



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil

Ágatha Ribeiro Hauck

Estudo do comportamento de geotêxteis aplicados como elementos filtrantes de rejeito de Bauxita

Ouro Preto

2019

Estudo do comportamento de geotêxteis aplicados como elementos filtrantes de
rejeitos de Bauxita

Ágatha Ribeiro Hauck

Monografia de conclusão de curso para
obtenção do grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto
defendida e aprovada em 12 de julho de
2019 como parte dos requisitos para a
obtenção do Grau de Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. D.Sc. Lucas Deleon Ferreira - UFOP

Ouro Preto

2019

H368e Hauck, Ágatha Ribeiro.
Estudo do comportamento de geotêxteis aplicados como elementos
filtrantes de rejeito de Bauxita [manuscrito] / Ágatha Ribeiro Hauck. - 2019.

68f.: il.: color; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Departamento de Engenharia Civil.

1. Geossintéticos. 2. Barragem de rejeitos - Desaguamento. 3. Barragem de
rejeitos - Ensaio de filtração tipo cone. 4. Floculação. I. Ferreira, Lucas Deleon. II.
Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 624

Estudo do comportamento de geotêxteis aplicados como elementos filtrantes de
rejeitos de Bauxita

Ágatha Ribeiro Hauck

Monografia de conclusão de curso para
obtenção do grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto
defendida e aprovada em 12 de julho de
2019 como parte dos requisitos para a
obtenção do Grau de Engenheiro Civil.
Banca examinadora:



Orientador: Prof. D. Sc. Lucas Deleon Ferreira - UFOP



Membro: Prof. M. Sc. Bruno de Oliveira Costa Couto – IFGoiano



Membro: Prof. M. Sc. Rondeson Queiróz Hilário – UFMG

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho representa o último passo de uma conquista pessoal. Não diria que foi fácil, mas certamente essa trajetória será lembrada com carinho e saudades por tudo que representa em minha vida.

Aos meus pais por expressarem tanto orgulho por mim, me fazendo ter forças pra ir cada vez mais longe. A minha irmã Bárbara por me entender e me apoiar sempre.

A todos os professores que tive na graduação, em especial ao Lucas, meu orientador, por toda paciência e atenção que tem com seus alunos, não só durante a orientação. Um agradecimento especial também ao professor Jaime, por estar sempre disposto a ajudar e por todo amor que expressa por sua profissão, você nos inspira a sermos pessoas melhores. Tive professores que são pessoas e profissionais incríveis e espero um dia conseguir retornar para a sociedade todo aprendizado e crescimento pessoal que vocês me proporcionaram.

A Lílian por toda ajuda durante a execução dos ensaios, discussão dos resultados e por todo apoio, não teria sido possível sem você. A Ana pela predisposição em ajudar e compartilhar seus conhecimentos. A Cynthia, Diogo e Mariana pela ajuda nos ensaios. Aos meus amigos da Engenharia Civil por terem compartilhado as preocupações e conquistas durante todos esses anos, vocês tornaram tudo mais fácil e divertido.

A CAPES pela oportunidade de participar do programa Jovens Talentos para Ciência e pelo Ciência sem Fronteiras, programas que expandiram minha visão de mundo e me proporcionaram aprendizados pra vida que vão muito além das salas de aula. Mais do que isso, por acreditarem que um país mais justo e desenvolvido se faz com educação pública e de qualidade.

Por fim, agradeço pela disponibilização dos laboratórios do NuGEO para a realização dessa pesquisa e a Escola de Minas por formar engenheiros com ética e responsabilidade social há quase 150 anos, tenho muito orgulho por fazer parte dessa história.

RESUMO

O enorme volume de rejeitos gerados na mineração demanda áreas e estruturas de iguais proporções para sua disposição final. Os riscos incorridos dessas estruturas são elevados e rompimento de duas barragens da empresa Vale S/A ocasionaram a busca emergencial de novas alternativas para disposição destes com menores fatores de risco. Nesse sentido, um dos processos adotados são os bags de rejeito, utilizados para desidratar, empilhar e destinar a lama proveniente da mineração. Os estudos sobre essa alternativa ainda são novos, dessa forma, o presente trabalho tem por objetivo estudar o processo de desaguamento da polpa de rejeitos através de três diferentes geotêxteis disponibilizados no mercado como forma introdutória para a utilização em bags. Além disso, estudou-se a necessidade de utilização de flocculantes para aumentar a eficácia dos geotêxteis em questão. Os resultados e conclusões foram obtidos através da realização de ensaios de filtração do tipo cone, com rejeito de Bauxita e geotêxteis tecidos e não tecidos. Os parâmetros observados durante os experimentos foram volume coletado, turbidez e teor de sólidos no filtrado. Testaram-se então dois flocculantes, sob diferentes concentrações e teores de sólidos iniciais. Os resultados obtidos foram satisfatórios uma vez que a adição de flocculante sob uma concentração ideal (obtida experimentalmente, como a concentração de mistura que resultou em menores teores de sólidos passantes no filtrado), ocasionou um aumento no teor de sólidos final do rejeito. Esses experimentos têm por finalidade servir de base para trabalhos futuros sobre filtração de rejeitos utilizando geotêxteis.

Palavras-chaves: Geossintéticos, Desaguamento de Rejeitos de Mineração, Ensaio de filtração do tipo Cone, Flocculantes.

ABSTRACT

The enormous volume of tailings generated in mining demands areas and structures of equal proportions for their final disposal. The risks incurred by these structures are high and the recent rupture of two dams of Vale S/A company caused the emergency search of new alternatives for the final disposal of these with lower risks incurred. In this sense, one of the processes recently adopted are the geotubes, utilized to dewater, stack and allocate the slurry generated in mining activities. The studies on this alternative are still recent. Therefore, the present work has the purpose of studying the process of dewatering the pulp of tailings through different geotextiles as an introduction to further applications in geotubes. In addition, the research studied the need to use flocculants to increase the effectiveness of the system. The results and conclusions were obtained through the realization of cone tests, with Bauxite tailings and geotextiles (woven and non-woven types). The parameters observed during the experiments were volume collected, turbidity and solids content in the filtrate. Two flocculants were tested under different concentrations and initial solids contents on the slurry. The results obtained were satisfactory since the addition of flocculant under an ideal concentration caused an increase in the final solids content of the tailing retained in the filter. These experiments are intended to serve as a basis for future work on tailings filtration using geotextiles.

Keywords: Geosintetics, Dewatering of mining tailings, Cone test, flocculants.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura do sistema de tubos geotêxteis.	5
Figura 2 – Ilustração apresentando as diferenças entre a disposição em polpa e em pastas minerais.	6
Figura 3 – Flocculação através do mecanismo de pontes.	10
Figura 4 – Processo de filtração de rejeitos, evidenciando a formação da torta de rejeito que funciona como pré-filtro no sistema.	11
Figura 7 – Geotêxtil cortado.	19
Figura 8 – Dobragem do geotêxtil –	19
Figura 9 – Dobragem do geotêxtil.	20
Figura 10 – Dobra final do geotêxtil com respectiva vista superior do filtro em cone	20
Figura 11 – Amostra de 1 litro de rejeito retirada do tambor de 20 litros e colocada em baldes para pesagem e acréscimo de água.	21
Figura 12 – Montagem do filtro	22
Figura 13 – Montagem do filtro	22
Figura 14 – Início do ensaio de cone – despejamento do rejeito no geotêxtil filtrante.	23
Figura 15 – Amostras de material filtrado com geotêxtil não tecido com teor de sólidos de 30, 25, 20 e 15%, respectivamente.	24
Figura 16 – Pesagem dos polímeros na balança de precisão.	25
Figura 17 – Comportamento filtrante	30
Figura 18 – Comportamento filtrante	30
Figura 19 – Amostras de material filtrado com geotêxtil não tecido com teor de sólidos de 30, 25, 20 e 15%, respectivamente.	31
Figura 20 – Resultado obtido no turbidímetro.	31

Figura 21 – À direita amostra de filtrado com 30% de sólidos e à esquerda a mesma amostra diluída em 25 vezes para coleta de resultados de turbidez.....	32
Figura 22 – Filtrado obtido	34
Figura 23 – Filtrado obtido com	34
Figura 24 – Processo de decantação, à direita amostra de filtrado com 15% de sólidos e à esquerda a amostra de filtrado com 20% de sólidos.....	34
Figura 25 – Polpa de rejeitos com a adição dos dois floculantes utilizados.....	37
Figura 26 – Análise da turbidez dos filtrados obtidos com a adição de floculantes.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Propriedades dos polímeros Polipropileno e Poliéster	7
Tabela 2 – Propriedades Mecânicas e Hidráulicas do geotêxtil não tecido	16
Tabela 3: Propriedades geotécnicas do rejeito utilizado	17
Tabela 4: Classificação granulométrica	17
Tabela 5: Análise química do rejeito	18
Tabela 6 – Valores obtidos na correção da quantidade de água no rejeito	27
Tabela 8: Resultados de filtração com geotêxtil não tecido	28
Tabela 9: Resultados de filtração com geotêxtil tecido de desaguamento	28
Tabela 10 – Valores obtidos em unidades de turbidez (uT)	32
Tabela 11 : Teor de sólidos nos filtrados com geotêxtil não tecido	35
Tabela 12 – Eficiência média do geotêxtil não tecido	35
Tabela 13 – Eficiência média do geotêxtil tecido de desaguamento	36
Tabela 14 – Conferência do teor de sólidos real nas amostras para geotêxtil de desaguamento	37
Tabela 15 – Conferência do teor de sólidos real nas amostras para geotêxtil não tecido	38
Tabela 16 – Resultados para filtração utilizando geotêxtil tecido de desaguamento com adição do floculante em pó	39
Tabela 17 – Resultados para filtração utilizando geotêxtil tecido de desaguamento com adição do floculante líquido	39
Tabela 18 – Resultados para filtração utilizando geotêxtil não tecido com adição do floculante em pó	40
Tabela 19 – Resultados para filtração utilizando geotêxtil não tecido com adição do floculante líquido	40

Tabela 20 – Turbidez utilizando geotêxtil tecido de desaguamento com adição do floculante em pó	42
Tabela 21 – Turbidez utilizando geotêxtil tecido de desaguamento com adição do floculante líquido	42
Tabela 22 – Turbidez utilizando geotêxtil não tecido com adição do floculante em pó	43
Tabela 23 – Turbidez utilizando geotêxtil não tecido com adição do floculante líquido	43
Tabela 24: Teor de sólidos nos filtrados com geotêxtil tecido de desaguamento	44
Tabela 25: Teor de sólidos nos filtrados com geotêxtil não tecido	44
Tabela 26 – Eficiência dos geotêxteis com adição do floculante em pó	45
Tabela 27 – Eficiência dos geotêxteis com adição do floculante líquido	46

SUMÁRIO

Agradecimentos	I
Resumo	I
Abstract.....	II
Lista de Figuras	III
Lista de Tabelas.....	V
Sumário	VII
1 Introdução	1
1.1 Objetivo	3
1.1.1 Objetivos Específicos.....	3
2 Revisão Bibliográfica.....	4
2.1 Rejeitos da Mineração e sua disposição	4
2.2 Geotêxteis: definição e aplicações	7
2.3 Floculantes: definição e efeitos.....	9
2.4 Desaguamento de rejeito por filtração com a utilização de geotêxteis ..	10
2.5 Ensaio de filtração do tipo cone.....	13
3 Metodologia.....	15
3.1 Especificações técnicas dos geotêxteis.....	15
3.2 Caracterização do rejeito.....	16
3.2.1 Propriedades geotécnicas.....	16
3.2.2 Composição mineral e análise química.....	18

3.3	Metodologia dos ensaios	19
3.3.1	Ensaio sem adição de floculante	19
3.3.2	Ensaio com adição de floculantes	24
4	Resultados	27
4.1	Ensaio de filtração sem adição de floculantes	27
4.1.1	Porcentagem de sólidos das amostras submetidas à filtração.....	27
4.1.2	Resultados obtidos na filtração	28
4.1.3	Turbidez	30
4.1.4	Teor de sólidos presente nas amostras filtradas.....	35
4.1.5	Eficiências encontradas	35
4.2	Ensaio com utilização de floculante	36
4.2.1	Porcentagem de sólidos real nas amostras submetidas a filtração.	36
4.2.2	Resultados obtidos na filtração	38
4.2.3	Turbidez	41
4.2.4	Teor de sólidos presente nas amostras filtradas.....	44
4.2.5	Eficiências encontradas	45
5	Conclusão	47
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	49
	Referências.....	50

1 INTRODUÇÃO

O Brasil vivenciou em janeiro de 2019 o rompimento da barragem de Córrego de Feijão em Brumadinho/ MG, três anos após o rompimento da Barragem de Fundão em Mariana/MG, ambos com danos sociais e ambientais irreversíveis para o país. Por consequência, novas alternativas vêm sendo buscadas pelas mineradoras para que suas atividades não sejam prejudicadas. Segundo o IBRAM (Instituto Brasileiro de Mineração), o Brasil exportou em 2017 mais de 403 milhões de toneladas de bens minerais, o que corresponde a um montante de 28,3 bilhões de dólares, cerca de 30,5% do saldo comercial do país no referido ano.

