



**CENTRO UNIVERSITÁRIO CHRISTUS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

ISIS MAGALHÃES ARAÚJO

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE MATERIAIS GEOSSINTÉTICOS EM FUNDAÇÕES
DE BARRAGENS DE TERRA**

**FORTALEZA
2021**

ISIS MAGALHÃES ARAÚJO

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE MATERIAIS GEOSSINTÉTICOS EM FUNDAÇÕES
DE BARRAGENS DE TERRA

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado ao curso de Engenharia Civil
do Centro Universitário Christus, como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Prof^a. MSc Ivelise Marconi
Strozberg

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Centro Universitário Christus - Unichristus
Gerada automaticamente pelo Sistema de Elaboração de Ficha Catalográfica do
Centro Universitário Christus - Unichristus, com dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A658a Araújo, Isis Magalhães.
Análise da aplicação de materiais geossintéticos em
fundações de barragens de terra / Isis Magalhães Araújo. - 2021.
60 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro
Universitário Christus - Unichristus, Curso de Engenharia Civil,
Fortaleza, 2021.

Orientação: Profa. Ma. Ivelise Marconi Strozberg.

1. Geossintéticos. 2. Barragens. 3. Fundações. 4. Percolação.
I. Título.

CDD 624

ISIS MAGALHÃES ARAÚJO

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE MATERIAIS GEOSSINTÉTICOS EM FUNDAÇÕES
DE BARRAGENS DE TERRA

TCC apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Christus, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Prof^a. MSc Ivelise Marconi Strozberg

Aprovada em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. MSc Ivelise Marconi Strozberg
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

Prof. MSc Euclides Lourenço de Melo Neto
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

Prof^a. MSc Raphaele Silva de Almeida
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe, Tereza Magalhães, pelo carinho, afeto e dedicação, por todo o esforço para me proporcionar a melhor educação possível, por todo o incentivo e apoio incondicional em todas as minhas decisões.

Agradeço à minha orientadora, professora Ivelise Marconi Strozberg, pela oportunidade e apoio na elaboração desse trabalho, por todo o suporte no pouco tempo que tivemos e por toda paciência e dedicação.

Meus singelos agradecimentos a todos meus professores, pelo conhecimento partilhado ao longo desses anos, não só o conhecimento técnico, como os ensinamentos para vida, que foram fundamentais na formação do meu caráter.

Agradeço ao Lucas Oliveira Vale, por toda a ajuda na elaboração desse trabalho, que disponibilizou seu tempo para me auxiliar com o *software* utilizado no estudo de caso.

Agradeço ao meu namorado, Camilo Henrique, por estar ao meu lado durante essa caminhada, por sempre segurar minha mão e me levantar nos momentos de fraqueza, por me escutar, me entender e me apoiar em todos os momentos.

Agradeço à minha amiga, Sarah Jamille, por sua amizade verdadeira durante todos esses anos, por sempre estar presente para me aconselhar e me incentivar.

A todos, o meu muito obrigada.

RESUMO

Os geossintéticos são materiais poliméricos que foram desenvolvidos com o objetivo de solucionar problemas em diversas áreas da construção civil. Estes materiais podem ser empregados com finalidade de drenagem, impermeabilização, filtragem, separação, reforço do solo, entre outros. No caso de barragens de terra, os geossintéticos podem se tornar grandes aliados dos projetistas, visto que são materiais que possuem eficiência quando se trata do controle do fluxo de água, como em obras de drenagem, filtragem e impermeabilização. Um problema em que se deve ter uma atenção maior no projeto de barragens é a questão da percolação através do corpo e das fundações, pois, caso não sejam tomadas as devidas providências, essa situação poderá comprometer a estabilidade da estrutura. Visto a necessidade de resolução de problemas envolvendo a percolação de água, esse trabalho tem como objetivo analisar a utilização de geossintéticos como uma forma viável de controle de percolação através das fundações de barragens de terra. Foi utilizado o programa *SEEP/W* para simular o fluxo de água através de uma barragem genérica, com o intuito de analisar a percolação através das fundações com a utilização de geomembrana como tapete à montante. De forma comparativa, foram analisadas também uma seção da mesma barragem com a utilização de trincheira de vedação e uma seção sem nenhum tratamento das fundações. Os resultados obtidos mostraram que houve redução da vazão comparando com a seção sem tratamento da fundação. Em relação ao sistema de trincheira de vedação *cut-off*, a geomembrana como tapete à montante se mostrou compatível quando se trata de um comprimento próximo à 150 metros, podendo assim ser uma opção para a obra em questão. Entretanto, para uma análise completa, é necessário o estudo dos custos relacionados a aplicação dos dois métodos, como também o tempo de execução.

Palavras-chave: Geossintéticos. Barragens. Fundações. Percolação.

ABSTRACT

Geosynthetics are polymeric materials that were developed with the objective of solving problems in several areas of civil construction. These materials can be used for drainage, waterproofing, filtering, separation, soil reinforcement, among others. In the case of earth dams, geosynthetics can become great allies for designers, since they are materials that have efficiency when it comes to controlling water flow, as in drainage, filtering and waterproofing works. A problem where greater attention should be paid to the design of dams is the issue of percolation through the body and foundations, since, if the necessary measures are not taken, this situation could compromise the stability of the structure. Since there is a need to solve problems involving water percolation, this work aims to analyze the use of geosynthetics as a viable way of controlling percolation through the foundations of earth dams. The SEEP/W program was used to simulate the flow of water through a generic dam, in order to analyze the percolation through the foundations with the use of geomembrane as an upstream carpet. In a comparative way, a section of the same dam was also analyzed using the cut-off and a section without any treatment of the foundations. The results obtained showed that there was a reduction in flow compared to the section without treatment of the foundation. Regarding the cut-off, the geomembrane as an upstream carpet proved to be compatible when it comes to a length close to 150 meters, thus being an option for the work in question. However, for a complete analysis, it is necessary to study the costs related to the application of the two methods, as well as the execution time.

Key words: Geosynthetics. Dams. Foundations. Percolation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Geotêxtil tecido	16
Figura 2 - Geotêxtil não tecido	17
Figura 3 - Geogrelha	18
Figura 4 - Georrede	19
Figura 5 - Geomembrana	20
Figura 6 - Exemplo de aplicação de geomembrana	21
Figura 7 - Geocomposto	21
Figura 8 - Geocomposto argiloso	22
Figura 9 - Geotubo	23
Figura 10 - Geocélula	23
Figura 11 - Funções exercidas pelos geossintéticos: (a) drenagem, (b) filtragem, (c) proteção, (d) reforço, (e) separação, (f) controle de erosão superficial, (g) impermeabilização.	24
Figura 12 - Barragem do açude Castanhão	30
Figura 13 - Barragem de concreto do tipo gravidade	33
Figura 14 - Barragem de terra do tipo homogênea	35
Figura 15 - Exemplo de rede de fluxo em fundação de barragem.....	36
Figura 16 - Erosão tubular através de uma barragem de terra.....	37
Figura 17 - Tratamento de fundação com trincheira de vedação	38
Figura 18 - Tratamento da fundação com diafragma	39
Figura 19 - Tratamento da fundação com tapete à montante	40
Figura 20 - Seção tipo da barragem genérica	44
Figura 21 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento do trabalho	46
Figura 22 – Seção da barragem sem trincheira de vedação e sem tapete à montante	48
Figura 23 - Rede de fluxo da seção tipo da barragem sem tratamento nas fundações	48
Figura 24 - Canais de fluxo da barragem sem tratamento nas fundações	49
Figura 25 - Seção da barragem com trincheira de vedação e sem tapete à montante	50
Figura 26 - Rede de fluxo da seção tipo da barragem com cut-off	50

Figura 27 - Seção genérica da barragem sem trincheira de vedação e com tapete à montante	51
Figura 28 - Rede de fluxo na seção tipo com tapete à montante de 50 metros	52
Figura 29 - Rede de fluxo na seção tipo com tapete à montante de 75 metros	52
Figura 30 - Rede de fluxo na seção tipo com tapete à montante de 100 metros	52
Figura 31 - Rede de fluxo na seção tipo com tapete à montante de 150 metros	52
Figura 32 - Rede de fluxo na seção tipo com tapete à montante de 200 metros	52
Figura 33 - Rede de fluxo na seção tipo com tapete à montante de 250 metros	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABINT	Associação Brasileira das Indústrias de Não tecidos e Tecidos Técnicos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CTG	Comitê Técnico Geotêxtil
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
GCL	<i>Geosynthetic Clay Liners</i> (Geocomposto Argiloso)
ICOLD	<i>International Commission on Large Dams</i>
IGS	<i>International Geosynthetics Society</i>
IGS Brasil	Associação Brasileira de Geossintéticos
PA	Poliamida
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PES	Poliéster
PET	Politereftalato de Etila
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de Vinil
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativa	12
1.2	Objetivos	12
1.2.1	<i>Objetivos gerais</i>	12
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	13
1.3	Organização do trabalho	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Geossintéticos	15
2.1.1	<i>Classificação dos geossintéticos</i>	15
2.1.1.1	Geotêxteis.....	16
2.1.1.2	Geogrelhas	17
2.1.1.3	Georredes.....	18
2.1.1.4	Geomembranas	19
2.1.1.5	Geocompostos.....	21
2.1.1.6	Geotubos	22
2.1.1.7	Geocélulas	23
2.1.2	<i>Funções dos geossintéticos</i>	24
2.1.2.1	Separação	24
2.1.2.2	Filtragem.....	25
2.1.2.3	Drenagem	25
2.1.2.4	Reforço	25
2.1.2.5	Impermeabilização.....	26
2.1.2.6	Controle de erosão	26
2.1.3	<i>Propriedades e ensaios</i>	26
2.1.3.1	Propriedades físicas	27
2.1.3.2	Propriedades mecânicas	28
2.1.3.3	Propriedades hidráulicas	29
2.2	Barragens	29
2.2.1	<i>Estudos preliminares</i>	31
2.2.1.1	Estudos topográficos	31
2.2.1.2	Estudos hidrológicos.....	32

2.2.1.3	Estudos geológicos e geotécnicos.....	32
2.2.2	<i>Principais tipos de barragens</i>	32
2.2.2.1	Barragem de concreto.....	33
2.2.2.2	Barragem de terra	34
2.2.3	<i>Percolação em barragens de terra</i>	35
2.2.4	<i>Sistemas de vedação em fundações</i>	38
2.2.4.1	Trincheiras de vedação	38
2.2.4.2	Diafragma	39
2.2.4.3	Tapetes à montante	39
3	METODOLOGIA	41
3.1	Pesquisa bibliográfica	41
3.2	Estudo de caso	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1	Seção sem trincheira de vedação e sem tapete à montante	47
4.2	Seção com trincheira de vedação e sem tapete à montante	49
4.3	Seção sem trincheira de vedação e com tapete à montante	51
5	CONCLUSÃO	56
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

No decorrer dos anos diversas tecnologias foram desenvolvidas com a finalidade de promover avanços na construção civil. Seja para a redução de custos, maior rapidez ou aumento na resistência e durabilidade das obras, o mercado está sempre em constante mudança de forma a apresentar evoluções para a engenharia civil.

Assim foram desenvolvidos os materiais geossintéticos, que são uma série de materiais poliméricos utilizados para a solução de problemas nas áreas de geotecnia, estradas, estrutura, hidráulica e saneamento ambiental (QUEIROZ, 2016).

Estes materiais são fabricados de acordo com a função principal que irão desempenhar na obra, podendo exercer mais de uma função simultaneamente. As principais aplicações variam entre impermeabilização, drenagem, filtragem, reforço, separação de solo, proteção e controle de erosão.

Na área da engenharia geotécnica, os geossintéticos já são uma realidade. Eles podem trazer benefícios principalmente para as obras em que há contato do solo diretamente com a água, como por exemplo as barragens de terra, visto que a água pode ser um dos fatores responsáveis pelo colapso de uma estrutura. Segundo Caputo (2017), o problema das infiltrações através do corpo da barragem ou de suas fundações é de fundamental importância no estudo das barragens de terra, uma vez que, se não forem tomadas precauções, poderão comprometer a estabilidade da obra.

Não é rara a veiculação de notícias de acidentes envolvendo obras de construção civil relacionadas a erros no dimensionamento, falhas de execução, ou falta de manutenção - sejam obras de grande ou pequeno porte. Muitos destes acidentes estão relacionados principalmente às inconsistências detectadas na fase de projeto ou na fase de execução da obra. Um dos papéis fundamentais do meio técnico é fazer um estudo aprofundado para detectar e prever, ainda na fase de projeto, problemas possíveis de ocorrer e aplicar uma forma de solucioná-los com a opção de melhor custo-benefício.

No caso de percolação em barragens e sua implicação direta no solo constituinte do maciço relativa à diminuição de sua resistência ou mesmo percolação pelas fundações, podem ser citados como um dos fatores que podem vir a ocasionar a ruptura da estrutura. Esta condição pode ser amenizada desde que haja o estudo adequado em fase de projeto.

Desse modo, os geossintéticos podem se tornar aliados dos projetistas para auxílio em questões como as mencionadas anteriormente. As vantagens da utilização destes materiais sintéticos se devem pela fácil aplicação, durabilidade e resistência.

