



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



ANDRESSA NUNES REIS

APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS EM BARRAGENS DE REJEITOS

Uberlândia

2023

ANDRESSA NUNES REIS

**APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS EM
BARRAGENS DE REJEITOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Uberlândia, como parte
das exigências para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Giovana Bizão Georgetti

Uberlândia

2023

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu amigo Humberto (*in memoriam*), que sempre me acompanhou e apoiou nos meus sonhos e projetos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe Suzy, heroína que me deu apoio, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço.

Obrigada meu irmão e primos, que nos momentos de minha ausência dedicados ao estudo superior, sempre fizeram entender que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente!

Quero agradecer os meus amigos, particularmente, Bruna, Maria, Renata, Rogério e Victor. Obrigado por todos os conselhos úteis, bem como palavras motivacionais e puxões de orelha. As risadas que compartilhei durante esse momento difícil na faculdade, também me ajudaram a passar o dia. Vocês desempenharam um papel significativo no meu crescimento, e devem ser recompensados com minha eterna gratidão.

Obrigado por tudo. Este TCC também é de vocês!

RESUMO

As barragens de rejeito são utilizadas com a finalidade de armazenar os descartes provenientes da mineração. Por razão de falta de recursos naturais, alto valor de construção e segurança, materiais geossintéticos são utilizados para diversas funções, sendo elas drenagem, filtração, proteção, reforço, separação, impermeabilização e controle de erosão. Este trabalho visa analisar o panorama atual de aplicação de geossintéticos em barragens de rejeitos, visando abordar práticas já realizadas no país, o potencial de utilização, suas vantagens e desvantagens, e avaliar a utilização dos mesmos nas soluções e prevenções de problemas. A partir de uma consulta bibliográfica, procurou-se analisar algumas aplicações de geossintéticos em barragens de rejeitos, como a utilização de geotubos e geogrelha para reforço de solo, uso de geomembrana e geotêxtil para filtros drenantes em rejeitos de minério de ferro, entre outros. Diante da pesquisa, é possível perceber que existem diversas alternativas para a aplicação de geossintéticos nas obras de barragens, sendo opções que trazem benefícios para o controle de qualidade e otimização de projetos.

Palavras-chaves: Barragem de rejeito. Geossintéticos. Desempenho.

ABSTRACT

Tailings dams are used to store waste materials from mining activities. Due to the lack of natural resources, high construction costs, and safety concerns, geosynthetic materials are used for various functions, including drainage, filtration, protection, reinforcement, separation, waterproofing, and erosion control. This study aims to analyze the current landscape of geosynthetic applications in tailings dams, addressing practices already implemented in the country, their potential uses, advantages, disadvantages, and evaluating their utilization in problem-solving and prevention. Through a literature review, various applications of geosynthetics in tailings dams were analyzed, such as the use of geotubes and geogrids for soil reinforcement, the utilization of geomembranes and geotextiles for drainage filters in iron ore tailings, among others. Based on the research, it is evident that there are several alternatives for the application of geosynthetics in dam construction, offering benefits for quality control and project optimization.

Key words: Tailings dams. Geosynthetics. Performancedams.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Método de alteamento à montante.....	14
Figura 2 – Método de alteamento à jusante	15
Figura 3 – Método de alteamento linha de centro.....	16
Figura 4 – Utilizações mais frequentes de geossintéticos	19
Figura 5 – Tipos de geossintéticos.....	20
Figura 6 – Seção transversal representativa do dique.....	26
Figura 7 – Seções transversais: (a) modelo 1 e (b) modelo 2. Dimensões em metros.....	27
Figura 8 - Ilustração esquemática do conceito de compatibilidade de deformações da geogrelha de PVA com o solo.	30
Figura 9 - Vista frontal do aterro reforçado durante os trabalhos de hidrossemeadura.	30
Figura 10 - Localização dos drenos de fundo de poliuretano e dos drenos laterais de geossintéticos	33
Figura 11 - Condições de contorno analisadas	34

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVO.....	12
3. MÉTODO	12
4. BARRAGENS DE REJEITO	12
4.1 Métodos Construtivos	13
1.1.1. Alteamento a Montante.....	13
1.1.2. Alteamento a jusante.....	15
1.1.3. Alteamento em linha de centro	16
4.2 Drenagem	17
5. GEOSSINTÉTICOS.....	18
5.1 Funções dos geossintéticos.....	18
5.2 Tipos de geossintéticos.....	20
2.1.1. Georredes	20
2.1.2. Geocompostos.....	21
2.1.3. Geotubos	21
2.1.4. Geocélulas.....	21
2.1.5. Geoespaçador	21
2.1.6. Geogrelhas	22
2.1.7. Geomembranas	22
2.1.8. Geotêxteis	23
5.3 Propriedades relevantes.....	24
6. APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS EM BARRAGENS	25
7. ESTUDOS DE CASO.....	26
7.1 Geossintéticos na retenção de materiais em barragens de rejeitos – Mattos et al. (2019).....	26
7.2 Geomembranas filtrantes em barragens de rejeito – Sampaio (2013)	28

7.3	Reforço com geogrelha de PVA em barragens de rejeito – Silva et al. (2008)	29
7.4	Utilização de geotêxtil e geocomposto para filtro drenante em minério de ferro – Moreira (2011).	32
8.	ANÁLISE	34
9.	CONCLUSÃO.....	35
	REFERÊNCIAS.....	37

1. INTRODUÇÃO

Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2016), a mineração compreende um conjunto de atividades destinadas a pesquisar, descobrir, mensurar, extrair, tratar ou beneficiar e transformar recursos minerais, de forma a torná-los benefícios econômicos e sociais. De acordo com Beirigo (2005), o Brasil é um dos maiores produtores de minério do mundo e possui algumas importantes reservas minerais.

A mineração está profundamente relacionada à história contemporânea brasileira, pois representa uma das principais atividades econômicas do nosso país. Ela é responsável pela ocupação de territórios e é vital para o crescimento econômico do Brasil. No período colonial, houve muita extração de minério para produção de ouro e diamantes, e extração do ferro no período imperial (THOMÉ, 2018). Já os dados atuais mostram que a indústria extrativa mineral tem sido responsável por 1,4% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional, tendo apresentado desenvolvimento econômico superior se comparado ao PIB do setor industrial e até mesmo se comparado ao PIB total do Brasil (IBRAM, 2019).

Por um lado, os dividendos da mineração marcam um desenvolvimento econômico e, por outro, os impactos negativos e danos causados pela exploração mineral não podem ser ignorados (RIBEIRO; MENDES, 2013). A maioria dos rejeitos de mineração não pode ser reaproveitada e, de acordo com a legislação vigente, não deve ser descartada na natureza, sendo necessária a destinação adequada. Dentre as possibilidades de destinação, estão as barragens de rejeitos.

De acordo com o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB, 2012), com o passar dos anos a produção de rejeitos aumentou e as áreas à disposição se tornaram cada vez mais escassas, culminando no desenvolvimento dos projetos de engenharia permitindo a construção de barragens com alturas cada vez maiores. Esses projetos se tornaram possíveis com a ampliação contínua do conhecimento e controle dos aspectos de segurança, tais como, melhor compreensão do comportamento dos materiais e novos desenvolvimentos na ciência de mecânica de solos.

Os sistemas de drenagem possuem papel fundamental nas barragens de rejeito, como controlar e orientar a percolação da água por meio da fundação e do maciço. Com isso, ele

otimiza a rede de percolação para evitar a saída de gradientes hidráulicos excessivos, prevenindo a ocorrência de *piping*. Outra função da drenagem interna é contribuir para a segurança ao escorregamento do talude de jusante, reduzindo o trecho da superfície crítica submetido às forças de percolação e subpressões e reduzindo o volume de material saturado.

Com o conhecimento de um problema na funcionalidade de drenagem e filtração nessas barragens, e o desenvolvimento de novas tecnologias para melhorar o desempenho de estruturas geotécnicas, deu-se a aplicação dos geossintéticos em barragens de rejeito.

A utilização de um geossintético, segundo Vidal (1992), deverá cumprir uma ou mais das seguintes funções:

- Drenagem: coleta e condução de um fluido pelo corpo do geotêxtil;
- Filtração: retenção do solo ou de outras partículas, permitindo passagem do fluido em movimento;
- Proteção: limitação ou prevenção de danos a elementos de obras geotécnicas;
- Reforço: utilização das propriedades mecânicas dos geossintéticos para a melhoria do comportamento mecânico de uma estrutura geotécnica;
- Separação: ação de impedir a mistura ou interação de materiais adjacentes;
- Impermeabilização: ação de controle ou desvio de fluxo.

Dentre a grande variedade de produtos geossintéticos disponíveis no mercado, os geotêxteis têm sido estudados e utilizados com sucesso em diversas situações de drenagem e filtração (BEIRIGO, 2005).

As georredes são uma alternativa interessante na função drenante do maciço da barragem. Esses materiais são utilizados, normalmente, em combinações de geocompostos com materiais naturais (areia, brita, fibras naturais, solos, etc.) para que possam desempenhar funções simultâneas de drenagem, filtração, reforço, entre outros.

Outro desafio encontrado na execução de obras de contenção de rejeitos é o apoio em solos moles. Meneses (2004) testou diversas estruturas comparando condições sem reforço, reforçadas apenas por geocélulas e pela associação de geocélulas e geogrelha, alcançando resultados satisfatórios na utilização de geocélulas conjugadas em termos de recalque e capacidade de suporte.

