



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

THIAGO DUARTE FIGUEIREDO

APLICAÇÃO DE GEOSINTÉTICOS NO DESAGUAMENTO DE REJEITOS

ARAXÁ/MG
2018

THIAGO DUARTE FIGUEIREDO

APLICAÇÃO DE GEOSINTÉTICOS NO DESAGUAMENTO DE REJEITOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais– CEFET/MG, como registro parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Felipe de Moraes Russo

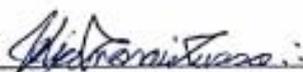
ARAXÁ/MG
2018

FOLHA DE APROVAÇÃO
THIAGO DUARTE FIGUEIREDO

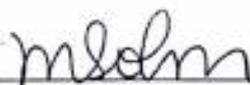
**APLICAÇÃO DE GEOSINTÉTICOS NO DESAGUAMENTO DE
REJEITOS**

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

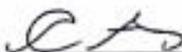
Araxá, 25 de junho de 2018.



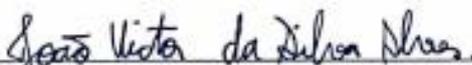
Presidente e Orientador: Prof. Dr. Felipe de Moraes Russo
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular: Prof. Dr. Michelly dos Santos Oliveira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular: Prof. Me. Allan Erlichman Medeiros Santos
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular: Eng. Minas Especialista João Victor Silva Alves
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

Dedico este trabalho aos meus pais, familiares e professores, que sempre me fizeram seguir em frente em busca de meus objetivos, não medindo esforços para que pudesse alcançá-los.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela saúde e fé para seguir em frente. Aos meus pais e familiares pela dedicação e esforço incondicional, sendo meu ponto de refúgio em qualquer situação. Aos meus amigos e colegas, pelo apoio e companheirismo frente os desafios da faculdade, que não foram poucos, mas com a ajuda de todos foram superados. Aos professores e funcionários do CEFET pelos ensinamentos e doação constante, visando sempre o desenvolvimento pessoal e profissional de todos os alunos. Ao meu orientador Prof. Dr. Felipe de Moraes Russo, pelo exemplo de profissionalismo, competência e cortesia durante a realização deste trabalho, agregando conhecimentos e transmitindo confiança em todos os momentos. Ao João Victor pela ajuda essencial durante a realização deste trabalho, sempre com muita paciência, sabedoria e generosidade. Agradeço também à TDM Brasil, na pessoa do Carlos Centurion, pela confiança depositada, pela honrosa parceria e incentivo incondicional à pesquisa, não medindo esforços no auxílio deste trabalho. Por fim, agradeço à todos que de certa forma fizeram parte da construção deste trabalho, direta ou indiretamente sendo parte da minha rotina e dos meus laços afetivos.

“Quando a partida de xadrez termina, o peão e o rei vão pra mesma caixa”.

(Ditado chinês)

RESUMO

Métodos tradicionais de deposição de rejeitos em polpas têm sido cada vez mais questionados quanto à sua segurança e seus impactos ao meio ambiente, visto que acidentes têm sido cada vez mais frequentes, com consequências desastrosas. Além disso, o consumo de água no setor mineral é bastante elevado, fomentado pela deposição de rejeitos na forma de polpa, onde parte considerável da água captada para o tratamento de minérios não é reaproveitada. Buscando maior segurança e sustentabilidade na deposição de rejeitos, novas técnicas para o desaguamento das polpas têm sido implantadas, através de processos de filtração e espessamento. O desaguamento através de *BAG's* geotêxteis é uma metodologia que consiste na adição de rejeitos em grandes bolsas compostas por geossintéticos porosos, que permitem a passagem da água ao mesmo tempo em que retém as partículas sólidas, desaguando-as. Este trabalho teve por finalidade avaliar a aplicabilidade dos geossintéticos no desaguamento de rejeitos fosfáticos ultrafinos provenientes de uma mina em MG. Por meio de testes de filtração por pressão, os geotêxteis que compõem os *BAG's* foram testados em um planejamento fatorial como desaguadores de polpas com 15%, 30% e 45% de sólidos em massa e com pressão positiva variando entre 2 Bar, 3 Bar e 4 Bar, analisando fatores como a espessura e umidade final da torta, a porcentagem de sólidos e volume do clarificado além da taxa unitária de filtragem do geotêxtil. Esperava-se uma redução considerável na umidade da polpa, conferindo à mesma maior resistência física e estabilidade para deposição e permitindo o reaproveitamento da água liberada. Após a realização dos testes, conclui-se que os geotêxteis foram muito eficientes no desaguamento de rejeitos, com a redução considerável na quantidade de água na torta formada, com taxa unitária de filtragem ainda reduzida, porém não muito distante dos métodos convencionais utilizados para desaguamento de material ultrafino.

Palavras-chave: Geotêxtil. Filtração. Rejeito. *BAG's*.

ABSTRACT

Actually, the management of tailings in mining pulp is one of the biggest problems for the mineral industry. Traditional methods of pulp deposition have been questioned as to their safety and their impact on the environment, as accidents have been increasingly frequent with disastrous consequences. In addition, water consumption in the mineral sector is quite high, fueled by the deposition of tailings in pulps, where a considerable part of the water collected to mining's treatment is not reused. Seeking greater safety and sustainability in tailings deposition, new techniques to dewatering of pulps have been implanted through filtration and thickening processes. The dewatering through geotextile BAG's is a methodology that consists in the addition of tailings in large pockets composed of porous geosynthetics that allow water to pass through while retaining the solid particles and dewatering them. This work aimed to evaluate the applicability of geosynthetics in the dewatering of ultrafine phosphate tailings from a mine in Minas Gerais. Through pressure filtration tests, the geotextiles that make up the BAGs were tested as pulp dehydrating, whose containing 15%, 30% and 45% solids mass in pulps with positive pressure ranging from 2 Bar, 3 Bar and 4 Bar, analyzing factors as the final moisture content of the pie, the percentage of solids in the clarified and the unit rate of filtration of the geotextile. A considerable reduction in the humidity of the pulp was expected, attributing to it a greater physical resistance, stability and allowing the reuse of the released water. After the tests, it was concluded that the geotextiles were very efficient in the dewatering of tailings, with the considerable reduction in the amount of water in the pie formed, with a reduced filtration unit rate, but not too far from the conventional methods used for dewatering of ultrafine material.

Keywords: Geotextile. Filtration. Tailing. BAG's.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Alçamento para montante. Fonte: Milonas (2006).	13
Figura 2.2 - Método de jusante. Fonte: Milonas (2006).	14
Figura 2.3 - Método de linha de centro. Fonte: Milonas (2006).	15
Figura 2.4 - Aplicação da deposição de rejeitos em cava à céu aberto - Mina de ferro da Mutuca, Nova Lima - MG. Fonte: IBRAM (2016).	16
Figura 2.5 - Deposição de rejeitos em pilhas. Fonte: IBRAM (2016).	17
Figura 2.6 - Tubo desaguador de rejeitos de 60m de extensão. Fonte: Newman et al. (2004).	18
Figura 2.7 - Desaguamento através de tubo geotêxtil. Fonte: Newman et al. (2004).	18
Figura 2.8 - Processo de filtração. Fonte: Arquivos de aula UERGS.	21
Figura 2.9 - Filtro de disco. Fonte: Chaves (2013).	23
Figura 2.10 - Filtro prensa. Fonte: Unicamp (2012).	23
Figura 2.11 - Filtro de mesa. Fonte: Oliveira (2004).	24
Figura 2.12 - Filtro de correia. Fonte: Oliveira (2004).	25
Figura 2.13 - Filtro de tambor. Fonte: Oliveira (2004).	25
Figura 2.14 - Tipos de tecedura para meios filtrantes. Fonte: Chaves (2013).	27
Figura 2.15 - Estrutura de geossintéticos tecidos (T) e não tecidos (NT). Fonte: Peixoto (2012).	31
Figura 2.16 - Estruturas dos geossintéticos. Fonte: Barthusrt (2017).	33
Figura 2.17 - Polpa desaguada por geotêxteis. Fonte: Newman et al. (2004).	34
Figura 2.18 - BAG's desaguadores empilhados em operação. Fonte: Miratech (2005).	34
Figura 3.1 - Homogeneização e amostragem de rejeito fosfático.	35
Figura 3.2 - Amostras de geoforma GT70 utilizadas para testes.	36
Figura 3.3 - Analisador químico por fluorescência de raio-x. Fonte: Sambow Adtech Co (2007).	36
Figura 3.4 - Difratorômetro XRD-700. Fonte: Spomberg (2010).	37
Figura 3.5 - Difratorômetro CILAS 1090. Fonte: CILAS.	37
Figura 3.6 - Teste de picnometria sendo realizado.	38
Figura 3.7 - Homogeneização e separação das massas de rejeito para testes.	40
Figura 3.8 - Preparo de polpas	40
Figura 3.9 - Testes de desaguamento.	41
Figura 3.10 - Filtro de pressão.	42

Figura 3.11 - Teste de filtração sendo realizado.	42
Figura 4.1 - Resultado do teste de desaguamento.	51
Figura 4.2 - Tortas formadas com 15% (A), 30% (B) e 45% (C) de sólidos.	54
Figura 4.3 - Clarificado de polpas contendo 15%, 30% e 45% de sólidos.	57
Figura 4.4 - Clarificado no início do teste e após a formação da torta.	59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 - Produção anual de fosfato.	4
Gráfico 2.2 - Contribuição de cada produto na geração de rejeitos no Brasil.	10
Gráfico 4.1 - Resultados de análise de fluorescência de raio-x.	47
Gráfico 4.2 - Curva granulométrica para rejeito fosfático.	49
Gráfico 4.3 - Relação tempo total de ciclo / Pressão / Porcentagem de sólidos.	52
Gráfico 4.4 - Relação umidade da torta/ Presão/ Porcentagem de sólidos	53
Gráfico 4.5 - Efeitos principais das variáveis para espessura de torta.	55
Gráfico 4.6 - Relação % sólidos em polpa / % Sólidos no clarificado.	56
Gráfico 4.7 - Médias principais para % de sólidos no clarificado.	57
Gráfico 4.8 - Médias principais para TUF.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Volumes de rejeitos produzidos no Brasil entre os anos de 1996 a 2005 (em milhares de toneladas).	8
Tabela 2.2 - Projeção dos volumes de rejeito produzidos no Brasil entre 2010 e 2030 (em milhares de toneladas).	9
Tabela 2.3 - Tipos de meios filtrantes e características de resistência.	26
Tabela 2.4 - Efetividade de cada tipo de tecedura para diferentes resultados.	27
Tabela 2.5 - Resistência de polímeros componentes de geossintéticos.	30
Tabela 3.1 - Parâmetros para preparo de polpas.	40
Tabela 3.2 – Planejamento dos testes	43
Tabela 4.1 - Especificações técnicas Geofoma GT70	45
Tabela 4.2 - Resultados para elementos presentes na amostra.	46
Tabela 4.3 - Resultados para óxidos presentes na amostra.	47
Tabela 4.4 - Resultados dos testes de picnometria.	50
Tabela 4.5 - Dados referentes à formação de torta durante testes de filtração.	52
Tabela 4.6 - Espessura média da torta.	54
Tabela 4.7 - Quantidade de sólidos no clarificado em cada teste de filtração.	55
Tabela 4.8 - Valores de TUF obtidos para cada ensaio.	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CEFET	Centro Federal de Educação Tecnológica
CGL's	Geocompostos argilosos
MG	Minas Gerais
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PP	Polipropileno
PRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
Sól	Sólido
TUF	Taxa Unitária de Filtragem

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
mL	Mililitros
%	Porcentagem
mm	Milímetro
m	Metro
Kg	Quilograma
s	Segundo
h	Hora
m ²	Metro quadrado
µm	Micrômetro
M	Massa
N	Newton
KN	Kilonewton
cm	Centímetro
g	Gramas
min	Minutos
L	Litro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Fosfato	3
2.1.1	Mineração de fosfato no Brasil	3
2.2	Resíduos de mineração	5
2.2.1	Rejeitos fosfáticos no Brasil	10
2.3	Métodos de deposição de rejeitos	11
2.3.1	Barragem de rejeitos	12
2.3.1.1	Método de montante	12
2.3.1.2	Método de jusante	13
2.3.1.3	Método da linha de centro	14
2.3.2	Deposição na própria cava	15
2.3.3	Pilhas	16
2.3.4	<i>BAG's</i>	18
2.4	Separação sólido-líquido	19
2.4.1	Filtração	20
2.4.1.1	Fatores relevantes para filtração	21
2.4.1.2	Equipamentos de filtração	22
2.4.1.3	Meios filtrantes	26
2.5	Reagentes	27
2.5.1	Coletores	28
2.5.2	Espumantes	28
2.5.3	Modificadores	28
2.6	Geossintéticos	29
2.6.1	Variações dos geossintéticos	31
2.6.2	Geotêxteis como desaguadores de polpa	33
3	METODOLOGIA	35
3.1	Material	35
3.2	Análise Química, mineralógica e granulométrica do rejeito	36
3.3	Massa específica de sólidos	37
3.4	Preparo de polpas	39
3.5	Testes de desaguamento	41

3.5.1	Teste de eficiência utilizando geotêxtil.....	41
3.5.2	Testes de filtração por pressão	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1	Caracterização do material	45
4.1.1	Meio filtrante.....	45
4.2	Análise química, mineralógica e granulométrica do rejeito	46
4.2.1	Análise química e mineralógica do rejeito.....	46
4.2.2	Análise granulométrica do rejeito	48
4.3	Massa específica de sólidos	50
4.4	Testes de desaguamento simples	50
4.5	Testes de desaguamento em filtro de pressão.....	51
4.5.1	Taxa unitária de Filtragem (TUF)	59
5	CONCLUSÃO.....	61
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
7	REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

Um dos fatores mais importantes e também questionados na indústria mineral é a produção e deposição de rejeitos, resíduos de descarte provenientes do tratamento de minérios. Os rejeitos são polpas com elevadas porcentagens de sólidos, normalmente de granulometria fina a ultrafina, e são gerados em grandes quantidades pelo setor mineral. São depositados principalmente em grandes barragens, acarretando no consumo de elevada quantidade de água, supressão de grandes áreas de vegetação e gerando riscos ambientais de potencial catastróficos.

Com o aumento constante da demanda por matérias-primas provenientes da mineração, as atividades minerais tem crescido cada vez mais, o que aliado à maior necessidade por insumos, torna viável a lavra e o beneficiamento de corpos minerais com teores cada vez mais baixos (IBRAM, 2016). Tal crescimento na produção mineral acarreta na geração, igualmente crescente, de rejeitos e no consumo de água. Com isto, as formas de armazenamento destes resíduos de descarte e seu gerenciamento ganham cada vez maior importância, sendo tema constante de pesquisas e desenvolvimento.

De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA), em 2016, no Brasil existiam 839 barragens de rejeitos, com praticamente metade delas localizadas no estado de Minas Gerais. Este número tende a ser ainda maior, considerando atividades ilegais e não registradas. Com este significativo número de barragens, o manejo e a gestão de suas estruturas, principalmente o reaproveitamento de água é tema frequente em estudos e discussões, objetivando novas soluções mais sustentáveis e de baixo custo.

Pereira (2005) define que a constante ruptura dos sistemas de contenção desses materiais vem causando considerável impacto ao meio ambiente, como contaminação e assoreamento de bacias hidrográficas, erosão e supressão de áreas de vegetação, além de comprometimento de áreas destinadas às habitações e plantações, prejuízo para população que depende diretamente do abastecimento de água e de alimentos dos mananciais locais. Ainda segundo Pereira, questões socioeconômicas, relacionadas até mesmo à perda de vidas humanas, são fatores relevantes para a consideração da segurança das estruturas de contenção de rejeitos.

De acordo com a Agência Nacional de Águas (2016), somente no Brasil há um total de 25 barragens de contenção que apresentam algum tipo de comprometimento significativo em

sua estrutura, apresentando, portanto, elevados riscos de ruptura. Com isto, cada vez mais se justifica a aplicação de métodos mais seguros e sustentáveis de disposição do rejeito, principalmente através da redução da porcentagem de água existente nas lamas, reduzindo sua área de alcance para o caso de uma ruptura dos meios de contenção. Para isso, são realizados processos de desaguamento de polpas por métodos de separação sólido-líquido como o espessamento e a filtração. Uma possível alternativa para um melhor desaguamento de rejeitos se dá pela aplicação de malhas geotêxteis como meio filtrante de polpas.

Além disso, o reaproveitamento da água proveniente de polpas minerais de rejeitos reduz consideravelmente o consumo de novas fontes hídricas na natureza. Tal processo diminui consideravelmente a extração de água nova de mananciais e reservatórios, além de tornar o processo mineral mais sustentável e evitar problemas futuros de escassez, tendo em vista a crise hídrica em que vivemos.

Os geotêxteis possuem propriedades que tornam possível sua aplicação na filtragem de rejeitos finos, material que na maioria das situações práticas de filtração, são de difícil operação. Como meio filtrante, o geotêxtil atua como meio de retenção de material particulado das lamas, permitindo a movimentação de água através de suas aberturas, sem oferecer resistência à saída do fluido, melhorando suas condições para reutilização.

Este Trabalho tem por finalidade avaliar a eficiência de malhas geotêxteis como meio desaguador de rejeitos fosfáticos provenientes de uma mina em Minas Gerais (MG), com o intuito de promover uma maior recuperação da água existente em rejeitos, visando o reaproveitamento desta água e a redução de umidade da polpa, conferindo maior resistência física ao material filtrado para deposição. Como objetivos específicos o presente trabalho visa determinar a viabilidade operacional da utilização de geotêxteis compostos no desaguamento de rejeitos, definir condições operacionais ótimas para melhores resultados de desaguamento e avaliar a influência da porcentagem de sólidos em polpa e de aplicação de pressão na eficiência do desaguamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fosfato

O fosfato é um composto encontrado na natureza em sua forma estável PO_4^{3-} abrangendo uma variada quantidade de espécies minerais, distribuídas abundantemente ao longo de quase toda a crosta terrestre. Os fosfatos, embora apresentem diversas composições têm como característica comum a presença do elemento químico fósforo, representado pela letra "P" no grupo V da tabela periódica dos elementos, sendo considerado fonte importantíssima para a produção de fertilizantes e insumos agrícolas (SOUZA; FONSECA, 2009).

