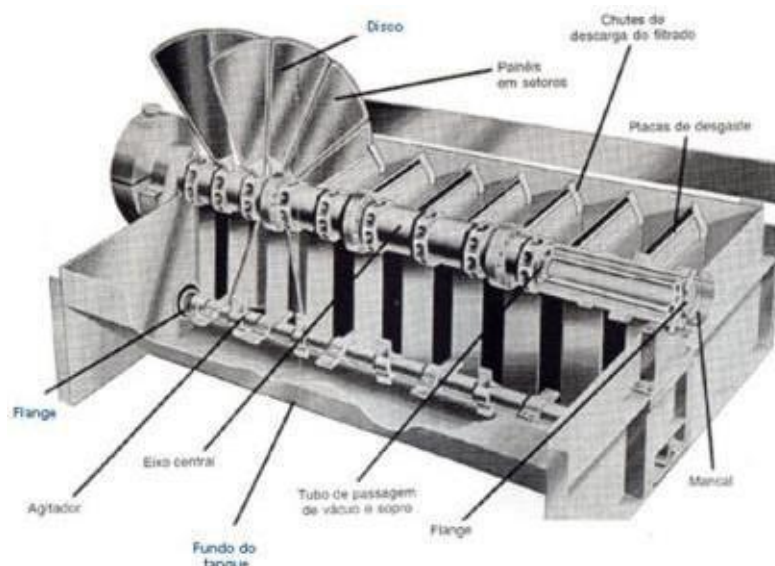
2.6 Equipamentos de filtração.

Existem diversos métodos para a realização da filtração, e para cada tipo de polpa, é apresentado um equipamento recomendado de filtração. Fatores como o tipo do minério constituinte, porcentagem de sólidos e granulometria das partículas são determinantes na seleção do equipamento ideal para uma filtração eficiente.

Desta forma, é necessário determinar as configurações ideais para a filtração, impedindo assim fenômenos indesejados durante o processo, como cegamento dos poros do meio filtrante, passagem de partículas sólidas juntamente com o clarificado, retenção de grande quantidade de água na torta e sub ou superdimensionamento da alimentação de polpa.

A Figura 9 apresenta a representação esquemática de um filtro de disco convencional. Este equipamento é composto por uma série de discos verticais, paralelos e espaçados, ligados entre si por um eixo central (constituído de um feixe de tubos) que executa um movimento de rotação. Cada disco é composto de múltiplos setores independentes, cobertos com o tecido filtrante. Cada setor é conectado a um dos tubos do eixo central.

Figura 9: Filtro de disco.



Os filtros de prensa (Figura 10) têm sido um dos equipamentos mais utilizados na indústria para desaguamento de polpas, especialmente aquelas contendo partículas muito finas, alcançando os melhores resultados de

aplicação custo-benefício. Estes equipamentos consistem em diversas placas intercaladas, com intervalos entre si nos quais é adicionada a polpa a ser desaguada. As placas são revestidas com meio filtrante, e com a adição de pressão, desaguam a polpa, direcionando o clarificado a uma calha coletora e retendo a torta com baixa umidade e custo operacional reduzido. O ciclo de desaguamento dos filtros prensa é uma operação descontínua, trabalhando em bateladas (GUIMARÃES, 2011).

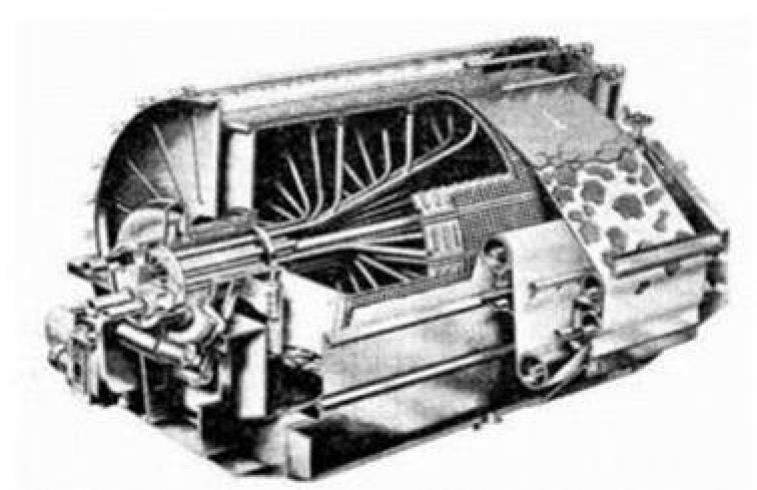
Figura 10: Filtro de prensa.



Fonte: Unicamp (2012).

O filtro de tambor consiste em um grande cilindro giratório revestido com tecido filtrante disposto horizontalmente. Assim como nos filtros de disco, o cilindro é submerso em uma bacia de polpa ou sobre a superfície do tambor. Por ação de vácuo a polpa é aspirada e a torta é formada na superfície do tambor acoplada ao meio filtrante, permitindo ser submetida à processos de secagem, lavagem e descarga. A descarga é efetuada por raspador, por rolo ou por fios (Figura 11)

Figura 11: Filtro de Tambor



Fonte: Oliveira (2004)

Os filtros de correia como o próprio nome diz, consistem em correias que revestidas pelo meio filtrante realizam a filtração da polpa durante o período de transporte da mesma. A polpa é despejada em uma extremidade da correia horizontal, e com o auxílio de vácuo, é desaguada ao longo do percurso realizado sobre o meio filtrante até a outra extremidade do equipamento, onde é descarregada.

Figura 12: Filtro de correia.



2.7 Meio filtrante.

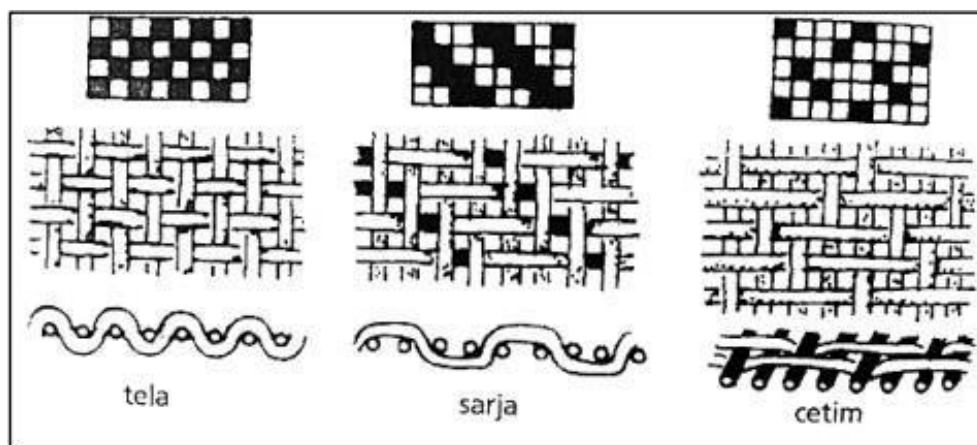
Existem diversos tipos de meios filtrantes e, de acordo com Luz, Oliveira e Lacerda (2004), estes podem ser feitos em sua maioria de materiais flexíveis utilizando algodão, lã, linho, nylon, seda, juta, fibra de vidro, além de materiais rígidos como borracha, carbono poroso e metais. A indústria mineral utiliza, em sua maioria, os meios filtrantes flexíveis que são compostos por tecido. Contudo, é evidente o quanto os materiais rígidos porosos também vêm conquistando cada vez mais este mercado. De acordo com Chaves (2013), um filtro deve atender aos seguintes requisitos:

- Suportar o meio poroso e a torta;
- Levar a torta do ponto de alimentação até a descarga;
- Permitir a passagem do filtrado;
- Manter a pressão diferencial no meio filtrante.

Os filtros cerâmicos não utilizam telas filtrantes, mas setores de material poroso rígido, que permitem a filtração por capilaridade, através de micrósporos que compõem a sua estrutura. Suas características são influenciadas pela composição química, mineralógica e pelo tratamento térmico recebido durante sua fabricação, no qual atuam diretamente com o arranjo dos átomos na sua estrutura e define suas propriedades como meio filtrante, bem como sua permeabilidade e resistência. Por isso, existem diversos tipos de meios porosos sendo estudados, além da forma de produzi-los, com o objetivo de promover melhoria da operação de filtração com o avanço tecnológico (GUIMARÃES, 2011).

Os tecidos utilizados na filtração recebem grande influência da composição química do material utilizado, bem como a maneira em que as malhas são tecidas, podendo resultar em uma tela ou trama de quadrados alternados. (GUIMARÃES, 2011).

Figura 13: Meios Filtrantes.



2.8 Mecanismo de filtração.

Conforme Chaves (2013), o dimensionamento dos filtros e a análise dos meios filtrantes podem ser realizados com base em ensaios empíricos ou através dos resultados das operações industriais. Não obstante, o tratamento teórico é importante para obter uma melhor compreensão dos resultados obtidos. As principais variáveis de filtração são:

- Temperatura da polpa;

- Viscosidade da polpa;
- Velocidade média de filtração;
- % de sólidos na polpa;
- Vazão de alimentação;
- Granulometria dos sólidos;
- Potencial hidrogeniônico da polpa (pH);
- Densidade e volume da polpa.

No processo de filtração, os reagentes mais utilizados são os coagulantes e floculantes. Estes compostos, classificados como auxiliares de filtração, têm como principal função a agregação das partículas mais finas em suspensão na polpa mineral, reduzindo a força de repulsão entre si, seja por meio de sais inorgânicos (coagulação) ou polímeros orgânicos (floculação) (WANG, 2014).

Além disso, a utilização de auxiliares de filtração reduz a compressibilidade da torta formada ao longo do processo. Desta forma, sua porosidade se mantém, permitindo assim a passagem da fração líquida da polpa e seu desaguamento (FIGUEREIDO, 2019).

2.9 Reagentes auxiliares.

Os reagentes auxiliares são importantes na agregação de polpas, especialmente em casos em que a polpa apresenta partículas de granulometria fina ou de elevadas superfícies específicas. As modificações no estado de agregação/dispersão de uma polpa, nas características de superfície de uma partícula e na tensão superficial do líquido podem causar grande influência sobre os resultados de filtração (AMARANTE, 2002).

A coagulação é conhecida como a agregação obtida pela redução da repulsão eletrostática existente entre as partículas em suspensão pela adição de eletrólitos inorgânicos. São utilizados eletrólitos com cargas de sinal opostos à da superfície das partículas para neutralização de cargas. O sulfato de alumínio e a cal são coagulantes consagrados (CHAVES, 2013).

A floculação é a agregação atingida pela adição de polímeros orgânicos com

elevado peso molecular, que promovem a ligação entre as partículas servindo como pontes e originando agregados, chamados flóculos ou flocos. O desempenho dos floculantes é afetado por fatores como diluição e preparo, dosagem, peso molecular, agitação, pH, força iônica da solução e percentual de sólidos na polpa (VALADÃO, 1996 apud AMARANTE, 2002).

Os floculantes mais eficazes devem ser aqueles capazes de formar pequenos agregados e resistentes ao cisalhamento. Para que haja o contato entre o polímero e a partícula, é necessária uma agitação ideal. Quando insuficiente, pode levar a uma má distribuição do floculante na polpa e em excesso pode causar a quebra dos agregados já formados ou da própria molécula (CHAVES, 2013).

Os surfactantes são substâncias orgânicas constituídas por moléculas de caráter anfipático, ou seja, polar e apolar. Na filtração, os surfactantes atuam na interface sólido-líquido tornando a superfície do mineral hidrofóbica e na interface líquido/ar diminuindo a tensão superficial reduzindo as forças que retêm água nos capilares da torta (DIAS; SILVA; PERES; VALADÃO, 2004).

Os auxiliares de filtração têm como elemento ativo um ou mais surfactantes, são adicionados na polpa para diminuir a tensão superficial da água ou por atuarem como floculantes (AMARANTE, 2002; CHAVES, 2013).

Esses reagentes podem interferir na porosidade e resistência específica da torta, umidade e a taxa unitária de filtração (DIAS; SILVA; PERES; VALADÃO, 2004). Amarante (2002) estudou a influência da adição de surfactantes e floculantes em polpas de minério de ferro e notou que a adição do floculante provocou a diminuição do tempo de formação da torta e a adição do surfactante contribuiu para diminuição da umidade da torta.

3 METODOLOGIA

Os trabalhos experimentais foram realizados no Laboratório de Tratamento de Minérios e no Laboratório de Caracterização do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET- MG). Foram realizadas as etapas de preparação da amostra, homogeneização e quarteamento, análise de fluorescência para determinar a composição química, determinação de densidade, análise granulométrica e filtragem. A amostra de rejeito de minério de ferro gentilmente doada pela empresa Minerita Ltda., proveniente do Complexo Serra Azul.

3.1 Preparação da amostra.

A amostra com 32kg de rejeito foi seca em estufa á 100°C. Logo após, o material passou pela etapa de desagregação manual, sendo submetida à homogeneização por tombamento, que tem por objetivo a obtenção de uma distribuição mais uniforme dos constituintes da amostra (Figura 14).

Após a primeira etapa de homogeneização, ocorreu a segunda etapa onde foi realizada uma pilha alongada. Em seguida, a amostra foi quarteada em frações de massa suficiente para a execução da caracterização e dos ensaios de filtração, onde foram numeradas, pesadas e armazenadas em sacos plásticos (Figura 15).

Figura 14: Processo de Homogeneização da Amostra.