A indústria da extração mineral representa cerca de 1,4% do PIB nacional, gerando 180 mil empregos diretos e mais de 1,5 milhões de empregos indiretos (IBGE 2014), atuando em mais de 1500 cidades no território nacional. Os principais minérios extraídos no país atualmente são ferro, bauxita (alumínio), manganês e nióbio. O Brasil é o segundo maior produtor de ferro do mundo, com cerca de 235 milhões de toneladas produzidas anualmente (Brasil Escola). Já na produção de bauxita, o país ocupa a terceira posição mundial, com cerca de 17,4 milhões de toneladas produzidas anualmente (Brasil escola). Segundo o Ministério de Minas e Energia, as maiores reservas nacionais de bauxita estão localizadas na Serra do Oriximiná, no Pará.

A extração mineral apesar de lucrativa desperta grande preocupação ambiental devido às altas taxas de geração de resíduo envolvidas na atividade. Somente no estado de Minas Gerais, que apresenta 307 empresas que realizam extração mineral em seu território, são gerados um montante anual de mais de 562 milhões de toneladas de resíduos (FEAM,2019). Do total referido, 289,9 milhões de toneladas são de rejeito e 272,2 milhões de toneladas são de estéril (FEAM,2019), totalizando quase 100% dos resíduos globais gerados na atividade.

Os resíduos líquidos da mineração se originam da água utilizada para beneficiamento do minério e da lavagem de pátios e equipamentos. O enorme montante de resíduos líquidos gerados na atividade demanda áreas de despejo de iguais proporções (as chamadas barragens de rejeito), pois esses resíduos

apresentam alta periculosidade de contaminação de cursos d'água e lençóis freáticos quando não destinados corretamente. Devido ao rompimento das barragens citadas anteriormente e a iminência de rompimento reportada recentemente de outras barragens no estado de Minas Gerais, as empresas mineradoras vêm buscando novas tecnologias e alternativas para disposição desses rejeitos que possibilitem a construção de estruturas menos robustas com menores riscos envolvidos e de menor impacto ao meio ambiente.

Uma das alternativas envolvendo as tecnologias presentes na engenharia são os tubos geotêxteis utilizados para conter, desaguar e empilhar os rejeitos. A lama proveniente da mineração tem origem nas etapas de fragmentação e concentração do minério, e tem em sua composição partículas finas gerando um resíduo argiloso a uma concentração de água que pode alcançar mais de 60%.

O desaguamento natural dos rejeitos utilizando os tubos geotêxteis possibilita uma diminuição significativa dos volumes requeridos para descarte deste material, visto que seu teor de água é elevado. Além disso, ocasiona-se uma maior segurança da estrutura ao se diminuir a saturação do rejeito. Estudos realizados anteriormente com lodos provenientes de Estação de Tratamento de Água demonstram ainda que o efluente líquido após a filtração apresenta características satisfatórias de turbidez, pH e contaminantes, podendo ser reutilizado para outros fins.

Para a confecção desses tubos são utilizados em geral geotêxteis tecidos ou uma associação dos mesmos com geotêxteis não tecidos, de gramatura escolhida de forma a ocasionar uma melhor filtração do rejeito em questão. Por este motivo, estudos são realizados com os diferentes tipos de geotêxteis encontrados no mercado e os rejeitos de mineradoras em funcionamento visando obter melhores resultados de filtração para melhorar a eficácia do sistema. No presente estudo foram utilizados geotêxtil tecido e não tecido, de diferentes gramaturas para filtragem de rejeito de Bauxita proveniente do município de Paragominas/ PA.

1.1 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar o desempenho de geotêxteis aplicados como elementos dreno/filtrantes de rejeito mineração durante o processo de desaguamento destes resíduos.

Para tanto, serão avaliados geotêxteis tecidos e não tecidos com diferentes gramaturas como elementos dreno/filtrantes em rejeitos finos de Bauxita. As análises serão embasadas em ensaio de filtração do tipo cone e utilização de floculantes para aumentar a eficácia de filtração, quando se fizer necessário.

1.1.1 Objetivos Específicos

Realizar ensaios de filtração do tipo cone com diferentes geotêxteis para obtenção dos melhores resultados de filtração de rejeitos finos, para posterior estudo sobre criação de um protótipo de geodreno.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Rejeitos da Mineração e sua disposição

Segundo Espósito (2000), a mineração consiste em um conjunto de atividades necessárias para a extração de bens minerais da crosta terrestre de forma econômica. Essa atividade provoca alterações no meio ambiente através dos processos de lavra e beneficiamento. A lavra é o conjunto de atividades em sequência que visam extrair um bem mineral para aproveitamento industrial ou uso direto (no caso do ouro, por exemplo). O beneficiamento por sua vez consiste em separações físicas e ou químicas a fim de se obter a substância mineral de interesse (como o ferro).

Durante o beneficiamento, o material que sobra além da substância mineral de interesse é chamado de rejeito, com pouco valor comercial e, por consequência, considerado material de descarte pelas mineradoras. Os procedimentos empregados no processo de beneficiamento são muito variados pois dependem do tipo e qualidade do minério a ser extraído. Dessa forma, os rejeitos provenientes do beneficiamento podem ser encontrados com características geotécnicas, físico-químicas e mineralógicas distintas, a depender do local e procedimento de extração adotados (ESPÓSITO,2000).

Os rejeitos são classificados como lama quando apresentam granulometria fina e como rejeitos granulares quando suas partículas são majoritariamente acima de 0,074mm. Seu descarte pode ser realizado a granel através de caminhões e/ou correias transportadoras ou na forma de polpa (mistura de água e sólidos), transportada através de tubulações com sistema de bombeamento ou por gravidade. (DUARTE,2008).

A disposição desses rejeitos pode ser feita em minas subterrâneas, em cavas exauridas de minas, em pilhas (por empilhamento a seco), por disposição em pasta ou em barragens de contenção de rejeitos (DUARTE,2008). A escolha do método para a disposição dos rejeitos depende do processo de mineração utilizado, das condições geológicas e topográficas da região onde é realizada a extração e das propriedades

mecânicas e químicas dos materiais (seu poder de contaminação ambiental, por exemplo).

Entre os métodos apresentados, as barragens de contenção de rejeitos constituíam a principal forma utilizada no Brasil. No entanto, com os riscos incorridos nessas construções, as enormes áreas que as mesmas demandam, além dos rompimentos da Barragem de Fundão em Mariana/MG no ano de 2015, e agora em janeiro de 2019 o rompimento da Barragem do Córrego do Feijão em Brumadinho/MG, totalizando mais de 60 milhões de metros cúbicos de lama sendo lançados ao meio ambiente, além de quase 250 mortes, as mineradoras estão buscando por novas metodologias economicamente eficientes para destinação desses rejeitos.

Uma das alternativas para a disposição desses rejeitos que requer menores volumes de armazenamento são os tubos geotêxteis, que apresentam alta capacidade dreno filtrante. Com este método é possível reduzir as áreas de desmatamento (onde antes seriam instaladas as barragens). (Lundin et. al.,2006). O processo já apresenta ampla utilização para desaguamento de lodo proveniente de estações de tratamento de efluentes, e estudos recentes vêm sendo realizados para análise de sua aplicabilidade a rejeitos de mineração. A Figura 1 a seguir apresenta o funcionamento dessa estrutura.

Figura 1 – Estrutura do sistema de tubos geotêxteis.

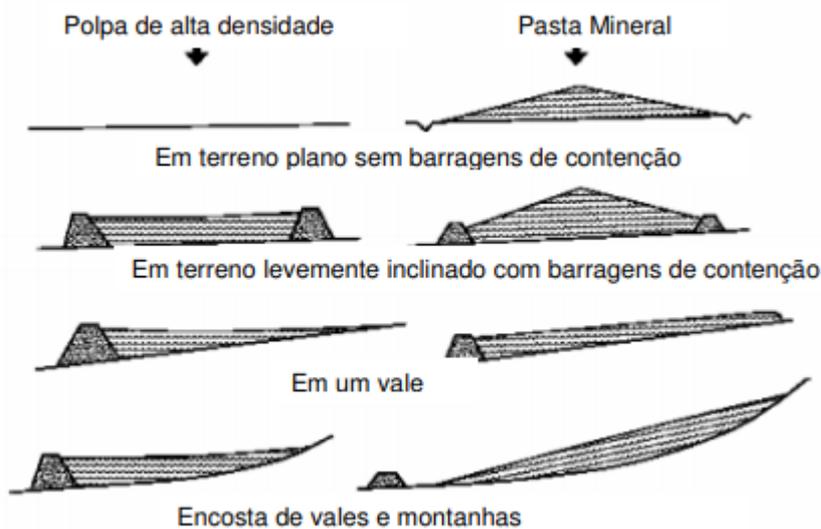


(Fonte: Lundin et. al., 2006)

O objetivo dos tubos de geotêxteis é auxiliar no desaguamento da polpa de rejeitos, para que a mesma se torne uma pasta mineral, de disposição mais simples. Segundo Archibald (2005) pastas minerais são definidas como material adensado e homogêneo, com alta viscosidade, distribuição de tamanhos e mineralogia característica, com baixo nível de água livre (não ocorrendo assim a segregação das partículas). A velocidade de escoamento dessas pastas é relativamente baixa quando comparada à polpa de rejeitos, além de ocupar um volume menor.

A disposição de rejeitos em forma de pastas minerais apresenta uma série de vantagens quando comparado à polpa de rejeito usual. Segundo Hernandez et. al. (2005), os aspectos geotécnicos da localidade onde ocorrerá a disposição dos rejeitos são de vital importância e devem ser levados em consideração. A Figura 2 a seguir ilustra o aumento da capacidade das áreas de disposição onde são utilizadas pastas de rejeitos.

Figura 2 – Ilustração apresentando as diferenças entre a disposição em polpa e em pastas minerais.