Estas e outras opções da utilização de geossintéticos na melhora de aspectos construtivos das barragens de rejeito são discutidas ao longo deste trabalho, dentre elas a utilização de geoespaçadores, geomembranas, e os materiais já citados.

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo geral analisar o panorama atual de aplicação de geossintéticos em barragens de rejeitos, visando abordar práticas já realizadas no país, o potencial de utilização, suas vantagens e desvantagens, e avaliar a utilização dos mesmos nas soluções e prevenções de problemas.

3. MÉTODO

O trabalho apresenta metodologia no embasamento teórico, através da consulta de livros, artigos, dissertações e trabalhos científicos presentes na literatura do assunto tratado, em âmbito nacional.

A partir da consulta bibliográfica, procurou-se estudar, descrever e analisar algumas aplicações de geossintéticos em barragens de rejeito, como reforço de solo, problemas em drenagem, impermeabilização, entre outros.

4. BARRAGENS DE REJEITO

Define-se barragem como uma barreira feita artificialmente para alterar, diminuir ou interromper um curso de água ou de materiais sólidos (DICIO, 2022). Uma barreira de contenção de rejeitos é uma estrutura artificial, muitas vezes construída a partir de materiais naturalmente emprestados, sobrecarga do poço ou até mesmo dos próprios rejeitos. Ele é construído para reter material represado, ou seja, resíduos que são considerados estéreis durante o processo de beneficiamento (RAFAEL, 2012).

Vianna (2015) defende que “(...) as barragens devem atender basicamente a três princípios de projeto: do controle do fluxo, da estabilidade e da compatibilidade das deformações”. Apesar das grandes diferenças observadas na construção da seção transversal e nos materiais utilizados, os projetos de barragens devem, portanto, ter alguns elementos básicos com função de vedação, drenagem interna e estabilização.

Existem diferenças fundamentais na forma como são construídas, dependendo do tipo de barragem. Duarte (2008) destacou que as barragens convencionais são dedicadas ao armazenamento de água e controle da geração de energia hidráulica ou hidrelétrica, com projeto de construção homogêneo, ou seja, em uma única etapa, utilizando assim materiais compactos e densos. Por outro lado, as barragens de rejeitos têm um processo de construção contínuo, ou seja, são construídas em etapas ao longo da operação da mina, e os próprios rejeitos são utilizados para formar uma ensecadeira.

Segundo Resende (2016), as características e o tipo de barragem, assim como a forma de disposição dos rejeitos, dependem do tipo dos rejeitos, ou seja, estão relacionados diretamente ao tipo de minério e ao processo empregado para o seu beneficiamento.

4.1 Métodos Construtivos

Os alteamentos podem assumir diferentes configurações, cada uma com suas características, especificações, vantagens e desvantagens.

Destacam-se três métodos de alteamento, denominados de acordo com o deslocamento do eixo da barragem durante as etapas de construção: montante, jusante e linha de centro. Soares (2010) assinala que o método utilizado deve ser o mais adequado às características do projeto: topografia, hidrologia, geologia, tipos e propriedades do subsolo, granulometria e concentração dos rejeitos, velocidade de deposição, variação da capacidade de armazenamento do reservatório com o aumento da altura.

É importante estudar os métodos diferentes de alteamento pois cada um dará consequências diversas às estruturas, fazendo com que a coleta e condução dos fluidos sejam diferentes, a retenção do solo e de partículas seja individual, as necessidades de proteção e reforço sejam específicas para cada tipo de alteamento e a separação de materiais adjacentes necessária seja inerente a cada tipo de estrutura também (VIDAL, 1992).

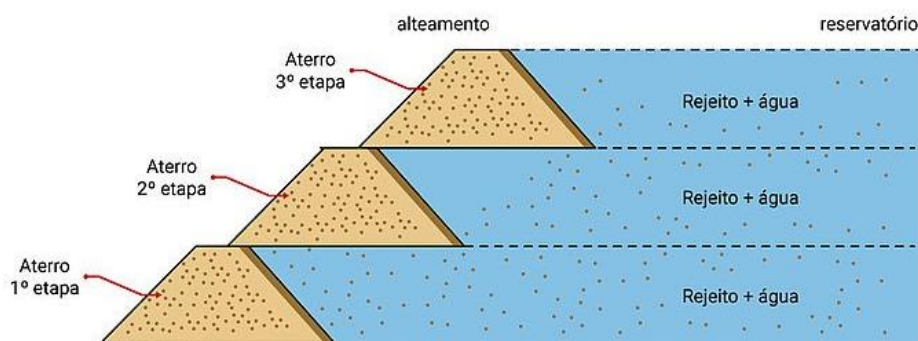
1.1.1. Alteamento a Montante

No Manual de Gestão e Manejo de Rejeito de Mineração (IBRAM, 2016), consta que a fase inicial incluiu a construção de uma barragem de partida. Após esta etapa, a lama escoou a montante do dique ao longo do perímetro da crista da barragem, formando uma praia sedimentar. Ocorre então a segregação de grãos, com partes mais espessas e densas

depositadas próximas ao maciço, e partes mais finas e leves suspensas e fluído em direção aos lagos de subsidência, as regiões internas das bacias sedimentares. Esta praia sedimentar servirá de base e, em última análise, fornecerá materiais de construção para a próxima elevação. A inclinação das praias é normalmente de 1%, que é desfavorável para se obter um acúmulo considerável de água.

A altura do talude nos alteamentos é uma variável que depende das necessidades operacionais do processo. Os diques iniciais são geralmente maiores do que os diques das fases subsequentes. Dessa forma, o procedimento continuará até que a cota final prevista no projeto seja atingida. A Figura 1 é um diagrama esquemático do processo de atualização do método de disposição de rejeitos a montante.

Figura 1 – Método de alteamento à montante



Fonte: Schweitzer (2019).

O método de alteamento a montante é considerado mais econômico no curto prazo, mas é uma abordagem crítica em relação à segurança por apresentar baixo controle construtivo (TRONCOSO, 1997 citado por IBRAM, 2016).

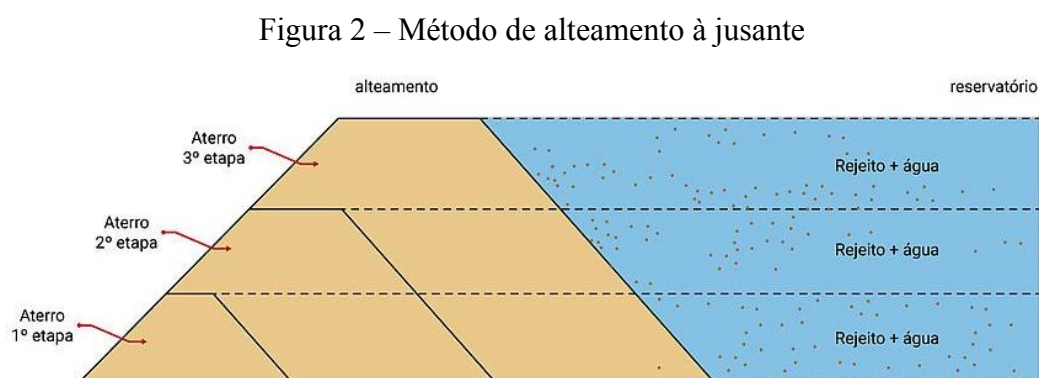
No Brasil, a Agência Nacional de Mineração emitiu a Resolução ANM nº 04/2019, que proíbe o uso de métodos a montante para construir ou levantar barragens de mineração. O histórico de acidentes recentes em barragens de mineração (Herculano Mineração, Samarco Mineração, Mont Polley (Canadá) e Vale S.A.) mostra que o modo de construção a montante foi uma opção para a indústria, amplamente adotada entre as décadas de 1970 e 1990, quando previa construir barragens para empreendedores a um custo menor. Hoje, no entanto, verifica-se que esta abordagem já não é tolerada, pois há cada vez mais registros de acidentes a ela associados, tendo-se observado que algumas destas estruturas ultrapassaram a sua vida

útil durante décadas, além de terem sido alteadas durante anos, aumentando gradativamente a carga de rejeitos em sua bacia.

Dessa forma, barragens construídas ou alteadas a montante, principalmente as mais antigas, devem ter tratamento diferenciado e monitoramento constante até que sejam extintas. Tal situação demanda alterações e inovações infralegais para que a sociedade esteja salvaguardada.

1.1.2. Alteamento a jusante

O alteamento a jusante é denominado assim, porque nos alteamentos o eixo da barragem se desloca para jusante, como ilustrado na Figura 2.



Fonte: Schweitzer (2019).

Na etapa inicial, forma-se o dique de partida, impermeável, contendo uma drenagem interna, composto por filtro inclinado e tapete drenante, geralmente formado por solo ou enrocamento compactado. Em seguida, formam-se os alteamentos subsequentes que se deslocam a jusante do dique de partida e dão sequência até a cota final prevista em projeto.

Fazendo uma comparação com o método a montante, o método a jusante é uma alternativa mais segura, visto que, preserva a geometria inicial do maciço, posto que o alteamento não ocorre em cima do material depositado, porém, por outro lado, o volume de material movimentado para a realização do alteamento é bem superior, o que torna este o fator de maior desvantagem do método, o alto custo relacionado ao grande volume de material movimentado para o andamento do aterro (FERNANDES, 2017).