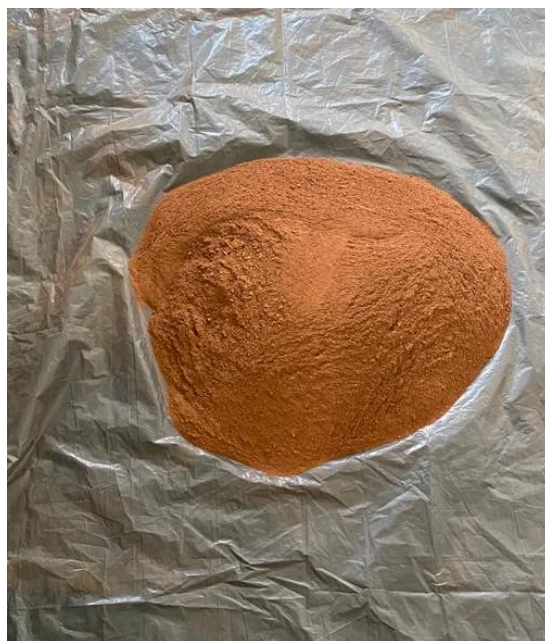


Figura 15: Pilha Alongada.



3.2 Caracterização de Amostra

A caracterização da amostra foi realizada pelos métodos de Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX), picnometria e análise granulométrica a úmido.

3.3 Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX).

Para execução da caracterização química da amostra, realizou-se a análise de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX). Esta técnica monitora quantitativamente e qualitativamente os materiais metálicos, cerâmicos,

poliméricos e se baseia na medição das intensidades dos raios-X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra, quando excitada por partículas como elétrons, prótons ou íons (MELO JÚNIOR, 2007).

3.4 Picnometria a água.

Para determinar a massa específica da amostra de rejeito de minério de ferro, foi realizada a técnica de picnometria à água. Neste sentido, a densidade foi determinada com o uso desta técnica, com a realização de ensaios em triplicata para maior acuracidade dos resultados. Determinando a densidade através do cálculo da média ensaios. A equação I determina os valores da densidade do material (SAMPAIO et al., 2007).

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

Eq.I

Onde: d_s : densidade dos sólidos;

A_1 : massa do picnômetro;

A_2 : massa do picnômetro + amostra;

A_3 : massa do picnômetro + amostra + água;

A_4 : massa do picnômetro + água.

Os ensaios de picnometria foram realizados de acordo com o seguinte procedimento:

Pesar o picnômetro vazio, previamente limpo, seco e a temperatura ambiente (A_1), logo após adicionar a amostra ao picnômetro, em seguida pesar todo o conjunto (A_2). A massa da amostra é a diferença entre A_2 e A_1 , ou seja, a massa obtida no picnômetro;

Adicionar água ao picnômetro com amostra, em seguida pesa-se o conjunto (A_3). A massa de água adicionada é a diferença entre (A_3) e (A_2). Lavar o picnômetro e adicionar água até transbordar, em seguida pesar o conjunto (A_4), desta forma a massa de água utilizada é a diferença entre (A_4) e (A_1);

Com os valores de massa do picnômetro vazio, picnômetro com amostra,

picnômetro com amostra e água, e picnômetro com água foi possível calcular a densidade real do minério.

3.5 Análise granulométrica a úmido.

A análise granulométrica foi realizada em um peneirador suspenso da marca CDC, modelo PV-08, conforme Figura 16. Após o peneiramento, a massa retida nas peneiras da série Tyler e o passante na peneira de menor abertura foram secos e pesados.

Figura 16: Peneirador vibratório suspenso, adaptado para o peneiramento a úmido.



As aberturas das peneiras que foram utilizadas para a realização do teste de granulometria estão mostradas na Tabela 1:

Tabela 1: Peneiras utilizadas.

Peneiras	
Mesh #	Abertura (mm)
48	0,300
65	0,212
100	0,150
150	0,104
200	0,074
270	0,053
325	0,045
400	0,037

Na análise foi colocada uma amostra de aproximadamente 100g, com auxílio de uma mangueira com água corrente e um balde realizou-se o peneiramento a úmido para retirada do excesso de finos.

A massa passante, undersize (US), menor que 400# (0,037 mm), e as massas retidas nas peneiras foram colocadas em um recipiente e levadas para estufa. Após a secagem, foram pesados para posteriores cálculos. Para garantir a acuracidade dos resultados foram realizados ensaios em duplicata com o intuito determinar a distribuição granulométrica da amostra.

3.6 Unidade de filtragem a Pressão.

Os testes de filtragem por pressão foram feitos com o filtro de pressão Mecpress, da Brastorno, mostrado na Figura 17. O equipamento consiste em um recipiente cilíndrico de cerca de 14 cm de diâmetro composto de aço revestido por borracha e utilizado para desagramento de polpas.

Figura 17: Unidade de Filtragem a Pressão.



O teste iniciou-se com a aplicação do meio filtrante revestindo a abertura inferior do cilindro. Após o cilindro ser travado e a polpa adicionada em seu interior, o cilindro foi lacrado, de forma a induzir a passagem da fração líquida da polpa pelo meio filtrante, expulsando-a para o ambiente externo. Com o fim da

filtração, retirou-se a torta formada no cilindro e o material passante foi recolhido para análise. A partir dos parâmetros obtidos foi possível avaliar a eficácia do procedimento na filtração de polpas.

Para a realização dos testes, inicialmente preparou-se a polpa de rejeito de minério de ferro, sendo condicionada por 1 minuto com o reagente auxiliar de filtração. Posteriormente, a polpa de rejeito foi colocada dentro do cilindro do filtro contendo o meio filtrante e aberto ao ambiente. O tempo de filtração da torta foi medido a partir do acionamento do vácuo até o momento em que não se observa saída de filtrado do equipamento.

Após a torta retirada do equipamento, com o auxílio de um paquímetro mediu-se a espessura da torta, sendo a mesma pesada e levada para a estufa a 100°C por 24 horas, para que posteriormente fosse pesada no seu estado seco, para se avaliar a umidade contida na torta.

Também foram avaliados a qualidade do material filtrado, utilizando um Turbidímetro HI93703 da marca Hanna Instruments. A análise de turbidez do filtrado pode ser comparada de forma diretamente proporcional com a qualidade da filtração. Ou seja, quanto menor o valor da turbidez, o filtrado apresenta-se mais puro, pois contém menores quantidades de sólidos presentes no filtrado.

3.7 Unidade de filtração a vácuo.

A unidade de filtração a vácuo é composta por um bomba a vácuo, acoplada a um Kitassato, que é utilizado como um reservatório de vácuo interligado por mangueiras. O meio filtrante utilizado foi fixado em um funil de Buchner que apresenta um diâmetro de 13,5 cm, onde a polpa é alimentada por cima. Na Figura 18: Unidade de Filtração a Vácuo. pode-se observar a montagem do teste.

Funil de Buchner

Kitassato

Bomba de vácuo

Ao finalizar o teste, foi usado um paquímetro para medir a espessura da torta obtida. A torta foi pesada e, logo em seguida, colocada por 24 horas na estufa, para ser pesada posteriormente. Também foi avaliada a turbidez do material filtrado, utilizando um Turbidímetro HI93703 da marca Hanna Instruments. Essa análise pode ser comparada de forma diretamente proporcional à qualidade da filtração, ou seja, quanto menor o valor da turbidez, o filtrado apresenta-se mais puro, pois contém menores quantidades de sólidos presentes no filtrado.

Para a preparação da polpa, inicialmente foi determinado o volume que a polpa ocupou para cada tipo de unidade de filtragem utilizado na pesquisa. Para os

testes com a unidade a pressão foi determinado um volume de área para polpa ocupar de 461,58 cm³ e para unidade a vácuo 429,20 cm³.

Preparação de Polpa (Filtro a pressão)

Como o filtro a pressão apresenta um diâmetro de 14cm, com a relação de altura da torta determinada em 3cm, foi determinado um volume de polpa para a realização dos testes de 461,58cm³. A massa de sólidos do rejeito foi definida partir dessa relação de volume e porcentagem de sólidos de cada teste (55%,60% e 65%). Na Figura 19, a seguir é apresentado a massa de polpa para os testes no equipamento de filtração a pressão.

Figura 19: Massa de polpa para filtro a pressão.

Preparação de Polpa			
%Sol	65	60	55
M. Sólidos (g)	529,46	461,58	400,85
M. Agua (g)	285	307,72	327,96
M. Polpa (g)	814,55	769,3	728,81

Preparação de Polpa (filtro a vácuo)

A Unidade de Filtração a vácuo utiliza um funil de Buchner que tem como diâmetro 13,5, com a relação de altura da torta determinada em 3 cm, foi determinado um volume de polpa para a realização dos testes de 429,20 cm³. A massa de sólidos do rejeito foi definida a partir dessa relação de volume, conforme mostrado Figura 20

Figura 20: Massa de polpa para filtro a vácuo.

Preparação de Polpa			
%Sol	65	60	55
M. Sólidos (g)	492,32	429,2	372,3
M. Agua (g)	265,09	286,13	304,96
M. Polpa (g)	757,41	715,33	677,68

3.9 Aplicação de Diferentes reagentes auxiliares de filtração no Método de Filtro a Pressão.

Nos testes de filtração a pressão utilizou-se dois tipos de reagentes auxiliares de filtração, com o objetivo de encontrar oportunidades para a redução na umidade da torta e na concentração de sólidos no filtrado, além de aumento da

Taxa Unitária de Filtragem (TUF), bem como investigar a melhor dosagem e qual reagente foi mais eficiente no método aplicado.

Foram testados os reagentes magnafloc 10, floculante de composição aniônico e o reagente magnafloc 504, que tem sua composição catiônico.

A Figura 21 a seguir, apresenta o volume de solução do reagente em ml, utilizada para os testes no filtro de Pressão.

Figura 21: Preparação do volume de solução do reagente.

Preparação do Volume de Solução do Reagente (g)			
Dosagem de Reagente (g/t)	% de Sólidos		
	65	60	55
70	12,35	10,77	9,35
55	9,7	8,46	7,35
40	7,05	6,15	5,35

3.10 Planejamento Fatorial a dois níveis com Ponto Central.

O presente trabalho tem como objetivo otimizar e definir os melhores parâmetros para filtração de rejeito de minério de ferro, desta forma, serão escolhidos dois valores distintos de pH, porcentagem de sólidos e dosagem de reagente para a análise de seus efeitos nos resultados dos testes. Para a otimização do processo de filtração têm-se a intenção de minimizar os valores das variáveis analisadas, que foram tempo de formação da torta, turbidez do filtrado e umidade da torta. O ponto central (0) foram introduzidos no planejamento a fim de fazer a estimativa de erro nos resultados dos ensaios. Este método foi adotado em detrimento da duplicata dos testes, prevendo a maior facilidade de trabalhar com os mesmos valores em todas variáveis deste ponto. Os valores das variáveis no ponto central (nível 0) são equivalentes ao ponto médio entre os níveis 1 e -1 e dessa forma, deverá determinar a confiabilidade em se fazer inferências sobre a população, a partir do conjunto de amostras.

3.13 Análise dos Resultados

Em ambas as unidades de filtragem, ao final do teste, recolhe-se o filtrado e a torta para a pesagem das massas úmida e seca. A espessura da torta, o volume e a turbidez do filtrado também são dados interessantes de serem coletados. Com base nesses dados são determinados os parâmetros da filtragem, os quais

são a umidade da torta, a taxa unitária de filtragem (TUF) e a turbidez do filtrado.

A umidade da torta em base úmida (b.u) é a relação entre a quantidade de água presente entre as partículas sólidas dividida pela massa úmida, obtida conforme Equação II.

$$Umidade\ b.u\ (\%) = \frac{massa\ úmida\ (g) - massa\ seca\ (g)}{massa\ úmida\ (g)} \times 100$$

Eq. II

A TUF ou produtividade é o parâmetro que quantifica a massa seca produzida em relação à área filtrante por unidade de tempo. O cálculo dessa taxa pode ser obtido por meio da Equação 3. (ARAUJO JUNIOR, 2014).

$$TUF\ (kg\ h / m^2) = \frac{massa\ seca\ (kg) \times 3600}{área\ de\ filtragem\ (m^2) \times tempo\ de\ ciclo(s)}$$

Eq. III

A Turbidez é quantificada logo após a realização dos testes, por meio de um Turbidímetro, que apresenta em valores numéricos a qualidade do filtrado. Conforme mostrado na Figura 22.

Figura 22: Turbidímetro para Análise de Turbidez.



A turbidez é um parâmetro, onde se espera que tenham os menores resultados, este trabalho tem como objetivo minimizar os resultados obtidos com o material filtrado.

Com estes resultados foram avaliados a interferência das variáveis, otimização dos resultados e os parâmetros mais significativos nos testes através da utilização software Minitab 19.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.

Neste capítulo serão apresentados os resultados acerca da caracterização física do rejeito que contempla a análise da composição do material, análise granulométrica, densidade dos sólidos e os ensaios de filtragem.

4.1 Composição

A análise por fluorescência de raios X proporcionou a obtenção da composição química do rejeito utilizados nos testes de filtragem. Segundo LOPES, 2017 os resultados encontrados com a análise são apresentados na Figura 23.

Figura 23: Composição química.