(Fonte: Hernandez et. al., 2005)

Com relação aos custos envolvidos, Newman et al. (2003) mostram que a disposição em forma de pastas minerais apresenta custo de capital maior que a

disposição em forma de polpa diluída. No entanto, a longo prazo, essa prática pode representar ganhos por requerer menor tempo para recuperação das áreas de descarte, além de apresentar menores riscos incorridos por requerer menores infra-estruturas para sua disposição.

2.2 Geotêxteis: definição e aplicações

Geotêxteis são produtos de origem polimérica utilizados em diferentes setores da engenharia, constituídos por filamentos (contínuos ou não) dispostos em forma de mantas, com estruturas que podem ser tecidas ou não. Os geotêxteis podem ser utilizados para separação, filtração, drenagem, reforço de solo, revestimento, entre outras. Dentre as diversas aplicações destes produtos, destacam-se para o presente trabalho a drenagem e filtração de estruturas e obras em geral (BEIRIGO, 2005).

Uma vez que a presente pesquisa destina-se a estudar o comportamento de geotêxteis no processo de filtração de rejeitos, a revisão bibliográfica será realizada com este foco.

Os geotêxteis não tecidos (aqueles em que os filamentos são dispostos de forma aleatória na manta) são produzidos em sua maioria por filamentos de poliéster (PET), polietileno ou polipropileno (PP) (KORNER, 1994) (RAKILOR,2000), (ANAND,2007). As propriedades destes polímeros estão apresentadas na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1– Propriedades dos polímeros Polipropileno e Poliéster

Polímero	Densidade Relativa	Complementares
Polipropileno (PP)	0,90	Termoplástico de alta resistência à oxidação química e a ação de solventes.
Poliéster (PET)	1,33 a 1,45	Termoplástico resistente mecânica, térmica e quimicamente, porém susceptível ao ataque de soluções alcalinas.

(Fonte: Mano, 1991)

Os geotêxteis não tecidos podem ter seus filamentos poliméricos ligados por três formas distintas, são elas: agulhamento, onde as fibras são entrelaçadas entre si (não tecidos agulhados); fusão parcial por aquecimento (não tecidos termoligados) e pela

ação de produtos químicos (não tecidos resinados), a depender das características que se pretende atingir (KOERNER,1994).

Os não tecidos são indicados quando sua aplicação requer deformabilidade, resistência à tração e ao rebentamento elevados, além de permeabilidade e peso controlados. Suas aplicações mais comuns são para reforços de estradas, estabilização de subsolo, entre outras (ANAND, 2007).

O geotêxtil não tecido utilizado no presente trabalho é do tipo agulhado, onde devido à sua produção industrial e padronizada, suas características podem ser controladas e adaptadas de acordo com as demandas do projeto.

O geotêxtil tecido, por sua vez, apresenta distribuição ordenada entre seus filamentos ou fibras. Sua fabricação vem do entrelaçamento de fios, mono filamentos ou fitas, dispostas de acordo com a finalidade de aplicação do mesmo.

Segundo Vidal (2001), a gramatura, espessura e porometria constituem as propriedades mais importantes no comportamento hidráulico de geotêxteis. A determinação da gramatura dos mesmos é normatizada pela NBR 12.568 (ABNT,1992) e corresponde à massa por unidade de área da manta têxtil. A espessura por sua vez corresponde à distância entre as duas faces da manta quando solicitada por uma tensão normal de 2kPa e é normatizada pela NBR 12.569 (ABNT,1992). Por fim, a porosidade (expressa em porcentagem) é a relação entre o volume de vazios e o volume total da amostra (BEIRIGO,2005).

Ainda segundo Beirigo (2005), o geotêxtil aplicado em sistemas de drenagem e filtração deverá permitir a máxima vazão do fluido, a fim de se evitar o entupimento do sistema e a conseqüente instabilidade do material. O uso de geotêxteis em barragens é consolidado há mais de 30 anos, no entanto as condições de filtração desses materiais são estudadas por diversos pesquisadores até o momento. Uma vez que se trata de uma tecnologia relativamente recente, alguns testes e análises ainda precisam ser realizados para análise do desempenho dos mesmos às novas demandas da engenharia.

2.3 Floculantes: definição e efeitos

Segundo Ferreira (2016), os floculantes são reagentes utilizados para agregar as polpas de rejeitos, de forma a acelerar o processo de separação entre as partículas sólidas e líquidas. Dessa forma a obtenção de rejeitos com um percentual de sólidos mais adequado para disposição e desaguamento desse material é facilitada.

Ainda segundo Ferreira (2016), o processo de agregação de partículas pode ser classificado como coagulação ou floculação. No processo de coagulação, sais orgânicos são utilizados a fim de reduzir a repulsão entre as partículas, através da compressão da dupla camada elétrica entre as mesmas. Ao se reduzir a repulsão entre as mesmas, promovem-se as forças atrativas de curto alcance que são responsáveis pela agregação das partículas.

Já o processo de floculação, segundo Sharma et al. (2006), consiste na agregação de partículas em suspensão através da atuação de floculantes orgânicos ou inorgânicos que promovem pontes de ligação entre as partículas ou reversão de carga. Quando comparados em dimensão das partículas agregadas, os agregados provenientes do processo de floculação apresentam maiores dimensões que os coágulos, além de maior instabilidade e retenção de água, por se tratarem de estruturas tridimensionais mais abertas (BALTAR,2004).

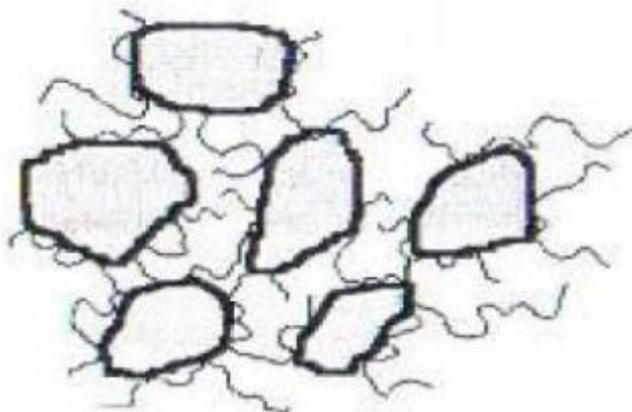
Segundo Ribeiro et al (2011), a utilização de floculantes orgânicos para polpas de minério vem sendo intensificada nos últimos anos. Utilizam-se para o processo polímeros que podem ter origem natural (como o amido, a celulose e as gomas naturais) ou sintética (as poliacrilamidas). Os polímeros são classificados de acordo com o tipo de carga elétrica prevalecente em sua estrutura, podendo ser não-iônicos, catiônicos, aniônicos e anfotéricos.

Segundo Falcucci (2007), o processo de floculação por pontes de ligação consiste na agregação das partículas por intermédio de polímeros orgânicos ou inorgânicos geralmente com elevado peso molecular, realizando ligações entre as partículas, originando agregados denominados flóculos ou focos.

Ainda segundo Falcucci (2007), suspensões formadas com partículas muito finas em geral apresentam resistência à floculação em consequência das forças resultantes das interações entre os sólidos em suspensão. Portanto, o processo de floculação nesse caso se inicia com a desestabilização dessas partículas em suspensão a fim de eliminar essas forças.

A macromolécula do floculante promove a ligação entre as partículas, através da extensão dos laços e caudas do floculante até as partículas, que apresentam cargas superficiais em certos pontos que favorecem a adsorção desses polímeros, auxiliando no processo de formação de flocos de forma rápida (FERREIRA,2016). A Figura 3 a seguir ilustra esse processo.

Figura 3 – Floculação através do mecanismo de pontes.



(Fonte: Baltar,2004)

O processo de floculação através da reversão de cargas consiste na utilização de floculantes iônicos que apresentam cargas opostas à superfície das partículas. O floculante se aglutina na superfície sólida e reverte a carga elétrica da superfície nas regiões de adsorção (BALTAR, 2004).

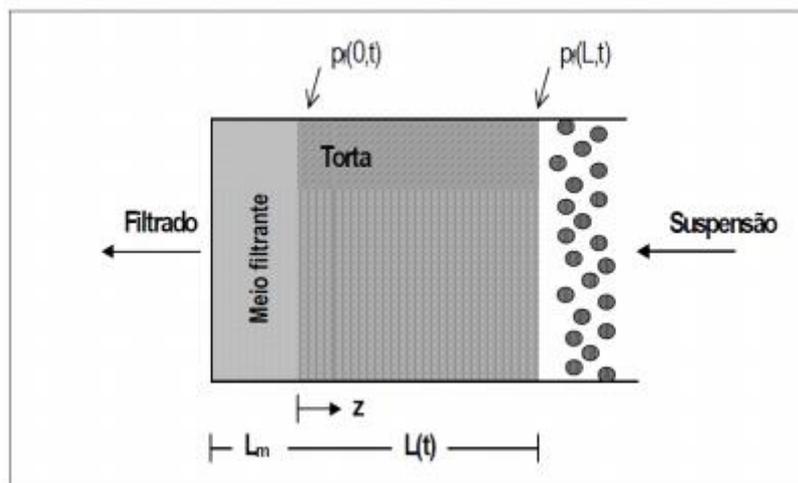
2.4 Desaguamento de rejeito por filtração com a utilização de geotêxteis

Segundo Vertematti (2004) o uso de geossintéticos como meio filtrante apresenta as seguintes vantagens quando comparado aos filtros granulares: menor espessura

do filtro; por ser um produto industrial, suas características são mais uniformes e padrões; caso ocorram recalques na estrutura, o mesmo mantém seu papel filtrante; facilidade de instalação e baixo custo, principalmente em filtros inclinados.

Segundo Peixoto (2012), o processo de desaguamento de rejeitos por filtração é feito geralmente através da formação da torta de rejeitos, que ao se acumular na parte externa do meio filtrante, acaba por criar um pré-filtro no sistema. A pressão exercida pelo material inicial contra o meio filtrante resulta na separação do filtrado (material passante no filtro) com a torta de rejeitos (retida no sistema drenante). O meio filtrante (como o geotêxtil, no caso estudado), exerce sua função de reter as partículas apenas no início da operação, pois uma vez que a torta é formada, a filtração ocorre através da mesma. A Figura 4 a seguir ilustra o processo de filtração de rejeitos com a formação da torta.

Figura 4 – Processo de filtração de rejeitos, evidenciando a formação da torta de rejeito que funciona como pré-filtro no sistema.



(Fonte: Peixoto,2012)

O sistema representado na imagem anterior demonstra que no processo de filtração a suspensão precisa atravessar dois meios porosos, dispostos em série (torta e meio filtrante). Há que se considerar que a espessura da torta aumenta com o decorrer do tempo e em função das variáveis do próprio fluxo (regime, pressões aplicadas, geometria do sistema filtrante). (PEIXOTO,2012)

Existem diversos sistemas filtrantes para desaguamento de rejeitos, como os filtros-prensas, filtros rotativos a vácuo, hidrociclones, peneiras a vácuo e combinações entre eles. No presente trabalho será dada ênfase ao desaguamento pelas fôrmas têxteis, um método recente e distinto dos convencionais citados anteriormente.

As fôrmas têxteis vêm sendo utilizadas para desaguamento de rejeitos finos, através da costura das mesmas em padrões tubulares. Os geotêxteis são utilizados por sua capacidade de reter as partículas finas dos resíduos durante o processo de desaguamento passivo. De acordo com a necessidade do sistema, utilizam-se ainda aditivos, de forma a catalisar o processo de desaguamento ou mesmo tratar os efluentes que porventura apresentarem características contaminantes. (GOMES, 2007).