Além disso, os geossintéticos dispensam a utilização de materiais naturais que atenderiam estas funções, como por exemplo camadas de solos com maior capacidade de resistência, ou consideravelmente de menor permeabilidade. Entretanto, esses materiais necessitam da disponibilidade de jazidas e a utilização de equipamentos de grande porte, podendo assim, aumentar o custo final e o tempo de execução da obra.

1.1 Justificativa

Este trabalho busca ampliar o conhecimento sobre os materiais geossintéticos e suas diversas aplicações, como também, avaliar os benefícios da aplicação desses materiais através de um estudo de caso.

É importante frisar que a possibilidade de apresentação da utilização de novas tecnologias sempre contribui para o meio técnico, principalmente na área da construção civil. Além disso, apresentar um estudo de caso aprofunda o conhecimento na medida em que se pode analisar uma escolha por determinada solução.

Na área de barragens, pouco se tem documentado a respeito do uso de geossintéticos como solução viável para controle da percolação. Nesse sentido, o presente estudo pretende acrescentar elementos técnicos que possam nortear futuros estudos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos gerais

Analisar a utilização de materiais geossintéticos em fundações de barragens de terra como uma alternativa técnica viável para resolução de problemas relacionados à percolação de água, por meio de revisão bibliográfica e estudo de caso.

1.2.2 *Objetivos específicos*

- Analisar a importância da utilização dos geossintéticos, funções, propriedades, vantagens e desvantagens desses materiais;
- Aprofundar o conhecimento do uso de materiais que auxiliem o bom funcionamento das estruturas, com enfoque em barragens de terra;
- Apresentar estudo de caso através de uma simulação do uso dos geossintéticos, de forma a demonstrar possíveis soluções de problemas de fluxo de água em maciços ou fundações de barragens de terra.

1.3 **Organização do trabalho**

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos: a apresentação da problemática, a revisão bibliográfica, a apresentação dos métodos, o estudo de caso e as considerações finais.

No presente capítulo foi apresentada uma introdução geral do assunto, encaminhando o leitor de forma a conhecer os aspectos gerais da pesquisa, a problemática, os objetivos e a justificativa da execução deste trabalho.

No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica sobre o assunto abordado: o que são geossintéticos, os principais tipos encontrados no mercado, suas propriedades e principais funções. É apresentada também, uma consideração inicial sobre barragens, os tipos existentes, as principais características e a questão da percolação em barragens de terra.

No terceiro capítulo é apontada a metodologia utilizada para a realização deste trabalho. É feita uma explanação de como foram realizados a revisão bibliográfica e o estudo de caso.

No quarto capítulo são discutidas as possíveis soluções de problemas encontrados nas barragens de terra com a utilização de geossintéticos, com o enfoque na percolação. É apresentado um estudo de caso de barragem genérica na qual foram elaboradas simulações de percolação através de um *software*, de forma a estudar a utilização do material geossintético como tapete à montante em sua fundação, em comparação com outras soluções viáveis.

No último capítulo são feitas as considerações finais do trabalho com a discussão de resultados obtidos a partir da utilização dos geossintéticos na barragem estudada, fazendo uma avaliação geral dos benefícios trazidos por estes materiais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Geossintéticos

A questão da adição de materiais naturais para melhoria na qualidade do solo não é uma prática recente como se imagina, Segundo Aguiar e Vertematti (2015), materiais vegetais constituídos de fibras resistentes já eram utilizados em obras como na construção dos Zigurates da Mesopotâmia, na Grande Muralha da China e em obras do Império Romano.

Depois da Segunda Guerra Mundial, com o desenvolvimento da indústria petroquímica e a consequente disseminação dos produtos plásticos, foi possível a produção de materiais geossintéticos 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.

Como mencionado anteriormente, 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), enquanto os geossintéticos possuem menor tempo de execução, facilidade de instalação, maior resistência mecânica e melhores resultados em relação aos materiais naturais.

O emprego destes materiais é amplo, podendo ser utilizados em obras de drenagem, filtragem, impermeabilização, reforço de solos moles e separação de diferentes tipos de solos. 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.

2.1.1 *Classificação dos geossintéticos*

Os geossintéticos são produtos industrializados e possuem considerável grau de versatilidade - por esse motivo, existem diversos tipos de geossintéticos no mercado mundial. Estes materiais podem ser classificados pelo formato

(unidimensional, bidimensional ou tridimensional), pelo método de fabricação e pelas funções principais de cada um.

Os principais tipos de geossintéticos encontrados são: geotexteis, geogrelhas, georredes, geomembranas, geocompostos, geotubos e geocélulas. Estes materiais serão mostrados a seguir, sendo apresentadas as principais características e propriedades de cada um, como também exemplos de aplicações em obras.

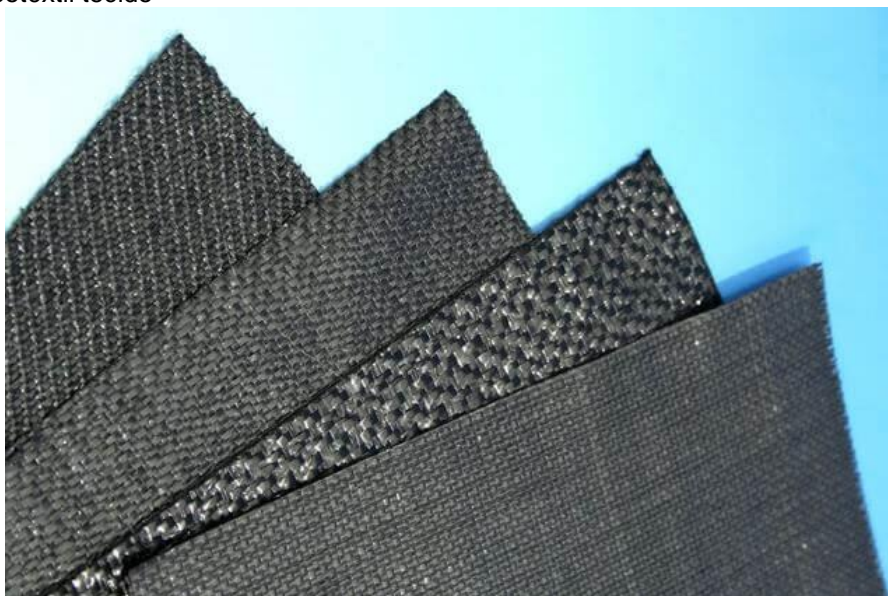
2.1.1.1 Geotêxteis

Os geotêxteis foram um dos primeiros produtos geossintéticos a serem desenvolvidos. São materiais bidimensionais em formato de mantas e são divididos em dois grandes tipos: tecidos e não tecidos, mas podem ser encontrados também tricotados ou costurados.

As mantas podem ser fabricadas de poliamida (PA), poliéster (PET), polietileno (PE) ou polipropileno (PP), sendo materiais flexíveis e permeáveis. As funções principais que um geotêxtil pode exercer são: separação, proteção, filtragem, drenagem, reforço e controle de erosões.

Os geotêxteis tecidos (Figura 1) são estruturas planares formadas por meio do entrelaçamento sistemático de dois conjuntos de filamentos paralelos. (DAS; SOBHAN, 2019).

Figura 1 - Geotêxtil tecido



Fonte: NTC Brasil (2020)

Já o geotêxtil não tecido (Figura 2) é um produto composto por fibras cortadas ou filamentos contínuos, distribuídos aleatoriamente, os quais são interligados por processos mecânicos, térmicos ou químicos. (VERTEMATTI, 2001)

Figura 2 - Geotêxtil não tecido



Fonte: NTC Brasil (2020)

Segundo Queiroz, (2016), para obras de drenagem e filtragem são mais utilizados os geotêxteis não tecidos, enquanto os geotêxteis tecidos são comumente usados como reforço do solo.

Os geotêxteis podem ser aplicados em diversos tipos de obras, como por exemplo: construção de estradas não pavimentadas e diques com função de separação e reforço de solo mole, e na construção de taludes e muros de arrimo com função de reforço, controle de erosão e filtragem, entre outras.

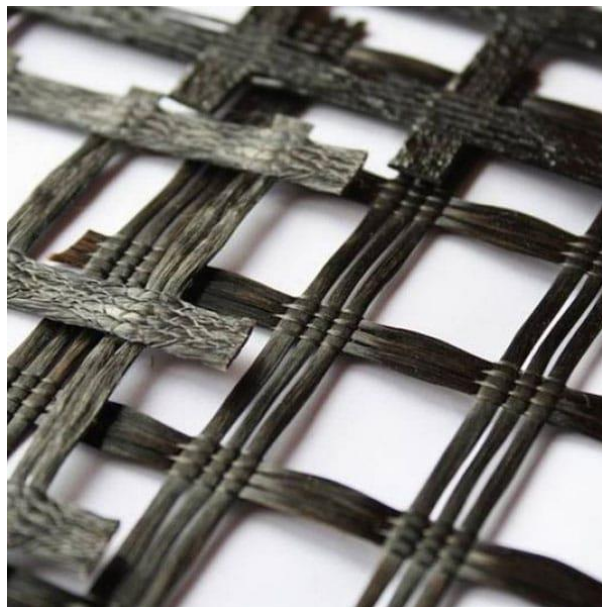
2.1.1.2 Geogrelhas

Como o nome sugere, as geogrelhas são produtos com formato de grelhas. Segundo Queiroz (2016, p.389), “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, como mostrado na Figura 3. 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).

Figura 3 - Geogrelha



Fonte: Inovageo (2019)

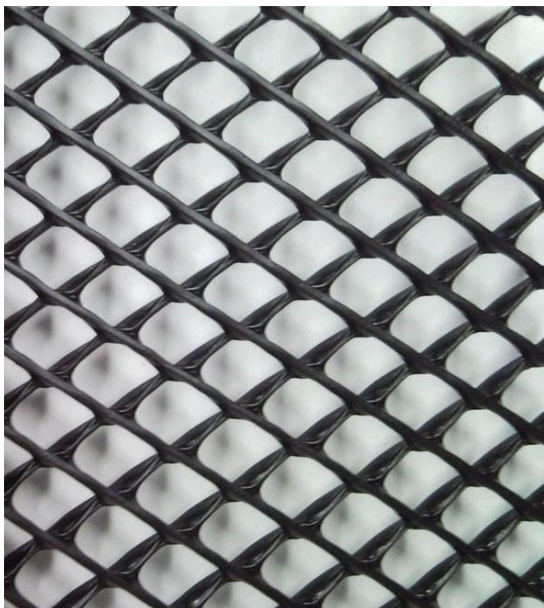
A principal função da geogrelha é de reforço de solos. Ela é considerada unidirecional quando apresenta elevada resistência à tração apenas em uma direção e bidirecional quando apresenta elevada resistência à tração nas duas direções principais. (VERTEMATTI, 2001)

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. (DAS; SOBHAN, 2019)

2.1.1.3 Georredes

São produtos que possuem a estrutura semelhante com as geogrelhas, entretanto, as georredes (Figura 4) são formadas por duas séries de membros extrudados paralelos. Possuem alta porosidade, sendo sua principal função a de drenagem. (BATHURST, 2015a)

Figura 4 - Georrede



Fonte: Geofoco (2013)

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.

2.1.1.4 Geomembranas

Geomembranas (Figura 5) 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).

Figura 5 - Geomembrana



Fonte: Embu Geomembrana PEAD (2018)

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, p.668), “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. Na Figura 6 é possível observar a aplicação de geomembrana em um canal.

Figura 6 - Exemplo de aplicação de geomembrana



Fonte: Embu Geomembrana PEAD (2018)

2.1.1.5 Geocompostos

Segundo Bathurst (2015a), os geocompostos são geossintéticos formados pela associação de dois ou mais tipos de geossintéticos como, por exemplo: geotêxtil-georrede; geotêxtil-geogrelha; georrede-geomembrana ou geocomposto argiloso (GCL).

Figura 7 - Geocomposto



Fonte: Geomembrana (2019)

Os geocompostos que fazem a utilização de geogrelhas ou georredes são utilizados principalmente para drenagem (Figura 7), enquanto os GCL's (Figura 8) possuem a função principal de barreira impermeabilizante, impedindo a passagem de gases ou líquidos.

Os geocompostos 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. (QUEIROZ, 2016). Já os GCL's são comumente usados em aterros sanitários em conjunto com geomembranas, formando uma barreira impermeabilizante.

Figura 8 - Geocomposto argiloso



Fonte: GeoSistemas (2015)

2.1.1.6 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 (Figura 9) 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.

Figura 9 - Geotubo



Fonte: IGS Brasil (2016)

2.1.1.7 Geocélulas

Segundo Bathurst (2015a), 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. A seguir é ilustrada a geocélula na Figura 10.