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	Cs ₂ O
72,97%	17,94%	7,99%	0,484%	0,182%	0,161%	0,145%	0,113%

Como pode ser observado, o material apresenta uma composição química com a presença de SiO₂, Fe₂O, Al₂O₃, MnO, K₂O, SO₃, P₂O₅, e Cs₂O, no qual apresentam porcentagens consideráveis de 72,97% de SiO₂, e 17,94% de Fe₂O₃. Por tratar-se de um rejeito, o material tem uma presença mais predominante do teor de SiO₂, em relação a porcentagem de Fe₂O, material de interesse econômico, sendo assim caracterizando o material como um rejeito de minério de ferro.

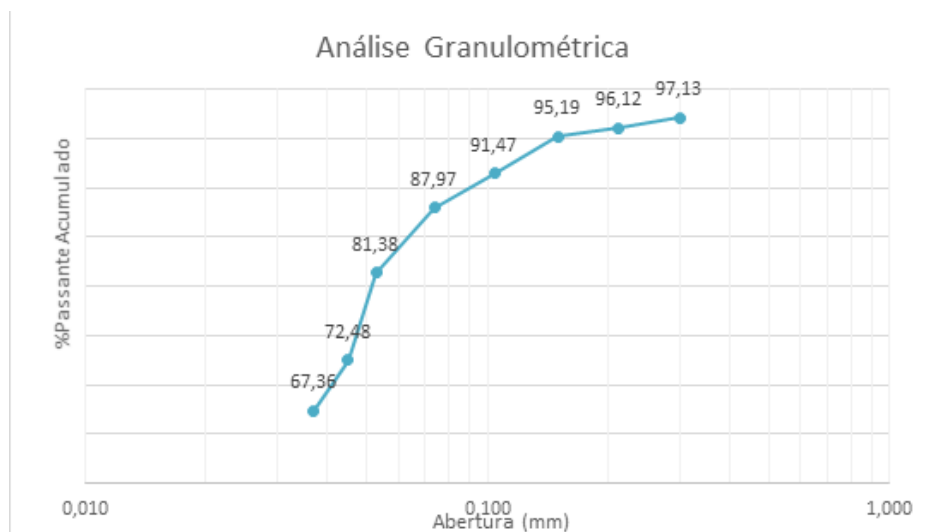
4.2 Análise de Granulometria

A análise granulométrica diz respeito a um conjunto de métodos que acessam a distribuição de tamanho das partículas num material granulado, ou produto fragmentado. No presente trabalho utilizou-se o peneiramento, um dos métodos mais antigos empregados na área de processamento mineral.

Realizou-se o peneiramento com 100,00g de amostra. Nota-se uma perda de 1,91 g, que corresponde a 1,91% do montante, o que corresponde a uma metodologia bem executada, já que admite-se até 5% de perda de massa.

Também observou-se que 67,3% das partículas estão com a granulometria abaixo de 400# (0,037mm). A partir dos dados obtidos pelo peneiramento, construiu-se a curva granulométrica, representada pela Figura 244.

Figura 24: Análise Granulométrica.



Pela curva granulométrica, nota-se que o d80, abertura a qual 80% das partículas atravessam a malha, é de aproximadamente 0,053 mm.

4.3 Picnometria

A picnometria tem sido uma técnica largamente utilizada no campo da mineração, pois com ela pode-se determinar a densidade real da amostra mineral. Os resultados obtidos para a amostra em questão são apresentados na Figura 25.

Figura 25: Resultados da Picnometria.

Picnometria								
AMOSTRA	Picnômetro	A1(g)	A2(g)	A3(g)	A4(g)	d (g/cm ³)	d médio (g/cm ³)	Desvio Padrão (g/cm ³)
1	1	29,21	37,21	85,37	80,05	2,99	3,00	0,01059219
	2	29,6	39,28	85,97	79,51	3,01		
	3	29,61	39,2	85,59	79,2	3,00		

Diante a análise, pode-se observar que a amostra apresentou uma densidade média de 3,00 g/cm³. Este valor pode ser explicado devido a grande quantidade de sílica presente no material.

4.4 Resultados do Planejamento Experimental – Filtragem a Pressão utilizando MAGNAFLOC 10

Para realização dos testes, primeiramente foram selecionadas as variáveis críticas mais importantes. Neste trabalho foram avaliados 3 fatores:

- A: % de Sólidos
- B: pH
- C: Dosagem de Reagente

Foram realizados 13 testes, sendo obtidos os parâmetros quantificadores da filtragem, os quais são a umidade da torta, a taxa unitária de filtragem (TUF) e turbidez do filtrado. Na Figura 26, a seguir são apresentados os resultados dos testes.

Figura 26: Resultados da Filtragem a Pressão com Magnafloc 10.

Teste	%Sol	pH	Dosagem	Umidade %	Turbidez (FTU)	TUF (kg/h/m ²)
1	55	5	70	17,48	622	0,396
2	60	6,5	55	14,90	338	0,432
3	65	5	70	15,34	369	0,540
4	60	6,5	55	17,45	330	0,540
5	55	5	40	14,66	416	0,360
6	60	6,5	55	14,48	451	0,396
7	55	8	40	13,56	378	0,360
8	65	8	40	18,36	320	0,540
9	55	8	70	16,43	590	0,360
10	65	5	40	14,67	398	0,504
11	60	6,5	55	12,29	156	0,540
12	60	6,5	55	14,00	241	0,396
13	65	8	70	18,21	-	0,540

Diante dos resultados, é possível observar que a umidade apresenta resultados bastante semelhantes, isso levando em consideração aos estudos de umidade ótima, com rejeitos de minério de ferro, a granulometria do material trabalhado e o metodologia de filtragem em questão.

Já a turbidez, que está relacionada à porcentagem de sólidos no filtrado, apresentou valores maiores do que o aceitável. Segundo o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), a turbidez aceitável sem ter a necessidade de realizar um tratamento deste efluente é de até 100 FTU. Como visto, nenhum dos resultados possibilitaria que fosse direcionado o material filtrado dos testes diretamente ao meio ambiente. Também é possível perceber que um dos testes de turbidez, por apresentar um valor elevado, não apresentou leitura (extrapolou o limite de detecção do equipamento).

Isto se deve ao aumento da velocidade de contato entre as partículas e o meio

filtrante, na qual o aumento da pressão induz a formação do filtrado mais rapidamente, onde maiores volumes de polpa tendem a passar pelo meio filtrante antes da formação da torta, acarretando no carregamento de mais partículas ultrafinas.

A Taxa Unitária de Filtragem, parâmetro que quantifica a massa seca produzida em relação à área filtrante por unidade de tempo, apresentou bons resultados, bem ligados a porcentagem de sólidos utilizados nos testes. Os testes que utilizaram maiores porcentagem de sólidos apresentaram melhores resultados.

Figura 27: Filtragem a pressão com Magnafloc 10.

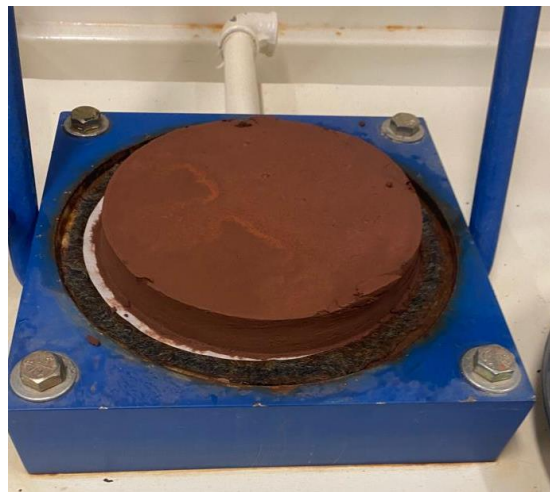


Figura 28: Torta seca da filtragem a pressão com Magnafloc 10.



4.4.1 Análises Estatísticas

Com o objetivo de minimizar o valor da umidade, turbidez, e maximizar a Taxa unitária de filtragem (TUF), os testes foram analisados usando o software Minitab 19.

4.4.1.1 Umidade

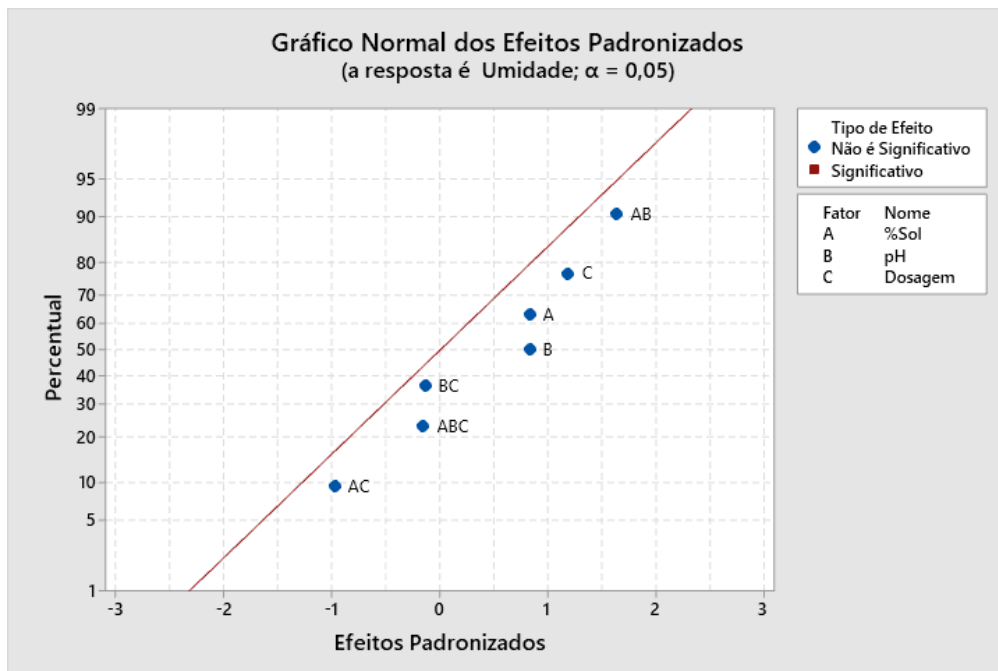
Diante a análise experimental foram avaliadas as variáveis de entrada em relação ao fator de umidade da torta e, com base no Gráfico de Pareto, ferramenta que permite identificar a relevância amostral significativa em um conjunto de dados, foi possível identificar que nenhuma das variáveis influenciam significativamente a umidade da torta (Figura 29).

Figura 29: Gráfico de Pareto para Umidade.



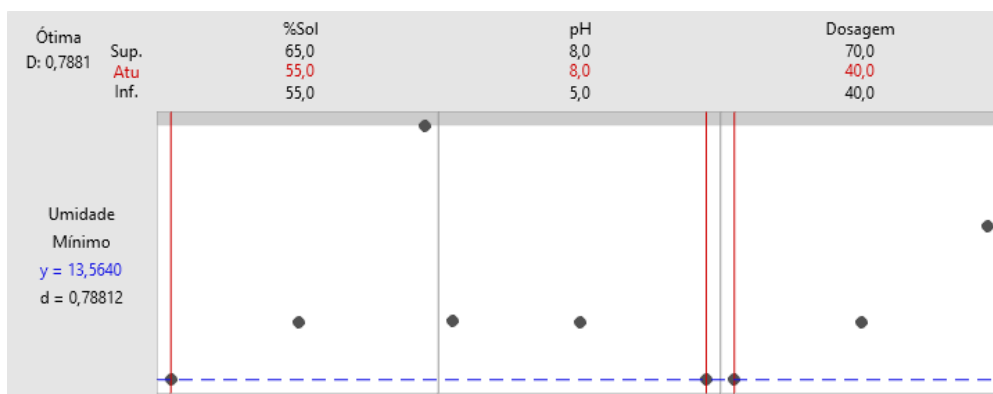
Além do Gráfico de Pareto, o Gráfico Normal de Efeitos Padronizados, também confirma a discussão em que nenhuma das variáveis possui efeito significativo negativo ou positivo na umidade da torta.

Figura 30: Gráfico Normal dos Efeitos Padronizados.



O software MiniTab 19 fornece a otimização do processo, indicando cada nível em que as variáveis devem estar para que o valor de umidade seja mínimo. Pela Figura 311, é possível analisar o cenário o ideal para os testes, gerando uma resposta de umidade de 13,56% (b.u.), umidade próxima da umidade ótima de compactação determinada por Santos (2022), com uma umidade de 13,04%.

Figura 31:Resposta de Otimização para umidade.

