



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**A UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS GEOSINTÉTICOS EM  
BARRAGENS DE TERRA E ENROCAMENTO**

**CAMILA CUNHA BARBOSA**

**João Pessoa - PB  
Novembro de 2016**

**CAMILA CUNHA BARBOSA**

**A UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS GEOSINTÉTICOS EM  
BARRAGENS DE TERRA E ENROCAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial obrigatório à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador (a): Prof<sup>ª</sup>. Aline Flávia Nunes Remígio  
Antunes

**João Pessoa - PB  
Novembro de 2016**

# **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**CAMILA CUNHA BARBOSA**

## **A UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS GEOSSINTÉTICOS EM BARRAGENS DE TERRA E ENROCAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso em 18/11/2016 perante a seguinte Comissão Julgadora:

---

Prof<sup>a</sup> Aline Flávia Nunes Remígio Antunes (Orientadora)  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

---

Prof. Dr. Fábio Lopes Soares  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

---

Prof. Dr. Clóvis Dias  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

---

Prof<sup>a</sup>. Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga  
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

B238a Barbosa, Camila Cunha  
A Utilização de Materiais Geossintéticos em Barragens de  
Terra e Enrocamento./ Camila Cunha Barbosa – João Pessoa:  
UFPB, 2016.

73f. il.:

Orientador: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Aline Flávia Nunes Remígio Antunes

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Civil)  
CGEC / Universidade Federal da Paraíba. Campus I - Centro  
de Tecnologia.

1. Geotêxtil. 2. Geocomposto. 3. Barragem. 4. Filtração.  
5. Reforço. I. Título

UFPB/BS/CT

CDU: 2ed. 981.33 (043)

Dedico este trabalho, primordialmente, a Deus, por reconhecer que nada poderia ter sido feito sem a Sua permissão. Agradeço à minha orientadora pela sua enorme paciência, à minha família por sempre acreditar em mim e aos meus amigos, pela divertida convivência.

## AGRADECIMENTOS

A **Deus**, dou graças porque através desta monografia a Sua bondade me alcançou, grande é a Sua fidelidade, pois dEle, por Ele e para Ele são todas as coisas.

A **minha mãe**, Maria José pelo apoio e amor incondicional. Agradeço a sua total dedicação aos meus projetos hoje e sempre.

Ao **meu pai**, Jairo (in memorian) pelo amor e cuidado. Sinto sua falta, paiinho. Obrigada por me visitar em meus sonhos.

À **minha irmã**, Ilsa pelo apoio, incentivo e amizade em todos os momentos.

Às **pessoas especiais**, Ester e Adelina Cunha (in memorian), Humberto Cunha Barbosa, Conexão Cidade Viva, Lígia, Raquel, Jéssica, Diego, Mayara pelo apoio e amizade.

À **minha amiga Gabrielle**, pela ajuda com o português. Tenho certeza que seu futuro será brilhante, Gabi.

Aos **meus amigos engenheiros**, Ana Beatriz, Amanda, Alice, Nathália, Sergio, Roberta, Germano, Rosenai, Thais, Natália, Adalice e Geórgia, pelo apoio e amizade.

À **minha orientadora prof.<sup>a</sup> Aline Remígio** por ser meu modelo de pesquisadora, assim como de ser humano ético e bondoso.

A todos os meus grandes amigos que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização desse trabalho: **MUITO OBRIGADA!**

## RESUMO

As barragens de terra e enrocamento - também chamadas de barragens de aterro -, possuem peculiaridades de projeto conforme as funções para as quais foram construídas. A ruptura dessas grandes obras pode trazer grandes malefícios econômicos e sociais e, por isso, deve-se dar grande importância aos estudos preliminares do projeto, bem como à execução e a manutenção da obra. Os geossintéticos, materiais sintéticos constituídos a base de polímeros, podem ser utilizados em diversas aplicações na engenharia civil. A utilização desses materiais em barragens de aterro pode trazer benefícios econômicos e ambientais em relação à utilização de determinados materiais granulares tradicionalmente empregados. Diante desse contexto, este trabalho buscou analisar, por meio de revisão bibliográfica, as funções que podem ser exercidas pelos geossintéticos em barragens de terra e enrocamento. As principais funções analisadas foram as de filtração e drenagem, impermeabilização, separação e proteção e, por fim, reforço e estabilização de face. Concluiu-se que há a possibilidade de haver benefícios ambientais e econômicos em relação à utilização de materiais geossintéticos, no entanto, o uso desses materiais não é recomendado em estruturas de barragens que possuam difícil acesso para o reparo e à troca desse material ou onde o mesmo exerça função crítica à segurança da barragem.