Ainda segundo Souza e Fonseca (2009), os fosfatos podem ser de origem ígnea, representando 85% dos depósitos mundiais, sedimentar, com quase 15% das oferta deste recurso ou biogenética, cujos depósitos representam menos de 1% do volume total de fosfato no planeta. No Brasil, os principais depósitos de fosfato são de origem ígnea, constituindo cerca de 80% dos depósitos nacionais (SOUZA; FONSECA, 2009).

O principal mineral fosfático extraído para obtenção do fósforo é a apatita $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{OH},\text{Cl})$. A apatita é um mineral de composição mineralógica bastante peculiar e de difícil concentração e recuperação, visto que sua mineralogia está associada à presença de elementos contaminantes como os carbonatos, exigindo processos muito complexos para separação destes compostos, afetando diretamente na relação custo benefício de produção.

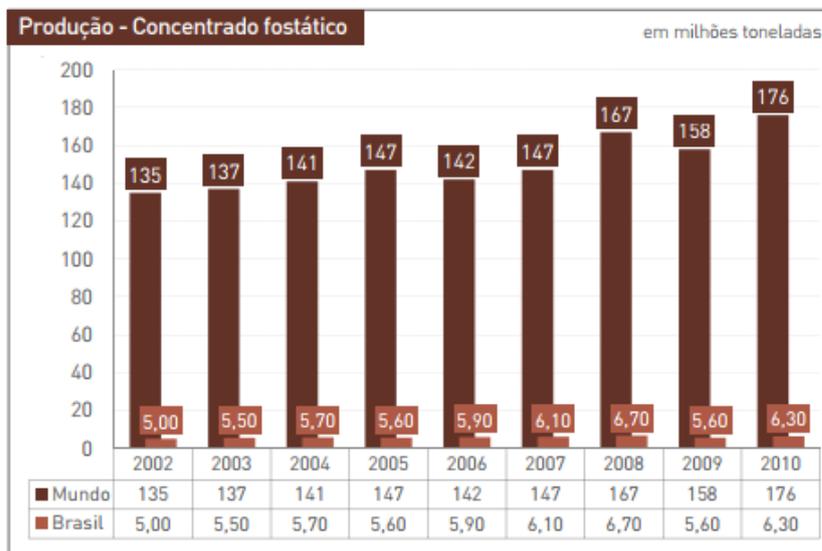
No mundo, as reservas de fosfato se distribuem predominantemente na China, Estados Unidos, Marrocos, Rússia, Tunísia, Brasil e Jordânia, sendo os maiores depósitos encontrados na América do Norte, Norte da África, Oriente Médio, na Ilha Navassa, pertencente aos Estados Unidos e em Togo. O maior produtor de rocha fosfática no mundo é a China, com uma produção anual de 72 milhões de toneladas em 2010 (JASINSKI, 2016).

2.1.1 Mineração de fosfato no Brasil

Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (2010), o Brasil possui uma reserva de 310 milhões de toneladas de rocha fosfática, com uma produção de cerca de 6,3 milhões de toneladas por ano. como ilustra o Gráfico 3.1. Esse valor representa aproximadamente 3,6% da produção mundial, estimada em 176 milhões de toneladas/ano (JASINSKI, 2016). As reservas nacionais de fosfato têm um teor médio de P_2O_5 estimado em 9,24%, considerando

depósitos contendo apatita, único mineral fosfatado considerado mineral-minério para obtenção do fósforo.

Gráfico 2.1 - Produção anual de fosfato.



Fonte: IBRAM (2010).

No território brasileiro, a mineração de fosfato se destaca principalmente nos estados de Minas Gerais, Goiás e São Paulo, que representam respectivamente 68, 14 e 6% da produção nacional. Dentre as cidades mais importantes no setor minerário de rocha fosfática, apenas nove concentram um percentual de 91,5% de toda a reserva nacional. As cidades de Tapira (32,6% de todo o volume de fosfato do Brasil), Serra do Salitre (13,5%), Patos de Minas (11,9%) e Araxá (8,8%), localizadas em Minas Gerais, são detentoras das maiores reservas nacionais (SOUZA; FONSECA, 2009). Além das cidades citadas, pode-se destacar as minas de Ouvidor e de Catalão, em Goiás assim como a de Cajati, em São Paulo (NEVES; SILVA, 2007).

Por ser um país essencialmente agrícola, o Brasil é um grande consumidor de fosfato, principalmente na forma de fertilizantes. O país é o 4º maior consumidor mundial destes insumos, atrás de China, Índia e dos Estados Unidos (IBRAM, 2010). A tendência é de um crescimento ainda maior no consumo de fertilizantes ao longo dos anos, o que aumenta a importância dos insumos oriundos do fosfato para produção dos mesmos.

2.2 Resíduos de mineração

Nas atividades de mineração, grandes volumes de solo e rocha são movimentados ao longo do processo de exploração das reservas e beneficiamento do minério. Da porção de material extraída do solo, parte consiste no elemento de interesse, denominado mineral-minério. O volume de material restante representa a porção movimentada do depósito sem valor econômico, cujo teor de minerais de interesse é muito baixo ou inexistente, consistindo assim os chamados resíduos de descarte da mineração.

Estes resíduos sólidos produzidos se subdividem em dois tipos, os estéreis e os rejeitos. Durante a lavra, volumes de solo sem valor econômico são escavados juntamente com o minério, seja através do decapeamento da mina ou por condições de estabilidade. A este produto se dá o nome de estéril, material com umidade geralmente reduzida a ponto de permitir o seu descarte, normalmente realizado em pilhas. Os estéreis, na maioria dos casos representam grande parte do volume gerado de resíduos de mineração, sendo também um material de deposição mais segura.

Já os rejeitos, são os resíduos gerados das etapas de beneficiamento dos minérios, onde a ganga, porção sem interesse econômico do minério, é separada do mineral-minério. Segundo Loureiro et al. (2005), embora se diferenciem em cada mina, as etapas de beneficiamento de minérios fosfáticos no Brasil compreendem basicamente as seguintes operações:

- Britagem (primária, secundária e até terciária, por vezes);
- Estocagem e homogeneização;
- Moagem primária e separação magnética de baixo campo;
- Moagem secundária e classificação;
- Deslamagem;
- Concentração por flotação e espessamento.

Normalmente as etapas de beneficiamento mineral são realizadas em meio úmido, onde os resíduos sólidos se encontram na forma de suspensão. Com isso, os rejeitos necessitam de processos específicos de deposição, sendo, em muitos casos, descartados com alta porcentagem de água, produzindo assim impactos ambientais consideráveis, além de possuírem maior complexidade para um descarte com segurança e viabilidade econômica.

Os rejeitos podem ser produzidos em variados estados físicos diretamente relacionados à concentração de sólidos em sua composição. Podem existir na forma de polpa, espessados,

pasta ou torta. Cada tipo de rejeito possui um comportamento geotécnico específico, que deve ser considerado nas operações de deposição e consequente estabilidade dos meios de contenção (PORTES, 2013).

De acordo Lozano (2006), os rejeitos podem ser descartados na forma sólida (pasta ou granel), transportado por caminhões ou correias transportadoras, ou na forma líquida (polpa), sendo transportado por bombeamento ou por ação gravitacional. Em relação ao tamanho das partículas que compõem os rejeitos na forma de polpa, Duarte (2008) define que os rejeitos cuja granulometria de sólidos seja inferior a 0,074mm (200#) são denominados lama, enquanto os produtos com tamanho acima de 0,074 mm caracterizam-se rejeitos granulares.

Segundo o IBRAM (2016), no Brasil o controle da produção e descarte de resíduos da mineração é regulamentado pelas leis nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, e a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, sendo a primeira citada, a criadora da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PRS) e a segunda responsável pelo surgimento da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), além do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB).

Embora sejam considerados resíduos sólidos para descarte, os rejeitos de mineração possuem em sua composição pequenos teores de mineral-minério potencialmente recuperáveis no futuro. Caso se torne economicamente viável, os processos de reaproveitamento de rejeitos poderão ser aplicados em larga escala na mineração mundial, principalmente pelo fato de que os rejeitos estocados dispensam operações como a lavra e fragmentação.

Com o aumento das atividades ao longo dos anos, a mineração tem gerado conseqüentemente, volumes maiores de resíduos. A Tabela 2.1 apresenta o crescimento da produção de rejeitos ao longo dos anos entre 1996 e 2005, enquanto a Tabela 2.2 ilustra uma projeção do volume de rejeitos gerados na mineração de alguns produtos até 2030, levando em consideração pesquisas realizadas por Silva et al. (2010), e as expectativas de crescimento da exploração, acompanhado de fatores como a demanda por matéria-prima, novas tecnologias e desenvolvimento econômico.

Tabela 2.1 - Volumes de rejeitos produzidos no Brasil entre os anos de 1996 a 2005 (em milhares de toneladas).

	Ferro	Ouro	Titânio ¹	Fosfato	Estanho ²	Zircônio ³	Calcário	Alumínio	Cobre	Níquel	Nióbio	Caulim	Zinco	Manganês	Total
1996	86.288	26.649	18.184	20.632	17.361	7.410	9.439	5.398	4.516	2.059	1.634	1.139	1.003	1.240	202.952
1997	72.954	39.014	26.693	21.584	16.559	9.168	12.115	5.301	3.179	2.740	1.681	1.599	1.126	841	214.553
1998	57.986	25.304	17.056	21.269	13.604	10.230	12.758	5.656	2.509	2.863	1.959	1.668	1.059	855	174.777
1999	67.432	25.484	33.942	21.990	12.867	12.880	9.872	5.776	1.150	3.464	2.496	1.910	1.068	520	200.850
2000	61.619	32.810	41.160	25.243	12.883	13.493	8.151	5.154	1.084	3.685	2.281	2.101	1.079	1.065	211.809
2001	66.335	35.250	18.365	24.974	15.309	12.439	10.617	5.880	3.983	3.840	2.056	2.348	1.098	940	203.433
2002	71.425	31.629	15.200	26.410	8.815	13.972	12.596	6.455	4.052	3.802	2.155	2.167	1.216	1.391	201.285
2003	81.760	26.058	31.431	29.108	6.652	10.358	2.042	9.424	4.396	3.752	6.617	3.354	1.509	1.146	217.606
2004	104.536	24.729	38.118	24.162	21.302	12.873	2.750	9.852	10.879	4.109	2.284	3.758	1.583	1.500	262.436
2005	95.641	28.369	36.074	29.083	24.018	13.414	9.058	10.887	17.750	4.762	12.526	4.303	1.821	2.567	290.274
Total	765.977	295.295	276.224	244.456	149.369	116.236	89.398	69.783	53.498	35.076	35.690	24.346	12.562	12.064	2.179.975

Fonte: Silva et al. (2010).

Tabela 2.2 - Projeção dos volumes de rejeito produzidos no Brasil entre 2010 e 2030 (em milhares de toneladas).

	Ferro	Fosfato	Ouro	Titânio	Cobre	Níquel	Alumínio	Zircônio	Estanho	Calcário	Nióbio	Caulim	Zinco	Manganês	Total
2010	127.233	36.464	38.177	32.114	35.636	12.180	12.487	15.535	15.022	12.883	4.438	3.452	1.389	1.118	348.129
2011	138.329	36.464	39.369	33.398	35.636	26.280	13.224	16.316	15.518	13.154	4.450	3.452	1.450	1.164	378.204
2012	149.425	43.952	40.598	33.398	35.636	33.600	14.004	17.097	15.821	13.430	4.490	3.452	1.450	1.212	407.566
2013	180.493	43.952	41.868	33.398	35.636	33.150	14.831	17.877	16.029	13.713	4.554	3.452	1.450	1.261	441.664
2014	213.411	43.952	43.178	33.398	35.636	32.520	15.706	18.658	16.192	14.001	4.636	3.452	1.450	1.313	477.503
2015	220.068	43.952	44.530	39.071	40.091	32.400	16.632	19.439	16.334	14.296	4.733	4.005	1.691	1.367	498.608
2016	224.877	51.247	45.925	39.071	40.091	32.400	17.613	20.219	16.474	14.620	4.848	4.005	1.691	1.423	514.504
2017	229.315	51.247	47.366	39.071	40.091	32.400	18.653	21.000	16.613	14.953	4.978	4.005	1.691	1.481	522.863
2018	231.534	51.247	48.853	39.071	40.091	32.400	19.753	21.781	16.754	15.292	5.120	4.005	1.691	1.542	529.134
2019	235.233	51.247	50.388	46.593	40.091	32.400	20.919	22.561	16.896	15.640	5.275	4.005	2.016	1.605	544.868
2020	237.452	56.009	51.973	46.593	40.091	32.400	22.153	23.342	17.038	15.995	5.440	4.557	2.016	1.671	556.731
2021	241.890	56.009	53.609	46.593	40.091	32.400	23.460	24.123	17.190	16.385	5.620	4.557	2.016	1.739	565.684
2022	244.479	56.009	55.298	46.593	40.091	32.400	24.844	24.903	17.347	16.785	5.814	4.557	2.016	1.811	572.950
2023	246.699	56.009	57.043	56.365	40.091	32.400	26.310	25.684	17.508	17.195	6.021	4.557	2.439	1.886	590.207
2024	248.918	58.890	58.843	56.365	40.091	32.400	27.862	26.465	17.671	17.614	6.241	4.557	2.439	1.963	600.318
2025	251.877	58.890	60.703	56.365	40.091	32.400	29.506	27.245	17.835	18.044	6.472	5.110	2.439	2.043	609.019
2026	254.466	58.890	62.623	56.365	40.091	29.850	31.247	28.026	18.002	18.485	6.715	5.110	2.439	2.127	614.433
2027	257.055	58.890	64.605	68.512	40.091	28.350	33.090	28.807	18.170	18.936	6.970	5.110	2.964	2.213	633.762
2028	260.014	71.626	66.653	68.512	40.091	28.350	35.043	29.587	18.340	19.398	7.236	5.110	2.964	2.304	655.228
2029	262.973	71.626	68.768	68.512	40.091	28.350	37.110	30.368	18.512	19.871	7.515	5.110	2.964	2.399	664.168
2030	265.562	71.626	70.951	79.311	40.091	28.350	39.478	31.149	18.685	20.356	7.806	5.110	3.432	2.429	684.334
Total	4.721.301	1.128.198	1.111.320	1.018.668	819.636	637.380	493.925	490.183	357.952	341.045	119.372	90.729	44.097	36.071	11.409.877

Fonte: Silva et al. (2010).

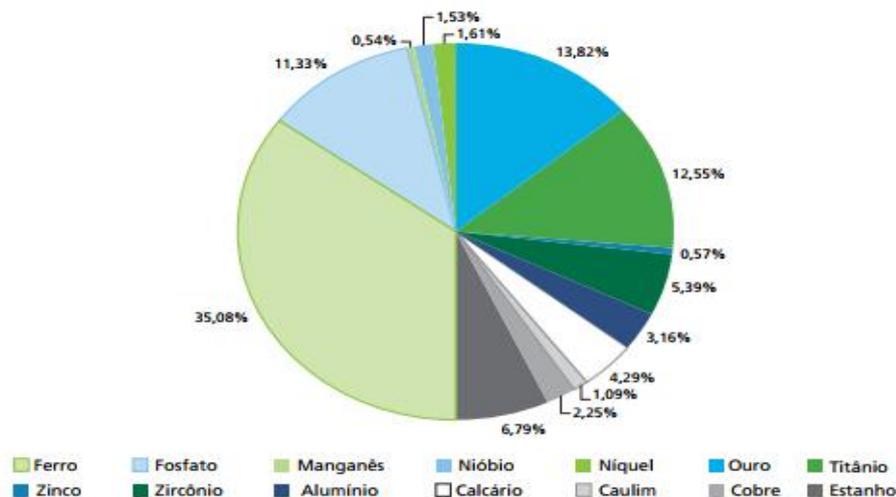
Como visto, há uma tendência de aumento na produção de resíduos de mineração ao longo dos anos, o que fomenta ainda mais a necessidade de melhorias nos sistemas de deposição dos rejeitos. É necessário o desenvolvimento de novos métodos de descarte de resíduos, que sejam menos impactantes para o meio ambiente, mais seguros e com um custo reduzido de operação, além da otimização dos métodos já existentes de descarte, para que sejam capazes de suportar a produção cada vez maior de resíduos.

2.2.1 Rejeitos fosfáticos no Brasil

As reservas de fosfato no Brasil possuem teores relativamente baixos, o que acarreta na geração de grandes quantidades de rejeito. Associado a isso, a complexidade para o tratamento dos minérios fosfáticos exige a aplicação de processos de redução granulométrica dos minerais, formando polpas com sólidos de granulometria extremamente fina e pouco coesa, gerando um rejeito de difícil manejo e baixa estabilidade.

Segundo Silva et.al (2012), a mineração de fosfato representa a quarta maior atividade mineral que mais gera rejeitos, com a produção de cerca de 11,33% de todo o volume nacional, ficando atrás das explorações de ferro (35,08%), ouro (13,82%) e titânio (12,55%). O Gráfico 2.2 representa a distribuição em porcentagem do volume de rejeito gerado pela atividade mineradora no Brasil entre 1996 e 2005.

Gráfico 2.2 - Contribuição de cada produto na geração de rejeitos no Brasil.