Durante as etapas de projeto e avaliação de viabilidade do método de seleção, deve-se considerar a quantidade de material de empréstimo presente no local, tendo em vista que a

quantidade de material necessário para a elevação aumenta exponencialmente, ou seja, se o projeto for economicamente viável, o material emprestado do local deve ser refinado para ter vida útil durante o projeto. Este método, ao contrário do método a montante, é mais eficaz quando são necessárias grandes quantidades de água parada e a probabilidade de liquefação é mínima.

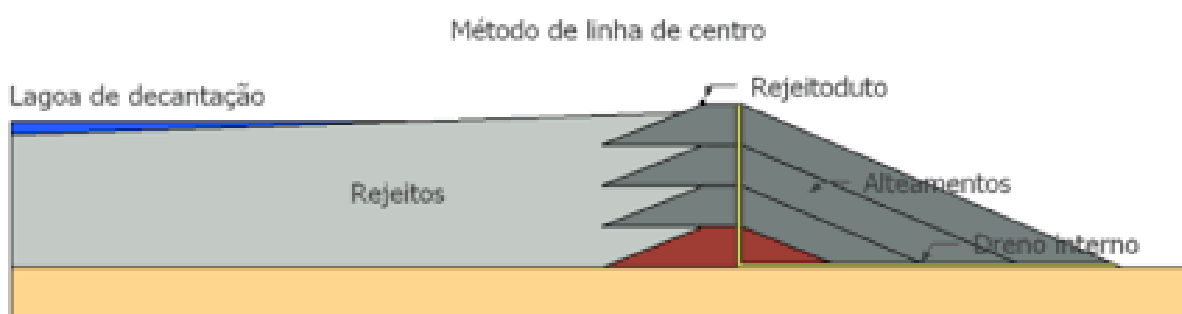
Neste método, os rejeitos são hidrociclonados, e com isso forma-se um movimento em espiral descendente, arrastando as partículas maiores e mais pesadas para saída inferior do equipamento, essas partículas são denominadas *underflow*. O *underflow* é liberado no talude a jusante, pois apenas rejeitos grosseiros são utilizados para o alteamento, que é compactado quando as características de umidade da área permitem, sendo este um dos fatores que permite que essas barragens sejam projetadas para alturas elevadas (SOARES, 2010).

1.1.3. Alteamento em linha de centro

O alteamento em linha de centro é um método intermediário entre o método por montante e o método por jusante, até mesmo em termos de custo, e é chamado assim devido ao eixo da barragem ser mantido de mesmo modo enquanto ela é elevada, porém o comportamento estrutural desse método tende ao método por jusante (SOARES, 2010).

A princípio, é construído um dique inicial e os rejeitos são lançados perifericamente a montante do mesmo, formando uma praia, como ilustrado na Figura 3. O alteamento subsequente é realizado lançando-se os rejeitos sobre a praia anteriormente formada e sobre o talude de jusante do dique de partida. Nesse processo, o eixo da crista do dique inicial e dos diques resultantes dos sucessivos alteamentos são coincidentes (SOARES, 2010), a Figura 3 apresenta o desenho esquemático do processo de alteamento deste método.

Figura 3 – Método de alteamento linha de centro



Fonte: Rafael (2012).

4.2 Drenagem

O sistema de drenagem interna de um barramento é fundamental para o combate da erosão interna em obras de terra (CRUZ, 2004). Além disso, cerca de 46% dos acidentes conhecidos no mundo com rompimentos de barragens são ocasionados pela erosão interna do maciço terroso (ICOLD, 2017).

A drenagem interna do barramento é um dos elementos responsáveis por controlar a percolação na barragem desde sua implantação até o estado de funcionamento total (ERSOY e HASELSTEINER, 2018). Esse sistema é feito com o uso de material de granulometria grossa, com alta permeabilidade, podendo ser executado de várias formas: dreno vertical ou inclinado, dreno horizontal, dreno de pé, trincheiras drenantes ou furos de drenagem (SILVA, 2016).

Os drenos, estruturas comuns a todos os métodos construtivos, são responsáveis por prevenir excessos de poropressão devido ao fluxo de água da barragem. As forças de poropressão são forças favoráveis ao movimento. Caso não haja eficiência no sistema de drenagem em direcionar o fluxo na barragem, podemos ter a ocorrência do fenômeno chamado *piping*, definido como a erosão interna que provoca a remoção de partículas do interior do solo, formando “tubos” vazios que provocam colapsos e escorregamentos laterais do terreno. Este fenômeno é descrito por Marques Filho e Geraldo (1998), ocorrendo em solos pouco coesivos onde o gradiente hidráulico é maior que a coesão do solo.

No que diz respeito às obras de drenagem de áreas de disposição de minérios, a utilização de materiais naturais (areia, brita, etc.) tem sido a prática mais comum. Contudo, nas últimas décadas, tem-se notado um interesse crescente no uso de geotêxteis para drenagem e filtração em obras de proteção ambiental e em projetos de disposição de rejeito. Empregados como elementos filtro-drenantes, os geotêxteis devem manter suas propriedades inalteradas por muitos anos. Este problema passa a ter importância fundamental no caso de barragens de rejeitos, tendo em vista a constituição agressiva do meio (FREITAS, 2003) e a vida útil esperada para a obra.

5. GEOSSINTÉTICOS

Geossintéticos são produtos planares, fabricados a partir de materiais poliméricos, sendo caracterizados pela natureza do polímero presente, pelo arranjo textural entre as fibras e/ou filamentos, pela tecnologia de fabricação e pelas suas aplicações geotécnicas (HSUAN e KOERNER, 1998).

Historicamente, depois da Segunda Guerra Mundial, com o desenvolvimento da indústria petroquímica e a consequente disseminação dos produtos plásticos, foi possível a produção de materiais sintéticos a partir de polímeros para a aplicação na engenharia civil. (QUEIROZ, 2016). Enquanto a nível internacional já havia um conhecimento considerável sobre a utilização destes produtos, no Brasil, sua utilização ocorreu somente a partir de meados dos anos 70.

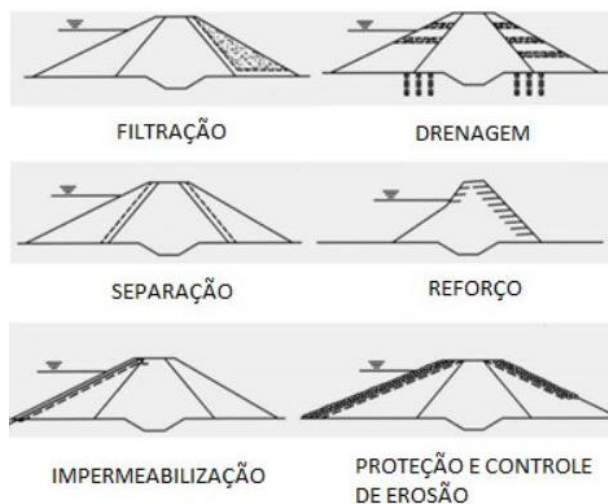
Os geossintéticos foram desenvolvidos para resolução de problemas principalmente em obras de terra, de forma a substituir materiais granulares que possuem um custo maior (obtenção, armazenagem, transporte e aplicação com maquinário pesado). Seu emprego proporciona menor tempo de execução, facilidade de instalação, maior resistência mecânica e melhores resultados em relação aos materiais naturais.

5.1 Funções dos geossintéticos

Os geossintéticos podem se fazer presentes em diferentes tipos de situações como obras de saneamento e tratamento de resíduos, obras de construção de rodovias e ferrovias, aterros sanitários, muros de contenção, controle de erosão do solo, projetos hidráulicos, fundações, entre outras. O emprego destes materiais é amplo, podendo ser utilizados em funções de drenagem, filtragem, impermeabilização, reforço de solos moles e separação de diferentes tipos de solos. Na figura 4 é retratado as funções e suas localizações na barragem.

- **Filtragem:** é um método que permite a livre passagem de um líquido ao mesmo tempo que impede a passagem de resíduos sólidos, retendo as partículas. Alguns geossintéticos que se caracterizam como meios permeáveis desempenham essa função em obras hidráulicas ou de saneamento ambiental. Por exemplo, geotêxteis são empregados para evitar a migração do solo para dentro do agregado drenante ou de tubulações, enquanto mantém o fluxo do sistema. (BATHURST, 2015)

Figura 4 – Utilizações mais frequentes de geossintéticos em barragens.