A aplicação prática desse sistema pode apresentar fôrmas com comprimento de dezenas de metros e alturas de 3 metros ou mais. Os geotêxteis utilizados comumente são os tecidos, ou ainda há casos em que se utiliza a associação entre tecidos e não tecidos. A estrutura apresenta diversos mangotes no eixo de topo dos tubos, que são utilizados para aplicação dos rejeitos em polpa sobre pressão ou até mesmo como válvula de descarga de efluentes em excesso. (PEIXOTO,2012).

As fôrmas auxiliam tanto na retenção dos sólidos presentes no rejeito quanto na drenagem dos líquidos efluentes. Ao atingir o final do ciclo de enchimento dos tubos, a massa retida no mesmo continua seu processo de desaguamento através da drenagem e evaporação naturais do sistema, gerando uma massa final seca, com menor volume e mais estável do que a inicialmente bombeada. (PEIXOTO,2012).

Levando em consideração os enormes volumes de rejeito gerados na mineração, e na necessidade crescente de reutilização da água implantada no sistema, há que se assegurar uma técnica que garanta elevada vazão de fluxo e altas taxas de desaguamento do material, para que sua aplicação seja viável em grande escala. Uma solução encontrada é o empilhamento das fôrmas, que otimiza a operação de enchimento (pois possibilita o enchimento simultâneo) e acelera o processo de desaguamento pois o sobrepeso das fôrmas eleva a pressão interna do sistema.

Dessa forma, há que se levar ainda em consideração a capacidade resistente e deformabilidade do geotêxtil para que as fôrmas não sejam cedam, comprometendo assim a eficácia do sistema. (PEIXOTO,2012).

2.5 Ensaio de filtração do tipo cone

A fim de se analisar o comportamento hidráulico da interface entre o geotêxtil e o rejeito são necessários ensaios laboratoriais e de campo. O presente trabalho foi baseado no ensaio de filtração do tipo cone, também conhecido como *Cone Test*, que consiste em um ensaio econômico e simples, utilizado para determinar o melhor tipo de geotêxtil a ser utilizado para cada situação analisada. O ensaio auxilia ainda na avaliação da necessidade de utilização de auxiliares de floculação no processo de desidratação da pasta de rejeitos. (JUNIOR; PANTA; URBAN, 2016)

O ensaio é realizado com uma amostra de rejeito de 500 mL, tal amostra é despejada em um cone feito com geotêxteis de aproximadamente 30 cm x 30 cm (para o presente estudo, foi utilizado geotêxtil circular com raio de 30cm). O cone é posicionado acima de um béquer graduado, que auxiliará na aferição do volume coletado. (JUNIOR; PANTA; URBAN, 2016)

Uma forma de parametrizar a eficácia de filtração sem a utilização de floculantes é a análise do filtrado e do tempo de desidratação da polpa. Caso a amostra desseque em menos de 120 segundos, e o percolado obtido apresentar limpidez (com 1% ou menos de sólidos passantes), significa que o ensaio pode ser adotado sem a utilização de floculantes auxiliares. Caso contrário (percolado com mais de 1% de sólidos e o material retido contiver quantidade significativa de água), considera-se necessária a utilização de tratamento químico para melhorar o desempenho do sistema. (VERTEMATTI, 2015)

Caso seja identificada a necessidade do uso de floculantes no sistema, será necessária a realização de testes para avaliar qual o tipo de floculante apresenta melhores resultados para o sistema proposto, bem como qual a concentração e

dosagem de solução respondem melhor ao proposto. O presente trabalho objetiva-se por encontrar esses valores através de ensaios de cone.

Para avaliação do desempenho do sistema de desaguamento proposto, foram avaliadas formulações propostas pela literatura, são elas:

- Eficiência de desaguamento (ED): avalia o grau de desaguamento através da comparação entre o percentual de sólidos totais no rejeito antes do desaguamento e o percentual de sólidos totais no rejeito retido no geotêxtil após a realização do ensaio (MOO-YOUNG ET AL, 2002), de acordo com a equação a seguir:

$$ED = \frac{PS_{final} - PS_{inicial}}{PS_{inicial}} * 100\%$$

Onde:

ED = Eficiência de desaguamento, %

$PS_{inicial}$ = Percentual de sólidos iniciais, %

PS_{final} = Percentual de sólidos finais, %

- Eficiência de infiltração (EI): corresponde à taxa diferencial entre a umidade inicial (rejeito antes do ensaio) e final (rejeito retido no geotêxtil). (MUTHUKUMARAN E ILAMPARUTHI, 2006), calculados da seguinte forma:

$$EI = \frac{w_i - w_f}{w_f} * 100\%$$

Onde:

EI = Eficiência de infiltração, %

w_i = Umidade inicial do rejeito, %

w_f = Umidade final do rejeito, %.

3 METODOLOGIA

Os ensaios de filtração do tipo cone foram realizados com a utilização dos três geotêxteis descritos a seguir.

3.1 Especificações técnicas dos geotêxteis

Os ensaios foram realizados com a utilização de três tipos de geotêxteis, cujas especificações técnicas fornecidas pelo fabricante estão apresentadas a seguir.

- Geotêxtil tecido de desaguamento marca Huesker

Modelo: *SOILTRAIN PP 105/105 DW*

Principais aplicações: Dessecagem de lodos orgânicos ou inorgânicos gerados em estações de tratamento de água ou de esgoto, resíduos industriais ou de dragagem de sedimentos.

Material: Polipropileno

Resistência à tração nominal (Longitudinal e Transversal): 105 kN/m

Deformação na resistência nominal (Longitudinal e Transversal): <10%

Velocidade de fluxo normal: 20×10^{-3}

Abertura de filtração característica: 0,20 mm

Resistência residual após 4.300h de exposição: > 90 kN/m

Perímetro de seção transversal máxima: 40 m

Comprimento máximo: 70 m

Costuras com circunferências sobrepostas

- Geotêxtil tecido marca Huesker - Basetrac Woven

Modelo: *BASETRAC WOVEN PP 110/55 UV (HATE 110/55 UV)*

Material: Polipropileno

Largura: 2,5m

Comprimento: 8m

Gramatura: 437

- Geotêxtil não tecido

Tabela 2 – Propriedades Mecânicas e Hidráulicas do geotêxtil não tecido

Propriedade	Norma	Valor
Resistência à tração (longitudinal)	ASTM D 4595	16 kN/m
Resistência à tração (transversal)	ASTM D 4595	14 kN/m
Alongamento na ruptura (longitudinal)	ASTM D 4595	40-60 %
Alongamento na ruptura (transversal)	ASTM D 4595	50-70%
Rasgo trapezoidal (longitudinal)	ASTM D 4533	440 N
Rasgo trapezoidal (transversal)	ASTM D 4533	400 N
Puncionamento	ABNT-NBR 13359	3,1 Kn
Estouro	ASTM D 3786	2,6 MPa
Permeabilidade	DIN 53855	>90%
Transmissividade	ASTM D 4716	0,13 cm ² /s

(Fonte: Ferreira,2016)

3.2 Caracterização do rejeito

Utilizou-se nos ensaios rejeito proveniente do processo de beneficiamento do minério de bauxita da empresa Mineração Paragominas S.A (MPSA), localizada no município de Paragominas/PA. O rejeito em questão foi previamente utilizado por Ferreira (2016) e sua caracterização técnica obtida através de ensaios geotécnicos e não geotécnicos encontra-se apresentada a seguir.

3.2.1 Propriedades geotécnicas

Os ensaios de caracterização do rejeito foram retirados da tese de doutorado do Ferreira (2016), uma vez que o material utilizado foi o mesmo, e seguiram as normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Suas propriedades geotécnicas encontram-se dispostas na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3: Propriedades geotécnicas do rejeito utilizado

Amostra na umidade natural	
Limite de liquidez (LL)	64%
Limite de plasticidade (LP)	30,9%
Índice de plasticidade (IP)	33,1%
Amostra na umidade natural	
Limite de liquidez (LL)	57,4 %
Limite de plasticidade (LP)	31,9%
Índice de plasticidade (IP)	25,5%
Densidade real dos grãos (GS)	2,673

(Fonte: Ferreira, 2016)

Foram realizados ainda ensaios de classificação granulométrica do rejeito de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 1984) com e sem adição de defloculante (Hexametáfosfato de Sódio). Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4 e as curvas granulométricas dos mesmos nas **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a seguir.

Tabela 4: Classificação granulométrica

Granulometria com defloculante	
Argila	49,1%
Silte	48,8%
Areia fina	2%
Granulometria sem defloculante	
Argila	2,5%
Silte	89,9%
Areia fina	7,7%

(Fonte: Ferreira, 2016)

A partir da análise da tabela anterior fica nítida a ação do defloculante no rejeito utilizado. Seu objetivo principal é o de agregar as partículas finas e superfinas umas às outras, auxiliando assim no processo de desaguamento da polpa uma vez que eleva as taxas de sedimentação e reduz a turbidez dos líquidos sobrenadantes.

3.2.2 Composição mineral e análise química

Foram realizados ainda ensaios de difração de raios X, que apresentaram uma estimativa dos componentes do rejeito de 67% de Gibbsita, 30% de Caulinita e 3% de Hematita (Ferreira,2016).

Para a obtenção da composição química do rejeito, utilizou-se um Espectômetro de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP) do Laboratório de Geoquímica da Universidade Federal de Ouro Preto e os resultados obtidos encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5: Análise química do rejeito

Elemento	Concentração (µg/kg)
Al - alumínio	240134
Ba - bário	26,80
Ca - cálcio	101
Co - cobalto	17,1
Cr - cromo	110
Fe - ferro	103904
K - potássio	127
Mg - magnésio	49,6
Mn - manganês	153
Na - sódio	92,00
P - fósforo	178
S - enxôfre	356
Sc - escândio	4,6
Sr - estrôncio	27,40
Th - tório	51,6
Ti - titânio	8997
V - vanádio	265
Y - ítrio	18,1
Zn - zinco	16,7
Zr - zircônio	559,0

(Fonte: Ferreira, 2016)

3.3 Metodologia dos ensaios

3.3.1 Ensaio sem adição de floculante

Foram realizados ensaios laboratoriais de filtração do tipo cone a fim de se obter o polímero mais eficaz no processo de filtração do rejeito.

Uma vez que não há normas vigentes para o referido ensaio, procurou-se padronizar sua realização da forma como será descrito a seguir, seguindo a metodologia proposta na literatura previamente apresentada.

Os geotêxteis (tecidos e não tecidos) foram dobrados de forma padronizada, seguindo as etapas apresentadas nas imagens a seguir.

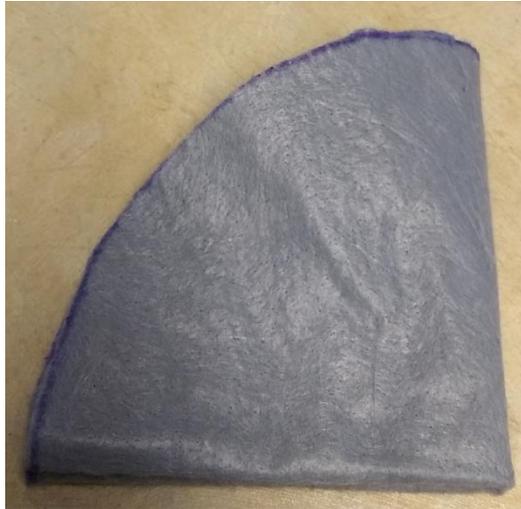
Figura 5 – Geotêxtil cortado em círculo com 30 cm de diâmetro



Figura 6 – Dobragem do geotêxtil – Passo 2



**Figura 7 – Dobragem do geotêxtil
– Passo 3**



**Figura 8 – Dobra final do geotêxtil com
respectiva vista superior do filtro em
cone**



Para a realização dos ensaios, utilizou-se amostragem única do rejeito de Bauxita descrito anteriormente, buscando-se evitar diferenças nos resultados e analisar o desempenho de diferentes geotêxteis para um mesmo material. Fez-se necessária a homogeneização da polpa antes da realização de cada um dos ensaios, pois o material apresentou decantação rápida.