Fonte: Silva et. al (2012).

Por possuir diferentes características em cada região, os fosfatos possuem diferentes processos de exploração e tratamento em cada mina, gerando conseqüentemente diferentes relações entre a produção do mineral-minério e o rejeito. Em Tapira (MG), por exemplo, a relação mineral-minério/rejeito é determinada sendo para cada 1,6 milhão de toneladas/ano de concentrado de fosfato produzido, são geradas nove milhões de toneladas por ano de rejeitos (DIAS; LAJOLO, 2010).

2.3 Métodos de deposição de rejeitos

Os rejeitos gerados pela mineração necessitam de formas de descarte seguras, economicamente viáveis e que acarretem no menor impacto ambiental possível. Com isso, os métodos de deposição de rejeitos devem ser meticulosamente analisados e definidos de acordo com as características de cada operação mineral.

Fatores como volume de rejeitos, granulometria dos sólidos, natureza do processo de mineração, além das condições geológicas e topográficas da região e do poder de impacto ambiental do contaminante dos rejeitos são levados em conta na definição do método de deposição mais recomendado (DUARTE, 2008). Os principais métodos de deposição de rejeitos utilizados atualmente são:

- Em cavas de minas subterrâneas e à céu aberto;
- Em pilhas;
- Barragens (tipo a montante, a jusante e “em linha de centro”);
- Acondicionamento em *BAG*'s;

Na deposição dos rejeitos, independente do método selecionado é imprescindível a construção de estruturas seguras e compatíveis com o material a ser depositado. Com o aumento de acidentes envolvendo estruturas de contenção de rejeitos nos últimos anos, a pressão por parte dos órgãos fiscalizadores e da própria população tem influenciado positivamente para a segurança do descarte de resíduos de mineração. Atualmente a legislação brasileira está cada vez mais rigorosa, com o intuito de evitar grandes desastres ambientais e sociais, seja por contaminação de lençóis freáticos, destruição de biota local ou até mesmo grandes inundações, destruição de cidades inteiras gerando risco de mortes.

2.3.1 Barragem de rejeitos

Método mais aplicado de deposição de rejeitos, as barragens são 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).

Estes diques de contenção podem ser construídos utilizando material de empréstimo ou até mesmo o próprio rejeito, desde que atenda as condições geotécnicas necessárias, reduzindo assim custos operacionais (IBRAM, 2016). À medida que o volume da barragem vai sendo ocupado, operações de alteamento são realizadas ao longo do tempo, de forma que os diques de contenção possam ser redimensionados e assim consigam suportar maiores volumes de rejeitos.

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.

Em todas as barragens de rejeito, é imprescindível a aplicação de técnicas de segurança e controle de acidentes, como a preparação prévia do solo a receber a polpa de rejeitos e o preparo do material utilizado para a construção das estruturas. Na maioria das vezes, as barragens são construídas através do próprio rejeito ou de solo retirado de áreas de empréstimo. Quando o alteamento é feito com o rejeito da mina, apenas a fração grosseira do material é aproveitada, para conferir maior estabilidade aos diques. Para isso, o rejeito é ciclonado, separando o material fino a ser depositado na barragem do grosseiro, matéria-prima para a construção dos alteamentos (ARAÚJO, 2006).

2.3.1.1 Método de montante

De acordo com Araújo (2006), o método de montante é o método de alteamento mais antigo e de mais baixo custo de aplicação. Neste método, a partir do dique inicial construído, o rejeito será lançado na barragem, no perímetro do dique, formando uma praia de deposição. Esta praia contém material sólido sedimentado, que servirá de fundação para a construção de

novos diques, que como ilustra a Figura 2.1, serão construídos a montante da barragem, ou seja, sobre os rejeitos lançados na barragem, até atingir a cota final.



Figura 2.1 - Alçamento para montante. Fonte: Milonas (2006).

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, o que aliado à dificuldade de implantação de drenagem interna, reduz a capacidade de controle do nível d'água e desestabiliza as estruturas das barragens, além de potencializar as chances de rompimentos (ARAÚJO, 2006).

O método de montante possui como principais pontos positivos a facilidade operacional, a movimentação de menores quantidades de material para alçamento, o baixo custo e rapidez na construção, além da versatilidade de construção, podendo ser realizada em topografias muito íngremes (LOZANO, 2006).

2.3.1.2 Método de jusante

O método de jusante, assim como o de montante consiste na construção de alçamentos a partir do dique inicial previamente concluído. A diferença se dá pela direção da construção, onde diferentemente do método de montante, os diques são construídos para frente, não sobre a praia da barragem (ARAÚJO, 2006). Os diques construídos vão avançando por áreas ainda não utilizadas pela barragem, aumentando assim a área total de ocupação pela estrutura. Como ilustra a Figura 2.2, a fundação destes diques é o próprio dique anterior já compactado, podendo o material para construção ser o próprio solo ou os rejeitos do processo.



Figura 2.2 - Método de jusante. Fonte: Milonas (2006).

Este método apresenta como principal ponto favorável o maior controle das condições da barragem, principalmente em questões de segurança, já que permite uma maior compactação dos diques de alçamento, evitando fenômenos como o *piping* ou a percolação de água por entre os sólidos do dique. Com isso pode-se concluir que o método a jusante é consideravelmente mais estável que o de montante por possuir elevada resistência a carregamentos dinâmicos facilitando a drenagem, apresentando ainda baixa susceptibilidade de liquefação.

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 alçamento das barragens. Além disso, para o alçamento em jusante, volumes consideráveis de material são movimentados para formação dos diques, exigindo operações mais caras e com maior tempo para conclusão (ARAÚJO, 2006).

2.3.1.3 Método da linha de centro

Segundo o IBRAM (2016), o método da linha de centro pode ser considerado uma operação intermediária entre o alçamento a jusante e o a montante. 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 alçamento citado anteriormente.

O método de linha de centro consiste basicamente no alçamento vertical da barragem, com a construção dos diques de contenção se sobrepondo, não alterando o eixo da barragem, como é representado pela Figura 2.3. Durante o alçamento, os diques são construídos parte sobre a praia de rejeitos, assim como no alçamento de montante, e parte sobre o dique de partida, se prolongando externamente, como é feito no alçamento de jusante. Com isto o eixo

da barragem não se altera, ao mesmo tempo em que a barragem vai atingindo sua cota final (LOZANO, 2006).



Figura 2.3 - Método de linha de centro. Fonte: Milonas (2006).

O comportamento das barragens alteadas por linha de centro se assemelha mais ao método por jusante, de forma que garante vantagens como maior estabilidade das estruturas em relação ao método de montante, ao mesmo tempo em que não demanda tanto material para sua construção, além de manter o eixo da barragem inalterado (LOZANO, 2006).

Todavia, por ser um método intermediário, o aterramento por linha de centro possui desvantagens inerentes tanto ao método de aterramento de montante quanto de jusante. Uma das principais características negativas deste método se deve à complexidade da operação, visto que, o aterramento de linha de centro necessita da aplicação de técnicas de aterramento de montante e de jusante, tornando-o mais complicado e aumentando seu investimento global, por demandar a operação de equipamentos mecânicos para deposição a jusante (LOZANO, 2006).

2.3.2 Deposição na própria cava

O método de deposição de rejeitos em cava consiste em aproveitar as estruturas já existentes na cava, resultantes da escavação e retirada do minério, preenchendo estes vazios com a adição da polpa de rejeitos. A deposição de rejeitos na cava da mina representa um melhor aproveitamento espacial da região explorada, pois à medida que a cava se exaure, o espaço torna-se útil para preenchimento com rejeitos, dispensando a utilização de novas áreas para construção de estruturas de contenção, como pilhas e barragens (IBRAM, 2016).

Este método é indicado apenas para rejeitos inertes, com baixa compressibilidade, alta permeabilidade e rigidez. O rejeito, por ser depositado diretamente sobre a cava, necessita possuir características que impeçam a contaminação da região, principalmente por dissolução de metais da cava, oxidação de sulfetos, acidificação da polpa e infiltração no solo e consequentemente contaminação dos lençóis freáticos (LOZANO, 2006).

A deposição de rejeitos na cava aplica-se tanto para minas à céu aberto, como mostra a Figura 2.4, quanto para escavações subterrâneas. Em ambos os casos, a aplicação dos rejeitos confere maior estabilidade para as estruturas, principalmente em minas subterrâneas, onde o preenchimento das galerias por rejeitos é denominado “*backfill*”. Os custos globais deste método são considerados elevados, e sua aplicação é rara, devido à dificuldade das escavações possuírem as características necessárias, como paredes quase impermeáveis, resistentes à corrosão e com estabilidade.



Figura 2.4 - Aplicação da deposição de rejeitos em cava à céu aberto - Mina de ferro da Mutuca, Nova Lima - MG. Fonte: IBRAM (2016).

2.3.3 Pilhas

O método de deposição em pilhas, como o próprio nome diz, refere-se no armazenamento de rejeitos empilhados, num processo de construção semelhante ao de pilhas de estéril, onde as pilhas são construídas em camadas, formando taludes. Estes taludes são sobrepostos por novas camadas à medida que a pilha vai aumentando, sempre com menores dimensões horizontais que a camada anterior. Com isso a pilha vai sendo construída, adquirindo formato aproximadamente cônico ou piramidal, representado pela Figura 2.5.

O empilhamento de rejeitos é aplicado no Brasil desde a década de 80, ainda sendo um método pouco difundido no país. As pilhas representam estruturas de contenção e drenagem dos rejeitos, através de um sistema de drenagem interna, onde a água dos rejeitos constituintes da pilha é liberada, conferindo à pilha maior quantidade de sólidos e conseqüentemente, maior estabilidade (IBRAM, 2016).



Figura 2.5 - Deposição de rejeitos em pilhas. Fonte: IBRAM (2016).

Para aplicação deste método, realiza-se a separação entre a fração grosseira e a argilosa dos rejeitos sólidos, garantindo assim a construção de estruturas estáveis, com baixo risco de rompimentos e drenagem eficiente. Além disso, só é possível o empilhamento de rejeitos com baixa porcentagem de água, exigindo assim a aplicação de processos prévios de separação sólido-líquido para rejeitos em polpas. As pilhas de rejeitos exigem grandes áreas de construção, e custo relativamente alto de produção, ao mesmo tempo em que são mais estáveis e causam menor impacto ambiental em comparação a métodos de contenção de rejeitos em polpa (LOPES, 2017).

2.3.4 *BAG's*

O acondicionamento de rejeitos em *BAG's* consiste na desidratação de polpas de rejeitos através de sua adição em tubos geotêxteis porosos, com capacidade filtrante. Estes tubos são totalmente fechados, no formato de grandes bolsas fabricadas a partir de geotêxteis tecidos ou uma combinação de tecidos e não tecidos, como mostra a Figura 2.6. Este material atua como meio filtrante capaz de reter as partículas sólidas da polpa ao mesmo tempo em que permite a liberação da fração líquida para o meio externo, onde será reaproveitada. A Figura 2.7 ilustra o processo de desaguamento através dos *BAG's*.



Figura 2.6 - Tubo desaguador de rejeitos de 60m de extensão. Fonte: Newman et al. (2004).



Figura 2.7 - Desaguamento através de tubo geotêxtil. Fonte: Newman et al. (2004).

O uso dos *BAG's* na indústria começou na década de 70, onde os tubos eram preenchidos principalmente com areia e utilizados como estruturas de apoio em obras costeiras de construção civil. Foi no início da década de 80 que os *BAG's* começaram a ser utilizados como meios desaguadores, inicialmente de materiais provenientes de dragagem. Atualmente os tubos geotêxteis possuem variadas aplicações, seja para contenção de estruturas, controle de erosão ou drenagem de polpas (MARTINS; VIDAL, 2006).

Ainda é recente a utilização de *BAG's* no desaguamento de rejeitos, sendo este método pouco utilizado na mineração brasileira, devido ao elevado custo operacional e ao tempo considerado muito longo para o processo de drenagem do rejeito. No mundo existem algumas empresas que utilizam de tubos geotêxteis como meios desaguadores de rejeitos, com destaque para países como Grécia e Estados Unidos (MARTINS;; VIDAL, 2006).

Segundo Castro (2005), os *BAG's* podem ter dimensões variadas, adequando-se a cada operação em que serão aplicados, dependendo de fatores como taxa de produção de rejeitos, espaço físico para acondicionamento dos tubos e a destinação da fração líquida drenada pelos *BAG's*. Os fluidos drenados dos tubos geotêxteis podem conter elementos contaminantes que inviabilizam uma possível reutilização sem um tratamento químico adequado. Portanto, deve-se realizar o desaguamento de rejeitos perigosos sempre em pátios impermeabilizados que impeçam a infiltração do líquido drenado para o solo ou mananciais.

Os *BAG's* são recomendados especialmente para materiais finos, sendo de elevada resistência e com altos níveis de segurança. Além disso, soma-se o fato de em alguns casos tanto os tubos quanto a fração líquida drenada possuem aproveitamento operacional para outros fins. Muitas vezes os tubos preenchidos e desaguados são aplicados como apoio de estruturas da própria mina, podendo ser empilhados ou não, conferindo maior estabilidade para taludes e servindo como meio de contenção. A fração líquida, caso possua as características necessárias, pode ser reaproveitada na usina de beneficiamento de minérios, para transporte em minerodutos ou para aspersão em estradas, por exemplo.

2.4 Separação sólido-líquido

No tratamento de minérios, a aplicação de processos de separação sólido-líquido vem crescendo cada vez mais. 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 importantíssima para o tratamento de minérios,

permitindo a aplicação de operações cada vez mais complexas e garantindo maiores índices de eficiência para o beneficiamento mineral (FRANÇA; MASSARANI, 2010).

Segundo Chaves (2004), as operações de separação sólido-líquido tem como principal objetivo a redução da umidade do produto, adequando o material para as operações subsequentes em que será submetido. Estas operações podem ser caracterizadas em duas formas: pela movimentação relativa entre as fases e por ação de forças auxiliares. A primeira é caracterizada apenas pela movimentação das partículas sólidas pelo fluido em repouso através da força gravitacional, provocando a separação por decantação; a segunda é definida pela separação sólido-líquido com o auxílio de forças auxiliares no meio, como agitação, forças centrífugas, pressão e adição de vácuo.

As principais operações de separação sólido-líquido são a secagem, centrifugação, filtração, espessamento e clarificação, sendo selecionadas de acordo com fatores como o tempo de processo, as características do material e investimentos necessários. A aplicação destas operações se justifica principalmente pela crescente exploração de minérios com baixos teores e com partículas em graus de liberação cada vez menores. 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).

2.4.1 Filtração

Entre os métodos de separação sólido-líquido se destaca a filtração, 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 clarificado.

A Figura 2.8 ilustra o processo básico de filtração, onde é possível observar a polpa adicionada, a torta produzida e o clarificado resultante.

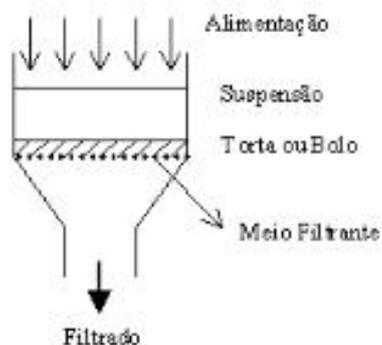


Figura 2.8 - Processo de filtração. Fonte: Arquivos de aula UERGS.

O processo de filtração pode ser realizado por diferentes métodos, utilizando variados meios de promover a separação sólido-líquido. A filtração 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, 2004).

A filtração 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.

2.4.1.1 Fatores relevantes para filtração

Para uma filtração eficiente, diversos fatores devem ser analisados, tanto em relação ao meio filtrante escolhido quanto para as características da polpa a ser filtrada. 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. São alguns fatores importantes para uma boa filtração:

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

Além de características referentes à polpa a ser filtrada, é importante também a seleção correta dos meios filtrantes, de acordo com as características da filtração desejada.

2.4.1.2 Equipamentos de filtração

Para cada tipo de polpa um equipamento de filtragem é recomendado. 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. Alguns dos equipamentos de filtração estão listados a seguir:

➤ Filtro de disco

Representado pela Figura 2.9, o filtro de disco é um equipamento formado por discos verticais distribuídos em série e conectados à tubulações de vácuo e ar comprimido. Os discos são revestidos por tecidos filtrantes e submersos em parte em tanques contendo a polpa a ser filtrada. A polpa é então aspirada por ação de vácuo pelos discos, que se movimentam realizando rotações e assim permitem que toda a área contendo tecido aspire a polpa e realize a filtração. O tecido permite a passagem apenas da fração líquida, retendo as partículas sólidas e assim formando a torta já desaguada. A torta ainda é submetida à lavagem, secagem e raspagem, sendo despejada (VALADÃO, 2012).

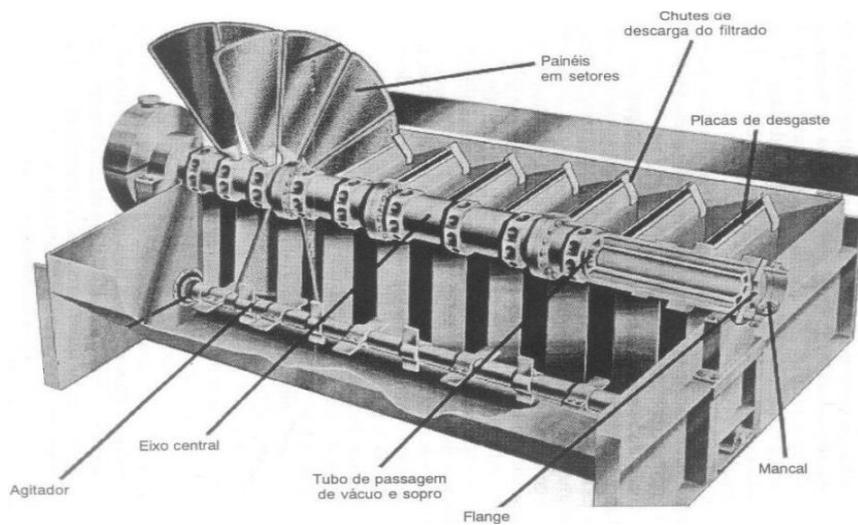


Figura 2.9 - Filtro de disco. Fonte: Chaves (2013).