Figura 10 - Geocélula

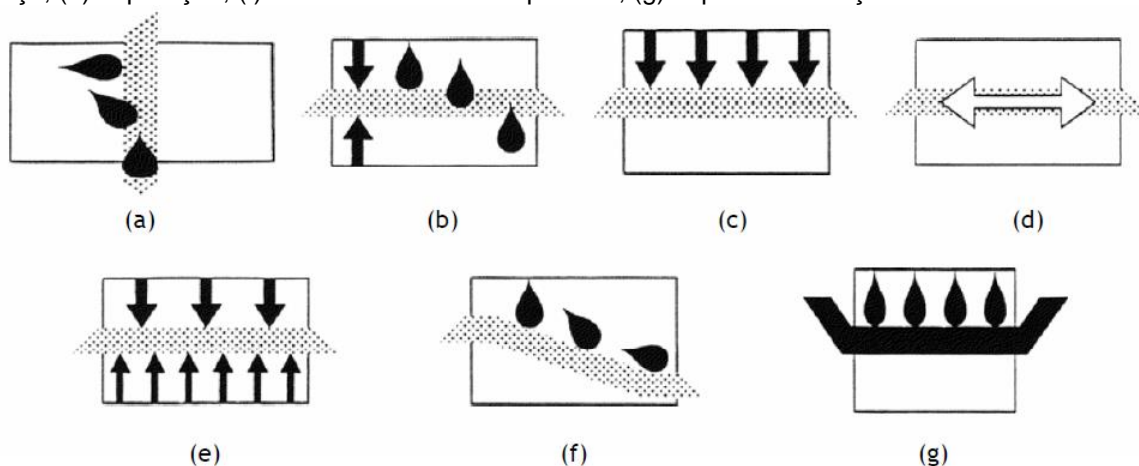


Fonte: Inovageo (2019)

2.1.2 Funções dos geossintéticos

Segundo Bathurst (2015b), os geossintéticos abrangem uma variedade de materiais poliméricos com a finalidade de serem utilizados em aplicações geotécnicas, ambientais, hidráulicas e de transporte. Esses materiais possuem uma ampla cartela de utilização, e em alguns casos podem adquirir dupla função. As principais funções que um geossintético pode desempenhar são: drenagem, filtragem, proteção, reforço, separação, controle de erosão e impermeabilização; como é exemplificado na Figura 11.

Figura 11 - Funções exercidas pelos geossintéticos: (a) drenagem, (b) filtragem, (c) proteção, (d) reforço, (e) separação, (f) controle de erosão superficial, (g) impermeabilização.



Fonte: Carneiro (2009)

2.1.2.1 Separação

Geossintéticos com função principal de separação são bastante utilizados em obras de estradas, nas quais, há o contato direto de dois tipos de solos diferentes, a fim de evitar a indevida mistura desses materiais. A barreira sintética é introduzida para que seja assegurada a integridade e correto funcionamento desses materiais. (CARNEIRO, 2009)

As propriedades mais importantes para os geossintéticos que vão desempenhar esta função são, segundo Ferreira (2010, p.09), “a resistência à tração, flexibilidade, resistência ao puncionamento e rasgamento, retenção do solo e permeabilidade aos fluidos”.

2.1.2.2 Filtragem

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, 2015b)

Para exercer esse tipo de função, é necessário que o material possua propriedades como a permeabilidade na direção normal ao plano, porometria adequada e flexibilidade. (FERREIRA, 2010)

2.1.2.3 Drenagem

Drenagem é o processo que faz a utilização de materiais especializados para o escoamento de fluídos em excesso no solo. Segundo Carneiro (2009, p.09), “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”.

Assim, as propriedades que influenciam o funcionamento de um geossintético de drenagem são a transmissividade, a permeabilidade na direção normal ao plano e a distribuição de poros (FERREIRA, 2010)

2.1.2.4 Reforço

O reforço de solo 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, 2015b)

Quando os geossintéticos desempenham a função de reforço, segundo Ferreira (2010), é fundamental que possuam resistência à tração, deformabilidade e flexibilidade.

2.1.2.5 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 apresentar resistências à tração, ao rasgamento, ao puncionamento, à temperatura e às radiações ultravioletas. Além disso, é necessária resistência satisfatória aos ataques químicos e biológicos. (FERREIRA, 2010)

2.1.2.6 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, 2015b)

2.1.3 *Propriedades e ensaios*

Os geossintéticos são selecionados através das funções que irão exercer, devendo possuir propriedades específicas de acordo com as exigências da obra. Essas propriedades são definidas através de ensaios de campo ou de laboratório, sendo de fundamental importância a verificação destes dados fornecidos pelo fabricante, de forma que o material esteja compatível com as especificações da obra.

Segundo Bueno e Vilar (2015), para que os materiais geossintéticos possuam as características técnicas estabelecidas no projeto, devem passar por um rigoroso controle de qualidade de fabricação, assim como todo material manufaturado.

As exigências em relação as propriedades do material podem variar de acordo com a obra e a função exercida por cada um. Lista-se a seguir algumas propriedades que devem ser avaliadas por meio de ensaios para caracterizar o geossintético para a utilização em projetos e construções, segundo Das e Sobhan (2019):

- a) Geotêxteis e produtos correlatos: massa por unidade de área; abertura aparente e de filtragem; espessura; exposição à radiação UV; permissividade e transmissividade; resistência ao puncionamento estático e dinâmico; dano por abrasão; compressibilidade; resistência à tração e propriedades de fluência; resistência química.
- b) Geomembranas e geocompostos: densidade; massa por unidade de área; capacidade de transmissão de vapor d'água; comportamento de tração; resistência ao rasgo; resistência ao estouro; resistência ao puncionamento; fissuramento sob tensão; resistência química; resistência à luz ultravioleta; propriedade térmicas; desempenho das emendas.

2.1.3.1 Propriedades físicas

As propriedades físicas dos geossintéticos de maior interesse são massa por unidade de área, espessura nominal, porosidade, porcentagem de área aberta e densidade. Tem-se a seguir uma breve descrição dessas propriedades, de acordo com Bueno e Vilar (2015):

- a) Gramatura: ou massa por unidade de área, é a relação entre a massa e a área de um corpo de prova de geometria regular. A gramatura está associada ao custo do produto e à sua resistência mecânica.
- b) Espessura: a espessura nominal de um geossintético, expressa em milímetros, é determinada registrando-se a distância interna entre duas placas rígidas, que comprimem corpos de prova sob uma tensão vertical de 2 kPa. Com exceção dos geotêxteis não tecidos e dos geocompostos, que se comprimem sob tensão, os

demais geossintéticos apresentam espessuras quase constantes, independentes das tensões a que são submetidos.

- c) Porosidade: é a relação entre o volume dos poros e o volume total de uma amostra.
- d) Porcentagem de área aberta: é a área dos espaços vazios resultantes do processo de fabricação.
- e) Densidade: é a relação entre massa e volume de uma amostra. Pode ser obtida através do processo de imersão.

2.1.3.2 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas, em princípio, são utilizadas em métodos de dimensionamento e expressam relações entre carregamento e deformações.

- a) Compressibilidade: a compressibilidade de um geotêxtil é obtida registrando-se a sua espessura sob diferentes níveis de carregamento.
- b) Resistência a tração: esse ensaio consiste em prender as extremidades de corpos de prova com um par de garras metálicas e sujeitar o conjunto a uma máquina universal de ensaio. Aplicam-se ao conjunto cargas de tração crescentes, registrando-se as deformações correspondentes até a ruptura. (BUENO; VILAR, 2015)
- c) Resistência ao rasgo: em certas situações, os geossintéticos podem ser solicitados à propagação de rasgamento, que ocorreria a partir de uma incisão inicial. Tal situação pode ocorrer durante a instalação — em manuseio descuidado, sob ação de vento, ou durante a vida útil, em zonas próximas de planos de ruptura. (BUENO; VILAR, 2015)
- d) Resistência a puncionamentos: é inversamente proporcional à vulnerabilidade dos geossintéticos às compressões diferenciais ou a choques causados pela queda de materiais. É importante determinar essa propriedade sob condições estáticas e sob condições dinâmicas. (CARNEIRO, 2009)
- e) Fluência: é a deformação de um geossintético submetido a uma carga constante ao longo do tempo, deve ser considerado para o dimensionamento de materiais previstos para tempo de serviço longo. (CARNEIRO, 2009)

2.1.3.3 Propriedades hidráulicas

Geossintéticos empregados em obras hidráulicas com funções de drenagem, filtragem e impermeabilização, devem passar por ensaios de permissividade e transmissividade.

- a) Permissividade: é a propriedade que correlaciona o coeficiente de permeabilidade normal ao plano e a espessura do geossintético sob determinada tensão. Segundo Carneiro (2009), permeabilidade normal ao plano é uma propriedade importante quando os geossintéticos desempenham funções de filtragem, essa permeabilidade depende da estrutura dos geossintéticos, principalmente da distribuição e da dimensão das aberturas.
- b) Transmissividade: é o produto da permeabilidade no plano do geossintético 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)

2.2 Barragens

Barragens são estruturas construídas com o objetivo de armazenar água, resíduos líquidos ou sólidos. Segundo Queiroz (2016), as barragens podem ser projetadas para diversas finalidades, como: acúmulo de água para abastecimento público ou industrial; acúmulo de resíduos originados de atividades humanas ou industriais; controle de vazões; geração de energia elétrica, entre outros.

Estas estruturas têm sido utilizadas por diversas civilizações há milhares de anos, principalmente pelo seu objetivo de armazenar água e beneficiar populações em suas atividades básicas. Segundo Fontenelle (2007), elas têm como principal objetivo o aproveitamento e a gestão dos recursos hídricos, principalmente em regiões carentes deste recurso.

Na Figura 12 é apresentado o exemplo da barragem do Castanhão, o qual foi construído com o objetivo de armazenamento de água para amenizar os efeitos da seca em determinados períodos do ano na região nordeste. Segundo Cavalcante (2018), o Castanhão é o maior açude público para múltiplos usos do Brasil, ele

constitui importante reserva estratégica de água e é utilizado para irrigação, abastecimento urbano, piscicultura e regularização de vazão.

Figura 12 - Barragem do açude Castanhão



Fonte: Senge-CE (2019)

As barragens são estruturas que exercem um importante papel social e econômico, entretanto, elas também têm um grande potencial para causar diversos impactos negativos, principalmente quando não são devidamente planejadas. (VIANNA, 2015)

Assim, fazem-se necessários os estudos de viabilidade da construção dessa estrutura, como por exemplo a capacidade resistiva do solo, a capacidade hídrica e topográfica da região. Além disso, devem ser avaliados os impactos econômicos, sociais e ambientais causados após a construção da barragem.

No caso de barragens de terra, há também a necessidade do estudo das vazões de água através do corpo e fundação da barragem, pois, se não forem devidamente controladas, essas vazões podem ocasionar problemas futuros para a estrutura. Assim, os sistemas de vedação e drenagem devem ser dimensionados corretamente de acordo com o fluxo da água através da barragem, com o objetivo de mitigar os problemas consequentes da percolação.

Como mencionado anteriormente, as barragens são estruturas que propiciam a formação de grandes reservatórios de fluidos, para isso, uma das suas principais propriedades é a estanqueidade - a estrutura deve ser dimensionada de forma que impossibilite a livre passagem da água. Entretanto, dependendo do tipo de

barragem, a percolação da água pelo maciço não é totalmente impedida, neste caso, deve-se aplicar uma forma segura de direcioná-la.

Outra característica importante dessas estruturas, é a capacidade de resistência aos esforços permanentes da água: as barragens devem ser dimensionadas para suportar grandes cargas, considerando sua capacidade máxima.

Segundo Queiroz (2016), as barragens se distinguem de outras estruturas na engenharia civil por apresentarem três características principais, citadas a seguir:

- a) O acúmulo de grande volume de solo e de água em uma determinada região limitada;
- b) A ação contínua da água sobre o maciço e a fundação da estrutura por meio da ação do empuxo, percolação e possível erosão interna e externa;
- c) Ocupação de área relativamente grande em um vale, além dos problemas ambientais decorrentes da inundação de áreas de vegetação ou ocupação humana.

2.2.1 Estudos preliminares

O projeto de barragens se dá através de inúmeros estudos preliminares para determinar a viabilidade da construção e a escolha do local da obra e do tipo de barragem a ser construída. Além da análise de impactos sociais e ambientais, faz-se necessária investigação dos parâmetros hidrológicos, geológicos e geotécnicos detalhados.

É importante salientar que, face à natureza do presente trabalho, estes estudos são mencionados, uma vez que na fase de projeto as características do local de implantação da obra irão condicionar os estudos de percolação de água.

2.2.1.1 Estudos topográficos

Os estudos topográficos são fatores que podem delimitar a viabilidade e escolha do tipo de barragem a ser construída. As configurações morfológicas locais poderão fornecer importantes subsídios para a concepção das obras principais, da estrutura da barragem em si, como também das obras auxiliares. (COSTA, 2012)

Nesses estudos são executados mapeamentos topográficos através de fotos aéreas do local onde será construída a barragem, em seguida, segundo Queiroz (2016), são realizados levantamentos planialtimétricos através de equipamentos eletrônicos georreferenciados com o objetivo de delinear a bacia de acumulação.

2.2.1.2 Estudos hidrológicos

Segundo Caputo (2017), os estudos hidrológicos visam conhecer o regime de águas da bacia de contribuição, bem como determinar volumes de acumulação e lâminas de cheias para o projeto através da simulação do funcionamento do vertedouro.

2.2.1.3 Estudos geológicos e geotécnicos

Os principais objetivos desses estudos são, segundo Costa (2012), selecionar o local ideal para construção da barragem em função da geologia e da topografia; caracterizar os eixos barráveis; definir as características dos reservatórios formados em cada eixo e definir as características dos materiais naturais de construção.