**Palavras-Chave:** Geotêxtil. Geocomposto. Barragem. Filtração. Reforço.

## **ABSTRACT**

Earth and rockfill dams – or embankment dams - have design peculiarities depending on the functions for which they were built. The rupture of these great works can bring huge economic and social damages and, therefore, great importance must be given to the preliminary studies of the project, as well as to the execution and its maintenance. Geosynthetics are polymeric materials that can be used in various applications in civil engineering. Their use in embankment dams can bring economic and environmental benefits in relation to the use of certain granular materials traditionally utilized. In this context, this work sought to analyze, through a literature review, the functions that can be performed by the geosynthetics in earth and rockfill dams. The main functions analyzed were filtration and drainage, waterproofing, separation and protection and, finally, reinforcement and surface stabilization. It was concluded that there is a possibility of environmental and economic benefits when using geosynthetics, however, they are not recommended in structures of dams that have difficult access for the repair and maintenance of this material or where it performs a critical function to the safety of the dam.

**Keywords:** Geotextile. Geocomposite. Dam. Filtering. Reinforcement.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CBR – *California Bearing Ratio*

CFRD – *Concrete Face Rockfill Dam*

CIGB – Comitê Brasileiro de Grandes Barragens

ECRD – *Earth Core Rockfill Dam*

FEMA – *Federal Emergency Management Agency*

GCL – Geocomposto argiloso

ICOLD – *International Committee of Large Dams*

IGS - *International Geosynthetics Society*

ISO - *International Organization for Standardization*

kPa – Quilo - Pascal

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

NBR – Normas Brasileiras

SPT- *Standard Penetration Test*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Barragem de concreto em arco, Barragem do Funil – RJ. ....	18
Figura 2: Seção da barragem Edson Queiroz .....	19
Figura 3: Barragem de aterro homogêneo modificado. ....	20
Figura 4: Barragem de aterro zoneada. ....	20
Figura 5: Esquema de linha de fluxo em uma barragem de terra. ....	24
Figura 6: Esquema de dreno de pé em uma barragem. ....	25
Figura 7: Esquema de tapete drenante em uma barragem. ....	25
Figura 8: Cut-off no centro de uma barragem de enrocamento. ....	26
Figura 9: Sequência erosiva devido ao galgamento em uma barragem de terra homogênea. ....	29
Figura 10: Ilustração do desenvolvimento de erosão interna na fundação de uma barragem. ....	31
Figura 11: Ilustração de erosão interna no corpo do maciço de uma barragem. ....	31
Figura 12: Exemplos de geossintéticos. ....	33
Figura 13: Instalação de geotêxtil em talude. ....	34
Figura 14: Geogrelhas. ....	35
Figura 15: Geomembrana em um canal. ....	35
Figura 16: Geocomposto geodreno. ....	36
Figura 17: Ilustração de um geotubo flexível. ....	37
Figura 18: Geocélula aplicada na face de um talude como elemento de reforço. ....	38
Figura 19: Formação de uma calota esférica no geossintético. ....	40
Figura 20: Utilizações mais frequentes de geossintéticos em barragens. ....	46
Figura 21: Geotêxtil utilizado como filtro. ....	47
Figura 22: Utilização de geossintético como filtro na barragem de Samira. ....	49
Figura 23: Manta geotêxtil com rasgo. ....	51
Figura 24: Esquema inicial de filtro. ....	52
Figura 25: Esquema do filtro após a alteração no projeto. ....	52
Figura 26: Utilização de geotêxtil como elemento separador entre o núcleo, fundação e enrocamento de uma barragem. ....	53
Figura 27: Utilização de geotêxtil como elemento separador entre <i>rip rap</i> e talude de montante de uma barragem. ....	53