➤ Filtros prensa

Os filtros prensa 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, representado pela Figura 2.10. 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 2.10 - Filtro prensa. Fonte: Unicamp (2012).

➤ **Filtro de mesa**

Segundo Oliveira (2004), os filtros de mesa são equipamentos que consistem em uma superfície circular horizontal giratória revestida por meio filtrante e ligada à uma fonte de vácuo. As polpas são despejadas sobre a superfície horizontal e a ação do vácuo as aspira em direção ao meio filtrante, retendo a fração sólida, formando a torta e permitindo a passagem do clarificado. Em seguida as tortas formadas são secas e descarregadas com auxílio de ar comprimido ou por ação de parafusos, desprendendo-se do meio filtrante. A Figura 2.11 ilustra um filtro de mesa.

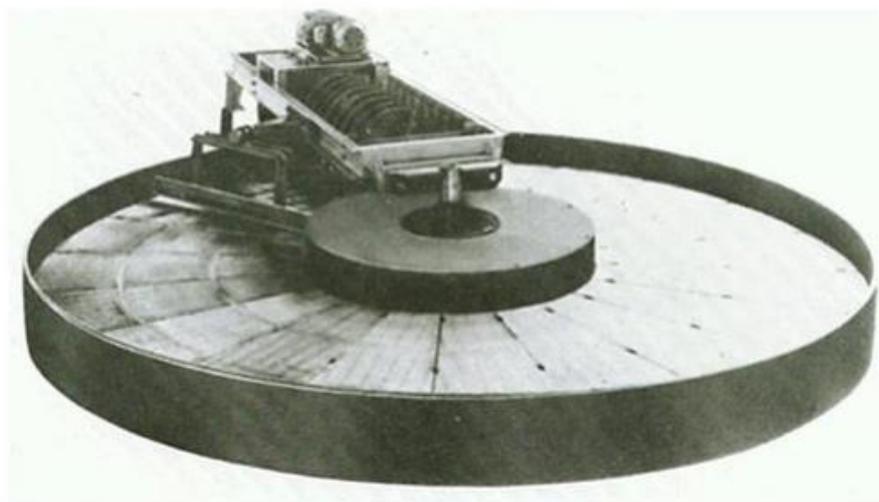


Figura 2.11 - Filtro de mesa. Fonte: Oliveira (2004).

➤ **Filtros de correia**

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 (CHAVES, 2003). A Figura 2.12 representa um filtro de correia. Os filtros de correia ainda permitem a lavagem da torta e a limpeza do tecido.

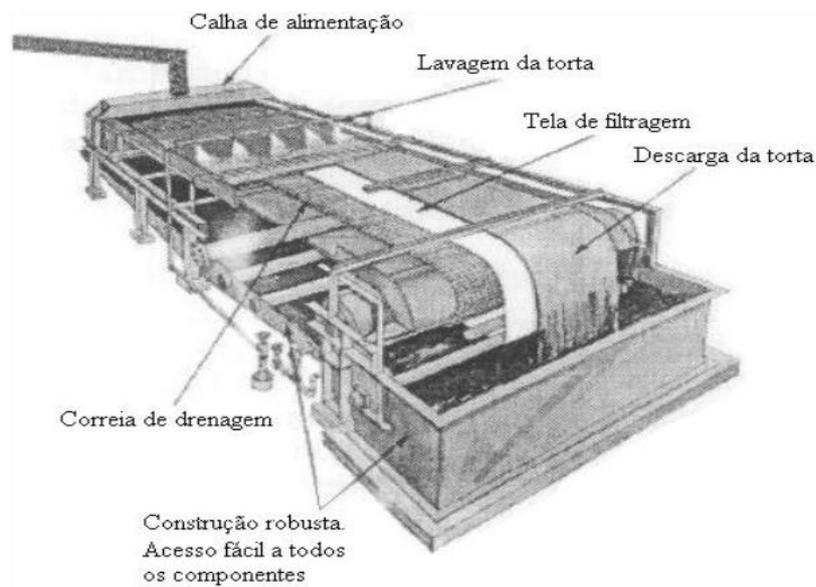


Figura 2.12 - Filtro de correia. Fonte: Oliveira (2004).

➤ **Filtro de tambor**

O filtro de tambor, representado pela Figura 2.13 é um equipamento que 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 (OLIVEIRA, 2004).

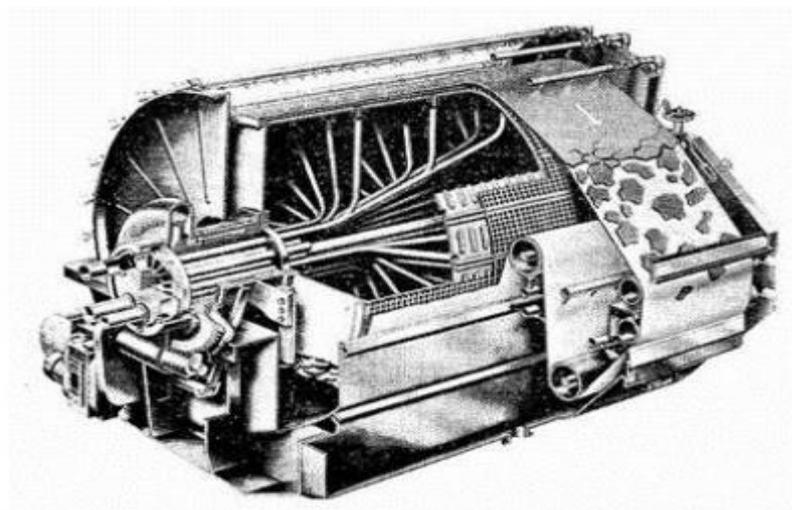


Figura 2.13 - Filtro de tambor. Fonte: Oliveira (2004).

2.4.1.3 Meios filtrantes

Os meios filtrantes para separação sólido-líquido de polpas minerais são na maioria dos casos compostos por filamentos entrelaçados, formando aberturas retangulares nas quais a fração líquida da polpa irá passar. Estes meios filtrantes são oriundos de materiais naturais, como o algodão ou de origem industrial, como o nylon e o poliéster.

Cada material possui uma indicação específica, sendo aplicado para diferentes operações e condições de polpa, devido a fatores como resistência química, física e especificações de torta e clarificado. A seguir a Tabela 2.2 indica as principais composições de meios filtrantes e suas indicações. Há ainda a utilização de materiais cerâmicos porosos como meio filtrante de polpas, onde a separação sólido-líquido ocorre por capilaridade.

Tabela 2.3 - Tipos de meios filtrantes e características de resistência.

Fibra	Temperatura de operação	Resistência em meio ácido:		Resistência em meio alcalino:		Resistência à solventes orgânicos
		Fraco	Forte	Fraco	Forte	
Polietileno	70°C	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Razoável
Saran	70°C	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	N/R
Polipropileno:	Monofilamento	95°C	Excelente	Excelente	Excelente	Razoável
	Multifilamento	110°C	Excelente	Excelente	Excelente	Razoável
Nylon	95°C	Razoável	N/R	Boa	Boa	Boa
Rilsan	95°C	Razoável	Razoável	Excelente	Excelente	Boa
Algodão	100°C	Razoável	N/R	Razoável	Razoável	Boa
Poliéster	135°C	Boa	Razoável	Razoável	N/R	Boa
Teflon	230°C	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Boa

N/R – Não Recomendado

Modificado de: Chaves (2013).

Independente da composição do meio filtrante, outro fator importante para a seleção do mais indicado é a tecedura dos filamentos. Os meios filtrantes podem, como mostra a Figura 2.14, apresentar tecedura na forma plana, de sarja e de cetim, se diferenciando na distribuição das aberturas e na disposição dos filamentos.

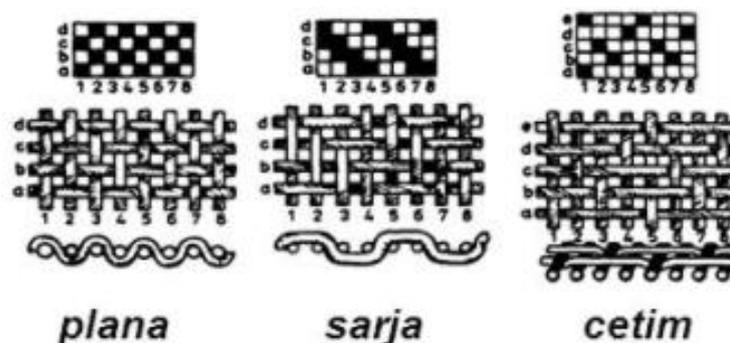


Figura 2.14 - Tipos de tecedura para meios filtrantes. Fonte: Chaves (2013).

A Tabela 2.3 indica quais as condições ideais de aplicação para cada tecedura, de acordo com as características dos produtos que se deseja obter.

Tabela 2.4 - Efetividade de cada tipo de tecedura para diferentes resultados.

Ordem de eficiência	1°	2°	3°
Clareza máxima do filtrado	Plana	Sarja	Cetim
Resistência mínima ao fluxo	Cetim	Sarja	Plana
Umidade mínima da torta	Cetim	Sarja	Plana
Limpeza mais fácil da torta	Cetim	Sarja	Plana
Vida útil do tecido	Sarja	Plana	Cetim
Menor tendência ao cegamento	Cetim	Sarja	Plana

Modificado de: Chaves (2013).

2.5 Reagentes

No tratamento de minérios os reagentes são compostos amplamente utilizados, principalmente em etapas de separação sólido-líquido, com destaque para a filtração e espessamento. Segundo Peres et Al. (1980), os reagentes são compostos orgânicos ou inorgânicos capazes de modificar as características de superfície das partículas minerais,

assim como do meio em que se encontram, permitindo o controle operacional e maior eficiência aos processos de separação. Os reagentes possuem variadas composições e funcionalidades, dividindo-se em coletores, espumantes e modificadores, que abrangem os reguladores de pH, depressores, floculantes e coagulantes.

2.5.1 Coletores

Os coletores são caracterizados como surfactantes, ou seja, compostos que adsorvem na superfície de partículas minerais alterando suas propriedades físico-químicas. São estruturas que apresentam uma parte apolar (hidrofóbica) e outra polar (hidrofílica), que se adsorve com a superfície mineral, tornando-a hidrofóbica, facilitando o processo de separação sólido-líquido (MAEDA, 2014).

2.5.2 Espumantes

Os espumantes são reagentes utilizados especificamente para etapas de flotação de minérios e atuam proporcionando estabilidade à espuma formada pelas bolhas de ar que carregam as partículas hidrofóbicas da polpa. Possuem composição semelhante aos coletores, com uma região hidrofóbica e outra hidrofílica, onde a primeira se adsorve na superfície da bolha e a segunda se orienta para a fase líquida do sistema (MAEDA, 2014).

2.5.3 Modificadores

Os modificadores são diversas estruturas com o objetivo principal de alterar as características físico-químicas das partículas minerais e dos meios em que se encontram, adequando-os para que os processos de separação sólido-líquido ocorram efetivamente. Os modificadores podem atuar tanto nas configurações de superfície das partículas, sejam como aglomerantes ou ativadores quanto em fatores químicos do sistema, como em ajuste de pH.

Segundo Peres e Araújo (2006), os modificadores podem ser descritos como:

- Reguladores de pH: São compostos ácidos ou básicos que ao serem adicionados à polpa ajustam os níveis de pH do sistema, tornando-os mais alcalinos, neutros ou ácidos, de acordo com as características de cada operação.

- Ativadores e depressores: São íons que adsorvem na superfície das partículas minerais, tornando-as propensas ou repulsivas à adsorção de coletores.
- Aglomerantes: estruturas responsáveis pela ação direta na superfície das partículas minerais de forma a reduzir sua área superficial e conseqüentemente sua tensão superficial, reduzindo a repulsão eletrostática entre as partículas, facilitando a aglomeração. São indicados principalmente para o manejo de polpas contendo partículas de granulometria mais fina, que por possuírem pequenas massas e grandes áreas superficiais são de difícil separação do meio fluido em que estão inclusas.

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), por exemplo (WANG, 2014).

Além disso, a utilização de auxiliares de filtração reduz a compressibilidade da torta formada ao longo dos processos de filtração. Desta forma, sua porosidade se mantém, permitindo assim a passagem da fração líquida da polpa e seu desaguamento.

2.6 Geossintéticos

Os geossintéticos são mantas flexíveis que possuem em sua composição polímeros de alta resistência e durabilidade, possuindo vasta aplicabilidade na área da engenharia, principalmente em obras de geotecnia. Desenvolvidos na década de 50, os geossintéticos adquiriram crescente importância ao longo dos anos, por possuírem características que lhe conferem grande eficiência, facilidade de operação e custo relativo baixo para solução de problemas que até então eram de difícil controle e prevenção, sendo difundidos como substituintes de técnicas convencionais de controle ambiental e engenharia geotécnica (MOREIRA, 2011).

Segundo Aguiar e Vertematti (2004), os geossintéticos possuem grande versatilidade operacional, sendo utilizados para diversas finalidades, como controle de erosão superficial, drenagem, filtração, impermeabilização, proteção, reforço e como meio separador. Com o elevado interesse acadêmico em pesquisa e desenvolvimento no estudo dos geossintéticos, melhorias e novas funcionalidades para o material estão sendo descobertas, o que tende a aumentar ainda mais a utilização e a importância dos geossintéticos na indústria.

Os principais materiais utilizados na fabricação de geossintéticos são os polímeros termoplásticos, visto que conferem ao produto maior resistência à variações de temperaturas sem comprometimento de suas estruturas. A grande maioria dos geossintéticos é composta por poliamida, polietileno, poliéster ou polipropileno, com destaque para as três últimas (FREITAS, 2003). A Tabela 2.4 representa as características de resistência dos principais polímeros utilizados na fabricação de geossintéticos.

Tabela 2.5 - Resistência de polímeros componentes de geossintéticos.

PROPRIEDADES	POLÍMERO			
	poliéster	poliamida	polipropileno	polietileno
resistência	A	M	B	B
módulo de deformação	A	M	B	B
deformação na ruptura	M	M	A	A
fluência	B	M	A	A
peso específico	A	M	B	B
custo	A	M	B	B
RESISTÊNCIA A:				
Raio U.V. estabilizado	A	M	A	A
Raio U.V. não-estabilizado	A	M	M	B
álcalis	B	A	A	A
fungos, vermes, insetos	M	M	M	A
óleos	M	M	B	B
detergentes	A	A	A	A

Notas: A – Alta, M – Média, B – Baixa, U.V. – radiação ultra-violeta

Fonte: John (1987).

De acordo com Gardoni (1995), as principais propriedades físicas dos geossintéticos que definem suas funcionalidades e devem ser analisadas para a seleção do tipo correto para cada fim são: Gramatura, a espessura, a forma e o diâmetro dos fios, além da porosidade e da distribuição dos poros, assim como o arranjo estrutural dos fios.

Os geossintéticos são compostos pela união ordenada ou não de filamentos de polímeros, formando mantas. A partir da distribuição destes filamentos, os geossintéticos podem ser considerados tecidos ou não tecidos. O geossintético tecido é representado quando os filamentos possuem um arranjo estruturado e bem definido como ilustra a Figura 2.15 (a), seguindo direções preferenciais, na maioria dos casos apresentando duas direções ortogonais, formando ângulos de 90° entre os filamentos. Já os geossintéticos não tecidos são definidos como representa a Figura 2.15 (b), quando a distribuição dos filamentos não segue um arranjo fixo e os mesmos são distribuídos aleatoriamente e não seguem uma direção preferencial de distribuição (FREITAS, 2003).

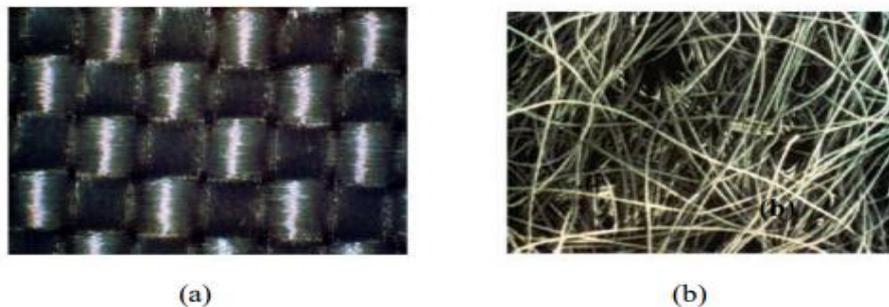


Figura 2.15 - Estrutura de geossintéticos tecidos (T) e não tecidos (NT). Fonte: Peixoto (2012).

2.6.1 Variações dos geossintéticos

A versatilidade dos geossintéticos aliada com a capacidade de eficiência dos mesmos em variadas funções confere grande aplicabilidade a estes produtos. No entanto, para cada diferente finalidade a qual é destinado, os geossintéticos necessitam apresentar diferentes características estruturais que se adequem corretamente às funções que desempenharão. Com isso, os geossintéticos são produzidos em diversos formatos, distribuições e estruturas, descritas a seguir, de acordo com Bathurst (2017).

Geotêxteis: São estruturas compostas por filamentos tecidos, não tecidos ou até pela aplicação de ambos em conjunto, podendo ser permeáveis ou contínuas. Possuem variadas finalidades, seja como material de reforço, drenagem, proteção, separação ou controle de erosões. Os geotêxteis são os principais produtos da classe dos geossintéticos, sendo os mais consumidos pela indústria, incluindo a mineração.