Esse estudo é feito através de ensaios tradicionais de sondagens a percussão e rotativas, entretanto, são recomendados também a abertura de trincheiras exploratórias, poços e galerias para que se obtenha aspectos não detalhados pelos procedimentos usuais. (CRUZ, 2004)

2.2.2 *Principais tipos de barragens*

A escolha do tipo de barragem depende das características gerais da região e do subsolo, da disponibilidade de material de empréstimo, no caso de barragens de terra, e de facilidade de acesso ao local, de outros materiais, como cimento, no caso de barragens de concreto. (CAPUTO, 2017)

Existem dois grandes tipos principais de barragens: as barragens de concreto e as barragens de terra. Além deles, há também a barragem de enrocamento, que são estruturas construídas predominantemente de material

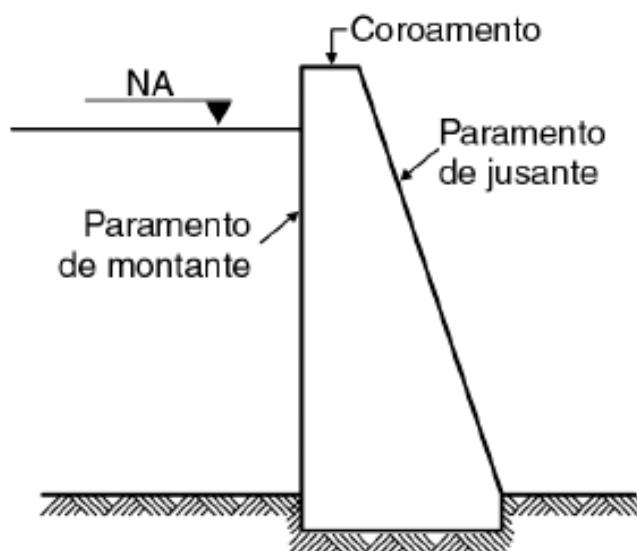
rochoso; e as barragens de rejeito, que são tipos específicos de barragens que possuem a finalidade de reter os resíduos da atividade de mineração.

2.2.2.1 Barragem de concreto

As barragens de concreto simples ou armado podem se dividir em quatro tipos principais: barragens de peso ou gravidade, arco-gravidade, abóbadas e contrafortes. Essas barragens de forma geral necessitam de terrenos altamente resistentes pela grande quantidade de carga que será imposta a eles.

As barragens de gravidade (Figura 13) são um dos tipos mais conhecidos de barragem de concreto, elas têm a sua estabilidade assegurada pelo peso da própria estrutura. Segundo Caputo (2017), esse tipo de barragem é geralmente de concreto simples ou de concreto compactado a rolo, de seção transversal trapezoidal, e para sua construção o terreno de fundação deve ter boas características de resistência, deformabilidade e estanqueidade.

Figura 13 - Barragem de concreto do tipo gravidade



Fonte: Caputo (2017)

As barragens de arco-gravidade são curvas em planta e com a face convexa para montante, e as barragens abóbadas também se caracterizam pela sua curvatura e pelo fato de suas seções trabalharem predominantemente à compressão.

(CAPUTO, 2017). Já as barragens de contraforte são grandes paredões de concreto impermeabilizados apoiados em contrafortes.

Segundo Fontenelle (2007), as rupturas das barragens de gravidade têm como causas principais:

- a) Resistência ao cisalhamento insuficiente em descontinuidades pela fundação;
- b) Sub-pressão excessiva nas fundações, em razão de drenagens não adequadas ou inexistentes;
- c) Não consideração de esforços raros, como resultantes de sismos;
- d) Erosão da rocha de fundação situada no pé de jusante.

2.2.2.2 Barragem de terra

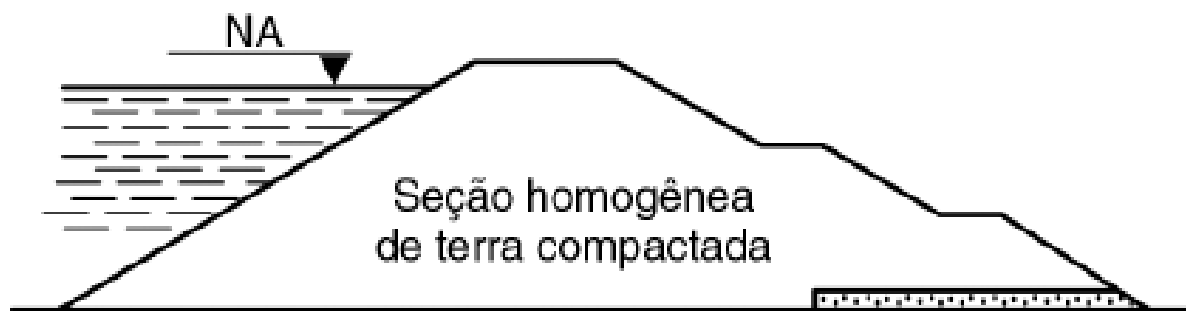
Segundo Queiroz (2016, p.330), “as barragens de solos ou barragens de terra são geralmente maciços artificiais (aterros) de seção trapezoidal construídos em um vale para o acúmulo de água”.

As barragens de terra são um dos tipos de barragens mais antigas e de maior utilização em todo o mundo, de acordo com ICOLD (2020), cerca de 65% das barragens registradas são barragens de terra. Isso se dá principalmente porque sua construção envolve o uso dos materiais naturais, localmente disponíveis. Além disso, os requisitos topográficos e de fundação são menos restritivos do que para os outros tipos de barragem. (VIANNA, 2015)

As barragens de terra podem ser classificadas da seguinte forma, segundo Pierozan (2014):

- a) Homogênea (Figura 14): constituída a partir de um tipo de material;
- b) Zoneada: podendo ser constituída a partir de materiais argilosos e granulares;
- c) Aterro hidráulico: construídas por meio de hidromecanização, que são processos de exploração, transporte e deposição de um solo em uma área predeterminada, com o auxílio de água.

Figura 14 - Barragem de terra do tipo homogênea



Fonte: Caputo (2017)

Como mencionado anteriormente, a característica mais importante das barragens, é a estanqueidade. Segundo Souza (2017, p.26), “por se caracterizarem como obras hidráulicas, requerem de suas fundações, em especial, além de características geomecânicas adequadas de estabilidade e deformabilidade, boas condições de estanqueidade”. No caso das barragens de terra, é de fundamental importância o estudo aprofundado do material granular a ser utilizado na construção da barragem.

De acordo com Pierozan (2014), um dos fenômenos que levam à danos e falhas estão relacionados à percolação d’água através da barragem, reforçando a necessidade de estudos para redução das vazões e o controle das cargas de pressão hidráulica dentro da estrutura da barragem.

Assim, para inibir o problema de percolação pelo corpo da barragem, a face à montante deve ser concebida de material consideravelmente impermeável, enquanto, na face a jusante, deve ser previsto material drenante para que a água infiltrada seja conduzida de forma apropriada.

2.2.3 Percolação em barragens de terra

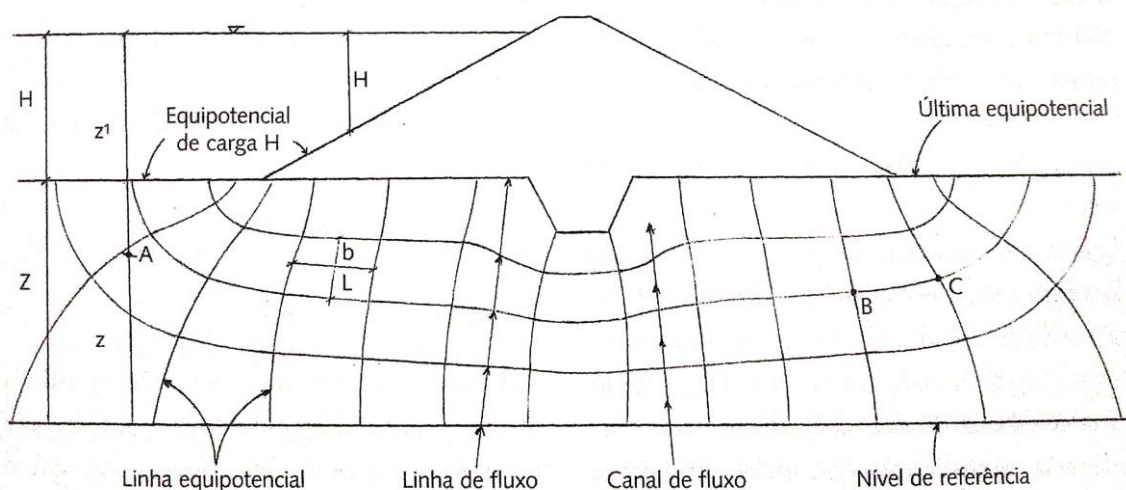
Percolação pode ser definida como o fluxo de água através de meios porosos. O estudo desse fenômeno é essencial para construção de barragens de terra, por se tratar de estruturas de material granular e submetidas a saturação constante. A análise da percolação tem como objetivo estimar a quantidade de água que atravessa o corpo e as fundações da barragem, de forma a prever problemas que podem comprometer a estrutura.

A principal propriedade a ser considerada para o estudo da percolação é a permeabilidade. É a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento da água através dele, isso se dá pela presença de espaços vazios interconectados, através dos quais a água consegue fluir de pontos de alta energia para pontos de baixa energia (DAS; SOBHAN, 2019). Essa propriedade do solo é expressa pelo coeficiente de permeabilidade.

A escolha do material granular ideal para a construção do barramento visa reduzir ou eliminar os efeitos prejudiciais da percolação. Visto que solos com permeabilidade elevada pode favorecer a ocorrência de erosão interna dentro da barragem, especialmente, se o solo estiver mal compactado. (KNAPPETT; CRAIG, 2018)

As vazões em um meio permeável são calculadas pela consideração de redes formadas por linhas de fluxo e linhas equipotenciais. Uma linha de fluxo representa a trajetória de uma partícula de água que se desloca de montante para jusante através do solo permeável, já a linha equipotencial é uma linha que traça os pontos que possuem a mesma carga potencial, como podem ser observadas na Figura 15.

Figura 15 - Exemplo de rede de fluxo em fundação de barragem



Fonte: Costa (2012)

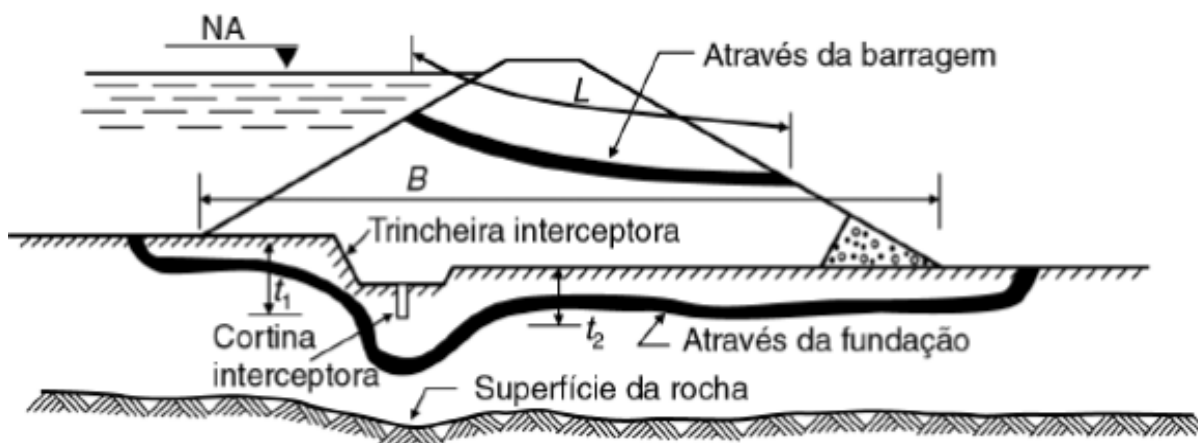
Segundo Pierozan (2014), o estudo do fluxo de água é de grande importância na engenharia geotécnica, pois ao percolar no interior do solo, a água exerce forças que alteram o estado de tensão do maciço, podendo resultar na instabilidade dele.

Uma das causas mais frequentes de ruptura das barragens de terra é a percolação, consequência da infiltração através do corpo ou fundações de barragens. Segundo Caputo (2017), as infiltrações podem comprometer a estabilidade da obra se não forem tomadas precauções contra os efeitos decorrentes das pressões de percolação.

Assim, se não forem adotadas medidas preventivas, a percolação ocorrerá de forma progressiva, sempre havendo a tendência de travessia da água através da estrutura da barragem. Isso se dá pela diferença de carga hidráulica total entre os níveis de montante e jusante. (PIEROZAN, 2014)

O maior problema relacionado à percolação é o carreamento de partículas de solo pela água, que acabam por abrir “caminhos” no corpo da barragem, aumentando os vazios e conseqüentemente diminuindo a resistência da estrutura. Esse fenômeno é denominado erosão tubular ou *piping*, ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Erosão tubular através de uma barragem de terra



Fonte: Caputo (2017)

Para a proteção contra o piping no interior do corpo da barragem ou na sua fundação, são recomendadas algumas soluções, tais como: o emprego de um tapete impermeabilizante à montante, a construção de uma trincheira de vedação (*cut-off*) ou a construção de poços de alívio. (CAPUTO, 2017)

Desse modo, deve ser prevista uma forma de vedação da barragem à montante, com uma zona de baixa permeabilidade, com a finalidade de reduzir e controlar o fluxo contínuo de água pelo interior do maciço (CRUZ, 2004). Este fluxo deverá ser captado pelo sistema de drenagem a jusante, para que a água seja conduzida de forma segura para fora do corpo da barragem.