Figura 28: Utilização de geotêxtil como elemento separador entre o dreno horizontal e gabiões numa barragem de terra. ....	54
Figura 29: Geossintético utilizado como reforço de fundação em solo mole. ....	56
Figura 30: Talude de barragem reforçado com geossintéticos. ....	57
Figura 31: Geossintético atuando com a função principal de evitar erosão de face no talude da barragem. ....	58
Figura 32: Posições da geomembrana em barragens de aterro. ....	59
Figura 33: Ilustração de entupimento do geotêxtil. ....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades importantes em cada função dos geossintéticos. ....	42
Tabela 2: Principais funções dos geossintéticos aplicados em barragens de aterro. ....	46
Tabela 3: Exemplos de barragens construídas com geossintéticos com função de filtração. ....	48
Tabela 4: Normas referentes aos ensaios realizados em geotêxteis e produtos similares. ....	60

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVOS.....	15
<b>2</b>	<b>CONSIDERAÇÕES SOBRE BARRAGENS.....</b>	<b>16</b>
2.1	PRINCIPAIS TIPOS DE BARRAGENS .....	17
2.1.1	<i>Barragens de Concreto</i> .....	17
2.1.2	<i>Barragens de Enrocamento</i> .....	18
2.1.3	<i>Barragens de Terra</i> .....	19
2.2	FATORES QUE INFLUENCIAM A ESCOLHA DO TIPO DE BARRAGEM .....	21
2.3	PRINCIPAIS ELEMENTOS DAS BARRAGENS.....	22
2.3.1	<i>Fundação</i> .....	22
2.3.2	<i>Crista</i> .....	23
2.3.3	<i>Núcleo</i> .....	23
2.3.4	<i>Sistema de drenagem interna</i> .....	23
2.3.5	<i>Proteções dos taludes</i> .....	27
<b>3</b>	<b>MECANISMOS DE RUPTURAS EM BARRAGENS DE TERRA.....</b>	<b>28</b>
3.1	GALGAMENTO ( <i>OVERTOPPING</i> ).....	28
3.2	DESLIZAMENTO DE TALUDES .....	29
3.3	EROSÃO INTERNA ( <i>PIPING</i> ).....	30
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES SOBRE GEOSSINTÉTICOS.....</b>	<b>33</b>
4.1	CLASSIFICAÇÃO.....	33
4.1.1	<i>Geotêxteis</i> .....	34
4.1.2	<i>Geogrelhas</i> .....	34
4.1.3	<i>Geomembranas</i> .....	35
4.1.4	<i>Georredes</i> .....	36
4.1.5	<i>Geocompostos</i> .....	36
4.1.6	<i>Geotubos</i> .....	37
4.1.7	<i>Geocélula</i> .....	37
4.2	PROPRIEDADES E ENSAIOS .....	38
4.2.1	<i>Propriedades físicas</i> .....	38
4.2.2	<i>Propriedades mecânicas</i> .....	39

4.2.3	<i>Propriedades hidráulicas</i>	41
4.3	APLICAÇÕES	41
4.3.1	<i>Filtração</i>	42
4.3.2	<i>Drenagem</i>	42
4.3.3	<i>Reforço</i>	43
4.3.4	<i>Separação</i>	43
4.3.5	<i>Controle de Processos Erosivos</i>	43
4.3.6	<i>Impermeabilização</i>	43
<b>5</b>	<b>UTILIZAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS EM BARRAGENS DE TERRA E ENROCAMENTO</b>	<b>45</b>
5.1	FILTRAÇÃO E DRENAGEM	47
5.1.1	<i>Algumas vantagens e desvantagens</i>	49
5.1.2	<i>Exemplo de utilização em barragens</i>	51
5.2	SEPARAÇÃO E PROTEÇÃO	52
5.2.1	<i>Exemplo de utilização em barragens</i>	54
5.3	REFORÇO	54
5.3.1	<i>Aterros em solos de baixa resistência</i>	55
5.3.2	<i>Reforço de Taludes</i>	56
5.4	ESTABILIZAÇÃO DE FACE	57
5.5	IMPERMEABILIZAÇÃO	58
<b>6</b>	<b>NORMAS VIGENTES</b>	<b>60</b>
<b>7</b>	<b>POTENCIAIS PROBLEMAS DE DESEMPENHO</b>	<b>63</b>
7.1	ALGUNS COMENTÁRIOS SOBRE DURABILIDADE	64
<b>8</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>66</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A construção de barragens é um fator essencial para a manutenção da qualidade de vida das cidades em épocas de seca e para garantir a produção de alimentos. Outros benefícios relacionados a essas grandes obras estão ligados ao controle de cheias, regularização de vazões, geração de energia elétrica, contenção de rejeitos e até benefícios em relação ao paisagismo e urbanismo do meio em que se encontram.