Geogrelhas: Como o próprio nome diz, são estruturas poliméricas com formato de grelha, sendo aplicado basicamente como método de reforços de solos, especialmente em taludes.

Georredes: Assim como as geogrelhas, as georredes também possuem disposição quadrangular de seus filamentos, porém com os mesmos distribuídos de forma sobreposta um sobre o outro. Por possuírem elevada porosidade, as georredes tem sua principal aplicação a condução de fluidos e gases.

Geomembranas: Utilizadas principalmente como meio isolante de fluidos e gases, as geomembranas são geossintéticos compostos por materiais flexíveis e contínuos, apresentando permeabilidade quase nula. Em sua estrutura podem ser aplicados um ou mais tipos de materiais sintéticos, combinando assim pontos positivos de cada um.

Geocompostos: São produtos caracterizados pela junção de mais de um tipo de geossintético, onde os diferentes tipos associados são aplicados em conjunto, agindo como uma única estrutura. Como exemplos podemos citar os geocompostos formados pela associação geotêxtil-geogrelha, aplicados como meio drenantes e de reforço, assim como os compostos georrede-geomembrana, utilizados como isolantes e condutores de fluidos e gases.

Geocompostos argilosos (GCL's): Geocompostos produzidos através de uma camada de bentonita (mineral argiloso) envolto por duas camadas de geotêxtil. São meios eficientes de isolamento de fluidos, sendo bastante aplicados em aterros sanitários e tanques de descarte de material orgânico associados à geomembranas.

Geotubos: Os geotubos são estruturas compostas por polímeros fabricados em formato de tubo utilizados como meios drenantes de líquidos e gases. Estas estruturas podem ser perfuradas ou não, em alguns casos sendo revestidas por filtros geotêxtis, de forma a permitir a passagem apenas da fração líquida ou gasosa para o outro lado. É aplicado principalmente na coleta de fluidos provenientes de aterros sanitários.

Geoexpandido: Geossintéticos formados a partir de espuma de poliestireno expandida, criando assim uma estrutura tridimensional na forma de blocos ou placas. Sua aplicação se dá como isolante térmico devido a sua baixa densidade, além de agir como substituinte de aterros ou meio de redução de pressão de solos.

A Figura 2.16 representa graficamente as estruturas dos diferentes tipos de geossintéticos. Representados por números estão descritos a seguir: geotela (1), georrede (2), geomembrana (3), geocomposto (4), GCL (5), geotubo (6) e geoexpandido (7).

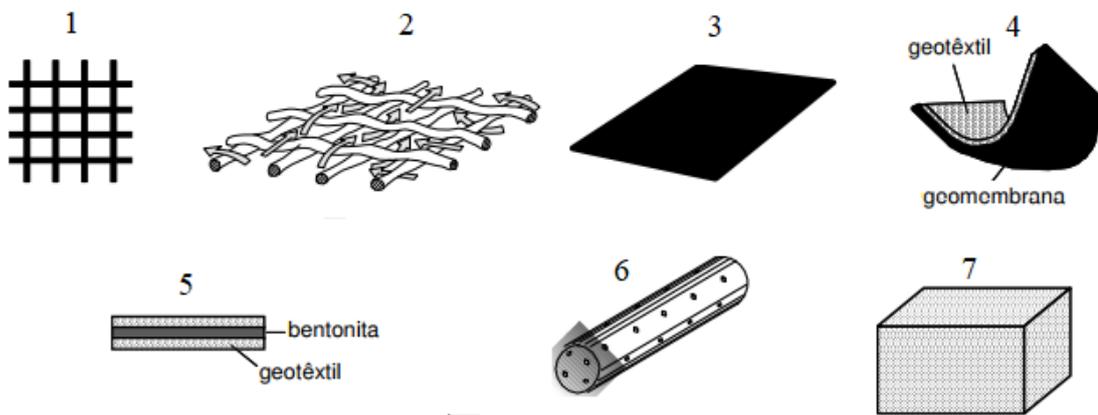


Figura 2.16 - Estruturas dos geossintéticos. Fonte: Barthusrt (2017).

2.6.2 Geotêxteis como desaguadores de polpa

Os geotêxteis possuem propriedades desaguadoras que permitem sua aplicação em larga escala, com elevada capacidade de retenção de partículas sólidas e condições hidráulicas suficientemente boas para a passagem da fração líquida da polpa pela estrutura. O desaguamento utilizando geotêxteis vem apresentando em alguns casos melhores resultados em relação a técnicas convencionais, reduzindo a umidade da polpa consideravelmente e aumentando a eficiência dos processos de separação sólido-líquido.

Atualmente a principal forma de desaguamento de polpas através de geotêxteis se dá por meio de *BAG's*, tubos fechados de material drenante que ao serem preenchidos por polpa são capazes de reter as partículas sólidas e liberar a fração líquida para outra destinação. Os *BAG's* são aplicados principalmente como meios alternativos de deposição e desaguamento de rejeitos, reduzindo o volume da polpa e permitindo assim um maior aproveitamento dos locais de descarte, como barragens e pilhas. O aumento da longevidade destes locais é importantíssimo para o bom funcionamento de uma mina, vide a dificuldade atual para liberação ambiental de novas áreas para descarte de rejeitos.

Em uma mina na península de Chalkidiki, na Grécia, a utilização de tubos geotêxteis como meios desaguadores foi capaz de aumentar a porcentagem de sólidos nos rejeitos de 10% para 60%, representando um desaguamento eficiente. A Figura 2.17 mostra o resultado obtido após o desaguamento da polpa (NEWMAN et Al., 2004).



Figura 2.17 - Polpa desaguada por geotêxteis. Fonte: Newman et al. (2004).

Na cidade de Baltimore, nos Estados Unidos, os tubos geotêxteis foram utilizados como método desaguador de rejeitos provenientes de uma mina de titânio, cujas barragens já estavam exauridas. Os *BAG's* foram preenchidos com a polpa contendo 2% de resíduos sólidos e empilhados, como representa a Figura 2.18 visando um melhor aproveitamento espacial do local. Após o desaguamento, o rejeito contido nos tubos apresentou 32% de sólidos, valor consideravelmente melhor em relação ao anterior. Na sequência, o rejeito desaguado foi novamente submetido a um desaguamento em *BAG's*, atingindo assim o valor final de 60% de sólidos (MIRATECH, 2005).



Figura 2.18 - BAG's desaguadores empilhados em operação. Fonte: Miratech (2005).

3 METODOLOGIA

Os procedimentos e testes aplicados durante o presente trabalho estão exibidos a seguir, e foram realizados no laboratório de tratamento de minérios do Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET- Campus Araxá) no primeiro semestre de 2018.

3.1 Material

O material utilizado para testes foi uma amostra de aproximadamente 8 kg de rejeito fosfático, retirado em uma barragem de uma mina em Minas Gerais. A amostra utilizada é o produto obtido do tratamento de minérios fosfatados de origem sedimentar, submetidos à operações de cominuição, deslamagem, concentração via flotação e processos de espessamento, sendo por fim despejada em barragem de rejeitos, onde foi coletada, submetida à secagem e enviada ao laboratório de tratamento de minérios para realização dos testes.

A amostra recolhida foi diluída em água para desaglomeração e seca posteriormente em estufa a 100 graus, sendo devidamente homogeneizada. O processo de homogeneização do material para amostragem e realização dos testes preliminares consistiu em etapas de tombamento em lona, seguido por quarteamento em pilha alongada, como mostra a Figura 3.1.



O meio desaguador selecionado foi a geoforma GT70, fabricado pela TDM Brasil. É

Figura 3.1 - Homogeneização e amostragem de rejeito fosfático.

um geotêxtil composto fabricado com fibras de Polipropileno (PP) de alta duração e tenacidade, sendo as mesmas tecidas na face externa e não tecidas internamente. A Figura 3.2 a seguir representa a estrutura de amostras da geoforma GT70, cedidas pela TDM Brasil para a realização dos testes.



Figura 3.2 - Amostras de geofibra GT70 utilizadas para testes.

Não foi necessária a caracterização do meio desaguador, pois a TDM Brasil cordialmente forneceu a ficha técnica referente à geofibra composta utilizada nos testes de desaguamento.

3.2 Análise Química, mineralógica e granulométrica do rejeito

Após a homogeneização, o rejeito fosfático foi amostrado e parte da fração coletada foi enviada para a realização de testes de fluorescência de raios-X, difração de raios-X e difração de raio/laser, visando a análise química e granulométrica do material, determinando a composição e os teores de cada espécie química presentes no rejeito fosfático, além da distribuição granulométrica. Para a análise química da amostra foi utilizado um analisador Shimadzu, modelo EDX-720, semelhante ao representado pela Figura 3.3, localizado no laboratório de engenharia de materiais do CEFET-MG Campus I, na cidade de Belo Horizonte-MG.



Figura 3.3 - Analisador químico por fluorescência de raio-x. Fonte: Sambow Adtech Co (2007).

Para análise mineralógica da amostra de rejeito o equipamento utilizado foi o difratômetro Shimadzu XRD-700, representado pela Figura 3.4.



Figura 3.4 - Difratômetro XRD-700. Fonte: Spomberg (2010).

Para análise granulométrica do material amostrado, os testes de difração à laser foram realizados a partir do equipamento Cilas 1090 Laser Particle Size Analyser, como ilustra a Figura 3.5.



Figura 3.5 - Difratômetro CILAS 1090. Fonte: CILAS.

3.3 Massa específica de sólidos

O material amostrado também foi submetido à testes de determinação de densidade, por meio do método de picnometria, procedimento que através da adição de um volume determinado de um líquido de densidade conhecida, (no caso deste experimento foi utilizado água), permite comparar os valores de massa do frasco contendo apenas o líquido e após a adição dos sólidos cuja densidade se deseja determinar. Inicialmente adiciona-se uma pequena

fração de sólidos em um picnômetro vazio de massa conhecida, de forma a preencher totalmente o fundo do frasco. Após a aferição da massa do conjunto, o mesmo tem seu volume restante totalmente preenchido por água e novamente sua massa é determinada.

Por fim, esvazia-se o frasco e em seguida seu volume é preenchido apenas por água, com a massa determinada. Os picnômetros foram previamente identificados com números e o teste foi iniciado, sendo explicitado na Figura 3.6.



Figura 3.6 - Teste de picnometria sendo realizado.

Através disso, foi possível a obtenção dos valores de densidade da amostra coletada, utilizando a Equação 3.1.

Equação 3.1 - Determinação de densidade de sólidos por picnometria.

$$\rho(\text{sól}) = \frac{Mb - Ma}{(Md + Mb) - (Ma + Mc)}$$

Onde:

$\rho(\text{sól})$ = Densidade da amostra de rejeito;

Ma = Massa do picnômetro vazio;

Mb = Massa do picnômetro + amostra de sólidos;

Mc = Massa do picnômetro + amostra de sólidos + água;

Md = Massa do picnômetro + água.

Com os valores necessários obtidos, a densidade dos sólidos foi calculada e o teste replicado duas vezes visando fornecer maior confiabilidade ao procedimento. Os valores de massa foram obtidos através da pesagem em balança Gehaka de precisão 0,01g, sendo o resultado final obtido através da média dos valores encontrados em cada teste.

3.4 Preparo de polpas

Para realização dos testes representativos de desaguamento, inicialmente se deu a preparação de polpas para aplicação nos mesmos. Levando em conta os objetivos de aplicação desta pesquisa em escala industrial, recomenda-se a utilização de polpas sem a adição de reagentes, pelo fato do rejeito se tratar de um material de descarte cujas operações não trarão retorno financeiro à empresa.

Uma possível adição de reagentes para tais processos acarretaria em maiores custos, diminuindo a viabilidade do desaguamento. Sendo assim, buscam-se condições de desaguamento que permitam um processo eficiente e com investimentos reduzidos, embora seja sabido que a filtragem simples não acontece a menos que o teor de sólidos em polpa seja elevado.

Foram preparadas polpas com 500 mL e 800 mL de volume, contendo 15%, 30% e 45% de sólidos em peso, a partir da adição do rejeito seco em um béquer preenchido com a quantidade de água necessária para formação da polpa. As polpas foram preparadas sob agitação a partir de um agitador mecânico IKA RW 20, com rotação estipulada em 1250 rotações por minuto durante 30 segundos, padronizando assim o procedimento.

As massas de rejeito seco necessárias para o preparo de cada polpa foram homogeneizadas em pilha e separadas em sacos plásticos, como ilustra a Figura 3.7, padronizando assim o procedimento de preparo. Por se tratar de um material previamente utilizado para a realização de testes preliminares, houve a necessidade desta nova etapa de homogeneização.



Figura 3.7 - Homogeneização e separação das massas de rejeito para testes.

Com o conhecimento do valor da densidade dos sólidos utilizados, os parâmetros para a preparação das polpas foram determinados, sendo exibidos a seguir pela Tabela 3.1. A Figura 3.8 mostra o procedimento de preparo das polpas para teste.

Tabela 3.1 - Parâmetros para preparo de polpas.

Porcentagem de sólidos (%)	Massa de sólidos (g)		Massa de água (g)	
	500 mL	800 mL	500 mL	800 mL
15	82,93	132,66	469,91	751,76
30	185,45	296,62	432,71	692,14
45	315,44	504,46	385,54	616,56



Figura 3.8 - Preparo de polpas

3.5 Testes de desaguamento

Com o preparo das polpas os testes de desaguamento foram realizados. Assim, a eficiência dos processos de separação sólido-líquido por meio de geossintéticos foi avaliada

3.5.1 Teste de eficiência utilizando geotêxtil

Para avaliar a necessidade ou não da utilização de flocculantes para o desaguamento da polpa de rejeitos, realizou-se o chamado “Cone Test”. Segundo especificações fornecidas pela TDM Brasil, empresa responsável pelo fornecimento dos geotêxteis, este ensaio consiste na adição de aproximadamente 500ml de rejeito em polpa por sobre uma camada de geotêxtil de 300 x 300mm. A polpa é deixada sobre o geotêxtil durante 120 segundos, onde o material passante, chamado de clarificado é coletado por um béquer graduado e recolhido para análise de eficiência.

Caso a separação sólido-líquido da polpa aconteça eficientemente, com redução da umidade da torta, assim como seja verificado menos de 1% de sólidos no clarificado, a necessidade da utilização de reagentes é descartada.

Caso o material percolado possua mais de 1% de sólidos em sua composição, e o material retido apresente umidade elevada, recomenda-se a utilização de flocculantes para melhoria de desempenho do desaguamento.

Os testes foram realizados e replicados com polpas contendo 15, 30 e 45% de sólidos, sendo representados a seguir na Figura 3.9.



Figura 3.9 - Testes de desaguamento.

3.5.2 Testes de filtração por pressão

Para determinação do comportamento dos geotêxteis em situações de filtração, foram realizados testes de filtração de polpas por pressão, que simulam condições práticas nas quais as polpas são inseridas nos *BAG's* por meio de dutos pressurizados. Os testes foram feitos utilizando o filtro de pressão Mecpress, da Brastorno.

Como mostra a Figura 3.10, este equipamento consiste em um recipiente cilíndrico de cerca de 14,5 cm de diâmetro composto de aço revestido por borracha e utilizado para desaguamento de polpas. O teste se inicia com a aplicação do meio filtrante revestindo a abertura inferior do cilindro, direcionada para um coletor de clarificado. No caso estudado o material utilizado foi a malha geotêxtil duplo tecido e não tecido.



Figura 3.10 - Filtro de pressão.

Após o cilindro ser travado e a polpa adicionada em seu interior, o cilindro é lacrado, isolando a polpa do ambiente externo e é pressurizado, de forma a induzir a passagem da fração líquida da polpa pelo meio filtrante, expulsando-a para o ambiente externo. A figura 3.11 representa o teste de filtração sendo realizado.

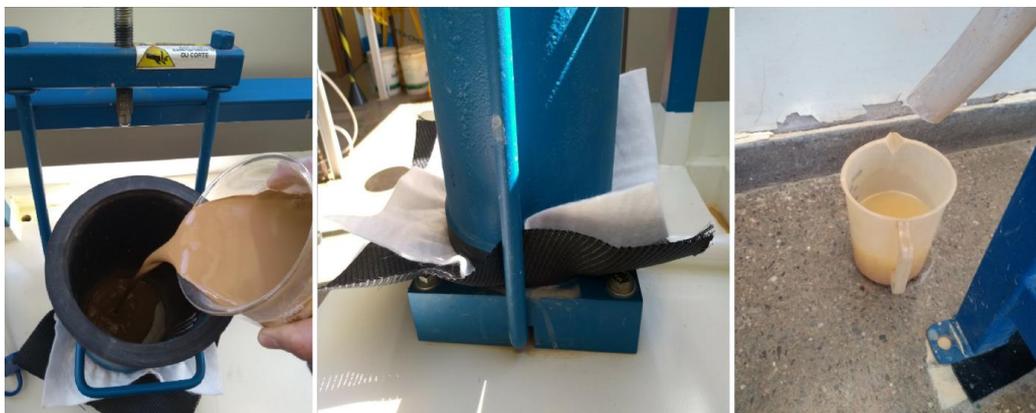


Figura 3.11 - Teste de filtração sendo realizado.

Como representado pela Figura 3.11, o clarificado sai por um coletor localizado abaixo do meio filtrante e é direcionado por tubulações até a calha de saída, onde durante os testes o material foi recolhido por meio de béqueres. Nos testes realizados, o material que permaneceu retido na calha após o procedimento foi coletado com auxílio de uma espátula.

Com o fim da filtração, retira-se a torta formada do cilindro e o material passante é recolhido para análise. A partir dos parâmetros obtidos é possível avaliar a eficácia do procedimento no desaguamento de polpas.