2.2.4 Sistemas de vedação em fundações

Dada a problemática dos efeitos da percolação através do corpo e fundação de barragens de terra, deve ser previsto um sistema de vedação efetivo de forma que seja notada a redução do fluxo de água pela estrutura.

O tratamento de fundações consiste em um conjunto de técnicas e procedimentos que tem como objetivo melhorar ou reforçar as características originais do maciço natural, visando a uma melhor adequação das fundações à obra projetada. (COSTA, 2012)

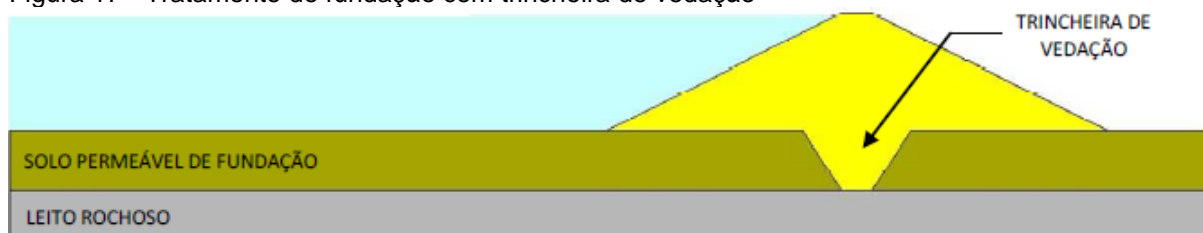
Segundo Cruz (2004), toda barragem requer uma zona de baixa permeabilidade, com a finalidade de reduzir e controlar o fluxo pelo corpo e fundação da barragem, que imediatamente a jusante é disciplinado pelos sistemas de drenagem.

Entre os sistemas usualmente empregados no controle de fluxo através das fundações, podem ser citadas as trincheiras de vedação, as paredes diafragma e as barreiras impermeabilizantes à montante da barragem.

2.2.4.1 Trincheiras de vedação

Uma das formas mais usuais de tratamento das fundações é a execução de trincheiras de vedação (*cut-off*). É executada através da escavação do solo ao longo de todo o barramento e preenchida pelo mesmo solo compactado do maciço da barragem, como ilustrado na Figura 17. Essa escavação é preferencialmente realizada até a profundidade do leite rochoso ou até o encontro de um solo mais impermeável, entretanto, quando este solo se encontra em grandes profundidades, a altura de escavação deve ser determinada em projeto. Esse sistema é conhecido como *cut-off* parcial.

Figura 17 - Tratamento de fundação com trincheira de vedação



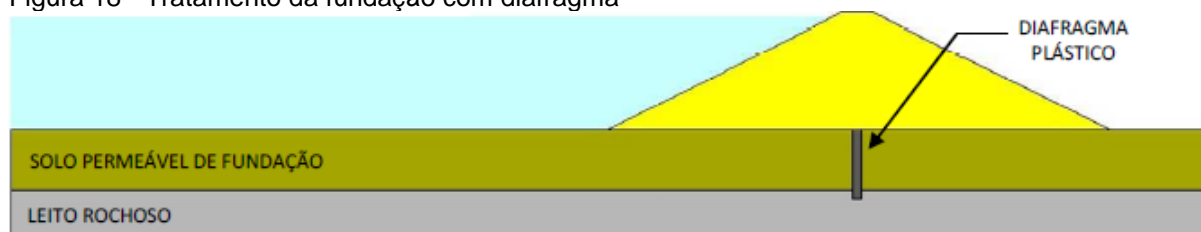
Fonte: Pierozan (2014)

A trincheira de vedação é uma forma de dificultar a percolação da água pela fundação da barragem, pois, segundo Queiroz (2016), sendo o solo da barragem menos permeável que o da fundação, a água vai contornar a base do *cut-off*, resultando em uma maior perda de carga e, conseqüentemente, na diminuição da vazão de percolação pela base.

2.2.4.2 Diafragma

Segundo Costa (2012), os diafragmas são executados com a substituição de uma estreita faixa da fundação por sucessivos painéis de concreto, geralmente localizado abaixo do eixo da barragem, como ilustrado na Figura 18.

Figura 18 - Tratamento da fundação com diafragma



Fonte: Pierozan (2014)

A extensão desse muro de concreto enterrado deve ser determinada em projeto e para que não ocorra desmoronamentos, é aplicada a lama bentonita. A execução do diafragma é planejada de forma que não seja realizada em grandes vãos.

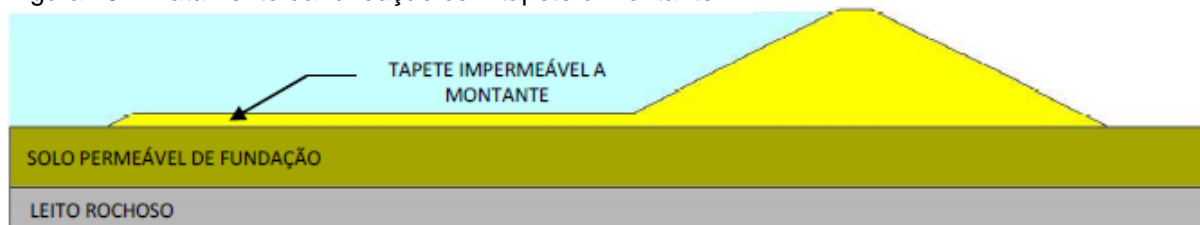
São escavados painéis com extensão entre 5m e 20m e largura entre 0,40m e 1,50m. Após a primeira escavação é feita a concretagem desse painel, sendo necessária uma distância relativa à extensão dos painéis para o início da segunda escavação e posterior concretagem, para a terceira escavação é utilizado o mesmo método e assim por diante, até o final do barramento. No final, deverá haver painéis de concreto intercalados com painéis de solo natural. Após a secagem dos painéis concretados, são executados os painéis que permaneceram com o material natural. (COSTA, 2012)

2.2.4.3 Tapetes à montante

Outra solução para reduzir a percolação sob a fundação da barragem é a construção de um tapete impermeável com o mesmo material compactado da barragem, ou com material com menor permeabilidade, na base à montante do aterro.

(QUEIROZ, 2016). A Figura 19 ilustra uma seção de barragem com a execução de tapete impermeável à montante.

Figura 19 - Tratamento da fundação com tapete à montante



Fonte: Pierozan (2014)

Esses tapetes têm como função reduzir o fluxo de água através das fundações, aumentando o caminho de percolação. Segundo Pierozan (2014), as barreiras impermeabilizantes são capazes de reduzir as vazões e as cargas de pressão atuantes na fundação.

Segundo Cruz (2004), os tapetes vedantes constituem uma solução “barata” para o controle de fluxo pela fundação da barragem, no entanto, é passível de não ser eficiente se não for executada com cuidados especiais.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido através de uma pesquisa qualitativa e uma análise quantitativa, de caráter exploratório, que, segundo Gil (2002, p.41), “têm como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a constituir hipóteses.”

Uma pesquisa pode ser definida como o procedimento sistemático que tem como objetivo proporcionar respostas aos problemas que são propostos. (GIL, 2002). Desta forma, este trabalho tem como objetivo de fazer uma análise geral das problemáticas encontradas em barragens de terra e propor formas de solucioná-las, por meio da utilização de materiais geossintéticos. Para isso, esta pesquisa está dividida em duas etapas principais: a pesquisa bibliográfica e o estudo de caso.

3.1 Pesquisa bibliográfica

A pesquisa bibliográfica em geral é um método de pesquisa que compreende toda a bibliografia já publicada em relação ao assunto abordado. No caso deste trabalho, é realizada por meio do levantamento e análise de informações de forma a trazer um maior conhecimento sobre o assunto, através de livros, artigos e trabalhos científicos disponibilizados na ferramenta do *Google* acadêmico.

Por meio da pesquisa bibliográfica, foi elaborado o referencial teórico deste trabalho, no qual são apresentadas as principais características dos geossintéticos, como também, os conceitos gerais de barragens.

Além disso, foi realizado também o estudo das problemáticas existentes em barragens de terra, elaborado a partir de bibliografia recente que trata do assunto de forma a delimitar melhor o ambiente de estudo.

Uma das problemáticas abordadas é o caso das infiltrações ocasionadas pela percolação da água através dos corpos e das fundações de barragens. Visto que esse problema pode ser uma das causas de falha na estabilidade da estrutura, foram avaliadas formas de solucioná-lo.

Desse modo, o conhecimento acerca dos materiais geossintéticos foi ampliado através da documentação bibliográfica disponível, chegando até a proposição de uso destes materiais para sanar as questões relativas ao fluxo de água

através das barragens, analisando as propriedades desse material e os benefícios da sua aplicação nesse tipo de obra.

3.2 Estudo de caso

Uma vez elaborado todo o levantamento bibliográfico que forneceu subsídios para que a avaliação dos casos de obra seja mais adequada, deu-se início à parte relativa ao estudo de caso.

Este estudo tem como função principal ilustrar, através de exemplo prático, a problemática abordada, para que se possa ter uma visão mais ampla do assunto. Por meio deste, é realizada uma análise aprofundada do objeto de estudo e retirada de conclusões.

Desse modo, o estudo de caso foi realizado utilizando uma barragem real em fase de projeto básico. Foi feita a análise da barragem cuja fundação em linhas gerais pode ser classificada como permeável e foi avaliada a percolação pelas fundações comparando soluções viáveis com a utilização do *Software Geo-Slope SEEP/W*.

SEEP/W é um programa desenvolvido pela *Geo-Slope International* e utiliza elementos finitos que analisa o fluxo de águas subterrâneas em material poroso. O programa permite vários tipos de análises, tais como simples problemas em meios saturados e regime estacionário, a situações mais complexas envolvendo materiais não saturados em regime transitório.

A barragem que foi utilizada como objeto de estudo nesta análise está sendo projetada com maciço em terra zoneada, constituída de material do tipo SM/SC, no espaldar de montante e jusante, classificada de acordo com o sistema unificado de classificação dos solos (SUCS), como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Sistema Unificado de Classificação dos Solos

SISTEMA UNIFICADO DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS (USC) (Resumo)		
Classificação geral	Tipos principais	Símbolos
SOLOS GROSSOS (Menos que 50% passando na # 200)	Pedregulhos ou solos pedregulhosos	GW, GP, GM e GC
	Areias ou solos arenosos	SW, SP, SM e SC
SOLOS FINOS (Mais que 50%) passando na # 200)	Siltosos ou argilosos	Baixa compressibilidade (LL < 50) ML, CL e OL
		Alta compressibilidade (LL > 50) MH, CH e OH
SOLOS ALTAMENTE ORGÂNICOS	Turfas	Pt

Fonte: Caputo (2015)

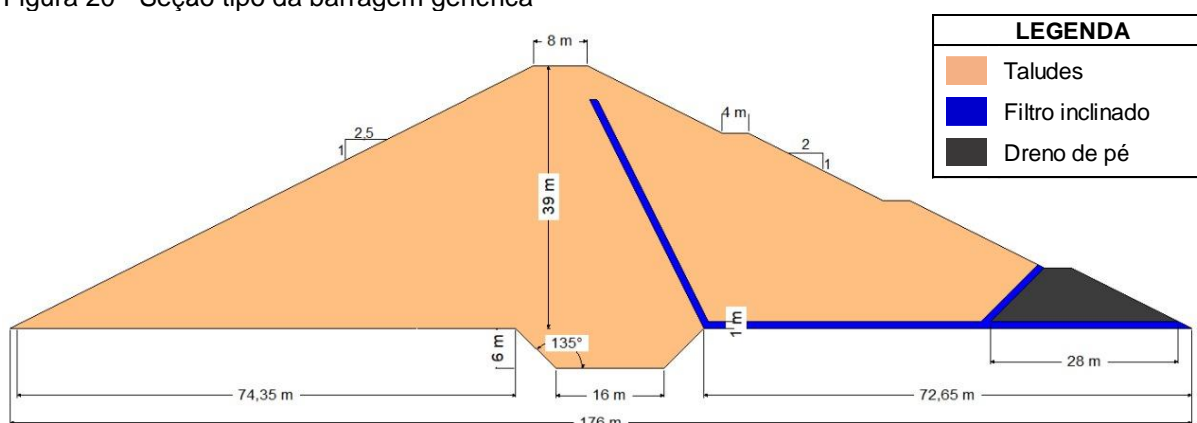
O projeto prevê uma barragem com altura máxima limitada em 39,00 metros, com largura de crista de 8,00 metros e largura de base de 176,00 metros. Para o talude de montante foi definida a inclinação de 2,5:1,0 (H:V) e para o talude de jusante uma inclinação de 2,0:1,0 (H:V). O comprimento total do barramento é de 191 + 18,53 estacas, ou seja, 3.838,53 metros.

A permeabilidade do maciço da barragem foi obtida a partir das análises dos ensaios de granulometria e ensaios de permeabilidade efetuados nos materiais das jazidas, cujos valores variaram em torno de $9,0 \times 10^{-6}$ cm/s. Foi adotada uma permeabilidade igual a $1,3 \times 10^{-6}$ cm/s no espaldar de montante e 10^{-6} cm/s para o núcleo do maciço compactado da barragem e uma permeabilidade de 10^{-4} cm/s para o material da fundação.

No projeto original foi determinado no sistema de vedação das fundações a utilização de uma trincheira de vedação *cut-off*. Para o sistema, foi previsto taludes de 1,5:1,0 (H:V), a partir do encontro do filtro inclinado com o tapete horizontal. A largura da base do *cut-off* foi determinada em 16,00m, com 6,00m de profundidade.