A porcentagem de sólidos da amostra foi medida em 42,3% no dia 24 de abril de 2019, dia em que foram realizados os primeiros ensaios. Buscou-se analisar inicialmente a capacidade filtrante dos geotêxteis às porcentagens de 30%, 25%, 20%, 15% e 10% de sólidos e para tal foi necessário a correção da quantidade de água na polpa de rejeito.

Amostras de rejeito de aproximadamente 1 litro foram colocadas em baldes, devidamente pesadas e acrescidas de água destilada até se atingir a porcentagem desejada, como demonstrado na Figura 9.

Figura 9 – Amostra de 1 litro de rejeito retirada do tambor de 20 litros e colocada em baldes para pesagem e acréscimo de água.



Faz-se importante ressaltar que o processo foi repetido quatro vezes, uma para cada porcentagem descrita acima, de forma a se evitar erros amostrais. A quantidade de água acrescida a cada amostra foi calculada com o auxílio de uma planilha elaborada pela mestranda Ana Carolina Ferreira, em conjunto com o professor Lucas Deleon Ferreira.

Após a correção da quantidade de água, uma cápsula foi retirada de cada amostra, devidamente pesada e colocada em estufa para conferência da porcentagem de sólidos real do rejeito submetido ao processo de filtração.

A montagem dos filtros foi feita com o auxílio de prendedores de papel para fixar o geotêxtil no suporte, como ilustrado nas Figura 10 e Figura 11.

Figura 10 – Montagem do filtro com geotêxtil não-tecido



Figura 11 – Montagem do filtro com geotêxtil tecido



Para realização dos ensaios de cone com os geotêxteis não tecido e Basetrac Woven foram utilizadas amostras de 500 mL e fixou-se um tempo de 6 minutos, considerado suficiente para análise dos parâmetros de turbidez, volume e porcentagem de sólidos no filtrado, bem como a porcentagem de sólidos retida no geotêxtil.

Posteriormente aos primeiros ensaios, foi disponibilizado ao laboratório amostras de 25cm de diâmetro de um geotêxtil tecido da marca Huesker específico para desaguamento. Para realização dos ensaios com o referido geotêxtil, seguiram-se as orientações do fabricante, portanto o volume ensaiado foi de 100 mL e o tempo do ensaio foi reduzido para 2 minutos. Os demais procedimentos foram feitos de forma análoga para os três geotêxteis ensaiados.

Foram realizados dois ensaios com cada porcentagem de sólidos para corrigir possíveis erros experimentais. A Figura 12 a seguir ilustra o momento inicial do ensaio, em que o rejeito é despejado no geotêxtil.

Figura 12 – Início do ensaio de cone – despejamento do rejeito no geotêxtil filtrante.



Decorridos os seis minutos estipulados, o rejeito retido no geotêxtil foi colocado em cápsulas, pesado e colocado em estufa para conferência da porcentagem de sólidos. O material filtrado foi separado para conferência do volume, medida de turbidez e cálculo da porcentagem de sólidos. A Figura 13 a seguir apresenta uma amostra dos filtrados com geotêxtil não tecido de 30, 25, 20 e 15% separados para conferência da turbidez.

Figura 13 – Amostras de material filtrado com geotêxtil não tecido com teor de sólidos de 30, 25, 20 e 15%, respectivamente.



Após a análise da turbidez dos filtrados, o material restante foi colocado em cápsulas para conferência do teor de sólidos nos mesmos, a fim de se analisar a eficácia do processo de filtração para cada teor de sólidos inicial adotado.

O processo foi realizado de forma análoga para os geotêxteis não tecido e para o geotêxtil Basetrac Woven PP 110/55 UV. Já para o geotêxtil de desaguamento, o diâmetro utilizado foi de 25cm, com volume inicial submetido a filtração de 100 ml e o tempo de ensaio de 2 minutos, além de analisar também o teor de sólidos de 10%, a fim de comparar aos resultados obtidos com a adição de floculantes. Tais ajustes foram realizados de acordo com orientações dadas pelo fabricante. As análises de turbidez, teor de sólidos e volume coletado foram feitas de forma análoga ao descrito anteriormente.

3.3.2 Ensaios com adição de floculantes

Após a realização dos ensaios de cone sem floculantes, optou-se por testar os resultados para filtração com o auxílio de polímeros. Foram disponibilizados ao laboratório dois tipos de floculantes do fabricante KEMIRA.

Para a concentração dos polímeros, foi realizada uma revisão bibliográfica e concluiu-se que seriam testados 0,1; 0,2 e 0,4 g de polímero por litro de solução. Para tal, utilizou-se a balança de precisão do laboratório conforme apresentado na Figura 14 a seguir.

Figura 14 – Pesagem dos polímeros na balança de precisão.



Adicionou-se então água destilada aos polímeros, com as respectivas concentrações indicadas nas tabelas dispostas nos resultados do presente documento, e conforme indicação do fabricante, aguardaram-se 30 minutos como tempo de reação da mistura. A solução foi testada em plaquetas de vidro, adicionando uma parte de polímero e outra de rejeito a 15% de sólidos, para análise do processo de floculação através da agitação por bastões de vidro. Observou-se que o rejeito não floculou para as concentrações iniciais de 0,1; 0,2 e 0,4 g por litro, foram então adaptadas as concentrações para 0,1;0,2 e 0,4g / 50 ml para o polímero em pó e 0,1;0,2;0,4 / 100 ml para o polímero líquido. Estes valores foram obtidos através da análise visual do processo de floculação do rejeito.

Para a realização dos ensaios de filtração com a adição de floculantes foram reduzidos os volumes iniciais de rejeito a ser ensaiado para 100 ml, por orientação dos fabricantes. Além disso, decorrente da diminuição do volume ensaiado, fixou-se um tempo de dois minutos, considerado suficiente para avaliação do volume passante, turbidez e porcentagem de sólidos no filtrado. A quantidade de solução (polímero + água destilada) utilizada por ensaio será apresentada nos resultados. Fixou-se um tempo de mistura do polímero com o rejeito de 1 minuto antes da realização dos ensaios para que ocorra o processo de floculação. Em seguida, os ensaios de filtração

do tipo cone foram realizados de forma análoga ao descrito no Item 3.4.1 da presente metodologia. As análises de turbidez, volume coletado, teor de sólidos no filtrado e teor de sólidos retido no geotêxtil também foi realizada de forma análoga ao descrito anteriormente.

Os ensaios com adição de floculantes foram realizados apenas com os geotêxteis de desaguamento e com o não tecido, pois o Basetrac Woven PP apresentou resultados insatisfatórios sem a adição de floculantes, logo não seria possível realizar uma comparação para o dado material.

4 RESULTADOS

4.1 Ensaio de filtração sem adição de floculantes

4.1.1 Porcentagem de sólidos das amostras submetidas à filtração

De acordo com o descrito na metodologia, foi realizada correção na quantidade de água na amostra inicial da polpa de rejeito a fim de se atingir as porcentagens de sólidos almeçadas no presente estudo. Os valores de massa de rejeito inicial, bem como quantidade de água destilada acrescentada e teor de umidade encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores obtidos na correção da quantidade de água no rejeito

Teor de sólidos (%)	Massa inicial (g)	Água Acrescentada (g)	Teor de umidade (w) (%)	Massa final (g)
30	1347.2	556.36	233.33	1903.57
25	1289.1	896.67	300	2185.77
20	1305.30	1461.24	400	2766.54
15	1832.5	3346.07	566.67	5178.60

Foram realizadas análises nas misturas e observou-se que o teor de sólidos real nas amostras submetidas à filtração não correspondeu exatamente ao esperado. Tal erro pode ser atribuído à falta de precisão das balanças utilizadas ou até mesmo a erros laboratoriais durante a realização dos ensaios (como a homogeneização da polpa antes de realizar a conferência, pois o material apresentou decantação rápida. Os valores obtidos nos ensaios serão comparados ao teor de sólidos real a fim de se obter uma conclusão mais realista.

4.1.2 Resultados obtidos na filtração

Os resultados obtidos para os ensaios de filtração sem a adição de floculantes encontram-se dispostos nas Tabela 7 e Tabela 8 a seguir.

Tabela 7: Resultados de filtração com geotêxtil não tecido

Teor de sólidos	Massa inicial úmida	Volume coletado	Massa rejeito seco	Peso da água	Teor de umidade	Teor de sólidos final
(%)	(g)	(mL)	(g)	(g)	(%)	(%)
30	481,95	53,6	173,54	308,41	177,72	36,01
25	464,18	48	138,16	326,02	235,7	29,76
20	58,94	47	13,66	45,28	331,48	23,18
20	256,51	49	69,14	187,4	271,04	26,95
15	193,47	181	36,48	156,99	430,34	18,86
15	175,44	314	34,53	140,91	408,08	19,68

Tabela 8: Resultados de filtração com geotêxtil tecido de desagramento

Teor de sólidos	Massa inicial úmida	Volume coletado	Massa rejeito seco	Peso da água	Teor de umidade	Teor de sólidos final
(%)	(g)	(mL)	(g)	(g)	(%)	(%)
30	70,26	26,5	21,12	49,14	232,67	30,06
30	56,07	35	17,00	39,07	229,82	30,32
25	35,36	47	8,48	26,88	316,98	23,98
25	44,22	46,5	10,86	33,36	307,18	24,56
20	4,66	96	0,50	4,16	832,00	10,73
20	2,28	85	0,28	2,00	714,28	12,28
15	-	95	-	-	-	-
10	-	100	-	-	-	-
10	-	92	-	-	-	-

Para os ensaios com o geotêxtil tecido de desagramento da Huesker, observou-se que para teores de sólidos baixos (10 e 15%), a abertura de filtração do geotêxtil foi maior que o recomendado para o sistema. Praticamente todo o volume passou pelo geotêxtil, impossibilitando a formação do pré-filtro e conseqüentemente prejudicando

o processo de filtração, além de impossibilitar a leitura dos resultados pois não houve material significativo retido no geotêxtil.

Os resultados obtidos com o geotêxtil tecido Basetrac Woven foram insatisfatórios, dessa forma foi impossibilitada a criação de uma tabela de resultados semelhante às anteriores. Para o teor de 25% de sólidos, o rejeito passante no geotêxtil apresentou características semelhantes às do original, comprovando que a filtração não ocorrera como esperado. As Figura 15 – **Comportamento filtrante** Figura 16 – **Comportamento filtrante** apresentadas no Item de turbidez demonstram as características do filtrado obtido com o respectivo geotêxtil. Não houve filtração a 25% e ao realizar-se o ensaio com o teor de 42,3% de sólidos (teor de sólidos original da polpa), ocorreu a colmatação total do sistema, sendo coletado apenas cerca de 1,5 ml de rejeito, com características semelhantes à polpa inicial.