Porém, apesar do avanço das técnicas de engenharia permitir que o projeto, a construção e a utilização dessas obras sejam feitas de forma segura e economicamente viável, pesquisadores afirmam que sempre haverá a possibilidade, ainda que pequena, de que o seu desempenho seja insatisfatório e que haja risco de sua ruptura.

A utilização de materiais naturais em obras de engenharia civil depende de características qualitativas, geotécnicas, e de segurança. As dificuldades em atender estes fatores, associadas às circunstâncias ambientais in loco, à melhoria da qualidade dos produtos sintéticos e à possível redução dos custos de construção, vêm provocando um grande aumento da utilização de materiais sintéticos em obras de geotecnia.

Com o desenvolvimento das técnicas no campo da engenharia civil, foram desenvolvidos polímeros que criaram espaço para que a concepção de novos materiais sintéticos pudesse ser utilizada. Tal aperfeiçoamento tem por objetivo fornecer vantagens de cunho econômico, ambiental e de segurança, quando em contraste à um cenário tradicional de utilização materiais naturais.

Os materiais geossintéticos formados por esses polímeros começaram a ser utilizados na década de 1950 como elementos de filtro para proteção antierosiva em obras hidráulicas. Nestes tipos de obras, os materiais sintéticos podem ser usados de maneira a cumprir diversas funções, tais quais a de prevenir erosões, promover drenagem e filtração, reforçar a fundação ou até reduzir infiltrações.

Assim, alguns grupos técnicos foram criados na França, Estados Unidos e Brasil para que fossem desenvolvidas normas específicas e métodos de dimensionamento desses materiais. Então, com a evolução das pesquisas e estudos teóricos promovidos por esses grupos, houve o surgimento de uma grande quantidade de produtos com igual variedade de aplicações, sendo algumas delas relativas às barragens de terra e enrocamento.

Apesar de serem produtos com aplicações relativamente novas, os geossintéticos apresentam um papel relevante como caráter inovador da ciência. Tendo em vista serem

materiais manufaturados de produção controlada, podem ajudar a reduzir incertezas quando devidamente comparadas à aplicação de materiais naturais.

No caso da utilização desses materiais sintéticos em barragens, é necessário que o seu projeto e instalação sejam feitos de forma adequada, pois, na sua deficiência, o risco de ruptura da obra pode aumentar consideravelmente, tendo em vista que cada parte constituinte da barragem exige propriedades e funções diferentes dos geossintéticos.

Dessa maneira, esta monografia levanta o seguinte problema: que funções os geossintéticos podem exercer em uma barragem de terra e de enrocamento, de forma a substituir materiais granulares tradicionalmente utilizados e garantir a segurança da estrutura?

Assim, o presente trabalho propõe o estudo da utilização e aplicação de materiais geossintéticos em obras de barragens de terra e enrocamento, buscando, em um primeiro momento, conceituar os tipos de barragens e os seus principais elementos constituintes, apresentar as principais causas de rupturas em barragens, e, em um segundo momento, analisar as principais funções exercidas pelos geossintéticos quando implementados em estruturas específicas das barragens de terra e enrocamento e, por fim, comentar sobre os problemas de desempenho de materiais geossintéticos nesse tipo de barragem.

## **1.1 OBJETIVOS**

A proposta do trabalho consiste em uma análise teórica das noções e fundamentos necessários à devida utilização de materiais geossintéticos em obras de barragens de terra e enrocamento, especificamente:

- Conceituar os tipos de barragens e seus principais elementos constituintes;
- Apresentar as principais causas de ruptura em barragens;
- Analisar as principais funções exercidas por geossintéticos nas barragens de terra e enrocamento;
- Explorar os problemas de desempenho de materiais geossintéticos nas barragens de terra e enrocamento.