Fonte: Pedroni (2018)

- **Drenagem:** é o processo que faz a utilização de materiais especializados para o escoamento de fluidos em excesso no solo. Segundo Carneiro (2009), “os geossintéticos devem permitir a livre circulação de fluidos no seu plano. As aberturas dos geossintéticos devem ter dimensões que impeçam a passagem de partículas sólidas para o interior dos drenos”.
- **Reforço:** é o processo de utilização de materiais geralmente com resistência a tração elevada, que oferece melhorias na capacidade de carga do solo. Este método é utilizado principalmente na construção de aterros sobre solos moles. Os geotêxteis e as geogrelhas são usados para acrescentar resistência na massa de solo de forma a possibilitar a construção de taludes com grandes inclinações. (BATHURST, 2015)
- **Impermeabilização:** A função de barreira de fluidos ou gases é o método de utilização de materiais relativamente impermeáveis para conter a passagem de fluidos. Para exercer esta função, segundo Carneiro (2009), os geossintéticos têm de ser impermeáveis e contínuos, devem ser resistentes aos ataques químicos e não devem sofrer danos durante as operações de transporte, manuseamento e instalação. Geossintéticos com função de impermeabilização devem também apresentar resistências à tração, ao rasgamento, ao puncionamento, à temperatura e às radiações ultravioletas. (FERREIRA, 2010)
- **Controle de erosão:** O controle de processos erosivos é um método que tem o objetivo de reduzir os efeitos da erosão do solo causados pelo impacto da chuva e

pelo escoamento superficial da água. Por exemplo, barreiras de geotêxtil são usadas na retenção de sedimentos carregados durante o escoamento superficial. (BATHURST, 2015)

5.2 Tipos de geossintéticos

As aplicações dos geossintéticos têm sido numerosas, variando de acordo com o processo de fabricação e com a matéria prima utilizada, podendo exercer diversas funções. Os principais tipos encontrados são: geotêxteis, geogrelhas, georredes, geomembranas, geocompostos, geotubos, geocélulas e geoespaçador. A figura 5 exemplifica os tipos de geossintéticos citados.

Figura 5 – Tipos de geossintéticos



Fonte: Aguiar (2022).

2.1.1. Georredes

São geossintéticos constituídos de duas séries de membros extrudados paralelos, compostos geralmente de tiras de material sintético (filamentos de poliéster). Possuem alta porosidade, sendo sua principal função a de drenagem (BATHURST, 2015). Segundo Barbosa (2016), esse material pode ser utilizado juntamente com outros geossintéticos, como por exemplo o

geotêxtil para evitar que haja entupimento de suas aberturas, formando assim geocompostos de drenagem.

2.1.2. Geocompostos

Segundo Bathurst (2015), os geocompostos são geossintéticos formados pela associação de dois ou mais tipos de geossintéticos como, por exemplo: geotêxtil-georrede; geotêxtil-geogrelha; entre outros. Os geocompostos que fazem a utilização de geogrelhas ou georredes são utilizados principalmente para drenagem, podem ser utilizados por exemplo na construção de muros de arrimo, de forma a permitir a filtragem e drenagem da estrutura, formados por uma camada de geotêxtil, uma geomanta drenante interna e uma geomembrana.

Outra combinação comum é a utilização de geomembranas em contato com um geocomposto bentonítico (barreira geossintética argilosa), que é um composto de dois geotêxteis com preenchimento de material argiloso do tipo bentonítico. A barreira geossintética argilosa são instalados no fundo com o intuito de impermeabilizar, impedindo a percolação dos minérios para o interior do subsolo, e na cobertura para diminuir a infiltração da água da chuva.

2.1.3. Geotubos

São materiais poliméricos em formato cilíndrico nos quais, a principal função é de drenagem de líquidos ou gases. São encontrados perfurados ou não e podem ser fabricados de policloreto de vinila (PVC), polietileno de alta densidade (PEAD) ou polipropileno (PP). Os geotubos são bastante utilizados em aterros sanitários para coleta de chorume e, segundo Amaral (2019), esses materiais podem ser empregados também como drenos em obras viárias, ferroviárias ou rodoviárias; e na proteção costeira como dissipadores de energia das ondas do marítimas.

2.1.4. Geocélulas

Segundo Bathurst (2015), geocélulas são arranjos tridimensionais relativamente espessos, constituídos por tiras poliméricas interligadas a formarem um conjunto de células que são preenchidas com solo e, às vezes, concreto. As funções principais desse material são de reforço e controle de erosão.

2.1.5. Geoespaçador

É um produto com estrutura tridimensional constituída de forma a apresentar grande volume de vazios, utilizado como meio drenante.

2.1.6. Geogrelhas

Segundo Queiroz (2016), as geogrelhas “são geossintéticos constituídos de uma série de elementos lineares interligados de forma perpendicular, compostos geralmente de tiras de material sintético (filamentos de poliéster), com alta resistência à tração”. As geogrelhas possuem uma estrutura aberta, essa estrutura aberta permite a interação com o solo e são encontradas no mercado em diferentes tamanhos e espessuras. Estes materiais podem ser fabricados de poliamida (PA), poliéster (PET), polipropileno (PP) ou polietileno (PE).

A principal função da geogrelha é de reforço de solos. Ela é considerada unidirecional quando apresenta elevada resistência à tração apenas em uma direção e bidirecional quando apresenta elevada resistência à tração nas duas direções principais. (VERTEMATTI, 2001)

As geogrelhas podem ser aplicadas em obras de reforço de aterro para estabilização de muros de contenção de terra; reforço na camada de lastro sob ferrovias; melhoria da capacidade de sustentação do subleito mais fraco abaixo dos trilhos; estabilização de taludes; melhoria da capacidade de sustentação em solo granular debaixo de uma fundação rasa, entre outras aplicações. (SOBHAN, 2019)

2.1.7. Geomembranas

Geomembranas são mantas de baixa permeabilidade, contínuas e flexíveis, constituídas de um ou mais materiais sintéticos (BATHURST, 2015a). A principal função é de impermeabilização, porém são utilizadas também para barreira de gases ou vapores e para separação de solos. São mantas de superfície lisa ou rugosa. Podem ser fabricadas de policloreto de vinila (PVC), polietileno de alta densidade (PEAD) ou polipropileno (PP).

Em algumas aplicações, as geomembranas necessitam de cuidados especiais, pois dependendo da aplicação, estes produtos podem sofrer danos como em superfícies com materiais pontiagudos, impacto de elementos perfurantes ou materiais abrasivos transportados pela água (QUEIROZ, 2016). Uma possibilidade é a utilização de outro material geossintético com uma resistência maior para proteção das geomembranas, como por exemplo os geotêxteis.

Segundo Das e Sobhan (2019), “o aspecto mais importante da construção com geomembranas é a preparação de emendas, caso contrário, o motivo básico para usar geomembranas como barreira de líquido ou vapor será anulado”. Portanto, deve-se ter uma atenção maior na aplicação de geomembranas em situações de emendas, que podem ser feitas através de extrusão, fusão térmica, fusão química ou emenda adesiva.

Como a principal função da geomembrana é de barreira de gases e líquidos, este material é bastante empregado em obras hidráulicas e de saneamento ambiental. Segundo Queiroz (2016), as geomembranas são utilizadas como revestimentos em aterro de resíduos sólidos, lagoas de retenção e de tratamento de resíduos líquidos, lagoas artificiais para armazenamento de água para irrigação; canais de irrigação e/ou adução, entre outros.

2.1.8. Geotêxteis

Segundo a NBR ISSO 10318-1 (ABNT, 2021), os geotêxteis são produtos têxteis bidimensionais permeáveis, polímero (sintético ou natural), podendo ser não tecido, tricotado ou tecido, utilizado em contato com o solo e/ou outros materiais em aplicações, cujas propriedades mecânicas e hidráulicas permitem que desempenhe várias funções em uma obra geotécnica.

Em virtude da técnica de fabricação adotada ocorrem mudanças no tipo de estrutura do geotêxtil, sendo eles classificados, segundo a NBR ISO 10318-1 (ABNT, 2021) em: geotêxtil não-tecido, que é um produto feito de fibras, filamentos ou outros elementos direcional ou aleatoriamente orientados, interligados por processos mecânicos, térmicos ou químicos; geotêxtil tecido, que é um produto oriundo do entrelaçamento de fios, monofilamentos ou laminetes (fitas), seguindo direções preferenciais de fabricação; e geotêxtil tricotado, que é um produto produzido pelo entrelaçamento de um ou vários fios, filamentos ou outros elementos.

Dentre os tipos citados, o geotêxtil não tecido é o mais utilizado para solução em drenagem e filtragem. O fato de ser um material industrial o põe em uma posição privilegiada de praticidade e economia de recursos em comparação aos filtros granulares convencionais. Segundo Vertematti (2015), outras vantagens que o material apresenta são, que possui uma espessura menor, tem características controladas e regulares, detém uma continuidade da

estrutura filtrante (mesmo em caso de recalques) e traz uma facilidade de instalação e menor custo.

5.3 Propriedades relevantes

Para aplicação em obras hidráulicas com funções de drenagem, filtragem e impermeabilização duas propriedades de especial interesse são a permissividade e a transmissividade. A primeira é a propriedade que correlaciona o coeficiente de permeabilidade normal ao plano e a espessura do geossintético sob determinada tensão, e depende especialmente da distribuição e da dimensão das aberturas do geossintético (CARNEIRO, 2009).

A segunda é o produto da permeabilidade no plano pela sua espessura sob determinada tensão normal de confinamento. Alguns materiais permitem a passagem de fluidos ao longo do seu corpo, entretanto, essa vazão depende dos esforços normais aplicados, pois, à medida que o geossintético se comprime, a vazão no plano decresce (BUENO; VILAR, 2015).

O comportamento dos filtros geotêxteis não tecidos, por exemplo, é afetado pelos níveis de tensão na obra, pois esses materiais são muito compressíveis em comparação com as camadas de filtros granulares. Outro aspecto que afeta o desempenho de um filtro geotêxtil é a possibilidade de ser impregnado com partículas do solo durante o espalhamento e compactação do solo (PALMEIRA e GARDONI, 2002).