Para os testes realizados, o volume de polpas produzidas foi de 800mL, valor fixado a partir de resultados de testes preliminares realizados com o objetivo de determinar os parâmetros ideais para os testes oficiais de desaguamento. A partir de polpas com este volume foi possível a realização da filtração cuja torta possuía espessura representativa para análise.

Utilizando a geoforma GT70 como meio filtrante, o geotêxtil foi acoplado ao filtro de pressão e os testes foram iniciados seguindo um planejamento com duas variáveis e três níveis, como explicitado pela Tabela 3.2. Os procedimentos foram duplicados em seguida, conferindo maior confiabilidade aos resultados.

No total foram realizados 18 testes de filtração, sendo 6 para cada porcentagem de sólidos utilizada, variando a pressão aplicada sobre a torta em 2, 3 e 4 Bar, assim como a massa de sólidos na polpa, definidas em 15, 30 e 45%. A análise de tais variáveis permitirá a avaliação da eficiência do geotêxtil como meio desaguador e sua aplicabilidade em diferentes condições operacionais.

Tabela 3.2 – Planejamento dos testes

Teste	% Sólidos na polpa	Pressão do filtro (Bar)
1	15	2
2	30	2
3	45	2
4	15	3
5	30	3
6	45	3
7	15	4
8	30	4
9	45	4

Ao fim de todos os testes, as características analisadas foram as seguintes:

- Tempo total de ciclo;
- Percentagem de sólidos no filtrado;
- Umidade da torta;
- Espessura da torta;
- Taxa unitária de filtração (TUF).

Os valores para tempo total de ciclo em cada teste foram cronometrados, representando o intervalo necessário para que o gotejamento da torta fosse cessado. Esta característica é alcançada quando a fração de água existente no material retido não oferece mais resistência à passagem do ar pela torta.

Após o fim do ciclo de filtração, a torta formada é pesada e submetida à secagem em estufa durante 24 horas a 100°C. Após a secagem, a torta é novamente pesada, possibilitando assim a determinação da umidade em base úmida. A equação 3.2 apresenta o cálculo da umidade da torta.

Equação 3.2 - Cálculo da umidade da torta.

$$Umidade\ da\ torta\ (\%) = \frac{Massa\ da\ torta\ úmida - Massa\ da\ torta\ seca}{Massa\ da\ torta\ úmida} \times 100$$

A partir dos valores de massa úmida e massa seca da torta é possível determinar os valores de taxa unitária de filtração (TUF) dos geotêxteis utilizados. Este valor representa a capacidade de filtração do material em relação a sua área, através da equação 3.3.

Equação 3.3 - Cálculo do TUF.

$$TUF\ (Kg/h/m^2) = \frac{Massa\ da\ torta\ seca\ (kg) \cdot 3600}{área\ de\ filtração \cdot tempo\ de\ ciclo\ (s)}$$

Por fim as tortas formadas assim como o material passante foram coletadas e analisadas sendo em seguida representados graficamente e tratados no software Minitab, que por meio de gráficos de efeitos principais permitiram a análise das interações entre as variáveis e os resultados obtidos. Sendo assim a eficiência do desaguamento foi avaliada e a viabilidade da aplicação de geotêxteis como meios desaguadores foi determinada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização das etapas descritas na metodologia, os resultados foram obtidos e serão exibidos no presente capítulo.

4.1 Caracterização do material

Os resultados referentes à caracterização do material foram fornecidos pelo laboratório de materiais do CEFET-MG Campus Belo Horizonte, onde os testes foram realizados.

4.1.1 Meio filtrante

A geoforma com parede dupla GT70, geotêxtil utilizado como meio filtrante para os testes de desaguamento e filtração teve sua especificação técnica realizada pela TDM Brasil, empresa atuante na área de geossintéticos e responsável pelo fornecimento do material para a realização do trabalho. Por se tratar de um geocomposto, os dois componentes da geoforma foram analisados separadamente, separados em face não tecida branca e face tecida preta, ambos fabricados com fibras de Polipropileno (PP) de alta duração e tenacidade. A Tabela 4.1 a seguir representa as especificações técnicas dos materiais utilizados.

Tabela 4.1 - Especificações técnicas Geoforma GT70

Propriedades Face Não Tecida Branca	Norma	Unidade	Valor
Propriedades Mecânicas			
Resistência à Tração Longitudinal – MD (-10%)	ASTM D4595	kN/m	13
Deformação na Ruptura Longitudinal – MD (+10 valores)	ASTM D4595	%	60
Espessura (-10%)	ASTM D5199	mm	2,10
Propriedades Hidráulicas			
Abertura Aparente – AOS O ₉₅ (+30%)	ASTM D4751	Mm	0,23
Permeabilidade (-30%)	ASTM D4491	cm/s	0,23
Dimensões Características			
Comprimento		m	100
Largura		m	4,00
Área		m ²	400
Propriedades Face Tecida Preta	Norma	Unidade	Valor
Propriedades Mecânicas			
Resistência à Tração Longitudinal – MD	ASTM D4595	kN/m	70
Resistência à Tração Transversal – CD	ASTM D4595	kN/m	105
Deformação na Ruptura Longitudinal – MD	ASTM D4595	%	16
Resistência à Perfuração Estática	ASTM D6241	N	8000
Propriedades Hidráulicas			
Permeabilidade (50mm)	ASTM D4491	1/s	0,40
Vazão (50mm)	ASTM D4491	L/min/m ²	1200
Abertura Aparente (O ₉₅)	ASTM D4751	mm	0,425
Dimensões Características			
Largura		m	4,50
Comprimento		m	50

Fonte: TDM Brasil.

Como pode ser visto na tabela 4.1, a camada externa do tecido (face preta) apresenta elevada resistência à tração, deformação e à perfuração. Tal característica confere, além das propriedades de filtração, maior proteção ao tecido interno (face branca), maior responsável pela retenção de partículas ultrafinas da polpa.

A face branca, por ser um material mais maleável e com menor resistência mecânica, tem na face preta uma camada protetora que impede sua degradação, seja por agentes externos, cortes ou perfurações, de forma a manter sempre suas propriedades filtrantes. A abertura aparente reduzida confere à face branca melhor capacidade de filtração, ao mesmo tempo em que retém partículas menores se comparada à face preta, reduzindo a porcentagem de sólidos do clarificado, justificando a aplicação dos tecidos em conjunto.

4.2 Análise química, mineralógica e granulométrica do rejeito

Após a realização dos testes de caracterização do rejeito amostrado, foram obtidos os resultados de composição química e mineralógica do material, além de suas características granulométricas.

4.2.1 Análise química e mineralógica do rejeito

A análise química das amostras de rejeito por fluorescência de raios-x permitiu a determinação da composição elementar e de óxidos do material analisado. Através dos resultados fornecidos pelos testes de fluorescência de raios-X foi possível determinar as frações de cada componente existente no material amostrado e utilizado para os testes subsequentes. As Tabelas 4.2 e 4.3 representam os resultados elementares e de óxidos presentes na amostra.

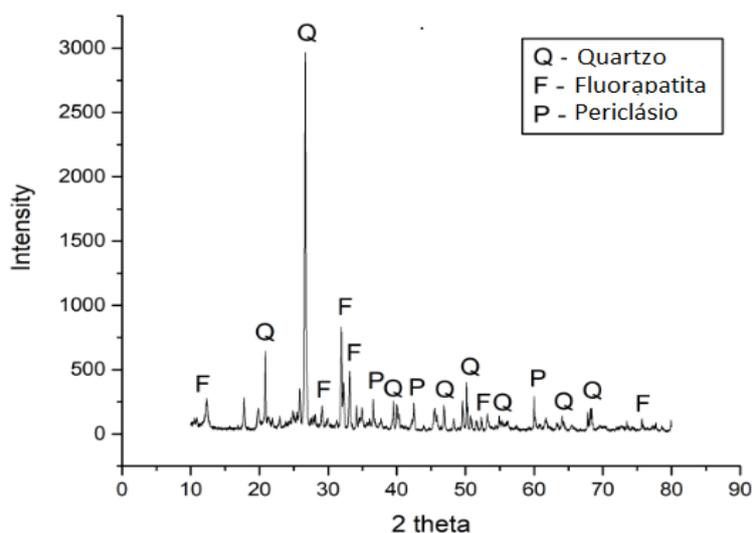
Tabela 4.2 - Resultados para elementos presentes na amostra.

Elementos	Fração da amostra (%)
Si	30,336
Ca	27,323
Fe	12,869
Al	10,769
P	8,720
K	6,648
Ti	1,303
Sr	0,711
Ba	0,621
Mg	0,427
Mn	0,174
Rb	0,048
Zn	0,029

Tabela 4.3 - Resultados para óxidos presentes na amostra.

Óxidos	Fração da amostra (%)
SiO ₂	41,085
CaO	19,005
Al ₂ O ₃	13,986
P ₂ O ₅	11,366
Fe ₂ O ₃	8,029
K ₂ O	4,228
TiO ₂	0,990
MgO	0,510
SrO	0,339
BaO	0,316
MnO	0,099
Rb ₂ O	0,021
ZnO	0,015

Além disso, os resultados dos testes de difração de raios-X permitiram determinar a composição mineralógica predominante no rejeito, cujos resultados estão graficamente expostos no Gráfico 4.1.

Gráfico 4.1 - Resultados de análise de fluorescência de raio-x.

Analisando os resultados é possível perceber a predominância de sílica e cálcio na amostra de rejeito fosfático, principalmente na forma de óxidos. Tal resultado vai de encontro com a geologia local, visto que é sabido que na região da mina fornecedora do material analisado há a ocorrência predominante de apatita carbonatada como pode ser comprovado pelo Gráfico 4.1.

A apatita é um mineral de origem sedimentar, que é explorado como mineral-minério na mina em questão, sendo intimamente associado ao quartzo, aumentando assim o teor de sílica no rejeito. Esta associação, inclusive, gera dificuldades no processo de beneficiamento mineral, reduzindo a recuperação metalúrgica do processo.

Cerca de 11% do rejeito é composto por P_2O_5 , material de interesse econômico da exploração de fosfato. Esta fração é considerada elevada se tratando de rejeito e corresponde ao mineral-minério perdido durante as etapas de beneficiamento, em que suas características físicas, químicas ou mineralógicas não permitiram seu aproveitamento.

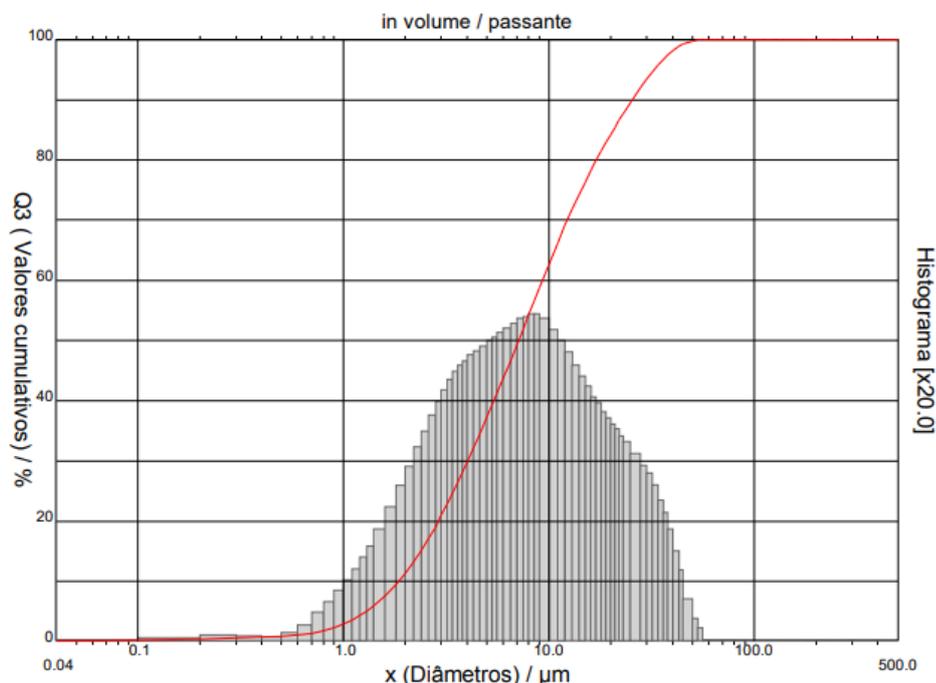
Durante as etapas de tratamento mineral, o minério extraído da mina estudada é submetido a seguidas etapas de moagem, objetivando a liberação do mineral-minério dos minerais de ganga. Com isso, há a formação de considerável quantidade de finos e ultrafinos, fração que durante processos de deslamagem, é direcionada à barragem de rejeitos independentemente de sua composição. Isso acarreta no descarte de material com teores relativamente altos de P_2O_5 , reduzindo a recuperação mássica do processo e justificando o alto teor de fosfato na barragem.

Há ainda a presença considerável de periclásio no rejeito analisado. Este mineral, cuja fórmula química é MgO representa um mineral de magnésio, o que justifica a presença do elemento nas Tabelas 5.2 e 5.3.

4.2.2 Análise granulométrica do rejeito

Após a análise granulométrica por difração à laser os valores médios de tamanho das partículas de rejeito foram obtidos, possibilitando a confecção da curva granulométrica para o material analisado, exibida pelo Gráfico 4.2.

Gráfico 4.2 - Curva granulométrica para rejeito fosfático.



Como é possível perceber através da análise do gráfico, o material possui granulometria heterogênea, variando na faixa entre finos e ultrafinos. Nota-se que cerca de 63% do rejeito analisado possui granulometria abaixo de 10 micrômetros (μm), faixa de tamanho que segundo Somasundaran (1980) caracteriza materiais ultrafinos. Foi possível ainda definir valores importantes para interpretação dos resultados, sendo eles:

Diâmetro mínimo de partícula: $0,04 \mu\text{m}$

Diâmetro a 10% de material passante : $1,86 \mu\text{m}$

Diâmetro a 50% de material passante : $7,13 \mu\text{m}$

Diâmetro a 90% de material passante : $25,51 \mu\text{m}$

Diâmetro máximo de partícula: $56,00 \mu\text{m}$

Diâmetro médio do material : $10,62 \mu\text{m}$

Com estas informações, confirma-se a variada faixa granulométrica na qual as partículas do rejeito analisado se encontram. Não é possível atribuir apenas uma característica de tamanho ao material analisado, definindo-o como fino ou ultrafino, inclusive com a existência de partículas consideradas coloides, (com granulometria abaixo de $1 \mu\text{m}$) de acordo com Somasundaran (1980).

No entanto fica claro que o rejeito fosfático estudado possui granulometria bastante reduzida, de difícil beneficiamento e, conseqüentemente, desaguamento por processos convencionais de separação sólido-líquido. Desta forma, a aplicação de novas metodologias para desaguamento deste material é justificada.

4.3 Massa específica de sólidos

Após a realização dos testes de picnometria foi possível determinar a massa específica dos sólidos, os valores obtidos durante os testes estão expostos na Tabela 4.4..

Tabela 4.4 - Resultados dos testes de picnometria.

Ma	Mb	Mc	Md	Densidade média (g/cm ³)
30,65	34,48	83,31	81,02	2,49
29,77	31,94	81,11	79,67	2,97
35,48	41,82	92,63	88,55	2,81
Densidade média da amostra = 2,755 g/cm ³				

Nota-se que a densidade média das amostras foi de 2,755g/cm³ ±0,244 , valor esperado vide a elevada presença de quartzo no material, de forma que sua massa específica de aproximadamente 2,7 g/cm³ exerça maior influência no resultado final. Com isso os valores de densidade do rejeito tendem a ser próximos aos da massa específica do quartzo.

4.4 Testes de desaguamento simples

Os testes de desaguamento foram realizados de acordo com o estipulado, porém o procedimento não foi representativo. Após o preparo das polpas, as mesmas foram despejadas sobre a malha geotêxtil, no entanto sem êxito no desaguamento. Como ilustra a Figura 4.1, o tecido não foi capaz de permitir a passagem efetiva do clarificado, de forma que a polpa ficou inteiramente retida sobre o geotêxtil.



Figura 4.1 - Resultado do teste de desaguamento.

s condições reológicas da polpa são dependentes da porcentagem de sólidos da mesma. Sendo assim foi observado que as polpas contendo 15% de sólidos em peso possuem mais fluidez dentre as analisadas, sendo que as polpas com 45% de sólidos foram as com piores condições para o teste. De qualquer forma, os testes de desaguamento apenas por ação gravitacional não foram passíveis de análises de filtração.

Tal fato se deve a viscosidade elevada da polpa, que por conter um rejeito de granulometria predominantemente ultrafina dificulta a passagem do fluido pelo tecido. As partículas do rejeito possuem massa muito pequena, além de elevada carga superficial, o que induz à repulsão das partículas, mantendo-as em suspensão e impedindo a sedimentação dos sólidos e sua passagem pelo meio filtrante.

A partir dos resultados obtidos foi possível determinar a necessidade da aplicação de forças externas para a filtração efetiva das polpas, de forma a induzir a passagem do material pelo tecido geotêxtil. Tal observação justifica a realização dos testes de filtragem em filtro de pressão, que embora sejam mais onerosos, garantem melhores resultados de filtração.

4.5 Testes de desaguamento em filtro de pressão

Como definido pela metodologia, os testes de desaguamento foram realizados utilizando filtro de pressão, variando a porcentagem de sólidos na polpa e o nível de pressão aplicado. As tortas formadas assim como o material passante foram coletadas e analisadas sendo em seguida representados graficamente e tratados no software Minitab, que por meio de gráficos de efeitos principais permitiram a análise das interações entre as variáveis e os resultados obtidos.