Durante a realização dos ensaios observou-se que quanto menor o teor de sólidos inicial, mais rápida era a formação do “*filter cake*”, ou seja, menor era o tempo em que o rejeito começava a ser filtrado. No entanto, ao diminuir-se o teor de sólidos inicial, aumentaram os volumes passantes no geotêxtil, portanto, maiores volumes de rejeito não filtrados foram coletados, ainda que a colmatação ocorrera mais rapidamente nos mesmos. As fotos a seguir ilustram a diferença na velocidade de filtração para os teores de 30% e 15% de sólidos (os dois extremos ensaiados).

Figura 15 – Comportamento filtrante
Teor de sólidos a 30%, decorridos
Cerca de 2 minutos do início
do ensaio.

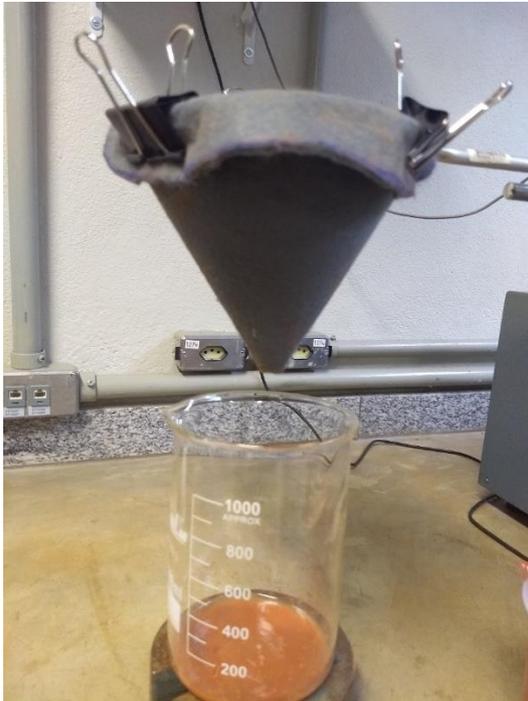


Figura 16 – Comportamento filtrante
Teor de sólidos a 15%, decorridos
menos de 1 minuto do início
do ensaio.



Os tempos médios observados para colmatção dos filtros com o geotêxtil não tecido foram de aproximadamente 2 minutos e 20 segundos para 30% de sólidos, 2 minutos para o de 25%, 1 minuto e 48 segundos para o de 20% e após 1 minuto e 15 segundos para o teor de 15% de sólidos.

4.1.3 Turbidez

O parâmetro de turbidez foi analisado pois representa a presença de materiais sólidos em suspensão no filtrado (silte e argila, no caso do rejeito analisado).

Após a realização dos ensaios de cone, os filtrados foram analisados com o auxílio de um turbidímetro no Laboratório de Saneamento Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto.

Os filtrados foram colocados em cubetas de vidro para turbidímetro conforme apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Amostras de material filtrado com geotêxtil não tecido com teor de sólidos de 30, 25, 20 e 15%, respectivamente.



A presença de sólidos em suspensão em grande quantidade nas quatro amostras gerou resultados de turbidez excessiva (resultados acima do limite de sensibilidade do turbidímetro). A Figura 18 apresenta o resultado apresentado pelo aparelho para as quatro amostras.

Figura 18 – Resultado obtido no turbidímetro.



A fim de se possibilitar a leitura pelo turbidímetro, foram feitas dissoluções com as amostras, utilizando-se balões volumétricos e uma pipeta automática para auxiliar na coleta do rejeito. Foram testadas dissoluções de 1/25 (1mL de rejeito para 25 mL de água destilada) e somente as amostras de 30 e 25% apresentaram resultados (as outras continuaram acima da sensibilidade do turbidímetro).

Figura 19 – À direita amostra de filtrado com 30% de sólidos e à esquerda a mesma amostra diluída em 25 vezes para coleta de resultados de turbidez.



Os resultados obtidos no turbidímetro foram 141,4 para a amostra de 30% e 495 para a de 25%, esse resultado foi multiplicado por 25 devido à dissolução da amostra realizada e os valores obtidos estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores obtidos em unidades de turbidez (uT)

Amostra	Turbidez (uT)
Filtrado com teor de sólidos a 30%	3.535
Filtrado com teor de sólidos a 25%	12.375

Para os filtrados de 20% e 15% de sólidos, utilizou-se a dissolução em até 1/100 (1 mL de rejeito para 100 mL de água destilada) e os valores permaneceram acima do limite de leitura do aparelho. Devido ao fato da perda de precisão quanto maior for a dissolução, considerou-se ineficaz dissolver a amostra em relações menores de

rejeito/água. Como consequência desse resultado, a análise de turbidez das mesmas foi impossibilitada.

Sabe-se que a água proveniente do rejeito de mineração não é indicada para consumo humano devido à presença de metais pesados que o corpo não consegue absorver, podendo ocasionar graves problemas de saúde a curto e longo prazo. No entanto, apenas para efeito de comparação de grandezas, a Portaria nº 2.914/11 do Ministério da Saúde estabelece parâmetros de turbidez de até 1,0 uT em 95% das amostras analisadas para água de consumo humano, o que evidencia os resultados negativos obtidos para turbidez.

Para lançamento da água em corpos hídricos, a Resolução nº 357/2005 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) delibera que os rios contidos na Classe I não devem ultrapassar 40 uT, bem como os contidos nas Classes II e III não devem ter sua turbidez acima de 100 uT. Para analisar o atendimento a estes parâmetros, faz-se necessário estudar a autodepuração das Bacias em que o efluente líquido é lançado. A autodepuração nada mais é do que a capacidade do rio em se regenerar após o lançamento do efluente. Para os valores obtidos de turbidez (acima de 3.000 uT) espera-se que o rio não consiga se regenerar, impossibilitando assim o lançamento desse efluente em corpos d'água superficiais.

Os filtrados obtidos com o geotêxtil tecido a 25% e a 42,3% de sólidos não foram analisados em termos de turbidez pois uma simples análise visual demonstrou ineficácia no processo de filtração (o filtrado apresentou características semelhantes às do rejeito inicial). As Figura 20 e Figura 21 a seguir apresentam os filtrados obtidos e respectivos volumes coletados.

Figura 20 – Filtrado obtido com geotêxtil tecido e teor de sólidos a 25%.



Figura 21 – Filtrado obtido com geotêxtil tecido e teor de sólidos a 42,3%



Durante a realização das análises de turbidez, observou-se uma decantação diferenciada no filtrado de 20% de sólidos, como apresentado na Figura 22. Os resultados de porcentagem de sólidos presentes nas amostras filtradas poderão justificar esse comportamento.

Figura 22 – Processo de decantação, à direita amostra de filtrado com 15% de sólidos e à esquerda a amostra de filtrado com 20% de sólidos.



4.1.4 Teor de sólidos presente nas amostras filtradas

Como descrito na Metodologia, após a realização das análises de turbidez, o filtrado restante foi pesado em balança de precisão para obtenção do seu teor de sólidos, a fim de se analisar a eficácia de filtração do experimento. Os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 10 a seguir.

Tabela 10 : Teor de sólidos nos filtrados com geotêxtil não tecido

Teor de sólidos inicial	Massa inicial úmida	Massa rejeito seco	Peso da água	Teor de sólidos no filtrado
(%)	(g)	(g)	(g)	(%)
30	33,1601	0,0513	33,1088	0,1547
25	32,4315	0,1941	32,2374	0,5985
20	71,1741	4,1790	66,9951	5,8715
15	65,4196	7,2277	58,1919	11,0482

4.1.5 Eficiências encontradas

A partir dos resultados apresentados nos itens anteriores, calcularam-se parâmetros para medir a eficácia do processo de filtração para cada teor de sólidos analisado utilizando-se as fórmulas descritas na revisão bibliográfica. Os valores apresentados na Tabela 11 a seguir representam a média entre os resultados encontrados.

Tabela 11 – Eficiência média do geotêxtil não tecido

Teor de sólidos	Eficiência de desaguamento	Eficiência média para o teor	Eficiência de infiltração	Eficiência média para o teor
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
30	20,51	20,51	24,28	24,28
25	16,48	16,48	19,13	19,13
20	19,24	28,94	19,99	27,29
20	38,63		34,58	
15	28,21	31,00	25,78	27,70
15	33,79		29,62	

OBS: Os resultados de eficiência de filtração foram analisados apenas para uma amostra de filtrado por teor de sólidos analisado (a mesma amostra utilizada para conferência da turbidez).

Tabela 12 – Eficiência média do geotêxtil tecido de desaguamento

Teor de sólidos	Eficiência de desaguamento	Eficiência média para o teor	Eficiência de infiltração	Eficiência média para o teor
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
30	0,60	1,04	-30,92	-30,12
30	1,47		-29,32	
25	-6,14	-5,00	-34,48	-32,41
25	-3,87		-30,33	
20	-44,80	-40,82	-176,17	-153,64
20	-36,83		-137,10	
15	-	-	-	-
10	-	-	-	-

OBS: Pode-se observar que o geotêxtil apresentou-se deficiente para a solicitação.

4.2 Ensaio com utilização de floculante

4.2.1 Porcentagem de sólidos real nas amostras submetidas a filtração

Foram realizados testes para analisar o comportamento da polpa a 42,3% de sólidos com a adição de floculantes. Observou-se que o mesmo apresenta melhores resultados quanto maior for a quantidade de água contida na polpa. Por este motivo, os ensaios de cone com a adição de floculantes foram realizados apenas com os teores de 15% e 10% de sólidos.

A Figura 23 – **Polpa de rejeitos com a adição dos dois floculantes utilizados**.a seguir apresenta o resultado obtido com a adição dos floculantes na polpa com teor de 42,3% de sólidos.

Figura 23 – Polpa de rejeitos com a adição dos dois flocculantes utilizados.



Pode-se observar na imagem anterior que o processo de floculação da polpa a 42,3% não foi eficaz a olho nu. Uma análise microscópica das partículas poderia comprovar o processo de floculação, no entanto, optou-se por diminuir o teor de sólidos da mistura para prosseguir os ensaios de filtração com flocculantes.

Assim como nos ensaios sem a adição de flocculantes, foram retiradas amostras da polpa a 10 e 15% de sólidos para a conferência do teor de sólidos reais das mesmas. Os ensaios realizados com geotêxtil tecido de desaguamento foram realizados em dia diferente dos ensaios com o geotêxtil não tecido, dessa forma, foram feitas duas conferências do teor de sólidos reais, apresentadas nas Tabela 13 e Tabela 14 a seguir.

Tabela 13 – Conferência do teor de sólidos real nas amostras para geotêxtil de desaguamento

Teor de sólidos (%)	Massa inicial (úmida) (g)	Massa final (seca) (g)	Peso da água (g)	Teor de umidade (%)	Teor de sólidos (%)
15	69,95	9,54	60,41	633,23	13,64
10	67,5	5,48	62,02	1131,75	8,12

Tabela 14 – Conferência do teor de sólidos real nas amostras para geotêxtil não tecido

Teor de sólidos	Massa inicial (úmida)	Massa final (seca)	Peso da água	Teor de umidade	Teor de sólidos
(%)	(g)	(g)	(g)	(%)	(%)
15	51,88	7,13	44,75	627,63	13,74
10	69,17	6,32	62,85	994,46	9,14

O teor de sólidos novamente não correspondeu exatamente ao esperado, a justificativa para tal divergência dos valores encontrados é a mesma citada no item 4.1.1. Os valores obtidos a seguir para análise da eficácia do processo de filtração com a adição de floculantes foram analisados com o teor de sólidos real descrito na tabela anterior.