A seguir, na Figura 20, é mostrada a seção da barragem genérica utilizada no estudo de caso.

Figura 20 - Seção tipo da barragem genérica



Fonte: A autora (2020)

O estudo foi elaborado de forma que resultasse em uma análise concreta da aplicação de um material geossintético para controle da percolação em fundações. No caso da barragem em estudo, optou-se fazer a análise com a utilização da geomembrana, por ter como característica principal uma baixa permeabilidade, podendo ser aplicada como tapete à montante.

Assim, foram realizados estudos de percolação através do programa *SEEP/W* em três fases a saber:

- Na primeira fase foi utilizada a seção da barragem sem a previsão de nenhum tratamento de fundação ou sistema de vedação, de forma que não haja controle de percolação, ou seja, a água poderá percolar livremente pelas fundações da barragem. Este estudo foi utilizado para efeito de comparação com os sistemas de vedação simulados.
- Na segunda fase foi feita a análise da seção da barragem com a utilização do sistema de vedação previsto no projeto original, a trincheira. Sendo este um sistema mais usual, será utilizado também para efeito comparativo.
- Por fim, na terceira fase, o estudo de percolação nas fundações foi realizado prevendo a utilização da geomembrana de PEAD como tapete à montante. Foram realizadas simulações com a aplicação deste geossintético com 2mm de espessura e em 6 (seis) comprimentos distintos: 50, 75, 100, 150, 200 e 250 metros.

A permeabilidade das geomembranas, em geral, variam entre $k = 10^{-12}$ e 10^{-15} m/s. Portanto, de forma mais conservadora, foi adotado para a simulação um coeficiente de permeabilidade $k = 10^{-12}$ m/s.

Além de elaborar um estudo comparativo com o sistema de vedação original, pretende-se também analisar o comprimento de maior viabilidade, no qual há uma diminuição significativa dos efeitos da percolação, caso essa condição seja notada nas simulações.

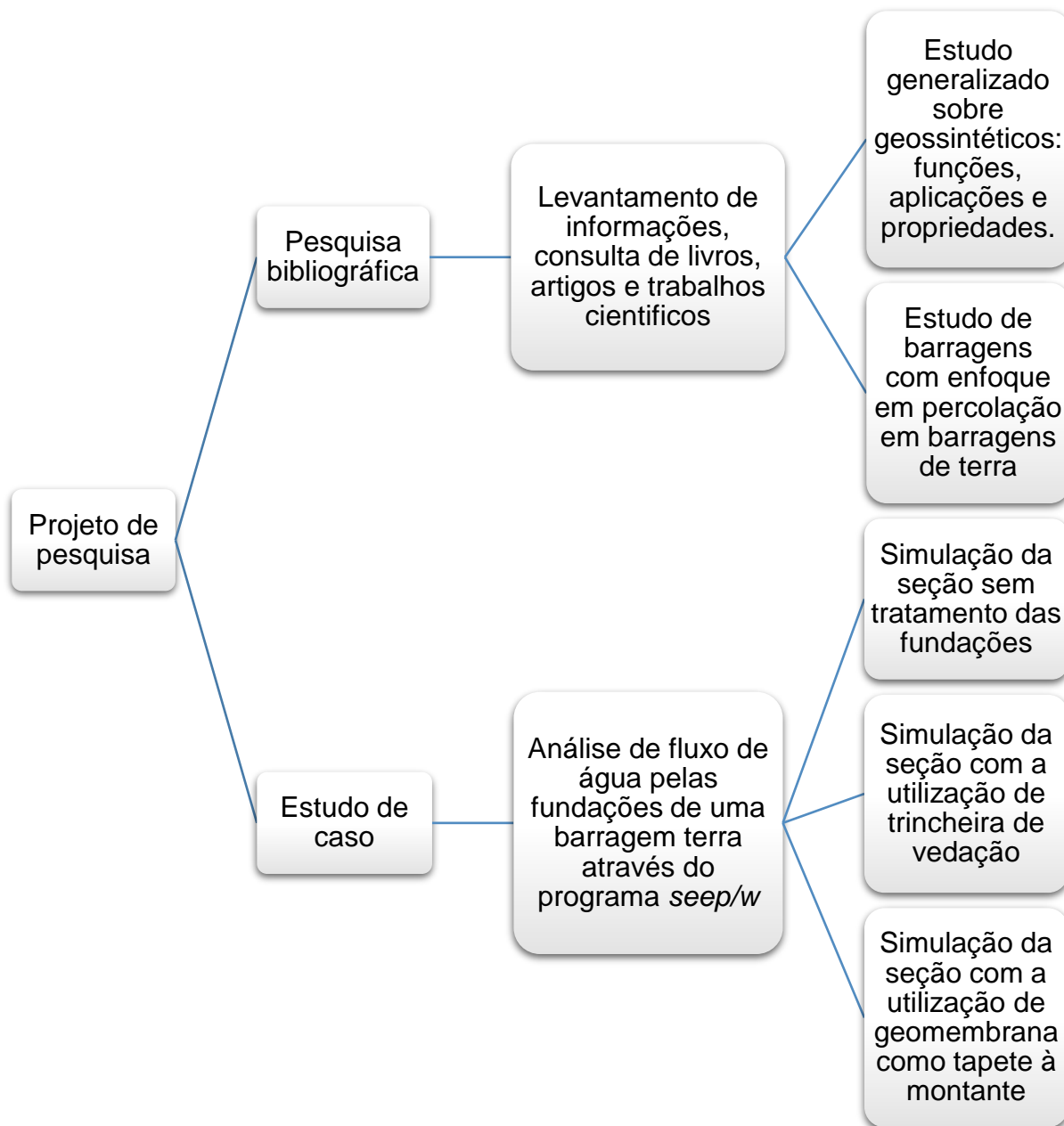
Neste trabalho, foi realizada a avaliação do fluxo de água através da fundação de uma barragem, não fazendo parte do escopo do trabalho a análise da percolação através do maciço, o estudo de estabilidades de taludes, como também análise referente aos custos relacionados a execução de cada sistema mencionado.

Após a coleta dos resultados através do programa *SEEP/W*, foi realizada uma discussão geral sobre a utilização do material geossintético nessa barragem, quais os resultados, se houve ou não diminuição de fluxo de água através das fundações em comparação com o sistema de vedação previsto em projeto e qual foi o comprimento encontrado de maior viabilidade.

A partir daí, foram tiradas as conclusões a respeito da utilização do material geossintético em barragens de terra, tentando avaliar se tal uso traz ou não benefícios para a obra, considerando como variável importante a mitigação do problema de percolação encontrado em barragens.

A seguir, na Figura 21, é apresentado um fluxograma no qual foi elaborado de forma a ilustrar as etapas de desenvolvimento deste trabalho.

Figura 21 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento do trabalho



Fonte: A autora (2020)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como mencionado anteriormente, foi feito o estudo de percolação através das fundações, elaborado para uma seção tipo de uma barragem genérica por meio do *software Geo-Slope SEEP/W*.

A análise foi feita em três fases distintas: a seção da barragem sem tratamento de fundação, a seção com a utilização de trincheira de vedação e a seção com a utilização de tapete à montante.

Tendo em vista que o objetivo deste estudo é fazer uma análise da utilização de geossintéticos como soluções viáveis para o controle de percolação nas fundações de barragens de terra, foi feita a escolha da aplicação da geomembrana como tapete à montante, principalmente pela sua característica de baixa permeabilidade, podendo ser uma opção eficaz para vedação das fundações.

Foi realizada análise da geomembrana de PEAD como tapete à montante, com 2mm de espessura e com comprimentos variáveis, de forma que seja possível encontrar o comprimento de maior viabilidade com reduções de vazões mais significativas.

Além disso, foram realizadas as simulações de forma comparativa com um método mais usual de vedação de fundação: a trincheira de vedação, sendo este o sistema previsto originalmente em projeto.

Como mencionado anteriormente, este trabalho fez o estudo do fluxo de água através das fundações da barragem, portanto, não foi feita análise da percolação pelo maciço da barragem, o estudo de estabilidade de taludes, como também a análise referente aos custos gerais de execução dos sistemas.

As condições de contorno da barragem e o nível de água foram considerados iguais para todas as simulações.

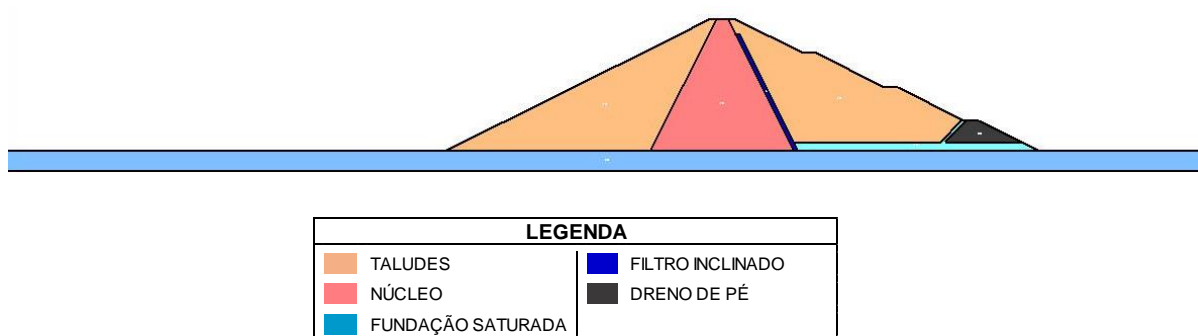
4.1 Seção sem trincheira de vedação e sem tapete à montante

Na primeira simulação feita através do programa *SEEP/W*, foi estudada a seção da barragem genérica sem a previsão de controle de fluxo pelas fundações, ou seja, sem a utilização de trincheira de vedação e sem o tapete à montante.

A simulação dessa seção foi realizada para efeito de comparação com o sistema de vedação mais usual, bem como a utilização da geomembrana como tapete à montante.

A figura a seguir apresenta a seção tipo da barragem em estudo (Figura 22). Como pode ser observado, esta seção não possui nenhum tratamento nas fundações, ou seja, o fluxo de água não tem impedimento, possuindo livre passagem através da fundação.

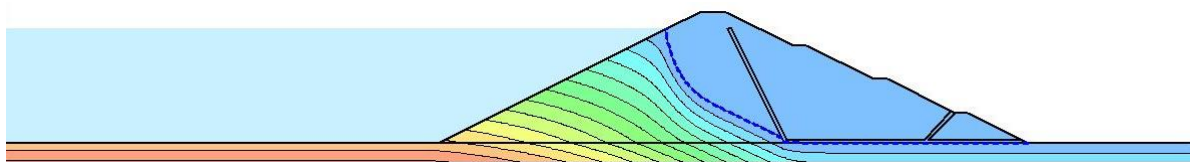
Figura 22 – Seção da barragem sem trincheira de vedação e sem tapete à montante



Fonte: A autora (2020)

Já a Figura 23 ilustra a rede de fluxo estabelecida para a geometria em questão. O traçado da linha freática foi determinado pelo *SEEP/W* com correções de entrada e saída para melhor estabelecimento da mesma. As linhas de fluxo representam os caminhos ao longo do qual a água pode escoar através da seção transversal. (OLIVEIRA, 2008)

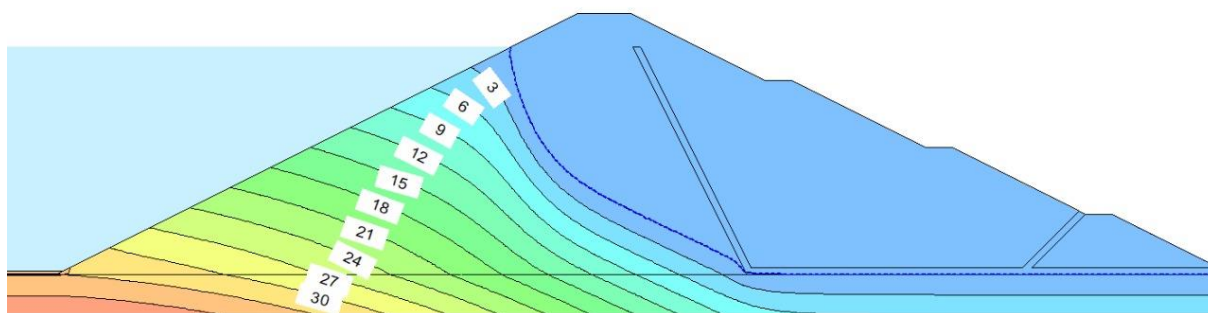
Figura 23 - Rede de fluxo da seção tipo da barragem sem tratamento nas fundações



Fonte: A autora (2020)

Na Figura 24, é possível observar de forma mais detalhada os canais de fluxo da rede apresentada na Figura 23.

Figura 24 - Canais de fluxo da barragem sem tratamento nas fundações



Fonte: A autora (2020)

Como mostrado na figura, as linhas de fluxo ilustram a livre passagem da água pelo corpo e fundação da barragem, esta situação pode trazer riscos a estrutura em decorrência do carreamento de material granular pela água e abertura de vazios.

Para esta simulação, foi encontrada uma vazão de $Q = 5,28 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Uma vez que esta barragem está localizada sobre fundação de solo permeável, o valor de vazão encontrado é suficiente para que se tenha problemas de perda de água armazenada no reservatório, formado pelo barramento, além do risco potencial para estrutura.