Segundo Bueno e Vilar (2015), "A seleção dos geossintéticos para atender às exigências da obra deve se basear em propriedades de engenharia que traduzam as condições técnicas a que serão submetidos quando em serviço". Devido ao alto controle de qualidade na produção dos geossintéticos, para cada obra os geossintéticos devem atender as características e ter as propriedades hidráulicas, físicas, mecânicas e de durabilidade requeridas na especificação dos projetos.

Para atender aos critérios de durabilidade, é de grande importância analisar como os geossintéticos irão reagir a exposição da luz do sol, aos agentes químicos e biológicos ao qual serão submetidos, além de perfurações que podem ocorrer durante a instalação ou por funcionamento de materiais dos locais onde foram aplicados. Devido a isso é necessário o estudo das seguintes características de durabilidade desses produtos para uma análise do

tempo de vida útil que terão no projeto: fluência, resistência a agentes químicos, resistência a agentes biológicos, resistência aos raios U.V. e resistência à abrasão.

6. APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS EM BARRAGENS

Atualmente, dispõem-se de uma grande variedade de geossintéticos para utilização nas mais variadas obras de engenharia. Devido à suas múltiplas funções e por terem a sua eficiência comprovada, eles passaram a ser aplicados com frequência em obras de barragens de rejeito.

Os geossintéticos possuem diversas vantagens em relação às soluções convencionais, dentre elas destacam-se:

- São materiais de construção manufaturados e, portanto, submetidos a controle de qualidade que garante a consistência e confiabilidade nas suas propriedades e características relevantes para este tipo de aplicação.
- A instalação de camadas de geossintéticos para impermeabilização (geomembranas) ou para drenagem e filtração (geotêxteis e georredes) é substancialmente mais fácil que a compactação de camadas argilosas. Em vista disso, a redução do tempo para a execução da obra pode ser bastante significativa;
- Os geossintéticos são camadas de pequena espessura e, por isso, ocupam pouco espaço na área de disposição em contraste com camadas de argila compacta ou de drenos de areia. O volume economizado pode ser então ocupado pelo resíduo a ser disposto;
- A utilização de geossintéticos é particularmente interessante em regiões com escassez de materiais naturais apropriados ou em regiões de difícil acesso;
- A tecnologia de geossintéticos avança a cada dia, já se dispendo de características e funções diversas em um mesmo produto. Exemplo disso são as geomembranas que permitem a localização de vazamentos através de monitoramento remoto e geotêxteis com propriedades eletro-cinéticas, por exemplo.

7. ESTUDOS DE CASO

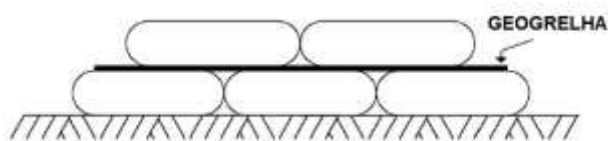
7.1 Geossintéticos na retenção de materiais em barragens de rejeitos – Mattos et al. (2019)

Em barragens de rejeitos, geotubos podem ser usados preenchidos com rejeitos do próprio reservatório, tendo como principais finalidades a retenção dos finos e tornar a barragem mais resistente. Mattos et al (2019) avaliou a estabilidade de disques construídos com tubos de geotêxtil, de forma a aumentar a capacidade de confinamento de rejeitos em áreas adjacentes ao dique principal de uma barragem de rejeitos.

Os tubos de geotêxtil podem ser empilhados e posicionados nos locais mais adequados das barragens, formando assim diques auxiliares. Esses diques, são compostos pelo próprio rejeito adensado nos tubos, diminuindo o volume desse material no reservatório e conferindo a ele uma utilidade.

A Figura 6 exemplifica o empilhamento dos tubos de geotêxtil após o preenchimento com rejeito, onde a geogrelha está também presente como elemento de reforço em todas as camadas.

Figura 6 – Seção transversal representativa do dique.



Fonte: Mattos et al. (2009).

Neste estudo, foram consideradas as características do geotêxtil não-tecido de poliéster (PET) para a composição dos tubos, tais como, resistência à tração faixa larga, permeabilidade normal e abertura aparente. Para a análise de estabilidade dos diques com reforço, foram consideradas geogrelhas tecidas de poliéster (PET), variando os modelos de geogrelha de GG 35 com tensão admissível de 20,20 kN/m à GG 200 com tensão admissível de 115,44 kN/m. A Empresa Samarco disponibilizou os parâmetros de rejeito utilizados neste estudo, e são referentes aos dados da Barragem de Germano, situada em Minas Gerais. A tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados.

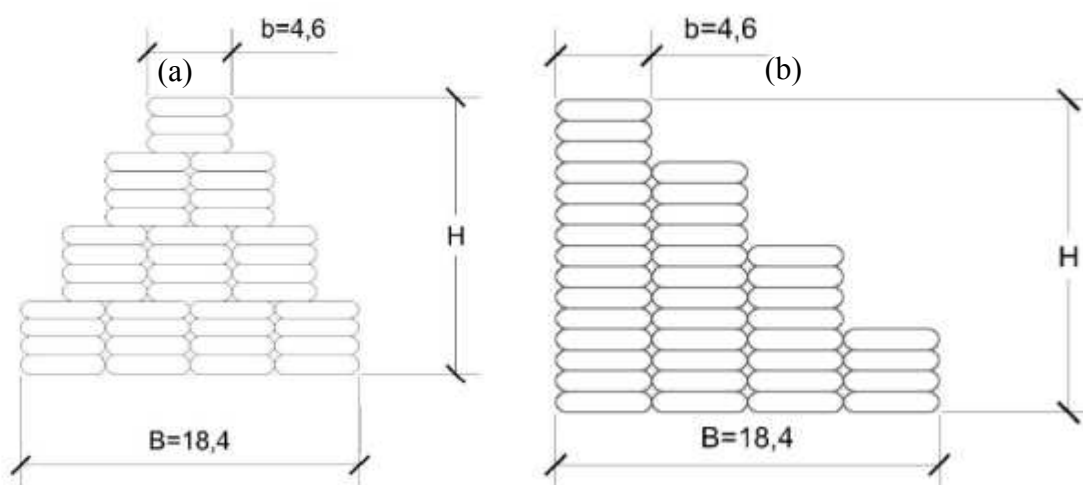
Tabela 1 - Parâmetros do rejeito utilizados.

Rejeito	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Rejeito Não Drenado	20	0	31,9
Rejeito Drenado	20	5	34,5

Fonte: Mattos et al. (2009).

Foram analisadas duas configurações de empilhamento para os diques, apresentados na Figura 7, sendo H a altura do empilhamento, que é a variável estudada.

Figura 7 – Seções transversais: (a) modelo 1 e (b) modelo 2. Dimensões em metros.



Fonte: Mattos et al. (2009).

Para as duas configurações foram realizadas análises com reforço de geogrelha e sem o reforço. Verificou-se a estabilidade externa levando em consideração o deslizamento, o tombamento, a capacidade de carga da fundação e a estabilidade global da estrutura. E para a estabilidade interna foram considerados a ruptura e o arrancamento do reforço.

A altura crítica encontrada para as duas configurações foi superior nos testes feitos com reforço de geogrelha. O modelo 2 apresentou resultados mais elevados de altura, sendo capaz de armazenar mais rejeito, tanto dentro dos tubos, como na região à montante do dique. Sendo assim, é possível afirmar que a utilização de tubos de geotêxtil, como elemento de construção de diques auxiliares em barragem de rejeitos, aliviará as tensões no barramento principal, aumentando a segurança da barragem e evitando acidentes.

7.2 Geomembranas filtrantes em barragens de rejeito – Sampaio (2013)

Sampaio (2013) realizou um experimento de campo com o objetivo de investigar o desempenho de geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD), e de geotêxtil poliéster em uma barragem de rejeitos de ouro de Jacobina, situada no estado da Bahia, da empresa Yamana Gold. Foram avaliadas as propriedades físicas das geomembranas PEAD, com espessuras de 1,5 mm, texturizadas em uma e em ambas as faces. O geotêxtil ensaiado foi do tipo não-tecido agulhado de filamento contínuo, com gramatura de 400 g/m³. Nos ensaios foram utilizadas amostras virgens e amostras que foram submetidas ao ensaio de degradação química, foram ensaiadas também amostras de geomembrana de PEAD exumadas da barragem.

Para verificação do desempenho da geomembrana e do geotêxtil ao longo da vida útil da barragem, foram realizados ensaios de cisalhamento direto, dano mecânico, durabilidade e resistência à tração, procurando simular em laboratório as condições de campo. As geomembranas foram utilizadas no sistema de impermeabilização da barragem, fundação, reservatório e talude de montante do maciço. O geotêxtil, com a função de filtro, foi implantado sob o sistema de drenagem interna entre as camadas de *underflow* e brita.

Nos resultados dos ensaios de dano mecânico por compressão, os geossintéticos aplicados na barragem de Jacobina apresentaram comportamento satisfatório para tensões de até 1.000 kPa, para os materiais em contato com o *underflow* e o *overflow*; e até 500 kPa para os materiais em contato com a brita. Ressalta-se que, no ensaio de dano da geomembrana em contato com a brita foi considerado o geotêxtil como material de proteção.