4.2.2 Resultados obtidos na filtração

Observou-se durante a realização dos ensaios com os floculantes que a eficácia de floculação das partículas foi maior nos primeiros instantes em que se misturou o polímero com a polpa de rejeitos. Por esse motivo, foi fixado um tempo de mistura de 1 minuto e logo em seguida foram realizados os ensaios de filtração conforme descrito na metodologia do presente documento.

Os floculantes foram ensaiados primeiramente com o geotêxtil de desaguamento da marca Huesker. Os resultados obtidos, respectivas concentrações e volume de floculantes utilizados encontram-se apresentados nas Tabela 15 e Tabela 16 a seguir.

Tabela 15 – Resultados para filtração utilizando geotêxtil tecido de desaguamento com adição do floculante em pó

Teor de sólidos	Concentração	Massa inicial úmida	Volume coletado	Volume de floculante utilizado	Massa rejeito seco	Peso da água	Teor de umidade	Teor de sólidos final
(%)	(g/ml)	(g)	(ml)	(ml)	(g)	(g)	(%)	(%)
15	0,1/50	51,75	48,5	10	13,11	38,64	294,74	25,33
15	0,2/50	62,76	41	10	15,77	46,99	297,97	25,13
15	0,4/50	34,54	67	10	14,61	19,93	136,41	42,30
10	0,1/50	30,87	60	6	8,5	22,37	263,18	27,53
10	0,20/50	41,65	55	6	7,37	34,31	465,54	17,68
10	0,4/50	36,5	55	6	9,13	27,37	299,78	25,01

Tabela 16 – Resultados para filtração utilizando geotêxtil tecido de desaguamento com adição do floculante líquido

Teor de sólidos	Concentração	Massa inicial úmida	Volume coletado	Volume de floculante utilizado	Massa rejeito seco	Peso da água	Teor de umidade	Teor de sólidos final
(%)	(g/ml)	(g)	(ml)	(ml)	(g)	(g)	(%)	(%)
15	0,1/100	45,45	56	8	11,27	34,18	303,28	24,80
15	0,2/100	256,51	77	10	5,44	25,72	472,79	17,46
15	0,4/100	193,47	60	10	12,24	33,7	275,33	26,64
10	0,1/100	23,91	72	8	4,43	19,48	439,73	18,53
10	0,2/100	27,04	81	8	4,39	22,65	515,94	16,23
10	0,4/100	51,53	43	8	7,57	43,96	580,71	14,69

OBS.: As concentrações utilizadas dos floculantes apresentadas nas tabelas acima foram testadas de forma a se obter o melhor resultado de floculação da polpa de rejeito.

Logo após a realização dos ensaios com o geotêxtil de desaguamento, foram realizados ensaios com o geotêxtil não tecido, a fim de compará-los com os resultados obtidos sem a utilização dos floculantes.

Os resultados obtidos encontram-se dispostos nas Tabela 17 e Tabela 18 a seguir.

Tabela 17 – Resultados para filtração utilizando geotêxtil não tecido com adição do floculante em pó

Teor de sólidos	Concentração	Massa inicial úmida	Volume coletado	Volume de floculante utilizado	Massa rejeito seco	Peso da água	Teor de umidade	Teor de sólidos final
(%)	(g/ml)	(g)	(ml)	(ml)	(g)	(g)	(%)	(%)
15	0,1/50	92,18	3,6	8	12,78	79,4	621,28	13,86
15	0,2/50	62,76	20	8	7,33	56,36	768,89	11,68
15	0,4/50	48,74	3,6	8	13,17	35,57	270,08	27,02
10	0,1/50	67,66	1	6	0,87	66,79	7677,01	1,29
10	0,2/50	59,57	3	6	3,55	56,02	1578,03	5,96
10	0,4/50	61,69	6,5	6	1,79	59,9	3346,37	2,90

Tabela 18 – Resultados para filtração utilizando geotêxtil não tecido com adição do floculante líquido

Teor de sólidos	Concentração	Massa inicial úmida	Volume coletado	Volume de floculante utilizado	Massa rejeito seco	Peso da água	Teor de umidade	Teor de sólidos final
(%)	(g/ml)	(g)	(ml)	(ml)	(g)	(g)	(%)	(%)
15	0,1/100	64,09	19	10	8,98	55,11	621,28	14,01
15	0,2/100	66,21	15,2	10	8,8	57,41	768,89	13,29
15	0,4/100	57,47	16,8	10	7,27	50,2	690,51	12,65

4.2.3 Turbidez

Os filtrados obtidos nos ensaios de filtração com a adição de floculantes apresentaram resultados mais favoráveis quando comparados aos ensaios sem a adição dos mesmos. A Figura 24 a seguir ilustra os filtrados sendo colocados nas cubetas de vidro para conferência da turbidez.

Figura 24 – Análise da turbidez dos filtrados obtidos com a adição de floculantes.



Na imagem anterior pode-se observar por uma análise visual de cor que o filtrado obtido apresenta características mais límpidas quando comparados aos obtidos sem a adição de floculantes. A olho nu não se observam mais os sólidos suspensos e em suspensão no filtrado.

Com o auxílio do turbidímetro no laboratório de Saneamento Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto, foram obtidos os resultados apresentados nas Tabela 19 – Turbidez utilizando geotêxtil tecido de desagramento com adição do floculante em pó Tabela 20 a seguir.

Tabela 19 – Turbidez utilizando geotêxtil tecido de desaguamento com adição do floculante em pó

Teor de sólidos	Concentração	Turbidez
(%)	(g/ml)	(uT)
15	0,1/50	619
15	0,2/50	352
15	0,4/50	297
10	0,1/50	939
10	0,20/50	487
10	0,4/50	768

Tabela 20 – Turbidez utilizando geotêxtil tecido de desaguamento com adição do floculante líquido

Teor de sólidos	Concentração	Turbidez
(%)	(g/ml)	(uT)
15	0,1/100	-
15	0,2/100	-
15	0,4/100	235
10	0,1/100	-
10	0,20/100	-
10	0,4/100	-

OBS.: Os valores sem resultados de turbidez podem ser justificados pelo volume insignificante de material filtrado, impossibilitando a leitura pelo aparelho. Houveram ainda casos em que o filtrado encontrou-se acima dos limites de sensibilidade do turbidímetro, ainda que o mesmo tenha sido diluído em água destilada.

O mesmo procedimento foi realizado com os filtrados obtidos nos ensaios com o geotêxtil não tecido e os resultados encontram-se nas Tabela 21 e Tabela 22 a seguir.

Tabela 21 – Turbidez utilizando geotêxtil não tecido com adição do floculante em pó

Teor de sólidos	Concentração	Turbidez
(%)	(g/ml)	(uT)
15	0,1/50	8,31
15	0,2/50	89,0
15	0,4/50	7,4
10	0,1/50	-
10	0,20/50	-
10	0,4/50	-

Tabela 22 – Turbidez utilizando geotêxtil não tecido com adição do floculante líquido

Teor de sólidos	Concentração	Turbidez
(%)	(g/ml)	(uT)
15	0,1/100	-
15	0,2/100	515
15	0,4/100	57

OBS.: Os valores sem resultados de turbidez podem ser justificados pelo volume insignificante de material filtrado, impossibilitando a leitura pelo aparelho. Houveram ainda casos em que o filtrado encontrou-se acima dos limites de sensibilidade do turbidímetro, ainda que o mesmo tenha sido diluído em água destilada.

Como pode-se observar, apesar da impossibilidade de leitura em alguns dos filtrados, os resultados para turbidez nos ensaios com a adição de floculantes apresentaram resultados melhores que os obtidos nos ensaios de filtração sem a adição dos polímeros. Foi necessário em alguns casos realizar a diluição do filtrado, de forma semelhante ao descrito no Item 4.1.3.. Pode-se observar que na maioria dos casos, os valores de turbidez encontrados ainda são superiores ao limite deliberado pelo CONAMA para cursos d'água superficiais, dessa forma conclui-se que o

processo de filtração ainda que com a adição de polímeros apresentou resultados desfavoráveis em termos de turbidez.

4.2.4 Teor de sólidos presente nas amostras filtradas

Os volumes filtrados nos ensaios com a adição de floculante foram colocados em estufa para conferência do teor de sólidos e posterior análise da eficiência de filtração do sistema. Os resultados encontrados são apresentados nas Tabela 23 e Tabela 24 a seguir.

Tabela 23: Teor de sólidos nos filtrados com geotêxtil tecido de desaguentamento

Teor de sólidos inicial	Concentração De floculante	Floculante utilizado	Massa inicial úmida	Massa rejeito seco	Peso da água	Teor de sólidos no filtrado
(%)	(g/ml)	-	(g)	(g)	(g)	(%)
15	0,1/50	Pó	44,8464	0,0073	44,8391	0,016
15	0,2/50	Pó	38,8056	-	-	-
15	0,4/50	Pó	60,0625	0,0317	60,0308	0,053
15	0,4/100	Líquido	46,3008	0,0538	46,2470	0,116
10	0,1/50	Pó	56,5298	0,0340	56,4958	0,060
10	0,2/50	Pó	45,4390	0,0585	43,3805	0,129
10	0,4/50	Pó	52,2720	0,0232	52,2488	0,044

Tabela 24: Teor de sólidos nos filtrados com geotêxtil não tecido

Teor de sólidos inicial	Concentração De floculante	Floculante utilizado	Massa inicial úmida	Massa rejeito seco	Peso da água	Teor de sólidos no filtrado
(%)	(g/ml)	-	(g)	(g)	(g)	(%)
15	0,2/50	Pó	18,69	0,0023	18,6877	0,012
15	0,1/100	Líquido	17,28	0,0787	17,2013	0,455
15	0,2/100	Líquido	13,14	-	-	-
10	0,4/100	Líquido	15,0956	-	-	-

A leitura do teor de sólidos do filtrado foi impossibilitada em alguns casos pois o teor de sólidos encontrado foi insignificante. Os resultados encontrados com o uso de floculantes foram significativamente melhores quando comparados aos ensaios sem a adição dos mesmos. Em alguns dos casos, conforme apresentado anteriormente, todo o volume ensaiado atravessou o geotêxtil, representando um teor de sólidos igual ao inicial, enquanto que nos resultados com floculantes o teor de sólidos encontrado máximo foi de 0,455% para os mesmos 15% de sólidos iniciais.

4.2.5 Eficiências encontradas

Em seguida, os parâmetros de eficácia do processo de filtração apresentado nos itens anteriores foram calculados e estão apresentados nas Tabela 25 e Tabela 26 a seguir. As fórmulas utilizadas para o cálculo encontram-se descritas na revisão bibliográfica.

Tabela 25 – Eficiência dos geotêxteis com adição do floculante em pó

Teor de sólidos	Geotêxtil	Concentração	Eficiência de desaguamento	Eficiência de infiltração
(%)		(g/ml)	(%)	(%)
15	Huesker - Geotêxtil de desaguamento	0,1/50	85,70	53,45
15		0,2/50	84,24	52,94
15		0,4/50	210,12	78,46
10		0,1/50	239,04	76,74
10		0,2/50	117,73	58,86
10		0,4/50	208,00	73,51
15	Geotêxtil Não Tecido	0,1/50	0,87	1,01
15		0,2/50	-14,99	-22,51
15		0,4/50	96,65	56,97
10		0,1/50	-85,89	-671,98
10		0,2/50	-34,79	-58,68
10		0,4/50	-68,27	-236,50

Tabela 26 – Eficiência dos geotêxteis com adição do floculante líquido

Teor de sólidos	Geotêxtil	Concentração	Eficiência de desaguamento	Eficiência de infiltração
(%)		(g/ml)	(%)	(%)
15	Huesker - Geotêxtil de desaguamento	0,1/100	81,82	52,11
15		0,2/100	28,74	25,34
15		0,4/100	95,31	56,52
10		0,1/100	128,20	61,15
10		0,2/100	99,88	54,41
10		0,4/100	80,91	48,69
15	Geotêxtil Não Tecido	0,1/100	1,96	1,01
15		0,2/100	-3,27	-22,51
15		0,4/100	-7,93	-10,02

Pode-se observar com as Tabelas anteriores que a eficiência de desaguamento apresentou valores desde negativos (quando o teor de sólidos final é menor que o inicial, logo, o geotêxtil apresentou ineficácia na retenção das partículas) até resultados superiores a 100% (ocorrem quando xxxx). Para os resultados obtidos pode-se observar que a concentração de 0,4 g/ 50 mL e teor de sólidos a 15% apresentaram maior eficácia do sistema, com a utilização do geotêxtil de desaguamento e o floculante em pó.