Dessa forma, será analisado o tratamento de fundação adequado para amenizar os efeitos da percolação neste caso. Segundo Oliveira (2008, p.31), “os projetos de dispositivos para o controle da percolação através da fundação têm como objetivos principais a redução da quantidade de percolação, a minimização ou controle dos gradientes de saída e a redução as subpressões.”

4.2 Seção com trincheira de vedação e sem tapete à montante

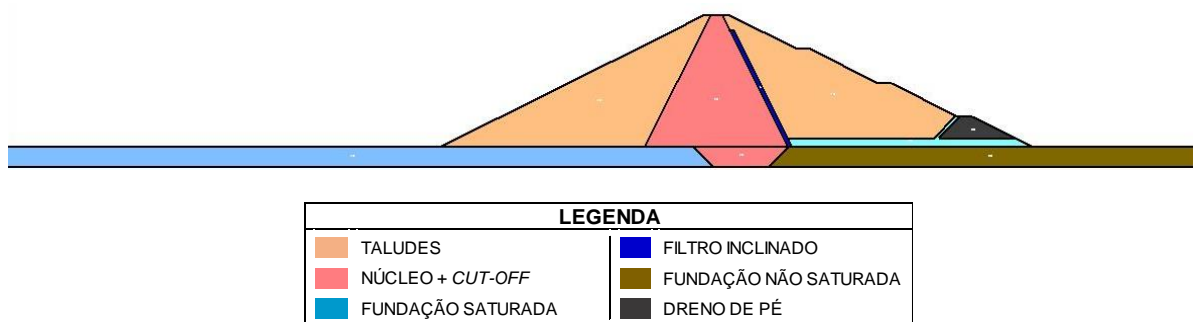
Na segunda análise foi estudada a seção da mesma barragem, porém, neste caso foi considerado o tratamento de fundações previsto em projeto: a trincheira de vedação *cut-off*.

Segundo Oliveira (2008), a trincheira de vedação é uma técnica na qual o solo permeável da fundação é substituído pelo solo de baixa permeabilidade compactado em trincheiras escavadas sob o núcleo do maciço.

Esta análise foi realizada de forma a comparar um sistema de vedação mais usual com o sistema de estudo, em que utiliza a geomembrana como tapete à montante.

A seguir, é apresentada na Figura 25 a seção tipo da barragem com a utilização do *cut-off*.

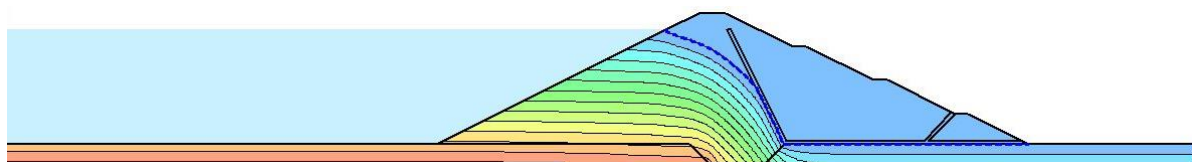
Figura 25 - Seção da barragem com trincheira de vedação e sem tapete à montante



Fonte: A autora (2020)

A Figura 26 ilustra a rede de fluxo estabelecida para a geometria em questão. Assim como na simulação anterior (Tópico 4.1), o traçado da linha freática foi determinado pelo *SEEP/W* com correções de entrada e saída para melhor estabelecimento da mesma.

Figura 26 - Rede de fluxo da seção tipo da barragem com cut-off



Fonte: A autora (2020)

Pode-se observar através da Figura que houve uma alteração no contorno das linhas de fluxo, isso se dá pois o material utilizado na construção da trincheira tem menor permeabilidade que o material da fundação, dificultando a travessia da água por ela e diminuindo a percolação através da fundação.

Nesta simulação foi encontrada uma vazão de $Q = 4,7 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, ou seja, houve uma redução da vazão em torno de 91,1% em relação a seção onde não houve tratamento das fundações, sendo uma diminuição do fluxo de água apropriada, podendo ser considerada uma alternativa efetiva para o tratamento da fundação desta barragem em específico.

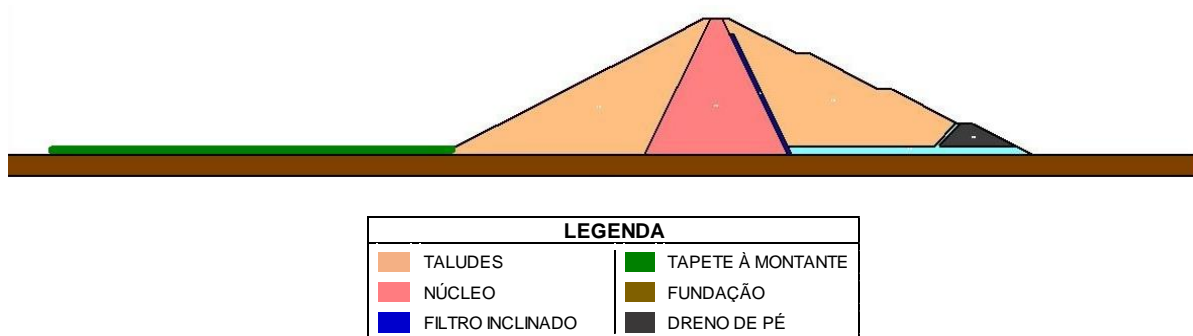
4.3 Seção sem trincheira de vedação e com tapete à montante

Na terceira análise da percolação através da fundação da barragem em estudo, foi utilizada a geomembrana como opção de sistema de vedação do tipo tapete à montante. Foi adotada uma geomembrana de PEAD com espessura de 2mm e coeficiente de permeabilidade de 10^{-12} m/s.

A técnica do tapete impermeável à montante visa aumentar o caminho de percolação. Originalmente, segundo Oliveira (2008), o tapete consiste em um aterro compactado constituído de solo de baixa permeabilidade executado a montante da barragem, entretanto, esse trabalho propôs a utilização de um material polimérico industrializado com função de impermeabilização.

Na Figura 27 é possível observar a seção da barragem na qual demonstra de forma genérica a utilização de uma geomembrana como tapete a montante de comprimento “L”.

Figura 27 - Seção genérica da barragem sem trincheira de vedação e com tapete à montante

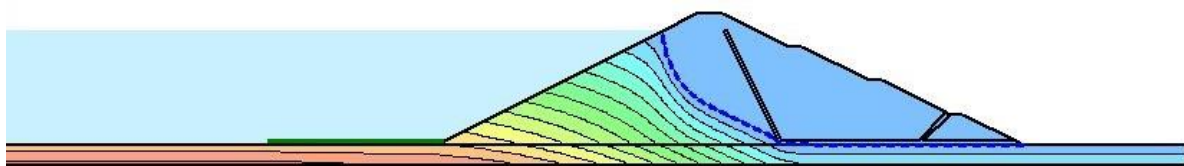


Fonte: A autora (2020)

O estudo da utilização da geomembrana foi realizado com 6 (seis) comprimentos distintos a saber: 50, 75, 100, 150, 200 e 250 metros. Dessa forma, é possível fazer a análise do comprimento de maior viabilidade, no qual seja notória uma maior redução do fluxo de água.

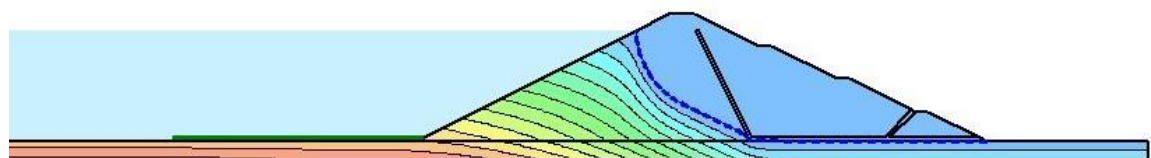
As Figuras 28, 29, 30, 31, 32 e 33 mostram as redes de fluxo encontradas para cada comprimento de geomembrana estudado, pode-se observar uma nova alteração na rede, de modo que o tapete à montante é “evitado” pelas linhas do traçado da água, aumentando o percurso da água percolada.

Figura 28 - Rede de fluxo na seção tipo com tapete à montante de 50 metros



Fonte: A autora (2020)

Figura 29 - Rede de fluxo na seção tipo com tapete à montante de 75 metros



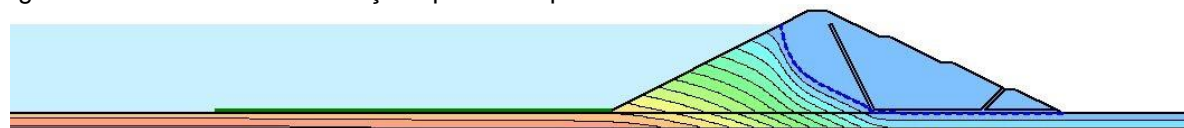
Fonte: A autora (2020)

Figura 30 - Rede de fluxo na seção tipo com tapete à montante de 100 metros



Fonte: A autora (2020)

Figura 31 - Rede de fluxo na seção tipo com tapete à montante de 150 metros



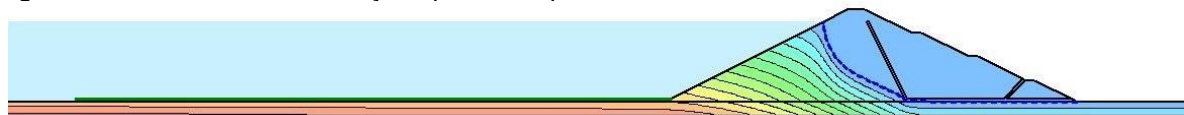
Fonte: A autora (2020)

Figura 32 - Rede de fluxo na seção tipo com tapete à montante de 200 metros



Fonte: A autora (2020)

Figura 33 - Rede de fluxo na seção tipo com tapete à montante de 250 metros



Fonte: A autora (2020)

Os resultados obtidos através do programa *SEEP/W* podem ser visualizados e resumidos na Tabela 2.

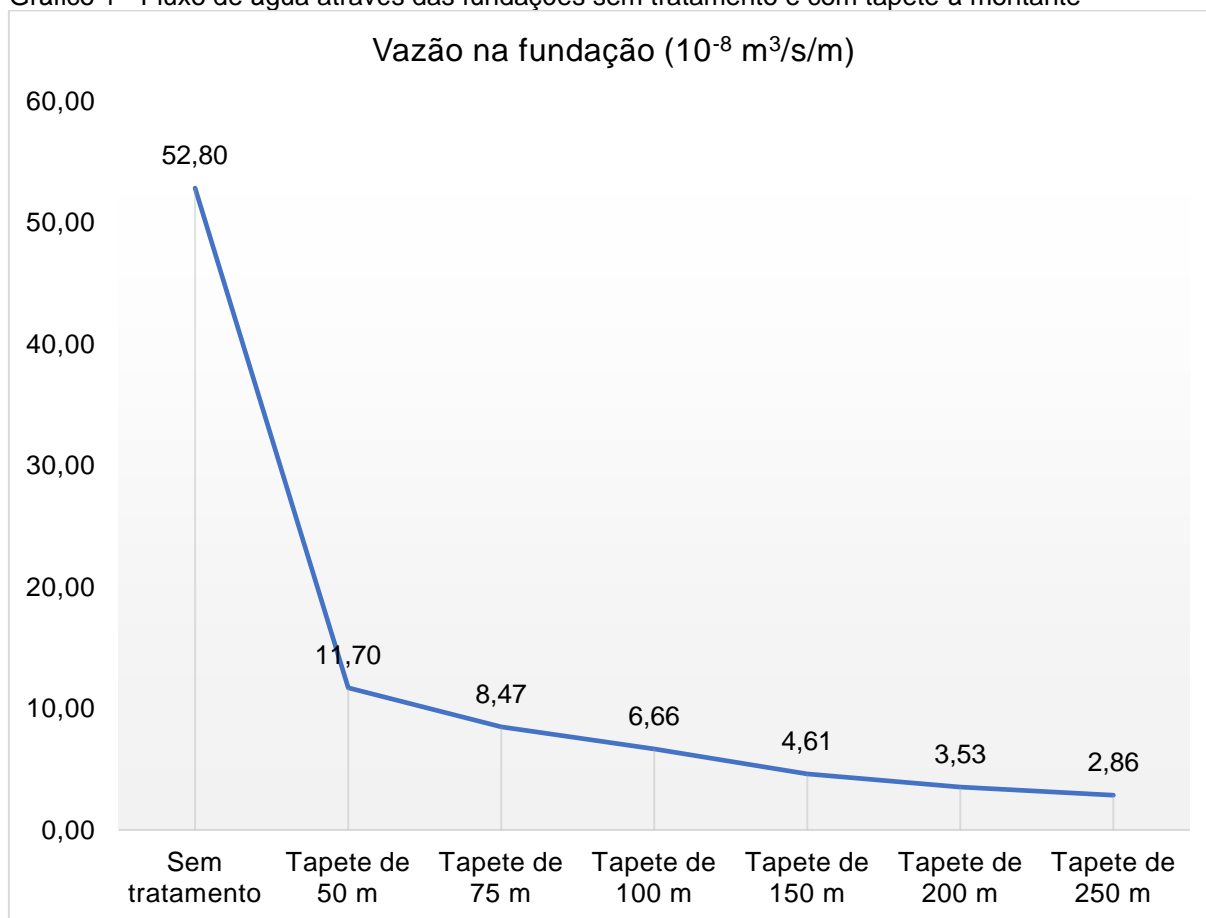
Tabela 2 - Vazões encontradas nas fundações da seção com o tapete à montante

Comprimento da geomembrana (m)	Vazão na fundação ($10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$)	Redução em relação à seção sem tratamento
50	11,7	77,40%
75	8,47	83,96%
100	6,66	87,39%
150	4,61	91,29%
200	3,53	93,31%
250	2,86	94,58%

Fonte: A autora (2020)

Assim, com os resultados obtidos após a simulação, pode-se observar uma diminuição progressiva do fluxo de água com o aumento do comprimento do tapete à montante. Foi utilizado o Gráfico 1 para ilustrar os resultados, fazendo um comparativo com a seção da barragem sem tratamento das fundações.