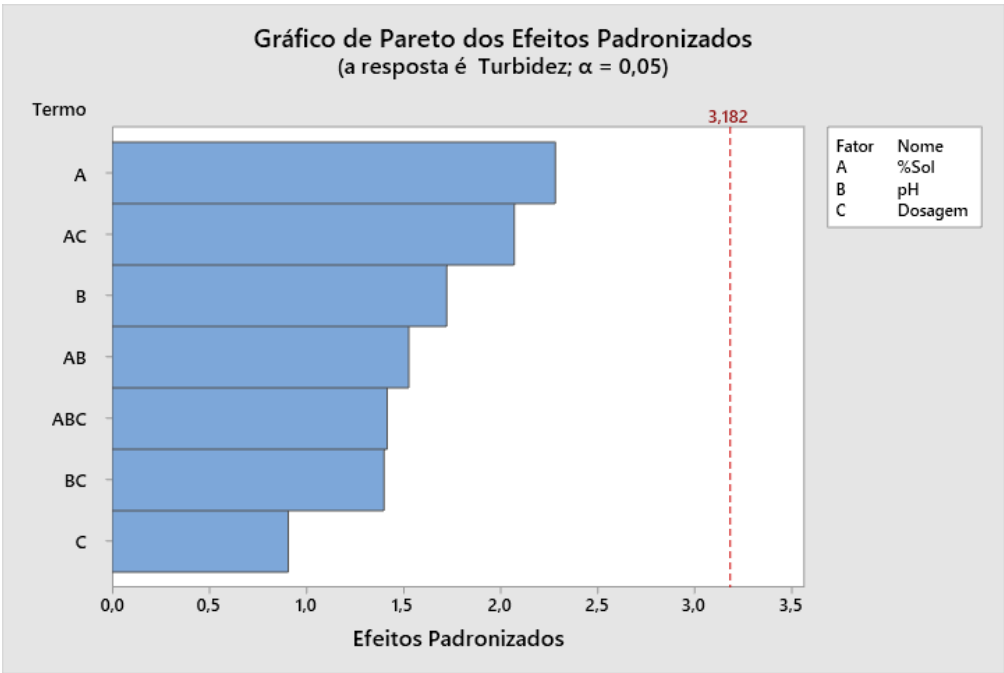


4.1.1.2 Turbidez

Assim como a umidade, quando analisamos a influência dos dados de entrada com relação à Turbidez, através do Gráfico de Pareto, pode-se concluir que nenhuma das entradas possui um efeito significativo na variável de resposta analisada. Isso sugere

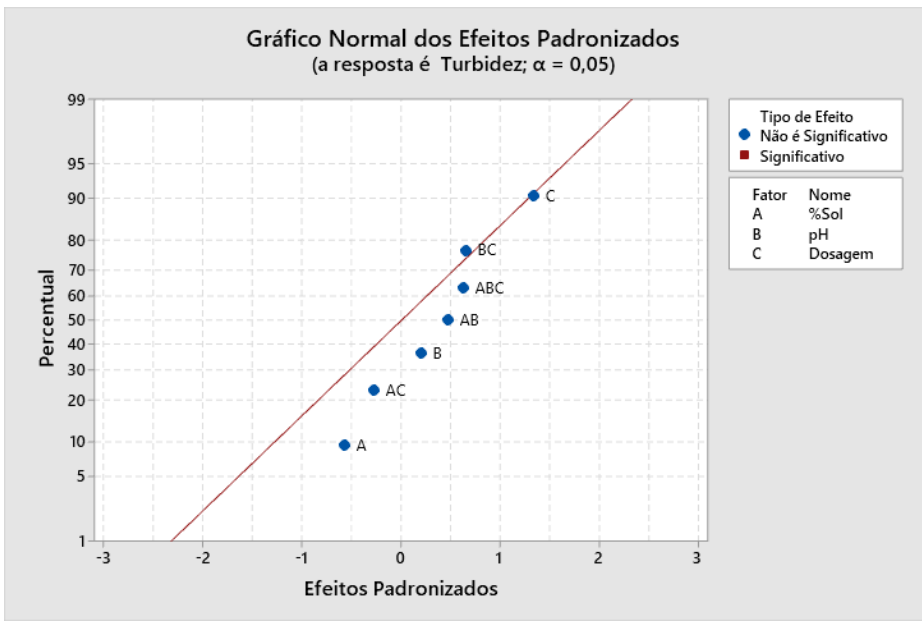
que os fatores testados não exercem influência significativa sobre a variável em questão (Figura 32).

Figura 32: Gráfico de Pareto para Turbidez.



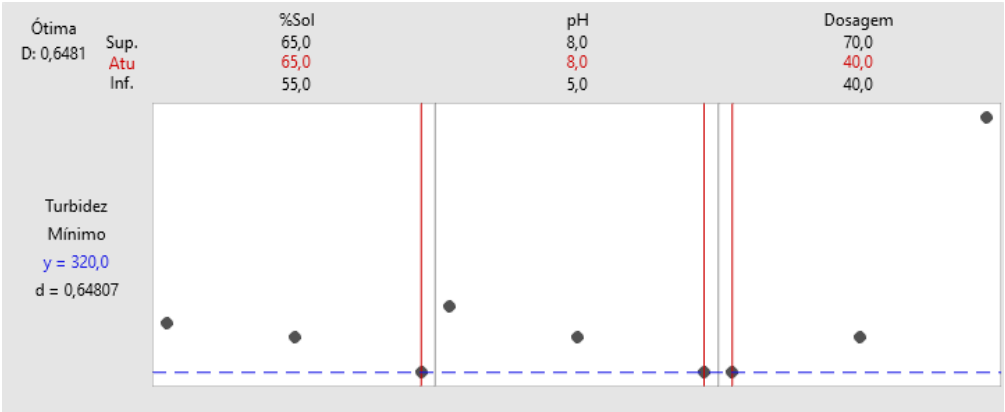
Ao analisar o Gráfico Normal de Efeitos Padronizados, se nenhuma das variáveis apresenta barras significativamente acima ou abaixo da linha de base, indica-se que nenhuma das variáveis possui um efeito significativo positivo ou negativo na variável de resposta. Isso implica que as variáveis testadas não exercem uma influência substancial na variável analisada, seja ela qual for.

Figura 33: Gráfico normal dos efeitos padronizados.



Na Figura 34 é apresentado o resultado otimizado dos testes, indicando cada nível em que as variáveis devem estar para que a resposta apresente seu valor mínimo. É possível observar o melhor resultado e as variáveis ideais, gerando uma resposta para turbidez de 320 FTU, no qual apresentou um valor maior do que o aceitado pela CONAMA (100 FTU), sendo necessário um tratamento deste efluente.

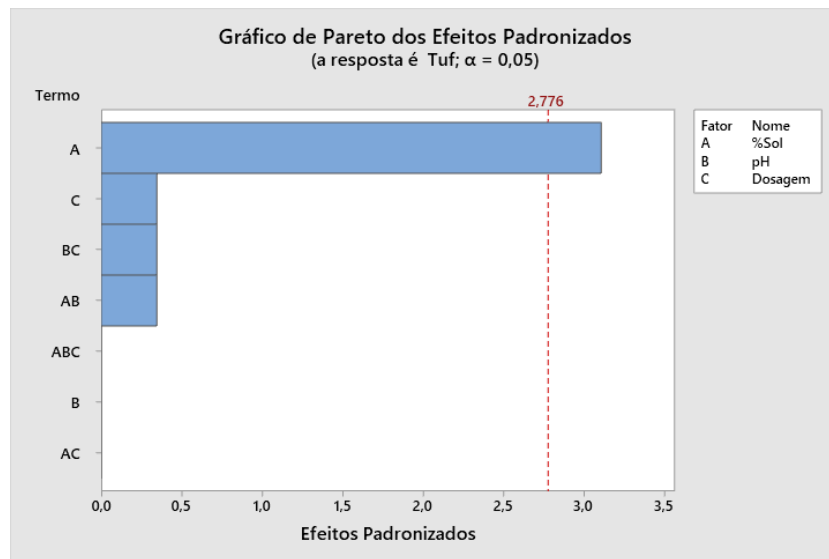
Figura 34: Resposta de Otimização da Turbidez.



4.4.1.3 Taxa Unitária de Filtragem.

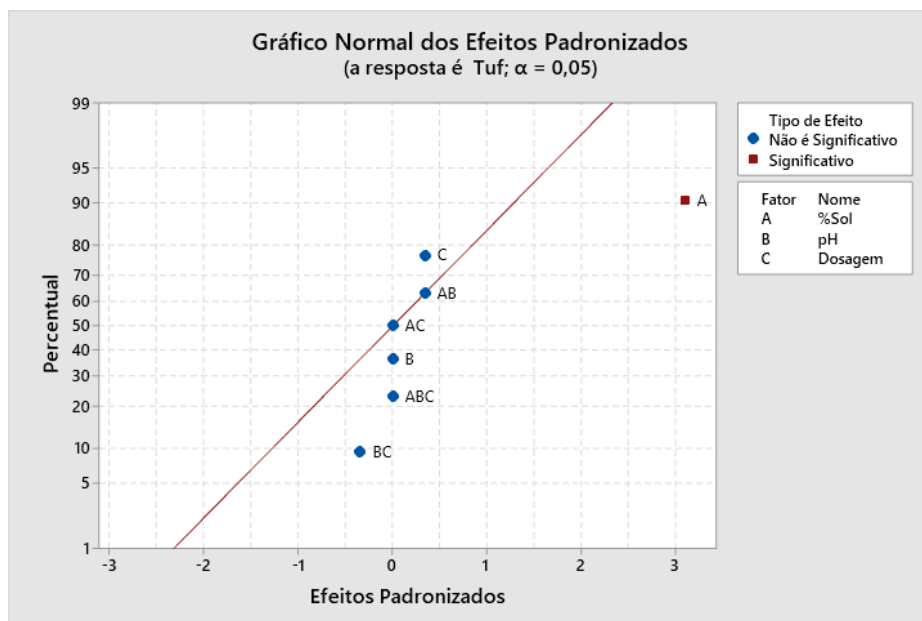
No gráfico de Pareto é apresentado de forma direta quais as variáveis significativas para a realização dos testes. De acordo com o gráfico dos efeitos padronizados, ao nível de significância de 5%, a variável porcentagem de sólidos apresenta um efeito significativo sobre a taxa unitária de filtragem, conforme mostrado, onde as barras ultrapassam a linha pontilhada.

Figura 35: Gráfico de Pareto para TUF.



Entretanto, o gráfico de Pareto não avalia se os efeitos dos fatores exercem efeitos positivos ou negativos sobre a resposta. Desta forma, no gráfico de efeitos padronizados é verificado essa influência do tipo de efeito (Figura 366).

Figura 36: Gráfico dos efeitos padronizados.



Pode-se observar que os efeitos principais ou de interação que estiverem à direita da reta normal têm influência positiva sobre a resposta. Por outro lado, aqueles efeitos que estiverem à esquerda da reta normal apresentam efeito negativo sobre a resposta quando se passa o fator ou variável do seu nível baixo para o seu nível alto. Diante disso, é perceptível que o Fator A, (%Sólidos),

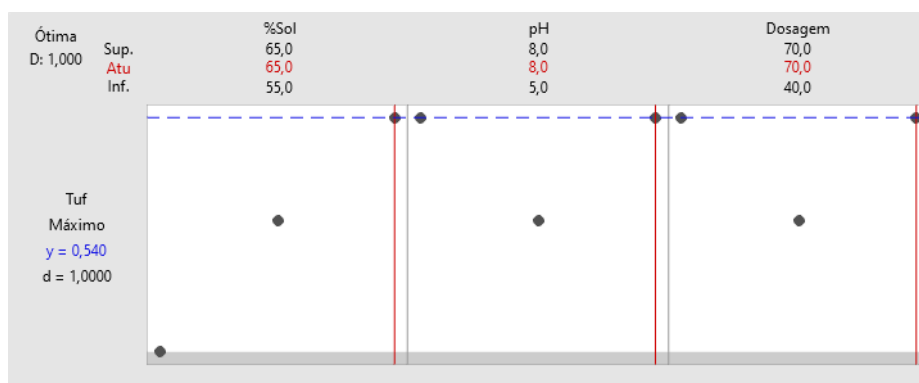
apresenta influência nas respostas dos testes, e de maneira positiva, ou seja, quanto maior a porcentagem de sólidos, maior será a TUF. Na equação de regressão, também é possível analisar se as variáveis influenciam positivamente ou negativamente na resposta.

$$\begin{aligned} \text{Tuf} = & -0,23 + 0,0084 \% \text{Sol} - 0,050 \text{ pH} + 0,0032 \text{ Dosagem} + 0,0012 \% \text{Sol} * \text{Ph} + 0,00000 \% \text{Sol} * \text{Dosagem} \\ & - 0,0004 \text{ pH} * \text{Dosagem} - 0,000000 \% \text{Sol} * \text{pH} * \text{Dosagem} + 0,0108 \text{ Pt Ct} \end{aligned}$$

Eq. IV

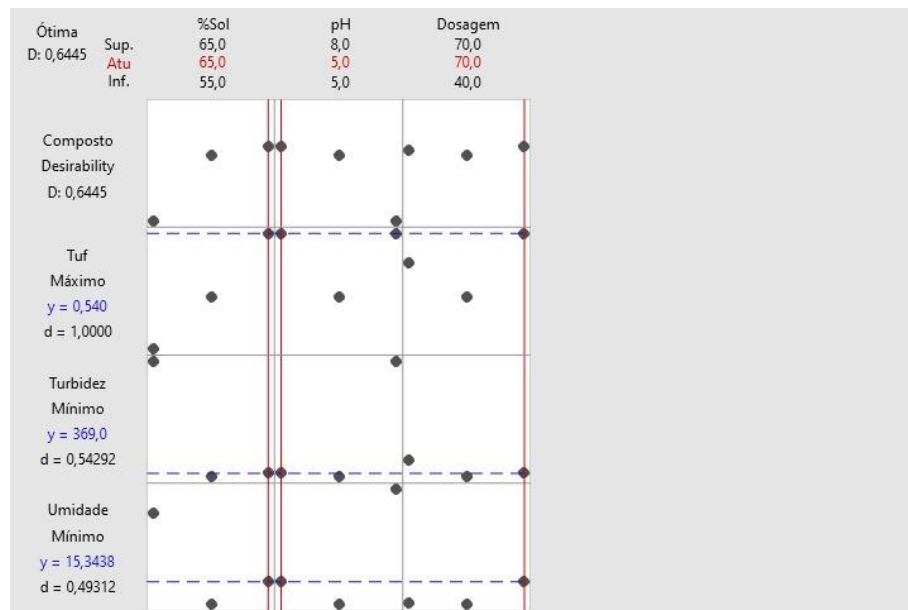
Para maximizar o resultado da taxa unitária de Filtragem (TUF), conforme mostrado na Figura 37, é necessário trabalhar com as variáveis dosagem no nível máximo de 70 g/t, pH no nível máximo (pH 8) e a porcentagem de sólidos no nível máximo (65% sólidos), gerando uma resposta, de TUF de 504 kg/h/m².