Nos ensaios de tração máxima, as amostras após degradação, em geral, apresentam um aumento de resistência de 20%. A degradação é a perda de plastificantes e aditivos, ocasionando um enrijecimento do material. O aumento de resistência verificado é derivado deste enrijecimento, não havendo, portanto, ganho de resistência mecânica.

Os ensaios de durabilidade e a exumação da amostra de campo permitiram avaliar a degradação do geotêxtil e da geomembrana tendo como base os resultados obtidos nas amostras virgens. Em geral, as amostras de geomembranas degradadas apresentaram resistência à tração simples, enrijecimento e deformação máxima na ruptura inferior em cerca de 27% aos valores obtidos para as amostras virgens. As amostras exumadas apresentaram deformação máxima na ruptura superior às amostras submetidas ao ensaio de durabilidade.

Já com o geotêxtil, as amostras após degradação apresentaram um aumento de resistência em torno de 36% que, é decorrente do enrijecimento do material. Notou-se que após o ensaio de durabilidade as amostras apresentaram deformação máxima na ruptura inferior em cerca de 14% após 1 mês de imersão no fluido e 32% após o período de 8 meses, em relação as amostras virgens.

As diferenças encontradas nos resultados de resistência a tração são devido à diferença de propriedades físicas das amostras ensaiadas, uma vez que a amostragem realizada foi do tipo aleatória-estratificada. Para reduzir essa diferença é necessário que seja avaliada a variabilidade da gramatura e da espessura das amostras.

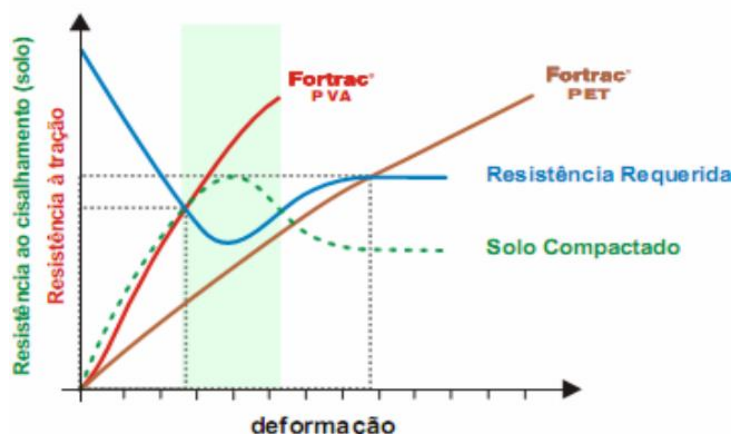
Devido à limitação de tempo da dissertação, não foi possível a realização dos ensaios de durabilidade com tempos maiores de imersão dos materiais no fluido da barragem. Porém, concluiu-se a partir dos resultados obtidos e em referências bibliográficas, que para obras de grande porte e condições críticas como a que está sendo analisada, que as amostras de geotêxteis apresentaram comportamentos semelhantes aos verificados nas geomembranas, e que os materiais não sofreram grandes danos, e estimou-se que a vida útil da geomembrana de PEAD poderia chegar a até 150 anos quando submetida a temperatura de 251°C e vida útil superior a 300 anos a 151 °C e 400 anos a 101 °C

7.3 Reforço com geogrelha de PVA em barragens de rejeito – Silva et al. (2008)

A refinaria de alumina da fábrica Alcoa, situada na cidade de Poços de Caldas, Minas Gerais, vem construindo áreas de disposição de resíduo de bauxita, e em razão dos riscos ambientais, foi estudada uma solução de alteamento final do dique perimetral em solo reforçado com face bastante verticalizada, reforçado com geogrelhas de alto módulo de rigidez. Em função da característica do lodo depositado com elevado grau de contaminação por soda cáustica, geogrelhas de poliálcool vinílico ou álcool de polivinila (PVA) foram utilizadas a fim de garantir a resistência química do material de reforço e sua durabilidade, em um eventual contato direto com o resíduo contaminado.

Os filamentos de PVA apresentam duas características marcantes: elevada tenacidade e elevada estabilidade química. Foi relatado que as geogrelhas disponíveis no mercado atingem um pico de resistência a deformação de 5%, sendo compatíveis com a deformação típica de solos granulares e solos lateríticos compactados (Figura 8).

Figura 8 - Ilustração esquemática do conceito de compatibilidade de deformações da geogrelha de PVA com o solo.



Fonte: Silva et al (2008)

No projeto foram utilizadas 9 camadas de geogrelha com espaçamentos entre camadas de 0,4 a 0,6 m, e resistência nominais de 35 kN/m nas 3 camadas superiores e de 55 kN/m nas 6 camadas inferiores, compondo um alteamento de 5 m. A proteção externa da face, mostrada na Figura 9, consistiu em bolsas de solo orgânico com sementes, envelopadas com as geogrelhas, e uma biomanta para controle da erosão, que cobre toda a superfície, posteriormente hidrossemeada.

Figura 9 - Vista frontal do aterro reforçado durante os trabalhos de hidrossemeadura.



Fonte: Silva et al (2008)

Para avaliação do desempenho da solução, foram instrumentadas duas seções da obra, cuja análise foi resumida em:

- *Tell-tales* nas camadas de geogrelhas localizadas a 40 cm, 190 cm e 370 cm de altura, para avaliação dos deslocamentos horizontais no material.
- Marcos superficiais na face da contenção registraram deslocamentos horizontais máximos de 25 mm e 50 mm a uma altura de 2 m na contenção, representando 1,25% da altura total construída.
- Os deslocamentos horizontais foram monitorados por *tell-tales* posicionados nas camadas de geogrelhas localizadas a 40 cm, 190 cm e 370 cm de altura. Estes instrumentos mostraram aumento dos deslocamentos à medida em que as geogrelhas foram entrando em carga. Os deslocamentos horizontais medidos próximos à face foram bastante similares aos valores medidos pelos marcos topográficos instalados em alturas semelhantes.
- Caixas suecas na base da contenção mediram recalques da ordem de 40 mm e 10 mm nas seções das estacas e não foram observados recalques diferenciais entre os pontos de medição.
- Em teste de carregamento de 12 horas, utilizando um caminhão carregado com peso estimado de 380 kN, a instrumentação instalada não indicou nenhuma movimentação significativa na face da contenção. Os autores interpretaram esses resultados como consequência das tensões previamente aplicadas pelos equipamentos de compactação, que foram da ordem de 100 kPa, em média cinco vezes maiores que aquelas devidas ao carregamento do teste de sobrecarga. Este exemplo evidenciou os efeitos benéficos da compactação no desempenho pós construtivo das estruturas de solo reforçado com reforços de alta rigidez.

Com isso, os autores relatam que foi possível constatar, após 4 anos da implantação na obra, que a solução em aterro reforçado com geogrelha para alteamento da área de disposição de resíduo de bauxita mostrou-se satisfatória para a ocupação de um terreno montanhoso, com significativa redução do volume de terraplenagem e do impacto ambiental na implantação da obra. Outra consequência direta da solução adotada foi a redução nos prazos de obra.

7.4 Utilização de geotêxtil e geocomposto para filtro drenante em minério de ferro – Moreira (2011).

Em Carajás/PA, o minério de ferro *sinter feed* (SFCJ) extraído pela Companhia VALE S.A, possui umidade final elevada, o que torna o processo de comercialização oneroso. Diante disso, Moreira (2011) buscou formas de reduzir a umidade adquirida durante os processos de estocagem e transporte, avaliando então, o comportamento de sistemas filtro-drenantes com a utilização de geossintéticos.

Foram realizados ensaios de filtração, ensaios especiais de secagem com a utilização de vácuo e avaliação do desgaste abrasivo dos materiais sintéticos utilizando amostras virgens de geotêxteis não-tecidos agulhados, geocomposto MacDrain R.2 e geocomposto MacDrain 2L 20.2.

No sistema SFGA, os resultados obtidos mostram que não houve variação brusca da permeabilidade e do corpo de prova com o aumento da tensão aplicada. Com relação a vazão, pode-se observar um comportamento inverso ao carregamento, à medida que o carregamento foi aumentando, a vazão diminuía.

No sistema SFGB, observou-se que o valor de GR se apresentou bastante sensível com a variação do carregamento. Esse fato pode ser explicado por possíveis deslocamentos de partículas finas para a parte inferior do corpo de prova, justamente no contato do geotêxtil com o minério de ferro. Observa-se que ao final do ensaio, após a aplicação da tensão vertical de 3000 kPa, o valor de GR se apresentou superior a unidade, o que pode significar algum grau de colmatação do geotêxtil.

Para os sistemas SFGm e SFGr, a variação da vazão apresentou tendência de aumento, acompanhando a elevação do gradiente hidráulico. Já o valor de GR, se apresentou pouco sensível com a variação do carregamento, de maneira geral, os resultados se apresentaram próximos de 1,0, sendo o valor mais elevado. Valor de GR próximo durante toda a execução do ensaio indica que o geossintético utilizado não influenciou de forma significativa o regime de fluxo do sistema.