Gráfico 1 - Fluxo de água através das fundações sem tratamento e com tapete à montante

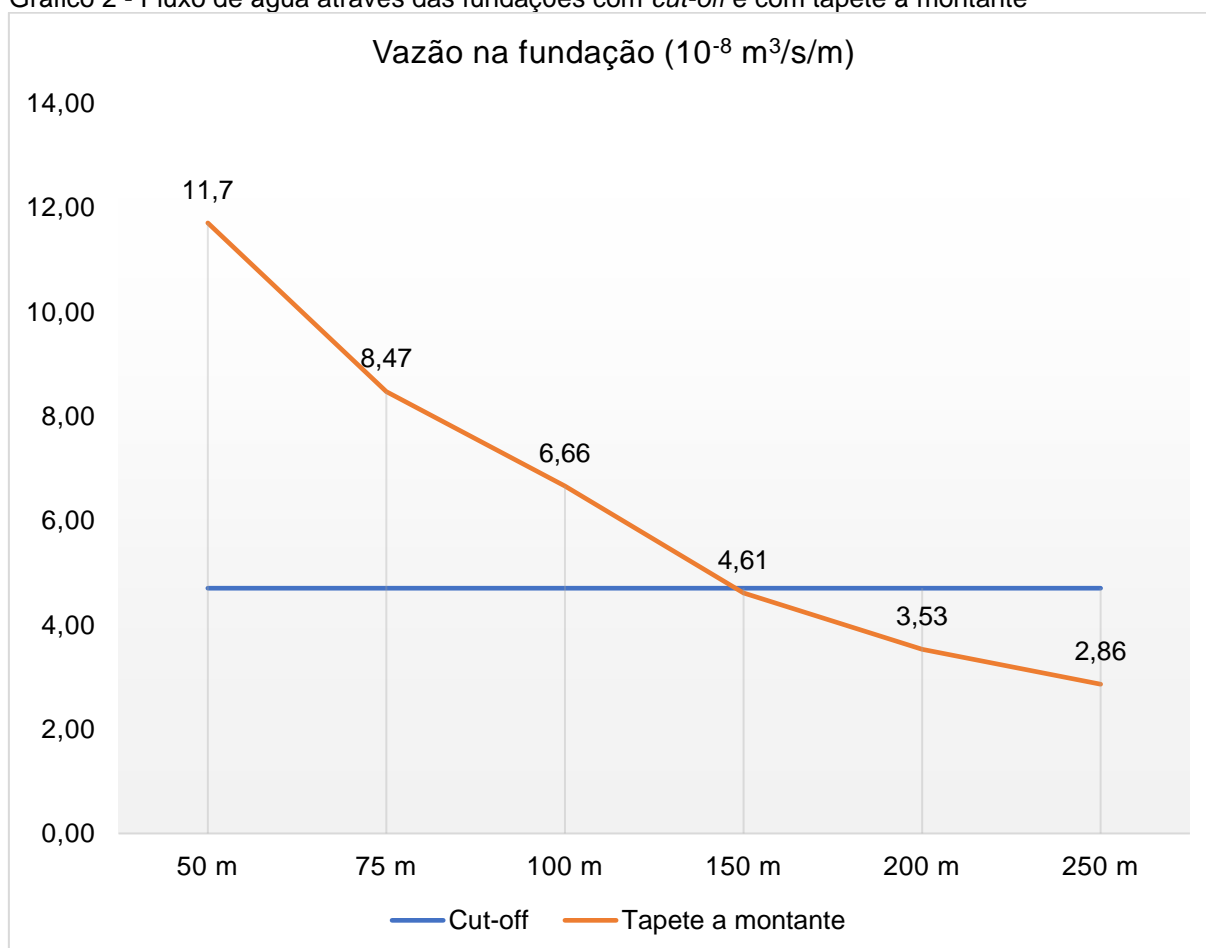


Fonte: A autora (2020)

É possível observar através da Tabela 2 a porcentagem de redução da vazão em comparação à seção da barragem sem tratamento das fundações. Pode-se notar que a geomembrana de 150 metros de comprimento possui uma porcentagem de redução da vazão de 91,29%, esta redução é bastante próxima à encontrada na simulação anterior com a utilização da trincheira de vedação (Tópico 4.2).

Portanto, assim como o *cut-off*, a geomembrana pode ser considerada também como uma opção viável na escolha do melhor sistema para essa barragem em específico. No Gráfico 2, foi feito um comparativo entre os dois sistemas de vedação estudados.

Gráfico 2 - Fluxo de água através das fundações com *cut-off* e com tapete à montante



Fonte: A autora (2020)

Fazendo uma análise mais aprofundada, pode-se observar que a redução da vazão não se trata de uma função linear. Há uma redução considerável entre os comprimentos de 50 e 75 metros e entre os comprimentos de 100 e 150 metros,

porém, a partir disso, a redução da vazão não é significativa, podendo não ser considerada como uma opção viável.

Para uma melhor comparação dos dois métodos, é necessária a análise de outros pontos importantes para definição do melhor sistema para ser aplicado em cada tipo de obra. Além do estudo da percolação através das fundações, há também a necessidade da análise do custo inicial, o custo de transporte de material, e o tempo de execução, sendo fatores importantes a serem considerados antes da tomada de decisão, os quais não foram elaborados no presente estudo.

5 CONCLUSÃO

O estudo do fluxo de água através do maciço e das fundações é de grande importância para prever problemas passíveis de ocorrer e garantir a segurança da barragem, visto que a percolação da água pode ocasionar perda da estabilidade da estrutura.

Esse trabalho apresentou a análise de uma solução viável para os problemas relacionados a percolação de água através das fundações de barragens de terra, em comparação com soluções existentes. Foi proposta a utilização de um geossintético como tapete impermeável à montante de forma a substituir métodos usuais com materiais granulares.

Desse modo, foi realizado uma análise de percolação através de simulações em um *software* com a previsão de dois sistemas de tratamento das fundações: a trincheira de vedação e o tapete à montante. Para uma análise comparativa também foi simulada a vazão de uma seção sem tratamento nas fundações.

Analisando os resultados e utilizando como base a seção sem tratamento nas fundações, na utilização da geomembrana como tapete a montante, há uma redução gradual da vazão de acordo com o aumento do comprimento do tapete, variando de 77,40% à 94,58%. Essas porcentagens indicam uma redução significativa da vazão, confirmando a geomembrana como solução eficaz para controle de percolação através das fundações.

Em relação a utilização do *cut-off*, houve uma redução da vazão de 91,1% após a implementação da trincheira, confirmando a viabilidade da utilização desse sistema de vedação. Um resultado parecido foi observado com o tapete à montante de 150 metros de comprimento, isso mostra que a geomembrana pode ser uma opção viável a ser comparada com o *cut-off*.

Fazendo a análise entre os dois sistemas, para comprimentos de geomembrana menores que 150 metros, a redução das vazões encontradas foram baixas em relação a redução encontrada com a adição da trincheira, enquanto que para comprimentos maiores que 150 metros, houve reduções maiores que a trincheira. Entretanto, para realizar uma análise comparativa completa entre a geomembrana e o *cut-off*, faz-se necessária a análise de outros fatores que possibilite a comparação desses dois métodos.

De forma geral, pode-se concluir que feitas as simulações para o estudo da percolação nas fundações da barragem genérica, foram encontrados resultados satisfatórios. Na análise da utilização da geomembrana como tapete à montante, os resultados encontrados se apresentaram vantajosos, podendo ser uma opção em relação ao sistema de trincheira de vedação.

Assim, a utilização da geomembrana como tapete à montante pode ser considerada como uma opção de vedação de fundações se analisada a redução do fluxo. Entretanto, é importante salientar que há outros pontos a serem avaliados para a escolha do sistema a ser utilizado. Por exemplo, o custo de cada material e custo de transporte, como também o tempo de execução são pontos importantes a serem considerados, os quais não foram analisados no presente estudo.

Neste trabalho, foi feita a análise da utilização de geossintéticos em fundações de barragens de terra com a opção do emprego da geomembrana como tapete à montante, entretanto há outras opções de geossintéticos que podem ser analisados, sendo esse estudo uma opção para temas de trabalhos futuros.

Além disso, há também outras análises que podem ser feitas com os geossintéticos, como por exemplo, o fluxo pelo maciço, visto que neste trabalho somente foi analisado o fluxo através das fundações.

Outro estudo que contribuiria para o meio acadêmico seria a análise comparativa entre outros sistemas de vedação, já que neste trabalho optou-se pela trincheira de vedação *cut-off* por ser o sistema previsto originalmente em projeto.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, P. R.; VERTEMATTI, J. C. Introdução. *In*: VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 2. ed. São Paulo: Bluncher, 2015. Cap. 1, p. 17-30.
- AMARAL, N. B. **Geossintéticos aplicados a geotecnia ambiental**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10318-1**: geossintéticos - parte 1: termos e definições. Rio de Janeiro, 2018.
- BARBOSA, C. C. **A utilização de materiais geossintéticos em barragens de terra e enrocamento**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.
- BATHURST, R. J. **Classificação dos geossintéticos**. Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS). Tradução Marianna J. A. Mendes. [Brasília]: IGS BRASIL, [2015a]. Disponível em: <http://igsbrasil.org.br/wp-content/uploads/geossinteticos/1.pdf>. Acesso em: 20 de jul. 2020.
- BATHURST, R. J. **Funções dos geossintéticos**. Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS). Tradução Karla C. A. P. Maia. [Brasília]: IGS BRASIL, [2015b]. Disponível em: <http://igsbrasil.org.br/wp-content/uploads/geossinteticos/2.pdf>. Acesso em: 20 de jul. 2020.
- 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.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**: fundamentos. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. v. 1.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**: mecânica das rochas, fundações e obras de terra. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. v. 2.
- 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.
- CAVALCANTE, S. N. Chuvas continuam, Castanhão alcança 8,7%. **Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS)**. Fortaleza, 16 mai. 2018. Disponível em: <https://antigo.dnocs.gov.br/gab-cs/97-noticias-internas/4021-chuvas-continuam-e-melhora-volume-do-acude-castanhao>. Acesso em: 06 out. 2020.
- COSTA, W. D. **Geologia de barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CRUZ, P. T. **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. 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.

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

FONTENELLE, A. S. **Proposta metodológica de avaliação de riscos em barragens do nordeste brasileiro – estudo de caso: barragens do estado do Ceará**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD. **Seepage Modeling with SEEP/W: an Engineering Methodology**. Alberta, Canadá, 2015.

GIL, S. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

ICOLD. **World register of dams**. 2020. Disponível em: https://www.icold-cigb.org/GB/world_register/world_register_of_dams.asp. Acesso em: 28 de set. 2020

KNAPPETT, J. A.; CRAIG; R. F. **Craig mecânica dos solos**. Tradução Amir Elias Abdalla Kurban. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

MARQUES, J. C.; UNAS, M. Estudos em modelo reduzido de percolação em barragens de aterro. **Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente**. Porto, 2010. ISBN 978-989-95557-4-7.

OLIVEIRA, A. G. S. **Análise da eficácia dos dispositivos de vedação e drenagem utilizados em fundações permeáveis de barragens de terra**. 2008. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

PIEROZAN, R. C. **Aplicação de geomembranas em tapetes impermeáveis a montante de barragens de terra**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

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

SARÉ, A. R.; LIGOCKI, L. P.; SAYÃO, A. S. F. J; GERSCOVISH, D. M. S. Estudos geotécnicos na barragem de terra de Curuá-Una. **Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos (Geo-Jovem)**. Rio de Janeiro, 2004. p 1-6. CD-ROM.

SOUZA, M. D. F. **Geologia aplicada a fundações de barragens: barragem Governador Eduardo Henrique Accioly Campos, um estudo de caso**. 2017.

Dissertação (Mestrado em Geociências) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade de Pernambuco, Recife, 2017.

TEIXEIRA, W. L.; LIMA FILHO; F. P.; PONSATI, A. C. **Um estudo das condições de percolação e estabilidade em barragens de terra mediante métodos geofísicos**: caso do dique de Sant Llorenç de Montgai – Espanha. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

UNAS, M. S. P. **Estudo experimental e numérico de problemas de percolação em modelo reduzido**. 2010. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2010.

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. Disponível em: <http://www.abint.org.br/pdf/Apostila%20-%20CBG.pdf>. Acesso em: 18 de jul. 2020.

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. 2015. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Curso de Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

VILAR, O. M.; BENJAMIM, C.V. S.; BUENO, B. S. Geossintéticos. *In*: ZUQUETTE, L. V. **Geotecnia ambiental**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. Cap. 12, p. 352-383.

ZUFFO, M. S. R. **Metodologia para avaliação da segurança de barragens**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.