Figura 37: Otimização de resposta para TUF.



Por fim, ao analisar todos os resultados obtidos com os testes, as respostas foram avaliadas para definir qual o melhor resultado na otimização da resposta com a Taxa Unitária de Filtragem (TUF), Umidade% e a Turbidez dos Testes. Na Figura 38, é apresentado a melhor resposta nos testes realizados e a melhor combinação.

Figura 38: Otimização da Resposta de Filtragem com Magnafloc10



Para obter o melhor resultado no experimento, é necessário trabalhar com as variáveis dosagem no nível máximo de 70 g/t, pH no nível mínimo (pH 5) e a porcentagem de sólidos no nível máximo (65% sólidos), gerando uma resposta, de Taxa Unitária de Filtragem de 540 kg/h/m², de Turbidez de 369,0 FTU e 15,34 de Umidade.

4.5 Resultados do Planejamento Experimental – Filtragem a Pressão utilizando MAGNAFLOC 504.

Assim como nos testes realizados com o reagente magnafloc 10, para realização dos testes foram selecionadas as variáveis críticas mais importantes. Sendo avaliados 3 fatores:

- A: % de Sólidos
- B: pH
- C: Dosagem de Reagente

Foram realizados 13 testes, e após a realização dos testes, foram obtidos os parâmetros quantificadores da filtragem, os quais são a umidade da torta, a taxa unitária de filtragem (TUF) e a porcentagem de sólidos no filtrado, no caso a Turbidez. Na Figura 39 a seguir, são apresentados os resultados dos testes.

Figura 39: Resultados da Filtragem a Pressão com Magnafloc 504.

Teste	%Sol	pH	Dosagem	Umidade %	Turbidez (FTU)	TUF (kg/h/m ²)
1	60	6,5	55	16,59	234	0,504
2	55	5	70	16,52	131	0,432
3	65	8	70	19,00	398	0,612
4	60	6,5	55	17,00	195	0,514
5	65	5	40	17,92	235	0,648
6	55	5	40	16,17	161	0,432
7	65	8	40	16,91	398	0,648
8	65	5	70	13,53	239	0,684
9	60	6,5	55	16,11	304	0,540
10	55	8	70	16,52	312	0,360
11	55	8	40	24,64	210	0,504
12	60	6,5	55	17,42	251	0,468
13	60	6,5	55	17,50	180	0,540

Ao analisar os resultados, é possível observar que a umidade apresenta resultados bastante semelhantes. Em comparação aos resultados dos testes de pressão utilizando o magnafloc 10, apresentaram uma maior umidade. Isso pode se dar pela diferença de interação química do reagente utilizado.

Assim como no experimento anterior, a turbidez, que está relacionada à porcentagem de sólidos no filtrado, apresentou valores maiores do que o aceitado pelo CONAMA, que estabelece as condições e tratamentos dos efluentes.

Este resultado pode ser explicado pelo método utilizado de filtragem que com a pressão impulsionando as partículas ao meio filtrante em uma velocidade maior

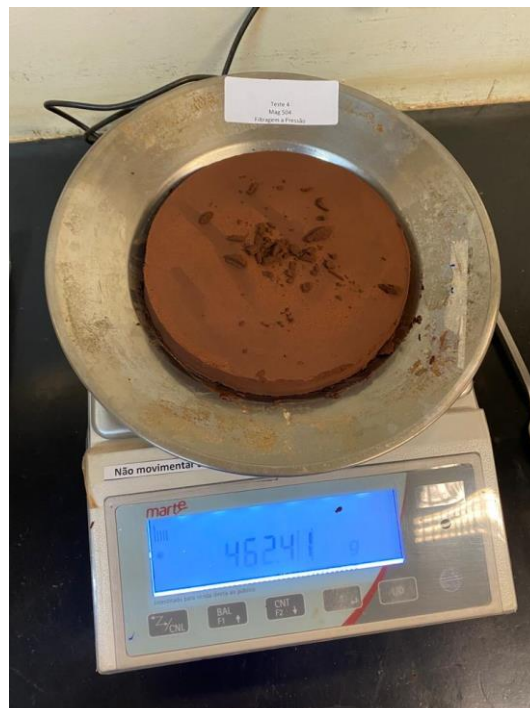
de aproximação, fazem com que as partículas ultrafinas passem pelo meio filtrante, antes mesmo da formação da torta.

A Taxa Unitária de filtração, o parâmetro que quantifica a massa seca produzida em relação à área filtrante por unidade de tempo, apresentou bons resultados, melhores que os realizados no experimento anterior, chegando a uma taxa Unitária de Filtração de 684 kg/h/m^2 , um aumento de 21% em comparação ao melhor resultado de TUF no experimento anterior.

Figura 40: Filtração a pressão com Magnafloc 504.



Figura 41: Torta seca do filtrado com Magnafloc 504.



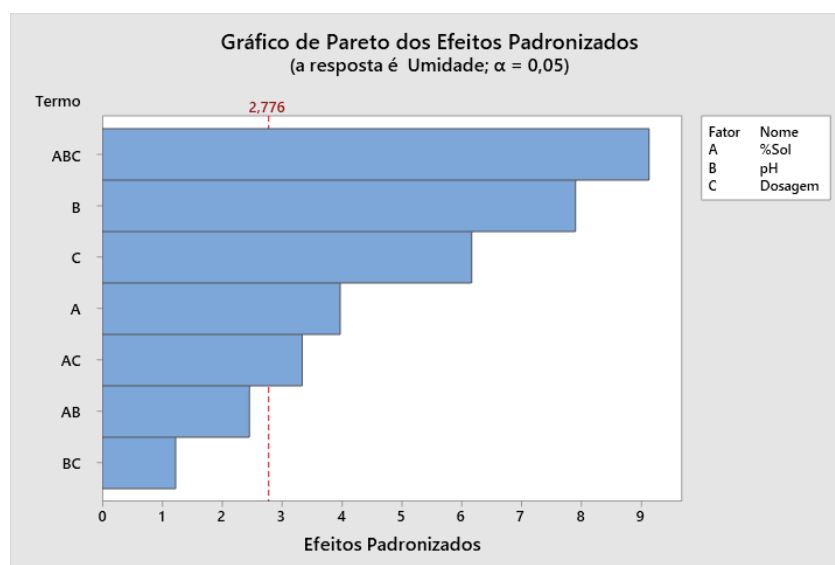
4.5.1 Análises Estatísticas

Com o objetivo de minimizar o valor da umidade, turbidez e maximizar a Taxa unitária de filtragem (TUF), os testes foram analisados usando o software Minitab 19.

4.5.1.1 Umidade

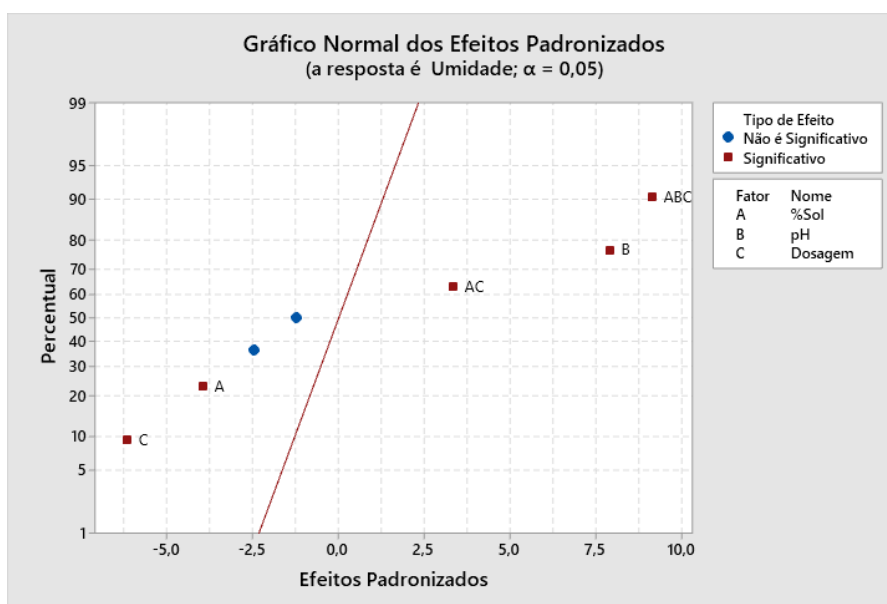
Diante a análise experimental foram avaliadas as variáveis de entrada em relação ao fator de umidade da torta e, com base no Gráfico de Pareto, ferramenta que permite identificar a relevância amostral significativa em um conjunto de dados. Assim, de acordo com o Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados, ao nível de significância de 5%, as variáveis de A, B e C e as interações que as barras ultrapassam a linha pontilhada são significativas para a filtragem do rejeito com o uso do magnafloc 504. Apenas as interações AB (%sólidos e pH) e BC (pH e Dosagem) não foram tão significativas.

Figura 42: Gráfico de Pareto para Umidade.



No entanto, no gráfico de Pareto não é possível verificar se os efeitos dos fatores ou interação entre fatores exercem efeito positivo ou negativo sobre a resposta. Neste sentido, lança-se mão do gráfico de efeitos normais padronizados. A Figura 433, pode-se observar que os efeitos principais ou de interação que estiverem à direita da reta normalmente têm influência positiva sobre a resposta, neste caso o fator B (pH), e as interações ABC e AC, que influenciam de forma positiva. Por outro lado, aqueles efeitos que estiverem à esquerda da reta normal apresentam efeito negativo sobre a resposta.

Figura 43: Gráfico normal dos efeitos padronizados.



Outra maneira de avaliar a influência positiva ou negativa dos fatores de forma direta, é através da equação de regressão, mostrada a seguir. É possível observar quais os fatores foram positivos e negativos, no qual também nos serve para avaliarmos a qualidade do modelo de testes avaliados.

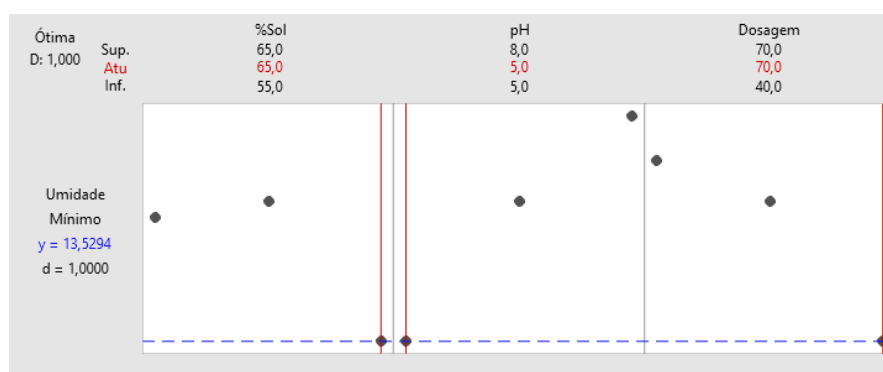
Umidade

$$-331,0 + 5,704 \%Sol + 60,47 \text{ pH} + 5,913 \text{ Dosagem} - 0,980 \%Sol * \text{pH} - 0,0988 \%Sol * \text{Dosagem} - 1,007 \text{ pH} * \text{Dosagem} + 0,01659 \%Sol * \text{pH} * \text{Dosagem} - 0,726 \text{ Pt Ct}$$

Eq. V

Para minimizar a umidade nos testes, é necessário trabalhar com as variáveis dosagem no nível máximo de 70 g/t, pH no nível mínimo (pH 5) e a porcentagem de sólidos no nível máximo (65% sólidos), gerando uma resposta, de umidade de 13,52 % (b.u.).

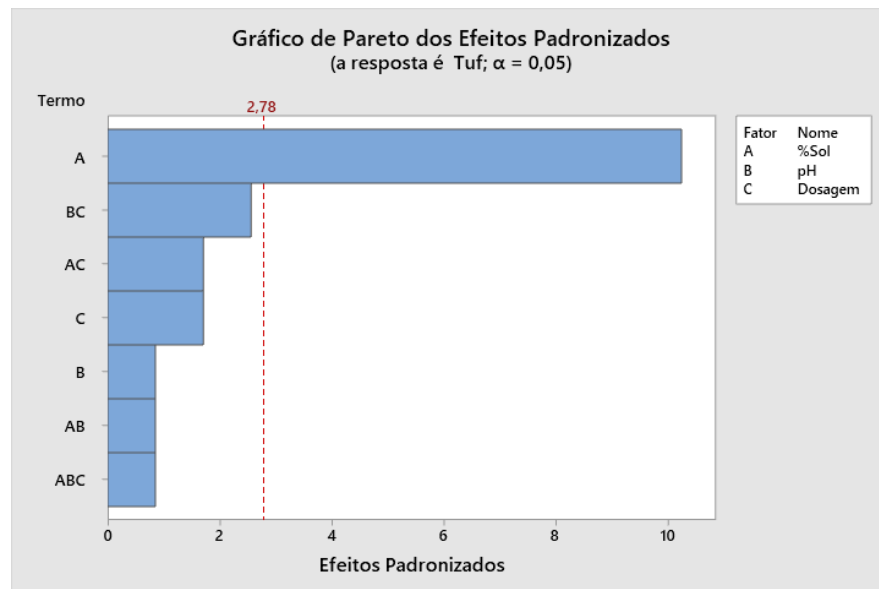
Figura 44: Otimização da Resposta de Umidade.