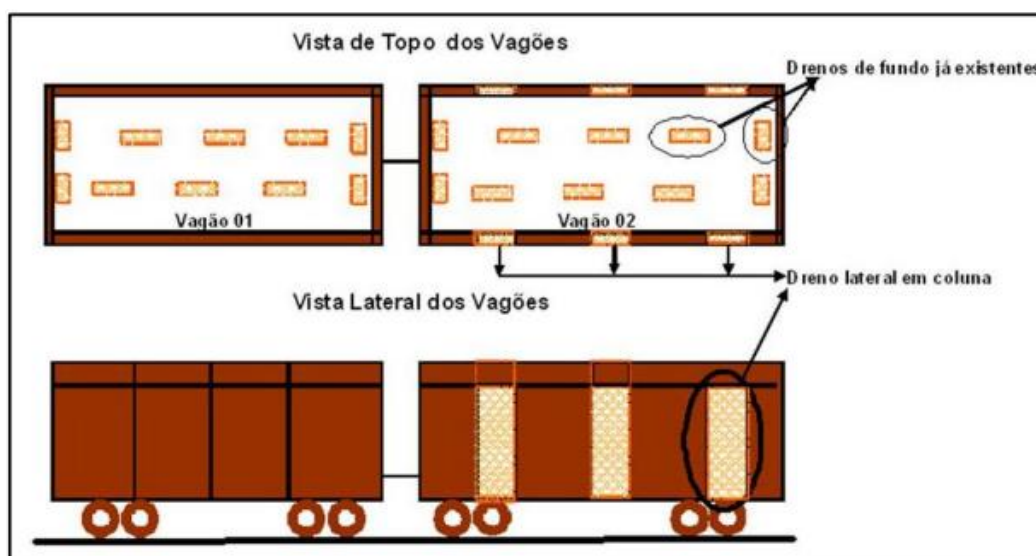
Nos ensaios de redução de umidade com aplicação de vácuo, foi observado de maneira geral que os valores de umidade final foram significativos, da ordem de 26% chegando a 34% de umidade volumétrica final. Os valores de umidade obtidos para a região do topo da amostra

se apresentaram menores do que os valores de umidade na região da base. Isso foi explicado pelo fato de o vácuo proporcionar um movimento vertical da água dentro do corpo de prova. Dessa maneira, ao sair do topo, também impulsionado pela gravidade, a água faz o percurso descendente.

Os ensaios de Abrasão Amsler para geotêxteis foram realizados com dois tipos de materiais abrasivos: areia número #50 com 92% de sílica e com o minério de ferro *sinter feed* (SFCJ). Os resultados do desgaste abrasivo do material sintético para as amostras ensaiadas com minério de ferro, foram aproximadamente 62% menores do que com areia. Os resultados obtidos nos ensaios mostraram que os processos de abrasão verificados para os dois tipos ensaiados foram de desagregação superficial e de separação das fibras do geotêxtil. O geotêxtil de menor espessura (400 g/m²) apresentou maior desgaste superficial.

Nas simulações computacionais realizadas com o auxílio do *software* VADOSE/W para as condições de transporte (vagões) e estocagem (pilha), foi observado que a utilização conjunta dos drenos de poliuretano e o geossintético contribuem mais significativamente para a redução de umidade do minério de ferro com relação a utilização de apenas um sistema de dreno ou o uso de nenhum sistema de dreno. Na figura 10 podemos observar a localização dos drenos de fundo de poliuretano e dos drenos laterais de geossintéticos.

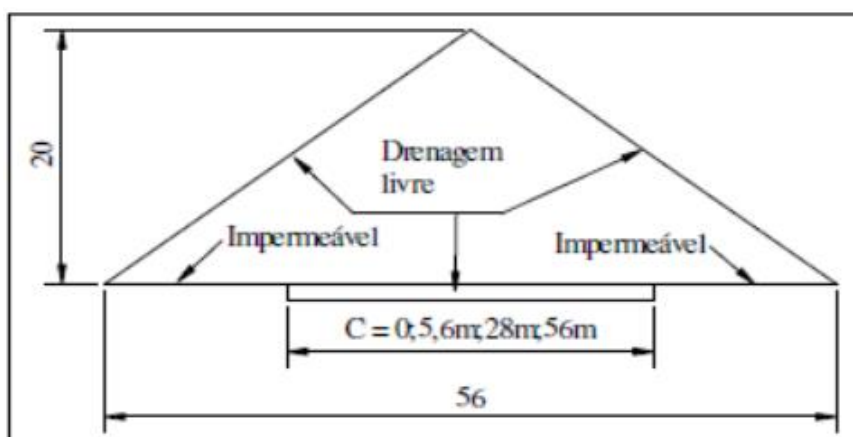
Figura 10 - Localização dos drenos de fundo de poliuretano e dos drenos laterais de geossintéticos



Fonte: Moreira (2011)

A pesquisa concluiu que a utilização de geossintéticos pode ser uma opção valiosa para o sistema de drenagem em pilhas de minério de ferro, especialmente quando o objetivo é reduzir a umidade durante o armazenamento. Os resultados indicaram que um sistema de drenagem com uma largura de 28 metros oferece resultados tão satisfatórios quanto um sistema de drenagem com 56 metros de largura (a base da pilha). Na figura 11, podemos observar a disposição do sistema de drenagem.

Figura 11 - Condições de contorno analisadas



Fonte: Moreira (2011)

No entanto, observou-se que a umidade no interior da pilha de minério permaneceu praticamente inalterada, sendo que o dispositivo de drenagem mais amplo (56 metros) afetou principalmente o escoamento superficial da pilha.

8. ANÁLISE

Os trabalhos relatados apontam para resultados promissores na aplicação de geossintéticos em barragens de rejeito quando desempenhando as funções de reforço do solo, impermeabilização, drenagem, filtração e proteção.

No caso da pesquisa de Mattos et al. (2009), foram alcançados resultados satisfatórios na construção de disques para barragens de rejeitos constituídos de tubos de geotêxtil para armazenamento dos próprios rejeitos. A utilização de geogrelha para reforço entre as camadas, aumentou a resistência, sendo possíveis maiores alturas para as barragens.

Sampaio (2013), verificou que geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD), podem ser utilizadas para impermeabilização de barragens, tendo uma vida útil de até 400 anos dependendo da temperatura dos rejeitos. Também foi verificada a utilização de geotêxtil

com a função de filtro no sistema de drenagem interna, mostrando resultados igualmente satisfatórios.

Silva et al. (2008), estudou uma solução de alteamento final do dique perimetral em solo reforçado com face verticalizada com geogrelha de poliálcool vinílico (PVA). No estudo foi possível constatar que a solução em aterro reforçado com a geogrelha resultou em redução do volume de terraplenagem e do impacto na implantação da obra.

Por fim, Moreira (2011) buscou formas de reduzir a umidade adquirida durante os processos de estocagem e transporte de rejeitos de minério de ferro, avaliando então, o comportamento de sistemas filtro-drenantes com a utilização de geotêxteis e geocompostos. Os resultados apontaram uma melhora de 30% na redução da umidade dos rejeitos, otimizando o transporte do mesmo.

Esses estudos ressaltam a eficiência e a viabilidade dos geossintéticos como soluções fundamentais nas barragens de rejeitos, oferecendo benefícios significativos em termos de desempenho estrutural, sustentabilidade e otimização dos processos relacionados ao armazenamento e transporte de resíduos. Comprovam também a importância contínua da pesquisa e do desenvolvimento na área de geossintéticos, visando avanços ainda maiores na engenharia geotécnica e nas práticas de construção de barragens de rejeitos.

9. CONCLUSÃO

A aplicação de geossintéticos em barragens de rejeitos tem se mostrado uma abordagem promissora e eficaz para melhorar a segurança, a sustentabilidade e a eficiência dessas estruturas. A utilização desses materiais na drenagem, filtração, proteção, reforço e impermeabilização oferece uma série de vantagens, incluindo a redução do consumo de recursos naturais, a otimização de projetos e a prevenção de problemas.

Observando os aspectos discutidos, é possível perceber que existem diversas alternativas interessantes da aplicação de geossintéticos nas obras de barragens de rejeito. Nas situações de impermeabilização, utilizando geomembranas, por exemplo, existem vantagens no sentido de ser uma alternativa eficiente e com possíveis benefícios econômicos para a obra.

Os tubos de geotêxtil, como elemento de construção de diques auxiliares em barragem de rejeitos também são boas soluções, pois mostrou-se que são capazes de aliviar as tensões no barramento principal, aumentando a segurança das barragens e evitando acidentes.

É importante destacar que a evolução contínua na fabricação e no desenvolvimento de geossintéticos oferece oportunidades para aprimorar ainda mais o desempenho desses materiais em barragens de rejeitos. Novas tecnologias e técnicas estão sendo aplicadas para criar geossintéticos mais duráveis, resistentes e adaptáveis às demandas específicas desse contexto.

No entanto, é fundamental que a aplicação de geossintéticos em barragens de rejeitos seja realizada de forma responsável, levando em consideração as características geotécnicas e os desafios particulares de cada empreendimento. Estudos de viabilidade, monitoramento contínuo e boas práticas de engenharia são essenciais para garantir a eficácia e a segurança dessas soluções.

Embora a análise dos trabalhos revisados tenha proporcionado informações valiosas sobre as aplicações de geossintéticos em barragens de rejeitos, é importante ressaltar que poucos estudos abordaram especificamente a questão da durabilidade e desempenho a médio e longo prazo desses materiais. Para garantir a eficácia e sustentabilidade das barragens de rejeitos, é necessário investigar mais a fundo a vida útil, degradação e resistência ao longo do tempo. A falta dessas investigações é uma lacuna evidente na literatura existente, e é fundamental preencher essa lacuna por meio de futuras pesquisas. É somente por meio de um estudo aprofundado desses fatores que poderemos maximizar a eficiência e confiabilidade dessas estruturas cruciais e mitigar potenciais riscos ambientais a médio e longo prazo.