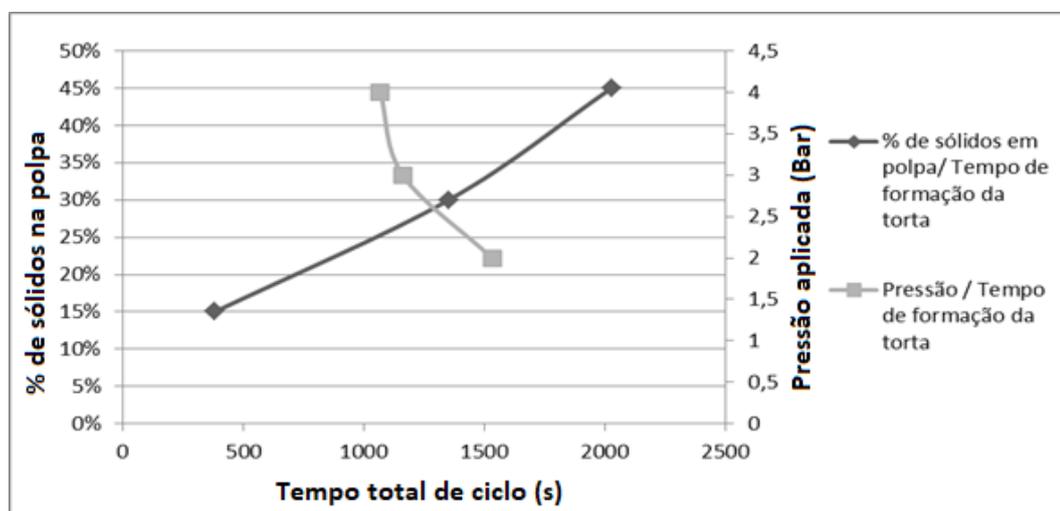
Os resultados para a torta formada após os testes de desaguamento estão exibidos na Tabela 4.5. Nela estão expressas informações referentes ao tempo total de ciclo, umidade final da torta e espessura da torta em cada teste realizado.

Tabela 4.5 - Dados referentes à formação de torta durante testes de filtração.

% Sólidos na polpa	Pressão do filtro (Bar)	Espessura da torta (mm)	Tempo total de ciclo(s)	Massa torta (g)	M sól (g)	Umidade (%)
15%	2	5,5	468	135,27	107,15	28,12
30%	2	13,75	1694	361,71	334,95	26,76
45%	2	22	2433	630,79	603,99	26,80
15%	3	5,5	363	132,65	104,86	27,79
30%	3	13	1304	361,96	336,19	25,77
45%	3	21,5	1815	629,99	604,31	25,68
15%	4	5,5	313	127,87	100,65	27,23
30%	4	13,75	1058	359,13	333,03	26,10
45%	4	21,5	1833	630,35	605,35	25,00

Como mostra a tabela, o tempo de formação das tortas foi muito variado, sendo diretamente dependente do nível de pressão aplicado e da porcentagem de sólidos em polpa. Os maiores tempos de formação de torta foram alcançados nos testes de filtragem de polpas contendo 45% de sólidos em massa e com a pressão de 2 Bar. Os menores tempos para formação de torta durante a filtração foram obtidos durante os testes com 4 Bar de pressão e 15% de sólidos em massa. O gráfico 4.3 a seguir representa a relação entre o tempo de formação de torta e as variáveis modificadas ao longo dos testes.

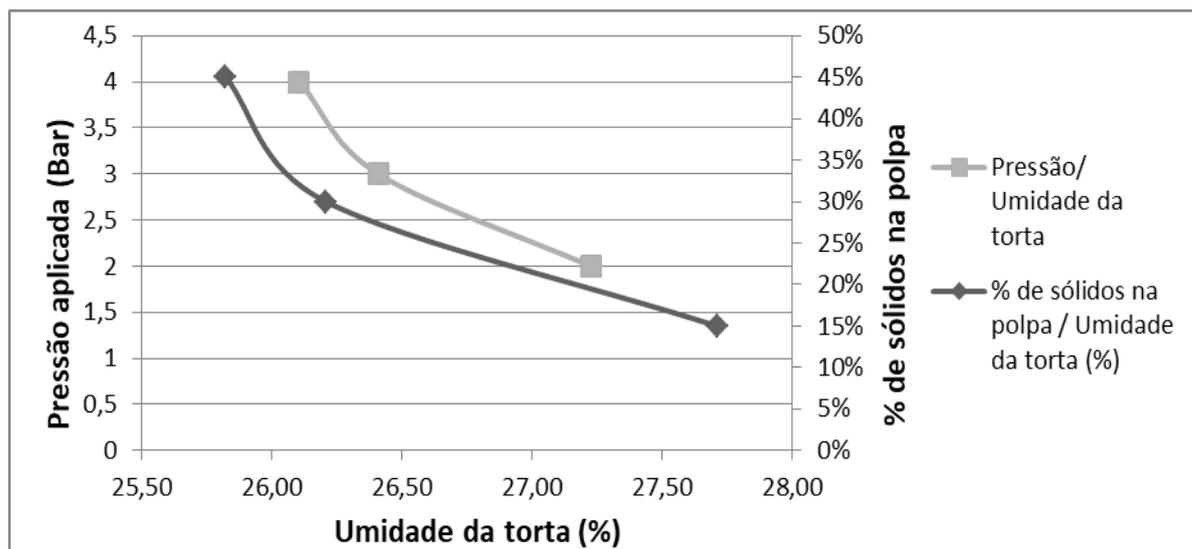
Gráfico 4.3 - Relação tempo total de ciclo / Pressão / Porcentagem de sólidos.



Analisando o gráfico fica clara a relação entre o aumento da quantidade de sólidos em polpa e o aumento do tempo de ciclo, assim como o nível de pressão sendo diretamente proporcional à velocidade de formação da torta. Isto se deve à maior dificuldade de secagem da torta. Quanto maior a camada de sólidos entre a polpa e o meio filtrante, maior será o tempo necessário para que a torta sofra o desaguamento completo. Os resultados também permitem observar uma maior influência da porcentagem de sólidos para o tempo final de ciclo. Nesse caso a variação na quantidade de sólidos em polpa afeta mais intensamente no resultado final do que a alteração de pressão aplicada no sistema.

Já em relação à umidade da torta, é possível observar uma relação direta entre a variação das variáveis com a eficiência do desaguamento. Sabendo disso, o Gráfico 4.4 representa os resultados de umidade em relação a pressão e % de sólidos.

Gráfico 4.4 - Relação umidade da torta/ Pressão/ Porcentagem de sólidos



Percebe-se através do gráfico uma tendência semelhante para redução da umidade da torta com o aumento das variáveis. Quanto maior a pressão e a % de sólidos, menor será a quantidade de água existente na torta após o desaguamento. Com isso é possível inferir que os melhores resultados para umidade da torta serão alcançados com aplicação dos maiores níveis de pressão e quantidade de sólidos possível.

Os resultados obtidos podem ser confirmados a partir da análise visual das tortas, ilustradas pela Figura 4.2, que representa as tortas formadas após os testes contendo respectivamente 15%, 30% e 45% de sólidos com pressão do filtro intermediária (3 Bar). Foi observado que, assim como ilustrado pelo Gráfico 4.5, as tortas formadas a partir de polpas

contendo maior quantidade de sólidos possuem menor umidade após o desaguamento, na qual a própria coloração mais clara da torta permitiu tal conclusão.

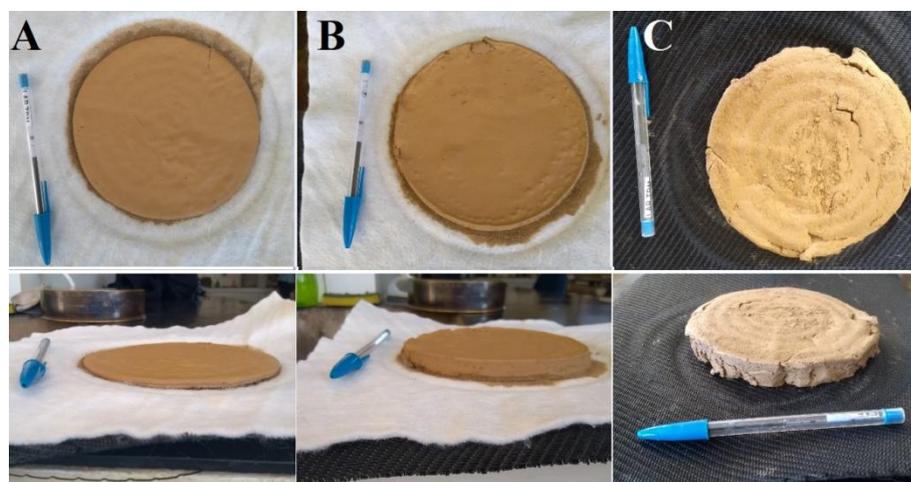


Figura 4.2 - Tortas formadas com 15% (A), 30% (B) e 45% (C) de sólidos.

Foi visto que a alteração da pressão durante os testes não teve influência significativa nas características visuais das tortas formadas, diferentemente da variação de % de sólidos, onde a massa e a espessura das tortas foram significativamente alteradas. As tortas apresentaram textura, colmatação e homogeneidade semelhantes, garantindo assim que a homogeneização prévia do material e a padronização do preparo de polpas foi eficiente.

Em todos os testes as tortas formadas não ofereceram resistência para se desprenderem do tecido geotêxtil, facilitando assim a retirada do material filtrado. As partículas retidas no tecido após a remoção das tortas foram facilmente liberadas apenas com o auxílio de jato de água de torneira, deixando o meio filtrante pronto para uso novamente.

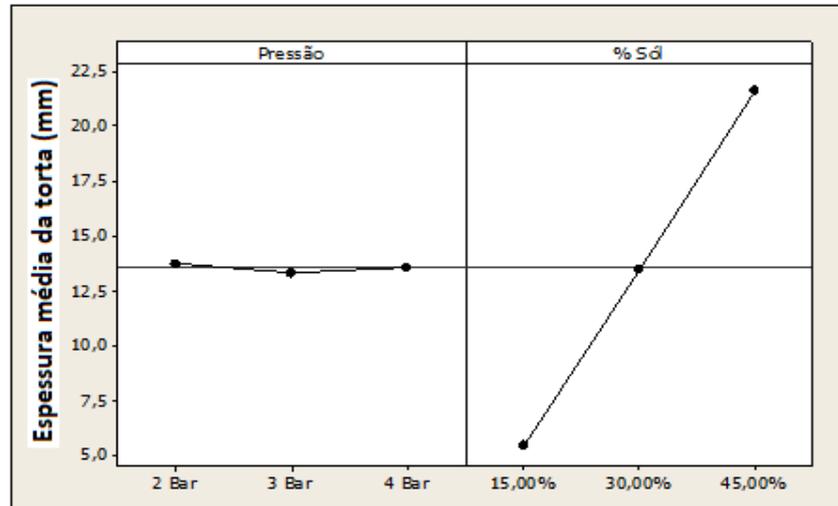
A espessura da torta foi medida com auxílio de uma régua e seus valores médios estão apresentados na Tabela 4.6:

Tabela 4.6 - Espessura média da torta.

% Sólidos na polpa	Espessura da torta (mm)
15%	5,5
30%	13,5
45%	21,7

Com os valores médios de espessura, a influência das variáveis nos resultados obtidos foi representada graficamente. O Gráfico 4.5, extraído diretamente das análises do software Minitab está exibido a seguir:

Gráfico 4.5 - Efeitos principais das variáveis para espessura de torta.



O gráfico, assim como a Figura 4.2 ilustra a intensa relação entre a % de sólidos na polpa com a espessura final da torta desaguada. Como visto, a variação de pressão no sistema não altera o produto final, sendo uma variável não influenciadora do resultado.

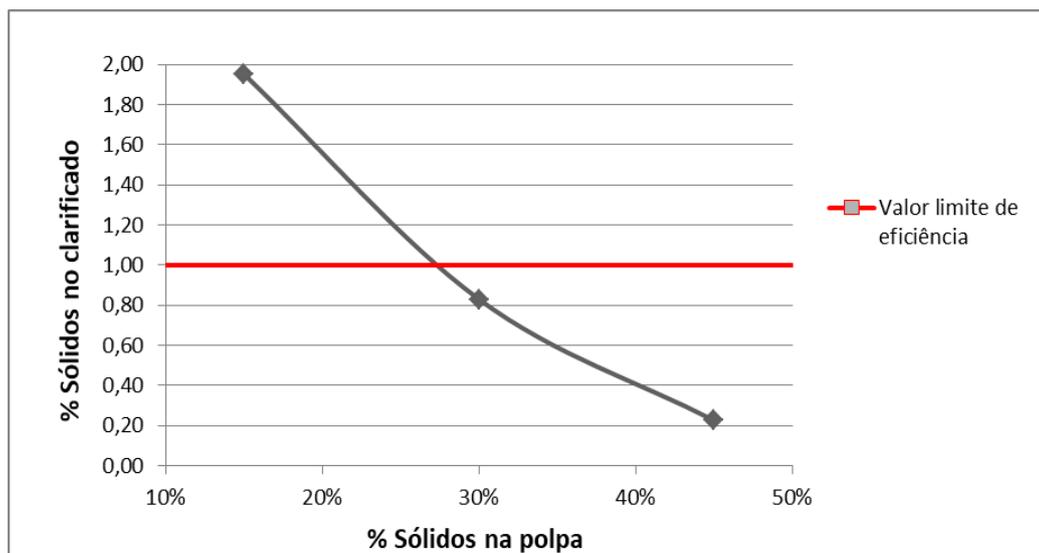
O clarificado resultante dos testes de filtração também foi analisado, e os respectivos valores médios para cada teste estão exibidos a seguir pela Tabela 4.7:

Tabela 4.7 - Quantidade de sólidos no clarificado em cada teste de filtração.

% Sólidos na polpa	Pressão do filtro (Bar)	Massa Clarificado (g)	% Sólidos
15%	2	676	1,91
30%	2	587	0,68
45%	2	406	0,18
15%	3	690	2,21
30%	3	601	0,75
45%	3	435	0,26
15%	4	715	1,74
30%	4	567	1,06
45%	4	431	0,23

De acordo com informações fornecidas pela TDM Brasil, empresa fornecedora do meio filtrante, o valor limite de sólidos no clarificado para um processo de filtração considerado satisfatório é inferior à 1%, garantindo um passante com reaproveitamento viável. Os resultados foram explicitados graficamente levando em conta o limite de eficiência definido pela TDM Brasil, sendo exibidos a seguir pelo Gráfico 4.6:

Gráfico 4.6 - Relação % sólidos em polpa / % Sólidos no clarificado.



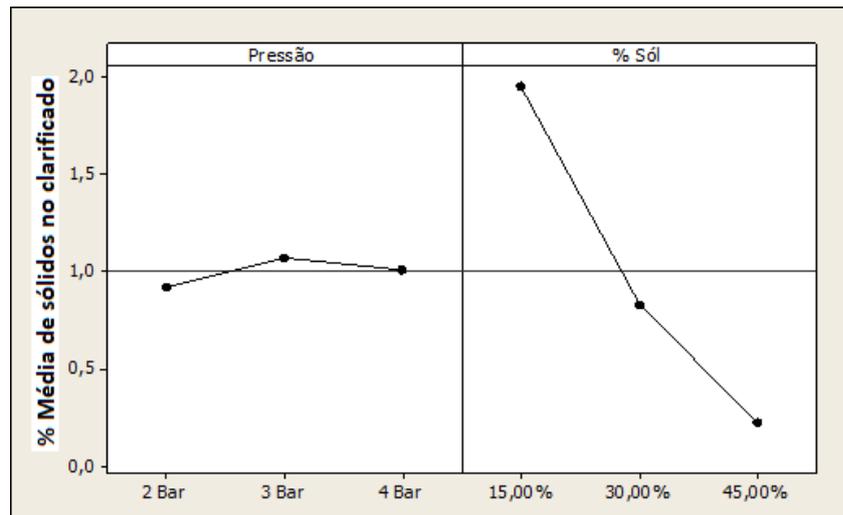
O gráfico 4.6 confirma a relação entre a quantidade de sólidos presente na polpa com a porcentagem de sólidos no clarificado. Foi observado que nos testes com polpas contendo 15% de sólidos, a quantidade de particulado passante pelo tecido geotêxtil foi superior a 1% em massa. Sendo assim é possível definir que os resultados dos testes com polpas de 15% de sólidos em massa não foram considerados satisfatórios, necessitando da adição de reagentes para redução da quantidade de partículas de rejeito.

Os testes com polpas contendo 30% de sólidos apresentaram porcentagem de sólidos no clarificado próximo a 1%, no entanto apenas quando submetidos à maiores pressões não obtiveram resultados satisfatórios. 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 clarificado 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 pelo clarificado.

Os melhores resultados de clarificado foram referentes aos testes com polpas contendo 45% de sólidos em massa, com valores de porcentagem de sólidos no clarificado

significativamente reduzidos, bem menores à 1%. Com isso pode-se afirmar que quanto maior a porcentagem de sólidos na polpa, melhores serão os resultados de qualidade do clarificado. O Gráfico 4.7 representa as médias principais para a porcentagem de sólidos no clarificado.

Gráfico 4.7 - Médias principais para % de sólidos no clarificado.



Com isso, é possível pressupor que a pressão do sistema pouco interfere no resultado final das características do clarificado. Portanto, esta condição do sistema é quase totalmente dependente da quantidade de sólidos em massa presente na polpa e das características do meio filtrante.

Os resultados obtidos são confirmados pela análise visual do clarificado coletado durante os testes de desaguamento. A Figura 4.3 mostra o material clarificado coletado após os testes com 15%, 30% e 45% de sólidos com pressão de 3 Bar, onde se vê uma redução da turbidez proporcional a quantidade de sólidos na polpa submetida ao teste.



Figura 4.3 - Clarificado de polpas contendo 15%, 30% e 45% de sólidos.