## 2 CONSIDERAÇÕES SOBRE BARRAGENS

De acordo com Marangon (2004), uma barragem pode ser definida como um elemento estrutural construído com o objetivo de formar um reservatório artificial de acumulação de água, executado transversalmente à direção de escoamento de um curso d'água.

O projeto de uma barragem é geralmente associado a grandes custos, diferentes graus de complexidade de projeto e estudos preliminares, que variam de acordo com a finalidade para a qual ela é construída. Segundo Filho & Geraldo (2009), as barragens de médio e grande porte, por exemplo, exigem estudos geológicos e geotécnicos minuciosos, que visam atender às suas necessidades e especificações de projeto, além de procurar minimizar imprevistos geológicos.

Uma barragem pode ser construída para atender uma finalidade específica ou mais de uma finalidade, como por exemplo:

- a) Geração de energia elétrica;
- b) Abastecimento de água;
- c) Recreação;
- d) Irrigação;
- e) Contenção de rejeitos;
- f) Controle de inundações.

Essas obras, quando construídas para determinada finalidade, podem permitir a execução de outras atividades, ditas secundárias, correlatamente. É dessa maneira, como afirma Marangon (2004), que aspectos tais quais a recreação, piscicultura e saneamento são comumente desenvolvidos.

As barragens devem ser vistas como um todo que compreende a bacia hidrográfica da represa, a fundação, as estruturas anexas ou auxiliares (casas de força, vertedouros e tomadas d'água, por exemplo) e as instalações de manutenção. Além disso, segundo Gaioto (1998), o projeto, a construção e o primeiro enchimento devem ser vistos como etapas interdependentes, que, quando bem coordenadas, podem evitar surpresas geológicas.

## 2.1 Principais tipos de barragens

Os tipos mais usuais de barragens, de acordo com seu material de construção principal, são (GAIOTO, 1998):

- a) A barragem de concreto;
- b) A barragem de terra;
- c) A barragem de enrocamento.

As barragens de terra e enrocamento também podem ser ditas como tipos comuns de barragens de aterro, que são barragens que possuem o seu material de construção principal com resistência menor que o concreto (Filho & Geraldo, 2009).

### 2.1.1 Barragens de Concreto

Este tipo de barragem tem sua estabilidade assegurada pelo seu peso e largura de base. Os principais esforços atuantes em sua estrutura são o peso do concreto e as pressões de água no paramento a montante. No entanto, pode haver também a subpressão exercida pela água que se infiltra por fissuras ou descontinuidades na zona de ligação entre a base da barragem e a sua fundação. Filho & Geraldo (2009) explicam que os principais mecanismos de ruptura nesse tipo de estrutura são o tombamento, onde a barragem tende a girar em torno de um ponto, e o deslizamento, mecanismo mais comum, onde há o deslocamento para jusante ao longo de uma superfície de baixa resistência ao cisalhamento.

Essas estruturas podem se dividir em barragem de gravidade, de gravidade aliviada, em contraforte, de concreto compactado ou em arco. As barragens de gravidade são aquelas maciças de concreto, geralmente com pouca armação e que trabalham apenas à compressão. As de gravidade aliviada são mais leves que as primeiras, todavia são vazadas para que menos esforços sejam passados à fundação ou para economizar concreto, apesar de utilizarem maior quantidade de armação (COSTA, 2012).

As barragens de concreto em contraforte são ainda mais leves que as em gravidade aliviada, no entanto, de acordo com Costa (2012), é uma das que mais exigem armação e que apresentam maiores tensões de contato. Já as barragens de concreto rolado ou compactado têm a mesma estrutura das de gravidade, porém, o concreto é

espalhado com trator de esteira e depois compactado, tendo sua estanqueidade garantida por uma camada de concreto convencional no paramento de montante.

Por fim, as barragens em arco têm a estabilidade garantida pela sua forma curva, conforme ilustrado pela Figura 1. São construídas em vales mais estreitos e regulares para que, dessa forma, as pressões exercidas pela água sejam, em sua maioria, transferidas para as ombreiras.