Em suma, a aplicação de geossintéticos em barragens de rejeitos apresenta benefícios significativos e promove avanços importantes na engenharia geotécnica. Com uma abordagem adequada e o uso dos materiais corretos, é possível melhorar a qualidade, a segurança e a sustentabilidade das barragens de rejeitos, contribuindo para um futuro mais resiliente e responsável na indústria da mineração.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 10318-1 – Geossintéticos – Parte 1: Termos e definições**. Rio de Janeiro, RJ, 2021. 9p.

AGUIAR, L. E. R. **O que são e para que servem os geossintéticos?**. Engenharia 360. 08 de dezembro de 2022. Disponível em: <<https://engenharia360.com/produtos-ecologicos-sustentaveis/>>. Acesso em: 10 de julho de 2023.

AMARAL, N. B. do. **Geossintéticos aplicados a geotecnia ambiental**. João Pessoa, 2019. 82 f.

BARBOSA, C. C. **A Utilização de Materiais Geossintéticos em Barragens de Terra e Enrocamento**. João Pessoa: UFPB, 2016.

BARRAGENS. In: DICIO, **Dicionário Online de Português**. Porto: 7Graus, 2020. Disponível em: <<https://www.dicio.com.br/barragens/#:~:text=Significado%20de%20barragem,da%20minera%C3%A7%C3%A3o%20de%20res%C3%ADDUOS.>>. Acesso em: 13 maio de 2023.

BATHURST, R. J. **Funções dos geossintéticos**. Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS). Tradução Karla C. A. P. Maia. [Brasília]: IGS BRASIL, [2015]. Disponível em: <http://igsbrasil.org.br/wp-content/uploads/geossinteticos/2.pdf>. Acesso em: 20 de jul. 2022.

BEIRIGO, E. A. **Comportamento filtro-drenante de geotêxteis em barragens de rejeitos de mineração**. 2005. 210 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. **Propriedades, ensaios e normas**. In: VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 2. ed. São Paulo: Bluncher, 2015. Cap. 3, p. 47-84.

CARNEIRO, J. R. C. **Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de carácter ambiental: a importância da incorporação de aditivos químicos**. 2009. Dissertação (Doutoramento em Engenharia do Ambiente) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2009.

CRUZ, P. T. **100 Barragens Brasileiras, Casos Históricos, Materiais de Construção, Projetos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos. 2004.

DAS, B. M.; SOBHAN, K. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. Tradução Livia Koepl e Priscilla Rodrigues Lopes. São Paulo: Cengage, 2019.

DE BARRAGENS, COMITÊ BRASILEIRO. **Barragens de rejeitos no Brasil**. Rio de Janeiro: CBDB, 2012.

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**. UFMG. Belo Horizonte. 2008.

ERSOY, B. ; HASELSTEINER, R. **The seepage analysis of the embankment dams of flood retention basin in Poland**. In: Proceedings do 26th International Commission on Large Dams Congress, Austria. pp. 1635-1646. 2018.

FERNANDES, R. B. **Manual para elaboração de planos de ação emergencial para barragens de mineração**. Editor Melt Comunicação. Belo Horizonte, 2017.

FERREIRA, F. B. **Comportamento das interfaces solo - geossintético**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Odo Porto, Porto, 2010.

FREITAS, R. A. **Comportamento de geotêxteis como filtro em resíduo – Fosfogesso e Lama Vermelha**, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

HSUAN, YG; KOERNER, RM. **Vida útil de depleção de antioxidantes em geomembranas de polietileno de alta densidade**. Revista de Engenharia Geotécnica e Geoambiental, v. 124, n 6, p;532-541, 1998.

ICOLD. **Internal Erosions of Existing Dams, Levees and Dikes, and Their Foundations**. **Bulletin** 164. International Commission on Large Dams Committee on Embankment Dams: Paris. 292 p. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração/Instituto Brasileiro de Mineração**; organizador, Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. - Brasília: IBRAM, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Relatório Anual de Atividades: Julho 2018 a Junho 2019**. Relatório Anual de Atividades, [s. l.], IBRAM, 2019.

MATTOS, Carolina Moraes et al. **Uso de Tubos de Geotêxtil em Barragens de Rejeitos**. In: XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul. 2019.

MARQUES Filho, P. L., & Geraldo, A. **Barragens e reservatórios**. Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, 1998.

MENESES, Leonardo Antônio de. **Utilização de geocélulas em reforço de solo mole**. 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo

MOREIRA, Thiago Borges Gomes. **Avaliação de sistemas de drenagem com geossintéticos para diminuição da umidade no minério de ferro da Serra de Carajás**. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

PALMEIRA, E. M., GARDONI, M. G. A. **Drainage and filtration properties of non-woven geotextiles under confinement using different experimental techniques**. *Geotextile and Geomembrane*, Vol. 20, n. 2, p. 97-115, Apr. 2002.

PEDRONI, B. **Uso de Geossintéticos em Barragens de Terra e Enrocamento**. Geosynthetic.net.br. 25 de maio de 2018. Disponível em: <<https://www.geosynthetic.net.br/uso-de-geossinteticos-em-barragens-de-terra-e-enrocamento/>>. Acesso em: 10 de julho de 2023.

QUEIROZ, R. C. **Geologia e geotecnia básica para engenharia civil**. São Paulo: Bluncher, 2016.

RAFAEL, H. M. A. M. **Análise do Potencial de Liquefação de uma Barragem de Rejeito**. Dissertação de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. PUC – Rio. Rio de Janeiro. 2012.

RESENDE, Tamires Gomes. **A Importância da Gestão de Riscos num Projeto de Mineração – Barragem de Rejeito**. (Monografia). Curso de Graduação em Engenharia de Minas. UEMG - Universidade Estadual de Minas Gerais. João Monlevade. Minas Gerais. 2016.

RIBEIRO, J. C. J.; MENDES, S. S. F. **A participação no fechamento de mina no direito comparado.** *Veredas do Direito: Direito Ambiental e Desenvolvimento Sustentável*, v. 10, n. 20, p. 23-54, 2013.

SAMPAIO, S.S. **Estudo do comportamento de barreiras poliméricas em sistemas de disposição de rejeito de minério de ouro.** Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Universidade Federal de Minas Gerais, MG, Brasil, 2013.

SHWEITZER, Ricardo. **Indústria de mineração no mundo inteiro reagindo a Brumadinho.** Manchester United, 18 de nov 2019. Twitter: @_rschweitzer. Disponível em: <https://twitter.com/_rschweitzer/status/1196502122264768515?lang=ar-x-fm>. Acesso em: 25 de jul 2022.

SILVA, A. E. F. et al. **Dique Reforçado com Geogrelha de PVA na Ampliação de Área de Deposição de Rejeitos Quimicamente Agressivos.** XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2008.

SILVA, D. S. **Estudo de filtro aplicado ao controle de erosão interna em barragens.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 181p. 2016.

SOARES, L. **Barragem de Rejeito.** CETEM: Coordenação de Processos Mineraiis – COPM. Rio de Janeiro. 2010. Disponível em <<http://mineralis.cetem.gov.br:8080/bitstream/cetem/769/1/CCL00410010.pdf>>. Acesso em 02 mai 2022.

SOBHAN, K. et al. **Bearing Capacity of Eccentrically Loaded Surface Circular Foundation on Sand of Limited Thickness.** In: *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges.* IOS Press, 2019. p. 1206-1213.

THOMÉ, R.; PASSINI, M. L. **Barragens de rejeitos de mineração: características do método de alteamento para montante que fundamentaram a suspensão de sua utilização em Minas Gerais.** *Ciências Sociais Aplicadas em Revista*, v. 18, n. 34, p. 49-65, 2018.

VERTEMATTI, J. C. **Manual brasileiro de geossintéticos.** 2. ed. São Paulo: Bluncher, 2015. Cap. 1, p. 17-30.

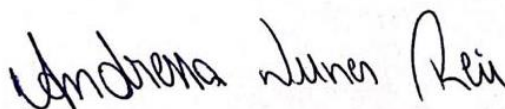
VERTEMATTI, J. C. **Curso básico de geotêxteis**. Comitê Técnico Geotêxtil (CTG) da Associação Brasileira das Indústrias de Não tecidos e Tecidos Técnicos (ABINT). São Paulo: ABINT, 2001.

VIANNA, L. F. V. **Metodologias de análise de risco aplicadas em planos de ação de emergência de barragens: auxílio ao processo de tomada de decisão**. Mestrado em Geotecnia e Transportes. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte. 2015.


VIDAL, D. **Geossintéticos: Terminologia e Normalização de Geossintéticos**. Seminário sobre aplicações de Geossintéticos em Geotecnia, GEOSINTÉTICOS'92, UNB, Brasília, DF, pp 21-34. 1992.

FOLHA DE ASSINATURAS

Uberlândia, 25 de junho de 2023.



Discente: Andressa Nunes Reis

 Documento assinado digitalmente
GIOVANA BIZAO GEORGETTI
Data: 14/07/2023 11:24:41-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Orientadora: Giovana Bizão Georgetti