É possível, através da análise das imagens observar uma maior quantidade de sólidos em suspensão nas bandejas contendo material passante das polpas com menor porcentagem de sólidos, corroborando com os dados coletados e exibidos no Gráfico. Tal resultado se dá principalmente pelo fato de que durante o teste de filtração por pressão a própria torta age como meio filtrante.

Quando a torta está sendo formada, uma camada de partículas sólidas se acumula no tecido geotêxtil responsável pela filtração da polpa. Esta camada de material também serve como uma espécie de filtro, retendo as partículas sólidas em suspensão, impedindo seu carregamento pela água. Quanto maior a % de sólidos na polpa, maior também será a espessura da torta e conseqüentemente a retenção de sólidos durante os testes, acarretando em uma filtração mais evidente e efetiva.

Além disso, a quantidade de sólidos na polpa é inversamente proporcional ao volume de líquido existente na mesma. Com isso as polpas contendo 15% de sólidos necessitam de mais tempo para desaguar o alto volume de água existente e iniciar o processo de formação de torta, assim como as contendo 45% de sólidos já desagüam a polpa rapidamente, iniciando a formação da torta sobre o tecido geotêxtil mais rapidamente, “protegendo” o meio filtrante por mais tempo e impedindo a passagem de sólidos.

Estas afirmações também justificam, portanto, as características físicas do clarificado observadas durante os testes. Foi visto que logo no começo da filtração, o material passante é bastante turvo, com elevada porcentagem de sólidos, representando o intervalo em que as partículas sólidas ainda não se depositaram. Após certo tempo, o clarificado possui aspecto cristalino e não é possível observar qualquer particulado existente, representando assim a etapa mais eficiente da filtração, onde as partículas sólidas estão sendo retidas pela própria torta dentro do filtro. A Figura 4.4 ilustra o clarificado nos primeiros segundos do teste e após o início da formação da torta.



Figura 4.4 - Clarificado no início do teste e após a formação da torta.

Como alternativa ao cenário obtido, recomenda-se o redirecionamento da fração inicial do clarificado a um novo processo de filtração, adicionando o material passante a uma nova polpa e em seguida submetê-la a um novo desaguamento, de forma a reduzir ainda mais a porcentagem de sólidos passante do teste. Com esta nova metodologia, apenas o clarificado da parte final do desaguamento seria considerado o produto final, tornando-o ainda mais puro, com melhores condições de reaproveitamento ou de descarte.

4.5.1 Taxa unitária de Filtragem (TUF)

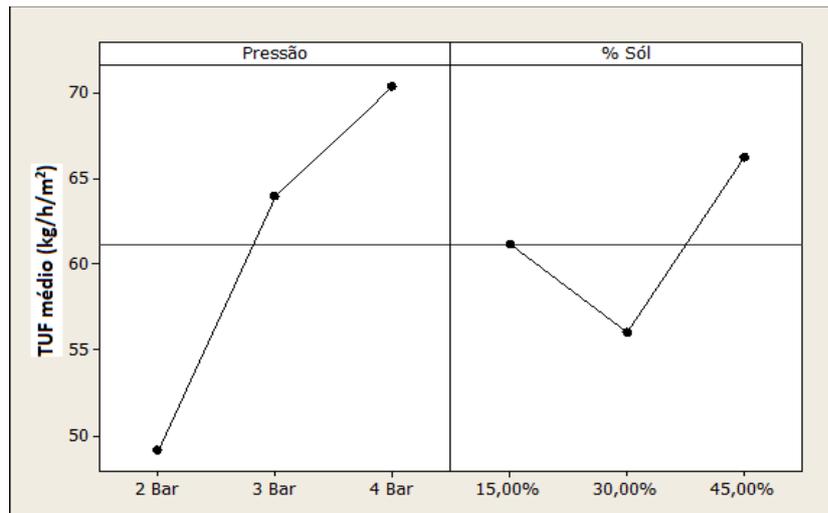
Com os testes realizados e seus resultados obtidos foi possível o cálculo da taxa unitária de filtragem dos procedimentos utilizando geotêxtil, de forma a mensurar a capacidade de desaguamento dos processos em toneladas de polpa por hora por metro quadrado de tecido. Os valores de TUF para cada um destes estão representados pela Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Valores de TUF obtidos para cada ensaio.

Teste	% Sólidos na polpa	Pressão do filtro (Bar)	TUF (kg/h/m ²)
1	15	2	50,2
2	30	2	43,3
3	45	2	54,2
4	15	3	63,1
5	30	3	56,2
6	45	3	72,6
7	15	4	70,4
8	30	4	68,7
9	45	4	72,1

Os valores de TUF para o geossintético como meio filtrante estão na faixa entre 43 e 72 kg/h/m². Essa considerável variação se deve principalmente à alteração dos valores de pressão no sistema. Através do software Minitab o Gráfico 4.8 representa a influência da pressão e da % de sólidos nos resultados obtidos.

Gráfico 4.8 - Médias principais para TUF.



A pressão elevada induz a passagem de maiores volumes de polpa pelo meio filtrante, aumentando consequentemente a velocidade de filtração e a TUF do ensaio (produtividade). Já a porcentagem de sólidos na polpa não possui relação contínua com os resultados obtidos, onde se observa que os piores valores de TUF foram para polpas contendo 30% de sólidos.

Isto se deve ao fato de que, com uma baixa % de sólidos a passagem de água pelo meio filtrante é facilitada, pois a camada da torta formada será de menor espessura e irá oferecer menor resistência a água. Já com uma alta porcentagem de sólidos a camada da torta irá oferecer uma maior dificuldade à passagem de líquido, no entanto, tem muito menos líquido para passar em relação às polpas diluídas, sendo isso uma possível explicação para o resultado.

Os valores de TUF obtidos em testes em filtro prensa horizontal foram utilizados como referência para os ensaios com o geotêxtil, visto que são os equipamentos de filtração por pressão mais comuns na indústria para desaguamento de lamas. Os resultados de filtração de lamas de minério de ferro do projeto Itabirito Vargem Grande foram utilizados como base de comparação, apresentando TUF de 85kg/h/m² e aproximadamente 21% de umidade de torta (GUIMARÃES, 2011).

Comparando com os ensaios realizados por Guimarães (2011), é possível observar que os resultados para TUF e umidade da torta dos testes com geotêxtil como meio filtrante são inferiores aos obtidos com o desaguamento por filtro prensa. No entanto, os valores comparados não são muito destoantes dos obtidos no projeto Vargem Grande, de forma que a relação custo-benefício de aplicação e a facilidade do processo de desaguamento podem viabilizar a aplicação dos *BAG's* geotêxteis como meios desaguadores de polpas em detrimento de filtros prensa convencionais.

5 CONCLUSÃO

A viabilidade da aplicação dos geotêxteis como meio desaguador de rejeitos ultrafinos de fosfato foi comprovada. Por meio dos testes de desaguamento foi possível confirmar a capacidade filtrante do geotêxtil de dupla face, além da qualidade de clarificado passante e a redução considerável da umidade das polpas. O processo de desaguamento ainda não atingiu resultados equivalentes aos apresentados por métodos tradicionais de desaguamento, no entanto fatores como o custo e a facilidade de operação podem viabilizar a aplicação dos geotêxteis no desaguamento de rejeitos.

Para a aplicação dos rejeitos em *BAG's* foi visto que o material geotêxtil responsável pelo desaguamento possui elevada resistência física, suportando a aplicação de elevada pressão sem se romper, mantendo suas características filtrantes inalteradas e com um resultado de desaguamento satisfatório. A utilização dos geossintéticos nos testes de desaguamento de polpas com granulometria muito fina foi satisfatória, representando um avanço na gestão de rejeitos, devido à grande dificuldade dos métodos tradicionais para redução eficiente de umidade de polpas de rejeitos com tais características, implicando em processos muitas vezes inviáveis operacionalmente e financeiramente.

A porcentagem de sólidos em polpa e a pressão no sistema influenciaram diretamente nos resultados durante os testes de filtração, tanto para as tortas quanto para o clarificado. Foi visto que com polpas com maior quantidade de sólidos, fatores como a umidade da torta e a porcentagem de sólidos no filtrado apresentam melhores resultados, embora levem mais tempo para realização do ciclo. Já a pressão no sistema foi diretamente proporcional à taxa unitária de filtragem do sistema, assim como à velocidade de formação de torta, e qualidade do filtrado.

Conclui-se, portanto, que os melhores resultados de desaguamento foram obtidos durante testes com as maiores pressões aplicadas, sendo esta uma variável importante para a otimização do processo de desaguamento, conferindo rapidez e eficiência ao procedimento, visto ainda que os testes realizados sem a adição de pressão não foram capazes de realizar a filtração das polpas mais espessas. Da mesma forma, visando as melhores condições para o desaguamento, a porcentagem de sólidos em polpa apresentou vantagens e desvantagens em cada condição utilizada, exigindo portanto a determinação de um valor intermediário ótimo de fração de sólidos na polpa, permitindo ao processo operar de forma eficiente, rápida e com tortas e clarificados dentro das especificações recomendadas.

Em relação ao reaproveitamento de água das polpas, foi visto que o desaguamento via geotêxteis pressurizados permite uma redução de umidade das polpas para valores próximos a até 23% de umidade, promovendo assim a liberação de uma fração considerável de água para reaproveitamento. Tal ação pode promover uma redução drástica na coleta de água nova para a mineração, minimizando os impactos ambientais da atividade mineral, além de reduzir custos com operações de captação e transporte. Com a oferta de recursos hídricos cada vez mais escassas na natureza, o desaguamento de rejeitos avaliado pelo trabalho surge como uma possível metodologia alternativa para futuras operações.

Ainda é necessário o estudo de outros fatores para confirmar a viabilidade operacional de aplicação dos *BAG's* geotêxteis como desaguadores de rejeito fosfático ultrafino. Questões hidráulicas e estruturais necessitam de avaliação e validação para que este processo seja aplicado industrialmente. A redução da umidade de polpas de rejeitos por geossintéticos conferiu às mesmas maior estabilidade, redução do volume ocupado e condições de deposição mais seguras. Dessa forma é importante a manutenção dos estudos na área e seu contínuo desenvolvimento, buscando soluções para os problemas enfrentados atualmente na deposição de rejeitos.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para novas pesquisas e trabalhos futuros, recomenda-se a análise das condições hidráulicas de aplicação dos *BAG's* como desaguadores, além de sua capacidade de empilhamento para deposição.

Além disso, recomenda-se a realização de ensaios de desaguamento de polpas com a adição de reagentes, analisando sua respectiva influência nos resultados finais. Fatores como pH e reologia das polpas também podem ser analisados e variados.

Como estudo complementar, o desaguamento de polpas com diferentes materiais, como rejeitos de minério de ferro ou de alumínio pode ser testado, avaliando sua eficiência em diferentes condições de granulometria e composição química.

Por fim, analisando os geotêxteis utilizados, sugere-se a continuação de pesquisas nesta linha, avaliando por exemplo a viabilidade econômica da aplicação de BAG's em detrimento de métodos convencionais, comparando critérios como eficiência de desaguamento, custos de operação entre cada método e redução de impactos ambientais.

7 REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas (ANA). **Relatório de Segurança de Barragens**. Brasília, 2016. 255 p. Disponível em:

http://arquivos.ana.gov.br/cadastr/barragens/Seguranca/RelatorioSegurancaBarragens_2016.pdf. Acesso em: 23 out. 2017.

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.

ARAÚJO, G.S.; **Estudo experimental do comportamento dreno-filtrante de interfaces de rejeitos finos-geotêxteis**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2005. 162p.

BATHURST, R.J.; **Classificação dos Geossintéticos**. IGS (International Geosynthetic Society). Disponível em: <http://www.geosyntheticssociety.org/wp-content/plugins/resources/documents/Classification/Portuguese.pdf>. Acesso em: 14 de ago. 2017.

CASTRO, N. P. B.; **Sistemas Tubulares para Contenção de Lodos e Sedimentos Contaminados**. Dissertação (Mestrado)- Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 2005. 103 f.

CHAVES, A. P.; **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. Desaguamento, Espessamento e Filtragem. 4.ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 2, 2013. 240 p.

DIAS, E. G.; LAJOLO, R. D.; **O meio ambiente na produção de fertilizantes fosfatados no Brasil**. In: FERNANDES, F. R. C.; LUZ, A. B.; CASTILHOS, Z. C. Agrominerais para o Brasil. Centro de Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro, 2010. p. 105-124.

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.

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 a sua disposição em pilhas. (Dissertação de mestrado). UFMG, Belo Horizonte, 2011. 114 p.

Instituto Brasileiro de Mineração, IBRAM. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. 1ª. ed. Brasília, 2016. 128 p. v. 1. Disponível em:

<<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006222.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2017.

Instituto Brasileiro de Mineração, IBRAM. **Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira**. 5ª. ed. Brasília, 2010. 128 p. v. 1. Disponível em:

<<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006222.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2017.

JASINSKI, S. M; **2012 Minerals Yearbook: Phosphate Rock: USGS**, 2016. 9 p. Disponível em: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/myb1-2012-phosp.pdf>. Acesso em: 11 set. 2017.

JOHN, N. W. M., **Geotextiles**, Blackie and Son Ltda. Glasgow and London, 1987. 347p.

LOPES, Marcos. **Técnicas de disposição de rejeitos na mineração**. 2017. Disponível em: <<https://tecnicoemineracao.com.br/tecnicas-de-disposicao-de-rejeitos/>>. Acesso em: 02 out. 2017.

LOUREIRO, F. E. L.; MONTE, M. B. M.; NASCIMENTO, M.; **Fosfato: CETEM**, 2005. 31 p. Disponível em: < <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1043>> Acesso em: 10 Ago 2017.

LOZANO, F. A. E.; **Seleção de Locais Para Barragens de Rejeitos Usando o Método de Análise Hierárquica**. 2006. 128 p. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Estruturas - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MARTINS, P. M.; VIDAL, D. M.; **Tubos Geotêxteis Para Acondicionamento e Desaguamento de Rejeitos de Mineração**. 2006. 9 p. Artigo (12º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XII ENCITA / 2006)- Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 2006.

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 (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2006. 146 p.

MIRATECH, T. C. N.; **Geotube® - Dewatering Technology**. Mining & Mineral Processing, 2005.

MME. **Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM - 2030): Geologia, Mineração e Transformação Mineral**. Texto para consulta pública. 2010. 157pp. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/plano-nacional-de-mineracao-2030/pnm-2030>>. Acesso em: 9 set. 2017.

MOREIRA, T. B. G.; **Avaliação de sistemas de drenagem com geossintéticos para diminuição da umidade no minério de ferro da Serra de Carajás**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

NEVES, C. A. R.; SILVA, L. R. **Universo da mineração brasileira**. DNPM/MME. Brasília, 2007. 83 p. Disponível em: http://www.dnpm.gov.br/mostra_arquivo.asp?IDBancoArquivoArquivo=2102. Acesso em: 10 set. 2017.

NEWMAN, P., HODGSON, M., ROSSELOT, E.; **The disposal of tailings and minewater sludge using geotextile dewatering techniques**. Minerals Engineering Cap 17, pp. 115-121. 2004.

OLIVEIRA, M. L. M.; LUZ, J. A. M.; LACERDA, C. M. M.; **Espessamento e Filtragem**. Universidade Federal de Ouro Preto – Departamento de Engenharia de Minas. 2010.122 p.

PARTICLE SIZE AND SHAPE ANALYZERS CILAS 1090. Disponível em: https://www.cilas.com/sites/default/files/public/media/panes/1090_en.pdf. Acesso em: 11 jun. 2018.

PEREIRA, E. L.; **Estudo do Potencial de Liquefação de Rejeitos de Minério de Ferro sob Carregamento Estático**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto - Departamento de Engenharia Civil. Ouro Preto, 2005. 186 f. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/6039>. Acesso em: 07 dez. 2017.

PERES, A. E. C. ARAÚJO, A. C. 2006. **A flotação como operação unitária no tratamento de minérios**. In: Chaves A. P (Ed.). Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. São Paulo, v.4, A flotação como operação unitária no tratamento de minérios, p.1-31.

PORTES, A. M. C.; **Avaliação da Disposição de Rejeitos de Minério de Ferro nas Consistências Polpa e Torta**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2013. 139p.

SILVA, A. P. M.; VIANA, J. P.; CAVALCANTE, A. L. B.; **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas: Relatório de Pesquisa**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília, DF. 2012. 40 p.

SILVA, M. R.; FREITAS, R. F.; SILVEIRA, R. B.; **Filtração**. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul. Bento Gonçalves, SC. 2012. 29 p. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/244518562/Filtracao-pdf>>. Acesso em: 23 out. 2017.

SOMASUNDARAN, P. (1980) **Principles of flocculation, dispersion and selective flocculation**. In: SOMASUNDARAN, P. Fine particles processing. Vol. II, c. 48, p. 947- 976.

SOUZA, A. E.; FONSECA, D. S.; **Economia Mineral Do Brasil: Fosfato**. Diretoria de Desenvolvimento e Economia Mineral – DIDEM. Brasília, 2009. 23 p.

SPOMBERG, S.; **Uso de Difractometria de Raios-X na Quantificação de Ferrita e Austenita em Aços Inoxidáveis Dúplex**. Centro Universitário FEI. São Bernardo do Campo, 2010. 70p.

UNICAMP. **Filtração**: Arquivo de aula da disciplina Operações Unitárias UNICAMP, 2012. 65 p. Disponível em: <http://www.unicamp.br/fea/ortega/aulas/aula19_Filtracao.ppt>. Acesso em: 20 out. 2017.

VERTEMATTI, J. C.; **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 1 ed. Brasília: Blucher, 2004. 428p.

WANG, C., HARBOTTLE, D., et al.; **Current State of Fine Mineral Tailings Treatment: A Critical Review on Theory and Practice**. 2014. 19 p.