5 CONCLUSÃO

Dentre os três geotêxteis analisados sem a adição de floculantes, o melhor resultado obtido foi o não tecido, com teor de sólidos inicial de 30%, pois o mesmo apresentou melhores valores de turbidez (ainda que muito elevada), menor teor de sólidos no filtrado, volume coletado relativamente alto (comprovando sua eficácia no processo de desaguamento) e maior teor de sólidos retido no geotêxtil.

Observou-se ainda que o geotêxtil não tecido Basetrac Woven da Huesker não é aconselhável para utilização em desaguamento, pois o mesmo apresentou filtração insatisfatória e entupimento quando solicitado por elevados teores de sólidos.

Além disso, ao realizar os testes com o geotêxtil de desaguamento sem a adição de floculantes praticamente todo o volume ensaiado passou pelo filtro para os teores de 15 e 10% de sólidos. Portanto pode-se concluir que a aplicação do mesmo para baixos teores de sólidos não é indicada pois possui baixa eficácia no processo de filtração.

Com relação ao volume coletado, para o geotêxtil não tecido os valores médios coletados variaram entre 10 e 50% do volume inicial ensaiado, enquanto que para o geotêxtil tecido de desaguamento a variação foi entre 26,5% e 100%.

Ao analisar os resultados obtidos nos ensaios, pode-se concluir que para os ensaios de filtração sem a adição de floculantes, obtiveram-se bons resultados de desaguamento (com altos volumes coletados), no entanto, o filtrado apresentou teores de sólidos elevados, fato que deve ser evitado devido à susceptibilidade de contaminação dos lençóis freáticos e águas superficiais.

Para corrigir o problema de contaminação dos corpos d'água, os ensaios foram repetidos com a adição de dois floculantes disponibilizados ao laboratório. Os resultados obtidos foram consideravelmente melhores em termos de teor de sólidos no filtrado e turbidez que os obtidos sem a adição dos polímeros. Para o teor de sólidos no filtrado nenhum dos valores ultrapassou 0,5%, enquanto que sem a adição dos floculantes obtiveram-se resultados de até 11% de sólidos passantes. Pôde-se

observar que o floculante em pó apresentou resultados melhores que o líquido de forma geral.

Os valores de turbidez que anteriormente atingiram até 12.000 uT, com a adição dos polímeros o valor máximo obtido foi de 939 uT, enquanto o mínimo foi de 7,4 uT, representando uma diminuição significativa no potencial poluidor dos corpos hídricos.

Os resultados obtidos com o geotêxtil não tecido em conjunto com o floculante em pó apresentou eficácia insatisfatória pois os volumes coletados foram muito baixos, o que significa que houve colmatção e/ou entupimento do sistema. Já para o floculante líquido, houve volume coletado de cerca de 15% do volume inicial, porém as eficácias de desaguamento e infiltração analisadas foram baixas.

Ao analisar os resultados de eficiência de desaguamento e infiltração, houveram resultados negativos, o que significa que o teor de sólidos final retido no geotêxtil foi menor que o inicial da polpa antes da realização do ensaio, ou seja, os sólidos passaram pelo geosintético. Por outro lado houveram eficácias superiores a 100%, o que significa que o sistema atendeu satisfatoriamente à solicitação proposta.

Diante da comparação dos resultados obtidos para as diferentes concentrações de polímeros, geotêxteis e teores de sólidos ensaiados, pode-se concluir que o melhor resultado obtido foi a concentração de 0,4/50 do floculante em pó para um teor de 15% de sólidos, utilizando-se o geotêxtil de desaguamento. Essa conclusão se deve ao volume coletado relativamente alto (67 mL), a turbidez baixa (297 uT) e o aumento no teor de sólidos retido no geotêxtil (42,3%). Dessa forma, esta configuração foi considerada a ideal para trabalhos futuros.

Há que se considerar todavia os custos incorridos na adição de floculantes na polpa de rejeitos. Segundo dados do fabricante, um saco de 25kg de floculante custa aproximadamente R\$13,00 o kg. Portanto, para a produção aproximada de 250 milhões de toneladas anuais de rejeitos, com base nos dados da FEAM citados na introdução, seriam gastos cerca de 970 milhões de reais com polímeros. Tal investimento se torna impraticável, dessa forma aconselha-se que os estudos do presente trabalho sejam aprofundados de forma a encontrar outra solução economicamente mais viável. Uma alternativa seria a associação de geotêxteis

tecidos e não tecidos, sem a adição de floculantes, no entanto, a eficácia do sistema deve ser testada por meio de ensaios laboratoriais em trabalhos futuros.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A fim de se aprofundar os estudos iniciados no presente documento, sugere-se a continuação dos ensaios de cone, utilizando a associação entre geotêxteis tecidos e não tecidos. Além disso, outros ensaios de filtração como o leaf test e o ensaio de razão entre gradientes podem ser adotados para se obter maior precisão dos resultados. Por fim, a configuração ideal ensaiada em laboratório pode ser adotada para protótipos de geodrenos e/ou tubos geotêxteis.

REFERÊNCIAS

- ABNT (2013). **Geossintéticos – Método de ensaio para determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos correlatos**. NBR ISO-9864. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2p., São Paulo.
- ABNT (2013). **Geossintéticos – Determinação da espessura e pressões especificadas. Parte 1: Camada única**. NBR ISO-9863-1. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 5p., São Paulo.
- ABNT (2016). **Solo – Análise granulométrica**. NBR 7.181. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 12p., São Paulo
- BALTAR, C., A., M. Floculação. In: LUZ, A., B., SAMPAIO, J., A. e ALMEDA, S., I., M. (eds) **Tratamento de Minérios**, Rio de Janeiro: CETEM, 4ª edição, 497-531, 2004.
- BEIRIGO, A.,E. **Comportamento filtro-drenante de geotêxteis em barragens de mineração**. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília/ DF, Dissertação de mestrado, 210p., (2005).
- BERNARDES S. G. **Condicionamento químico de resíduos gerado em estação de tratamento de água convencional**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Relatório final do Programa de Bolsa Institucional de Iniciação Científica Júnior. 21 p. Varginha/MG, (2017).
- DUARTE, P., A. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e resíduos industriais no Estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco**. Universidade Federal de Minas Gerais, Dissertação de Mestrado, 130p., (2008).
- ESPÓSITO, T., J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico**. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Tese de Doutorado, 363p., (2000).

FERREIRA, L., D. **Desaguamento e adensamento de rejeito de mineração usando processos isocinéticos**. Universidade Federal de Ouro Preto, Núcleo de Geotecnia/NUGEO, Ouro Preto-MG, Tese de Doutorado, 272p., (2016).

FREITAS, Eduardo de. "**Principais áreas produtoras de minério no Brasil**"; *Brasil Escola*. Disponível em <<https://brasilecola.uol.com.br/brasil/principais-areas-produtoras-minerio.htm>>. Acesso em 14 de maio de 2019.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE- FEAM. **Inventário de Resíduos Sólidos da Mineração. Ano base 2017**. 04 de janeiro de 2019. 47 p. Disponível em <<http://www.feam.br/noticias/1/1692-feam-publica-inventario-de-residuos-solidos-da-mineracao>>. Acesso em 14 de maio de 2019.

Gomes, R. C. **Sistemas de Disposição de Rejeitos de Mineração Utilizando Geotubos como Estruturas de Desaguamento e/ou de Contenção**. V Simpósio Brasileiro de Geossintéticos / REGEO, Recife: ABMS/IGS-BR, CD. (2007).

GUIMARAES M. G. A., Urashima D. C., Vidal D. M. **Dewatering of sludge from a water treatment plant in geotextile closed systems: Brazilian experiences**. *Soils and Rocks*, São Paulo, 36 (3): 251-263. 13p. (2013).

GUIMARAES M. G. A., Urashima D. C., Vidal D. M. **Dewatering of sludge from a water treatment plant in geotextile closed systems**. *Geosynthetics International*, 21, nº 5. 11p. (2014).

HAAK W. **Condicionamento químico de lodo de estação de tratamento de água com monitoramento através de potencial redox**. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Dissertação de Mestrado. 196p. (2011).

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. **Informações sobre a economia mineral brasileira 2015**. 25 p. Disponível em <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005836.pdf>>. Acesso em 14 de maio de 2019.

JUNIOR C. W., Panta C. A. C., Urban C. R. **Desidratação de rejeitos provenientes da mineração através de tubos geotêxteis**. 8p. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG (2016).

KOERNER, R., M. **Designing with Geosynthetics**. Prentice-Hall Inc., 783p., New Jersey, EUA (1994).

LAWSON C. R. **Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering**. Geosynthetics International, 15, nº6. 44p. (2008).

LUNDIN G. M., Escobar L. G. e Stephens T. **Cursos d'água e lagoas contaminadas com PCB (Bifenóis policlorados) de polpa e papel são contidas e desidratadas usando unidades Geotube proporcionando uma solução ambiental econômica**. Duas localizações são apresentadas. In: 8º Simpósio da IWA sobre Esgotos de Indústrias Florestais, Vitória, Brasil, 9p. (2006).

MANO, E., B. **Polímeros como materiais de engenharia**. Editora Edgard Blucher Ltda., 197p., São Paulo, (1991).

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Fundação Nacional da Saúde – FUNASA. Portaria Nº 1.469. **Controle e Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano e seu Padrão de Potabilidade**. Outubro de 2001.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução 357**. Março de 2005.

MIRATECH Ten Cate Nicolon. **Geotube. Dewatering Technology**: versão 5.2. Seção: Aplicações: [S.I.]: Mining & Mineral Processing, 2005

NETO, M., C., R. **Estudo de pastas minerais a partir do espessamento de lamas de processamento fosfático**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, UMFG, 122p., (2016)

PEIXOTO, P., L., C. **Proposta de nova metodologia de desaguamento de rejeitos em polpa**. Dissertação de Mestrado. Núcleo de Geotecnia. Universidade Federal de Ouro Preto. 108 p., 2012.

RIBEIRO, M., V., ROCHA, S., D., F., VALADÃO, G., E., S. **Revisão dos Mecanismos de Agregação de Partículas Aplicados à Disposição Final de Rejeitos.** In: XXIV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, v.1, Salvador-BA, 944-951, 2011.

SHARMA, B., R., DHULDHOYA, N., C., MERCHANT, U., C. **Flocculants Ecofriendly Approach.** Journal Polymer Environmental, v. 14, 195-202, 2006

Vertematti, J. C. (2015). **Manual Brasileiro de Geossintéticos.** Editora Edgard Blucher. 568p.

VIDAL, D., **Apostila de geossintéticos na Engenharia Civil: curso básico.** Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (2001).