4.5.1.2 Taxa Unitária de Filtragem (TUF)

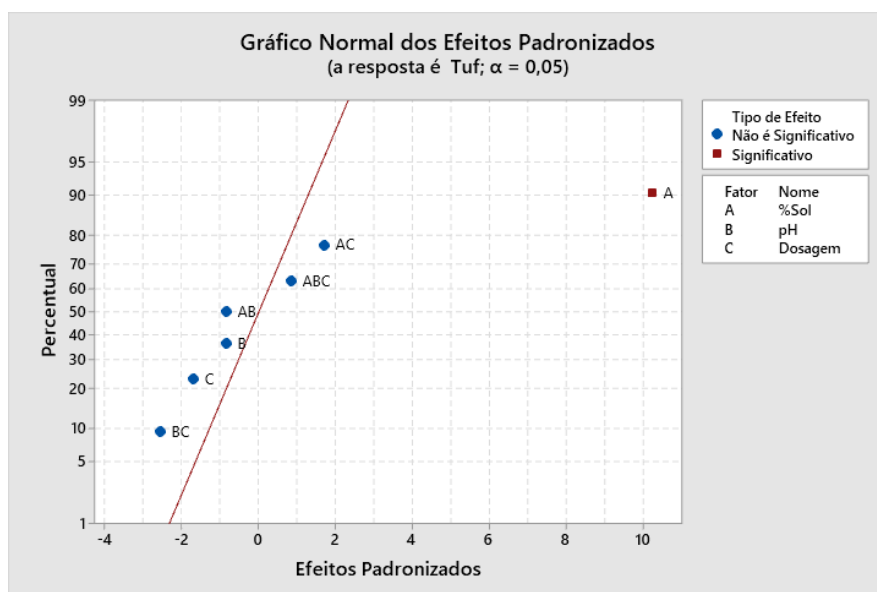
Na Figura 45 é apresentado o gráfico de Pareto, onde é possível observar quais as variáveis são significativas para a realização dos testes. De acordo com o gráfico dos efeitos padronizados, ao nível de significância de 5%, o fator A (% de Sólidos) influencia na taxa unitária de filtragem, conforme mostrado na Figura 455, onde a barra ultrapassa a linha pontilhada.

Figura 45: Gráfico de Pareto para TUF.



Através do Gráfico Normal dos efeitos, pode-se observar que os efeitos principais ou de interação que estiverem à direita da reta normal têm influência positiva sobre a resposta quando do aumento do seu nível. Por outro lado, aqueles efeitos que estiverem à esquerda da reta normal apresentam efeito negativo sobre a resposta quando se passa o fator ou variável do seu nível baixo para o seu nível alto, desta forma pode-se dizer que o Fator A (% de sólidos) apresenta influência positiva no resultado da Taxa Unitária de Filtragem.

Figura 46: Gráfico normal dos efeitos padronizados.

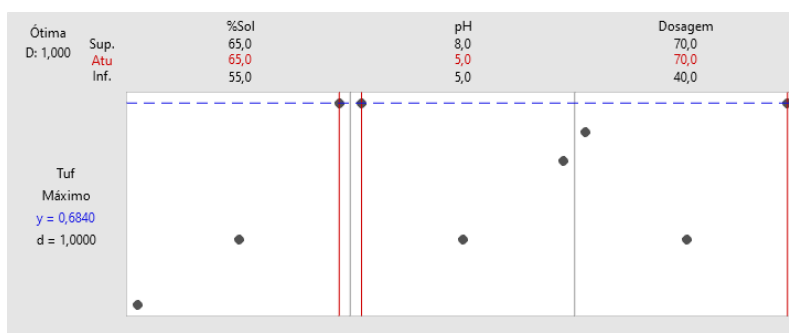


$$Tuf = -2,47 + 0,0448 \%Sol + 0,396 pH + 0,0234 Dosagem - 0,00560 \%Sol*pH - 0,000280 \%Sol*Dosagem - 0,00600 pH*Dosagem + 0,000080 \%Sol*pH*Dosagem - 0,0268 Pt Ct$$

Eq. VI

Para maximizar a Taxa Unitária de Filtragem (TUF), é necessário trabalhar com as variáveis dosagem no nível máximo de 70 g/t, pH no nível mínimo (pH 5) e a porcentagem de sólidos no nível máximo (65% sólidos), gerando uma resposta, de TUF de 684 kg/h/m², cerca de 21% maior que no experimento anterior. (Figura 47)

Figura 47: Otimização da Resposta para TUF.

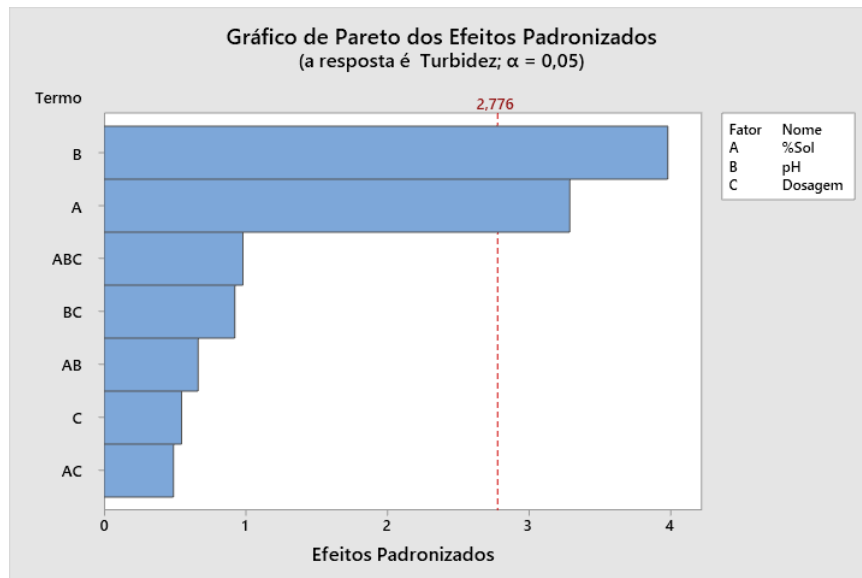


4.5.1.3 Turbidez

A Figura 48, apresenta o gráfico de Pareto para a Turbidez, onde pode-se

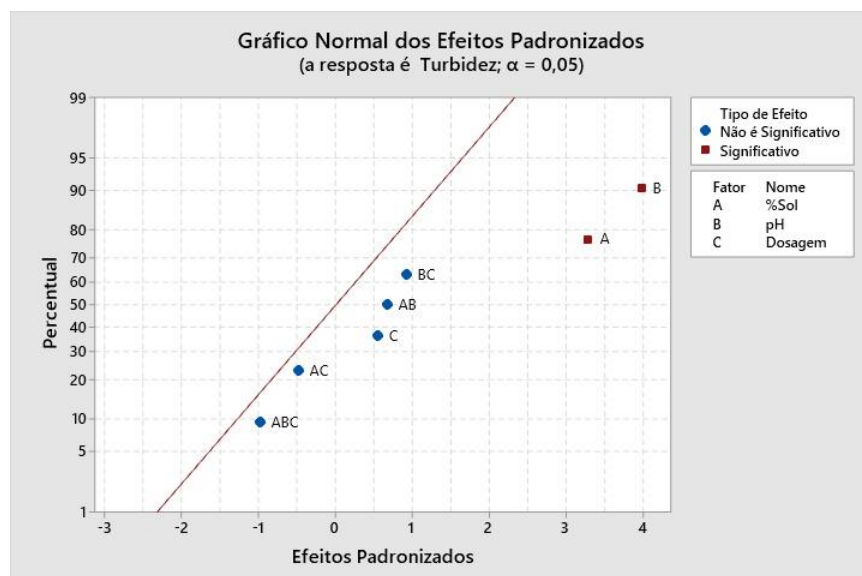
observar quais efeitos são significativos ou não. De acordo com o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados ao nível de significância de 5%, os Fatores A (% de sólidos) e B (pH) cujas barras ultrapassam a linha pontilhada apresentam influência na turbidez da filtragem, para os níveis estudados.

Figura 48: Gráfico de Pareto para Turbidez.



No entanto, no gráfico de Pareto não é possível verificar se os efeitos dos fatores ou interação entre fatores exercem efeito positivo ou negativo sobre a resposta. Neste sentido, lança-se mão do gráfico de efeitos normais padronizados, conforme apresentado na Figura 49.

Figura 49: Gráfico normal dos efeitos padronizados



Pode-se observar que os efeitos principais ou de interação que estiverem à

direita da reta normal têm influência positiva sobre a resposta, desta forma podemos observar que os Fatores A e B, apresentaram interações que influenciam positivamente. Também podemos observar estes efeitos pela equação de regressão em unidades da turbidez.

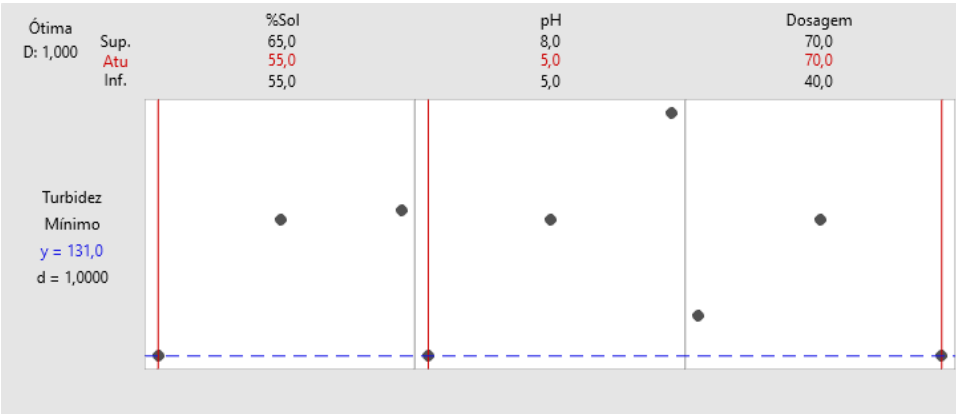
Turbidez=

2962 - 46,4 %Sol - 584 pH - 56,1 Dosagem + 9,84 %Sol*pH
+ 0,87 %Sol*Dosagem + 9,78 pH*Dosagem
- 0,151 %Sol*pH*Dosagem - 27,7 Pt Ct

Eq. VII

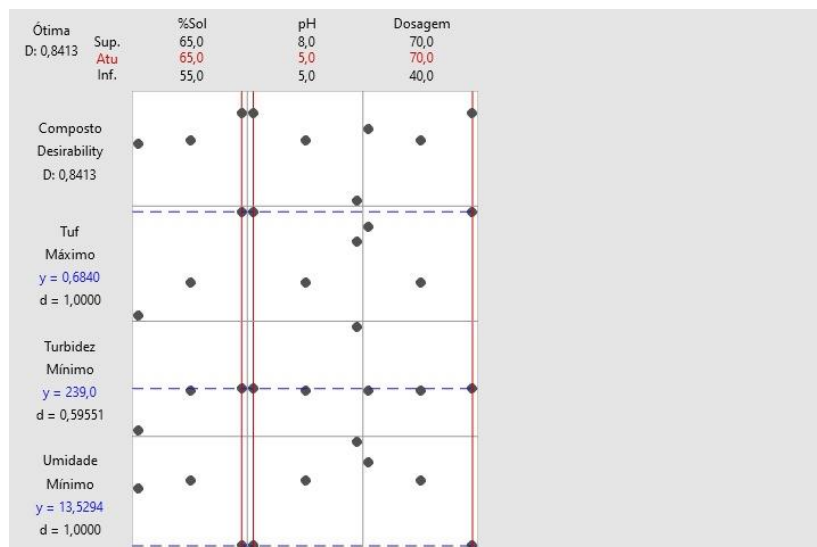
Para Minimizar a Turbidez nos testes, é necessário trabalhar com as variáveis dosagem no nível máximo de 70 g/t, pH no nível mínimo (pH 5) e a porcentagem de sólidos no nível mínimo (55% sólidos), gerando uma resposta, de Turbidez de 131,0 FTU.

Figura 50:Resposta de Otimização para Turbidez.



Por fim, ao analisar todas os resultados obtido com os testes, as respostas foram avaliadas para definir qual o melhor resultado na otimização da resposta com a Taxa Unitária de Filtragem (TUF), Umidade% e a Turbidez dos Testes. Na Figura 51, é apresentado a melhor resposta nos testes realizados e a melhor combinação.

Figura 51: Otimização da Resposta de Filtragem com Magnafloc 504.



Para obter o melhor resultado no experimento, é necessário trabalhar com as variáveis dosagem no nível máximo de 70 g/t, pH no nível mínimo (pH 5) e a porcentagem de sólidos no nível máximo (65% sólidos), gerando uma resposta, de Taxa Unitária de Filtragem de 684 kg/h/m², de Turbidez de 219,0 FTU e 13,52 de Umidade.

Ao analisar os experimentos a pressão, utilizando os reagentes Magnafloc 10 floculante aniônico e Magnafloc 504 floculante catiônico, conforme apresentado anteriormente, os resultados de umidade e turbidez apresentaram resultados aproximados, já a Taxa Unitária de Filtragem (TUF) nos testes realizados com o Magnafloc 504, apresentaram resultados mais significativos, tendo em vista que a (TUF) é o parâmetro que quantifica a massa seca produzida em relação à área filtrante por unidade de tempo, este resultado pode ser explicado maior interação química do floculante catiônico, que possui uma maior capacidade de agregar partículas, comparada com o Magnafloc 10, desta forma gerando melhores resultados. Com esta definição, os testes de filtragem a vácuo foram realizados com o reagente magnafloc 504.

4.6 Resultados do Planejamento Experimental – Filtragem á Vácuo utilizando MAGNAFLOC 504.

Assim como nos testes realizados anteriormente, para realização dos testes foram selecionadas as variáveis críticas mais importantes. Sendo avaliados 3 fatores:

- A: pH
- B: % de Sólidos
- C: Dosagem de Reagente

Foram realizados 13 testes, e após a realização dos testes, foram obtidos os parâmetros quantificadores da filtragem, os quais são a umidade da torta, a taxa unitária de filtragem (TUF) e a porcentagem de sólidos no filtrado, no caso a Turbidez. Na Figura 52, a seguir são apresentados os resultados dos testes.

Figura 52: Resultados da Filtragem a Vácuo.

Teste	%Sol	pH	Dosagem	Umidade %	Turbidez (FTU)	TUF (kg/h/m ²)
1	5	65	70	22,39	152	0,688
2	6,5	60	55	23,09	135	0,600
3	5	55	70	24,38	101	0,504
4	8	65	70	20,03	102	0,643
5	6,5	60	55	20,48	128	0,504
6	8	55	40	22,19	112	0,432
7	6,5	60	55	25,05	100	0,711
8	6,5	60	55	22,87	59	0,747
9	8	55	70	16,10	69	0,504
10	8	65	40	23,18	114	0,648
11	6,5	60	55	22,01	181	0,720
12	5	65	40	31,08	200	0,648
13	5	55	40	28,98	89	0,504

Ao analisar os resultados, é possível observar que a turbidez que apresenta a porcentagem de sólidos no filtrado, em relação aos testes realizados anteriormente com a unidade de filtragem a pressão, apresentou resultados melhores levando em consideração as diretrizes estabelecidas pela CONAMA para efluentes, que determina que efluentes com FTU acima de 100, devem ser direcionados para um tratamento. Nos ensaios realizados os testes 7,8,9 e 13 apresentaram uma turbidez aceitável. Os demais testes, apresentaram valores próximos do aceitável, entretanto os mesmos, não podem ser direcionados

diretamente ao meio ambiente. A Taxa Unitária de Filtragem (TUF), apresentou melhores resultados em relação ao testes realizados com a unidade de Filtragem a Pressão, cerca de 8% maior de aproveitamento no melhor resultado comparado aos resultados dos experimentos anteriores.

Entretanto, os resultados de umidade apresentaram resultados bem maiores do que os resultados dos testes de filtragem a pressão e da umidade ótima determinada por SANTOS (2022), para um material com características semelhantes ao do estudo. Este resultado pode estar relacionado à interação do pH e %sólidos utilizadas nos testes.

Figura 53: Filtragem a Vácuo com Magnafloc 504.



4.6.1 Análises Estatísticas

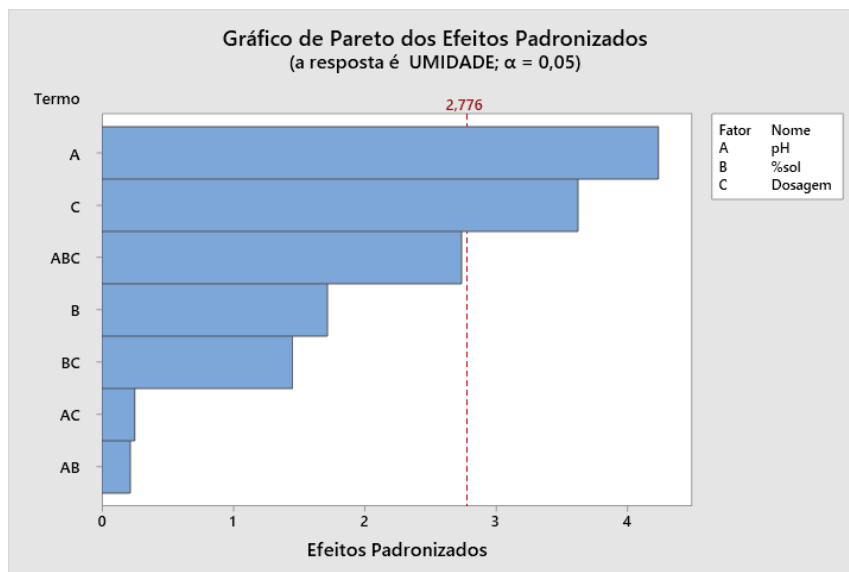
Com o objetivo de minimizar o valor da umidade, turbidez e maximizar a Taxa unitária de filtragem (TUF), os testes foram analisados usando o software Minitab 19.

4.6.1.1 Umidade

Diante a análise experimental foram avaliadas as variáveis de entrada em relação ao fator de umidade da torta e, com base no Gráfico de Pareto, ferramenta que permite identificar a relevância amostral significativa em um conjunto de dados, assim de acordo com o Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados, ao nível de significância de 5%, as variáveis de A e B que as barras ultrapassam a linha pontilhada são significativas para a filtragem do rejeito

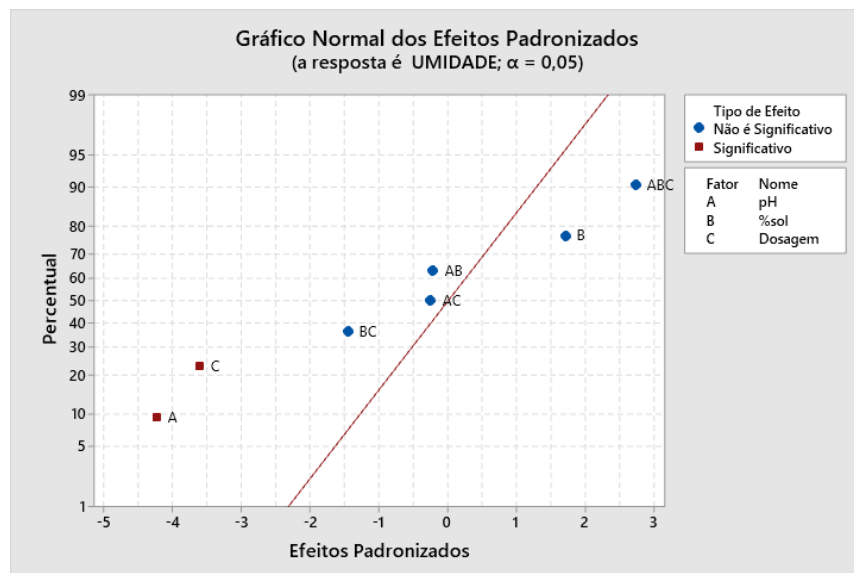
com o uso do magnafloc 504.

Figura 54: Gráfico de Pareto para Umidade.



Entretanto, o gráfico de Pareto não avalia se os efeitos dos fatores exercem efeitos positivos ou negativos sobre a resposta, desta forma, no gráfico de efeitos padronizados é verificado essa influência do tipo de efeito. Conforme apresentado na Figura 555.

Figura 55: Gráfico normal dos efeitos padronizados.



Através do Gráfico Normal, pode-se observar que os efeitos principais ou de interação que estiverem à direita da reta normal têm influência positiva sobre a resposta. Por outro lado, aqueles efeitos que estiverem à esquerda da reta normal apresentam efeito negativo sobre a resposta. Neste caso, podemos

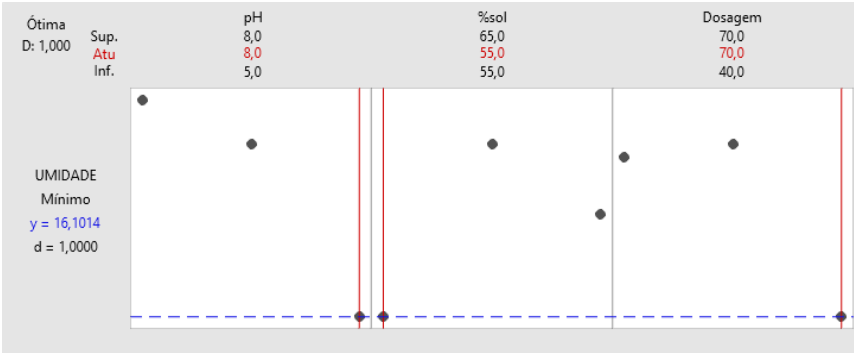
observar que os Fatores A e B, apresentam efeitos significativos para o estudo, mas de modo negativo nestas condições. Este efeito também pode ser observado na equação a seguir:

UMIDADE =

$$\begin{aligned}
 &-325 + 47,5 \text{ pH} + 6,12 \text{ \%sol} + 6,23 \text{ Dosagem} - 0,813 \text{ pH*}\% \text{sol} \\
 &- 0,875 \text{ pH*Dosagem} - 0,1055 \text{ \%sol*Dosagem} \\
 &+ 0,01447 \text{ pH*}\% \text{sol*Dosagem} - 0,264 \text{ Pt Ct}
 \end{aligned}$$

Eq. VIII

Figura 56: Otimização de Resposta para umidade.

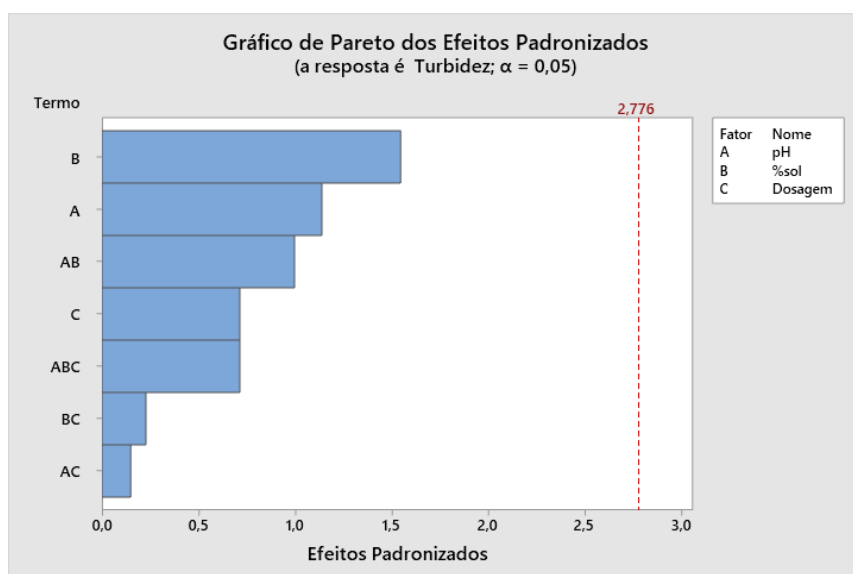


Para minimizar a umidade nos testes, é necessário trabalhar com as variáveis dosagem no nível máximo de 70 g/t, pH no nível máximo (pH 8) e a porcentagem de sólidos no nível mínimo (55% sólidos), gerando uma resposta, de umidade de 16,10% (b.u.).

4.6.1.2 Turbidez

De acordo com o gráfico de Pareto dos efeitos padronizado, mostrado na Figura 57, ao nível de significância de 5%, nenhum dos fatores apresentaram significância no estudo para a análise da turbidez da filtragem.

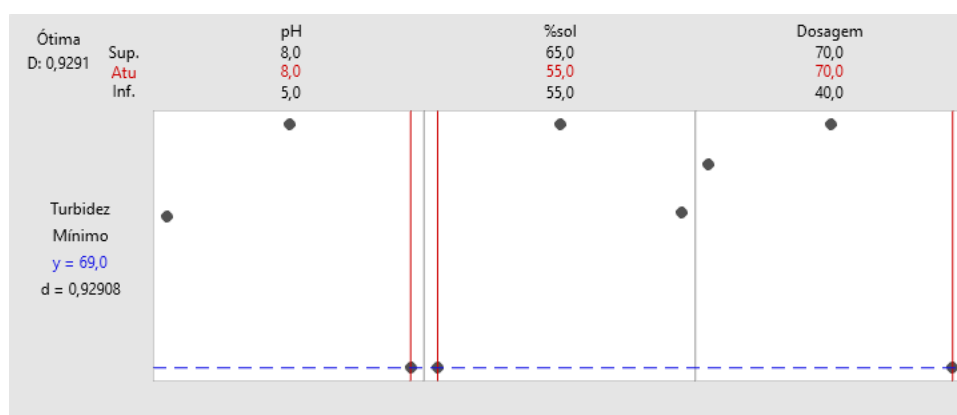
Figura 57: Gráfico de Pareto para Turbidez.



Este efeito pode-se dar, pela a falta de variação de resultados dos valores testados.

O Minitab 19, apresenta um gráfico de otimização da turbidez, na Figura 58, é apresentado a otimização com uma resposta, de Turbidez de 69,0 FTU, que apresenta um ótimo resultado com base na diretriz determinada pela CONAMA, e em relação aos experimentos anteriores com a unidade de filtragem a pressão.

Figura 58: Otimização de resposta para Turbidez.

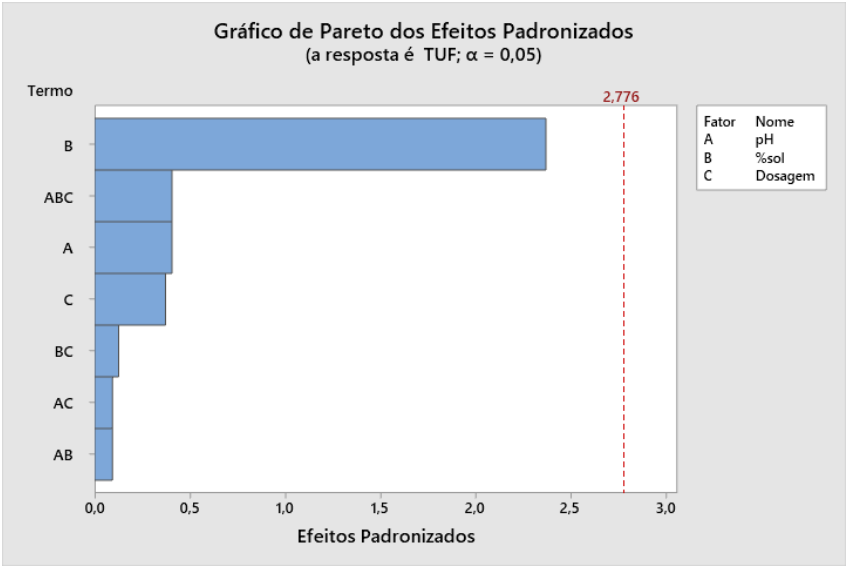


4.6.1.3 Taxa Unitária de Filtragem (TUF).

A Figura 59, apresenta o gráfico de Pareto para a Taxa Unitária de Filtragem (TUF), onde pode-se observar quais efeitos são significativos ou não. De acordo

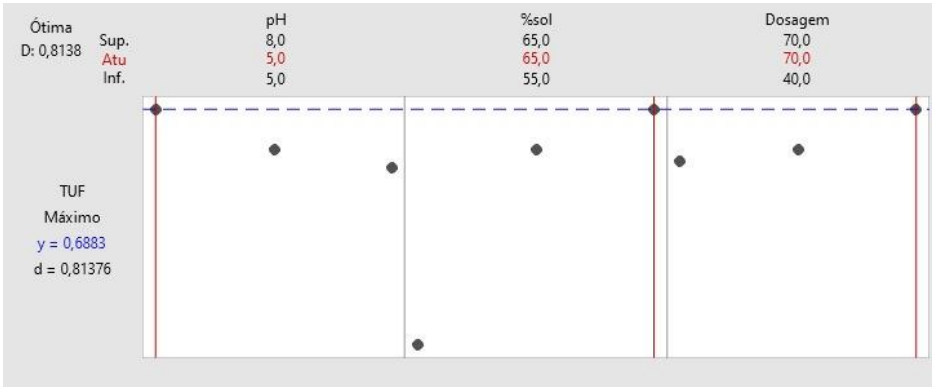
com o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados, ao nível de significância de 5%, nenhum dos fatores apresentaram significância no estudo para a análise da filtração.

Figura 59:Gráfico de Pareto para TUF.



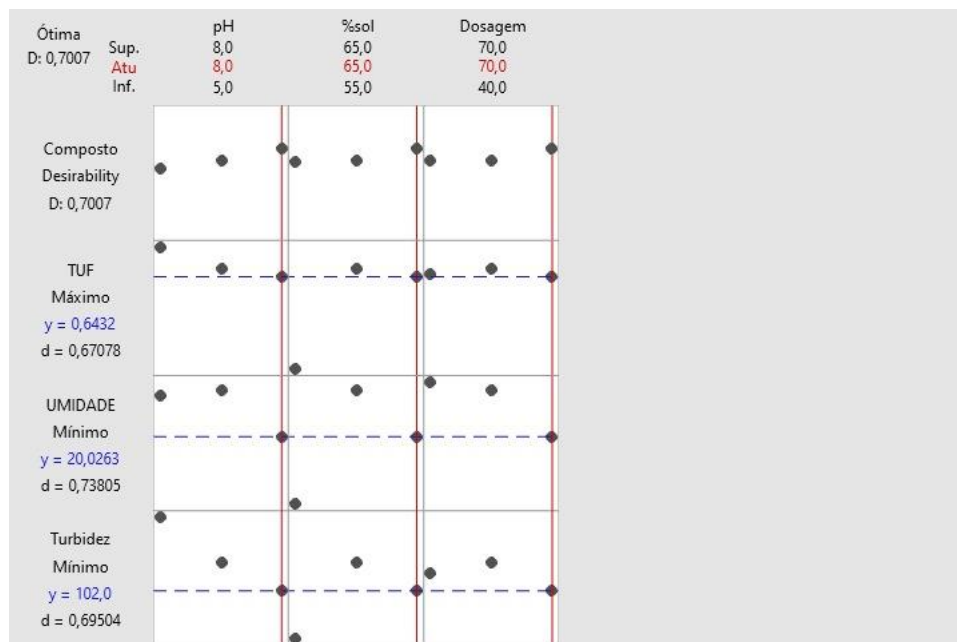
Na Figura 60, é apresentado a otimização da Taxa Unitária de Filtração nos testes. Ao analisar é possível determinar uma resposta de 688,0 kg/h/m², um valor de 0,6% mais produtivo que os resultados obtidos com os experimentos na unidade de filtração a pressão.

Figura 60:Otimização da Resposta para TUF.



Por fim, ao analisar todos os resultados obtidos com os testes, as respostas foram avaliadas para definir qual o melhor resultado na otimização da resposta com a Taxa Unitária de Filtração (TUF), Umidade% e a Turbidez dos Testes. Na Figura 61, apresentado a melhor resposta nos testes realizados e a melhor combinação.

Figura 61: Otimização de Resposta para Filtragem a Vácuo com Magnafloc 504.



Para obter o melhor resultado no experimento, é necessário trabalhar com as variáveis dosagem no nível máximo de 70 g/t, pH no nível máximo (pH 8) e a porcentagem de sólidos no nível máximo (65% sólidos), gerando uma resposta, de Taxa Unitária de Filtragem de 643 kg/h/m², de Turbidez de 102,0 FTU e 20,02 % (b.u) de Umidade.

Comparado aos resultados obtidos no testes de filtragem a pressão utilizando o mesmo reagente o Magnafloc 504, no qual resultou em uma resposta de Taxa Unitária de Filtragem de 684 kg/h/m², de Turbidez de 219,0 FTU e 13,52% (b.u) de Umidade, que os resultados foram inferiores em consideração a Taxa Unitária de filtragem e na umidade.

5. CONCLUSÃO

O trabalho apresentado tem como objetivo obter a otimização dos parâmetros operacionais de dosagem de reagentes, pH da polpa e porcentagem de sólidos utilizados nos testes, visando alcançar os melhores resultados para a disposição em pilhas. Ao analisarmos os testes realizados a pressão com o uso de Magnafloc 10, foi possível definir que, para obter o melhor resultado no experimento, é necessário trabalhar com as variáveis dosagem no nível máximo de 70 g/t, pH no nível mínimo (pH 5) e a porcentagem de sólidos no nível máximo (65% sólidos), gerando uma resposta, de Taxa Unitária de filtração de 540 kg/h/m², de Turbidez de 369,0 FTU e 15,34% (b.u) de Umidade. Nos testes a pressão com o uso de Magnafloc 504, a análise definiu que para obter o melhor resultado no experimento, é necessário trabalhar com as variáveis dosagem no nível máximo de 70 g/t, pH no nível mínimo (pH 5) e a porcentagem de sólidos no nível máximo (65% sólidos), gerando uma resposta, de Taxa Unitária de Filtração de 684 kg/h/m², de Turbidez de 219,0 FTU e 13,52% (b.u) de Umidade, valor mais próximo do valor encontrado por Santos(2022), de 13,04% (b.u).

É possível observar que a melhor combinação em ambos os experimentos, que otimizam as variáveis em dosagem no nível máximo de 70 g/t, pH no nível mínimo (pH 5) e a porcentagem de sólidos no nível máximo (65% sólidos). Entretanto podemos observar que os resultados com o uso do magnafloc 504 apresentam melhores resultados principalmente a Taxa Unitária de filtração, este efeito pode ser explicado pela capacidade do reagente Magnafloc 504 floculante catiônico agregar mais partículas, gerando melhores resultados.

Após a determinação do melhor reagente para a filtração sendo o Magnafloc 504, foram realizados os testes de filtração a Vácuo. Com os testes foi possível determinar que Para obter o melhor resultado no experimento, é necessário trabalhar com as variáveis dosagem no nível máximo de 70 g/t, pH no nível máximo (pH 8) e a porcentagem de sólidos no nível máximo (65% sólidos), gerando uma resposta, de Taxa Unitária de Filtração de 643 kg/h/m², de Turbidez de 102,0 FTU e 20,02% (b.u) de Umidade.

Ao analisarmos os três experimentos foi possível observar que o experimento de filtração a pressão com o uso do Magnafloc 504 apresentou os melhores resultados, considerando que a umidade dos testes conseguiu minimizar o resultado em 13,52%, considerando que o fator é extremamente importante para

a disposição em pilhas, objetivo principal do nosso projeto. A Taxa unitária de filtração neste experimento, também conseguiu alcançar o melhor resultado com 684,0 kg/h/m² o que significa uma boa produtividade. Apenas a turbidez neste experimento apresentou um resultado inferior ao experimento realizado a Vácuo, sendo necessário um tratamento dos efluentes, antes da recirculação do mesmo. Assim, os melhores resultados encontrados foram nos testes a Pressão com o uso do Magnafloc 504.

6. REFERENCIAS

ALVES, P. I. A. **Empilhamento de rejeito filtrado: a expansão de uma alternativa para substituição às barragens**. 2020. 114f. Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020. Disponível em:

<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/11939>. Acesso em 22 de junho 2023.

AMARANTE, S. C. **Filtração de minérios de ferro - comparação entre métodos de filtração de laboratório**: Testes de Folha e de Funil de Buchner. 2002. 125f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

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

ARAÚJO, C. B.; Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 2006. 133 f

BEZERRA, Carolina Goulart. **Caracterização do Rejeito de Minério de Ferro e a avaliação da sua influência no comportamento Físico Químico e Mecânico de pastas de Cimento**. 2017. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro,

2017.

BIZZI L. A., SCHOBENHAUS C., VIDOTTI R. M., GONÇALVES J. H. (Ed).
2003. Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil – Texto, mapas e SIG.
Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 674 p.

CHAVES, A. P. **Desaguamento, espessamento e filtragem**. 4.ed. São Paulo:
Oficina de Textos, 2013. 240 p. (Coleção teoria e prática do tratamento de
minérios, 2).

CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. 3.ed. São Paulo:
Signus, 2010. 229 p.

DUARTE, A. P.; **Classificação das Barragens de Contenção de Rejeitos de
Mineração e de Resíduos Industriais no Estado de Minas Gerais em
Relação ao Potencial de Risco**. Dissertação de Mestrado. Saneamento, Meio
Ambiente e Recursos Hídricos – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo
Horizonte, 2008. 117 p.

FIGUEIREDO, Thiago Duarte. **Aplicação de Geocinéticos no desaguamento
de Rejeitos**. 2018. 82 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas,
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2018.

FRANÇA, S. C. A.; CASQUEIRA, G. R. **Ensaio de filtragem em filtro de
folha (leaf test)**. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 2007. 10 p.

FRANÇA, S. C. A.; MASSARANI, G. **Separação sólido-líquido**. In: Tratamento
de minérios, 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap.15. p.637-678.
GUIMARÃES, N. C. Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando à sua
disposição em pilhas. UFMG. Belo Horizonte. 2011. 129p

GUIMARÃES, N. C.; VALADAO, G. E.S.; PERES, A.E.C. Filtragem de rejeitos de
minério de ferro visando à sua disposição em pilhas. Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro

Preto, v. 65, n. 4, p. 543-548, Dec. 2012. Disponível em . Acesso em 15 Mar. 2019.

GOMES, M. A. **Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2009. 220 p

GOMES, R.C., PEREIRA, E.L. (2002). **Avaliação do potencial de liquefação de rejeitos de mineração**. III Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, SBMR, São Paulo, SP, 91-101 pp

GOMES, R. C. (2006). **Caracterização Tecnológica e Sistemas de Disposição de Resíduos de Mineração**. Publicação Técnica. NUGEO – Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, 210p.

KLOHN, E.J. (1981). **The development of current tailing dam design and constrution methods**. Design and Construction of Tailing Dams. D. Wilsoned., Colorado School of Mines, Golden, Colorado.

LEMOS JÚNIOR, Marcos Antônio. **Estudos para avaliação da Capacidade de Reservatório de Rejeitos de Nióbio**. 2012. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012. Cap. 136.

LOPES, Larissa Moreira. **Otimização do Processo de Espessamento de Rejeito de Minério de Ferro de Itatiaiuçu - MG**. 2017. 88 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2017.

MILONAS, J.G. Análise do Processo de Reconstituição de Amostras para Caracterização do Comportamento de Barragens de Rejeitos de Minério de Ferro em Aterro Hidráulico. Dissertação de Mestrado. Publicação G.DM148/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília,

Brasília, DF, 2006. 146 p.

NUNES, A. S. Espessamento de polpas minerais contendo elevado teor de finos. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 24, 2011, Salvador. Anais. Salvador: CETEM/MCT, 2011. p. 756-763.

SANTOS, Renata Keila. **Estudo de Filtragem de um Rejeito de Flotação visando o empilhamento a seco**. 2022. 71 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Minas, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2022.

SANTOS, R. G. **Concentração via flotação reversa do minério de ferro do depósito Jambreiro**, Guanhães. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2016.