Figura 1: Barragem de concreto em arco, Barragem do Funil – RJ.



Fonte: THOMAZ, 2008.

### 2.1.2 Barragens de Enrocamento

Enrocamento é “um aterro feito com fragmentos de rocha ou cascalho, compactado em camadas com rolos vibratórios pesados” (FILHO & GERALDO, 2009, p. 404). Este tipo de barragem é normalmente construído sobre fundações resistentes e, devido ao elevado ângulo de atrito do seu material, os deslizamentos de seus taludes ocorrem com menor frequência.

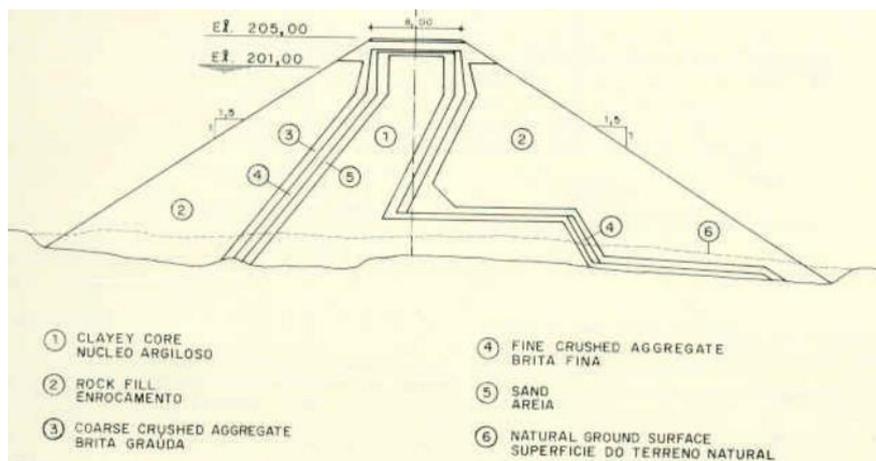
Algumas vantagens da execução desse tipo de barragem, conforme ressaltam Silva & Assis (2003), são a maior rapidez de construção, a estabilidade inerente à estrutura, o tratamento mais simples dado às fundações e a logística menos complicada da sua construção.

Seus tipos mais comuns são as de face de concreto (*Concrete Face Rock Dam – CFRD*) e as de núcleo impermeável (*Earth Core Rock Dams – ECRD*). Na CFRD, a vedação da água é garantida pela impermeabilização da face de montante e suas condições de estabilidade são mais simples. Já na ECRD, a vedação da água é feita por um núcleo argiloso separado do material rochoso por zonas de transição, entretanto, a

existência desse núcleo de terra pode causar problemas de erosão interna e deslizamentos profundos (FILHO & GERALDO, 2009).

A Figura 2 ilustra a seção transversal da barragem Edson Queiroz, no estado do Ceará, com núcleo impermeável de argila inclinado para a montante e com um tapete impermeável estendido à jusante.

Figura 2: Seção da barragem Edson Queiroz



Fonte: DNOCS, 2007.

Nesta Figura, pode-se ver que três camadas de transição antecedem o núcleo impermeável de argila, sendo a primeira de brita graúda, a segunda de brita fina e a terceira de areia. No que concerne as CFRD, Cooke & Sherard (1987 apud Cruz et al., 2009) definem as funções e requisitos de cada zona desse tipo de barragem, sendo que essas zonas devem contar com uma seção impermeável, outra de filtro ou transição diretamente ligada à face de concreto e uma zona referente ao maciço do enrocamento.

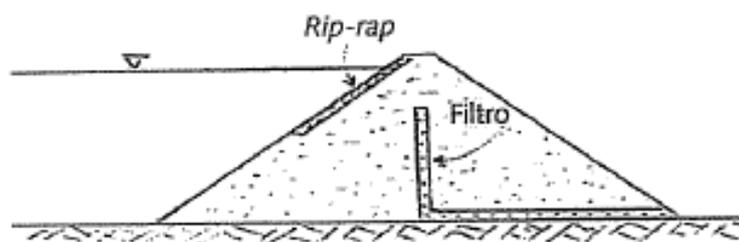
### 2.1.3 Barragens de Terra

As barragens de terra são construídas predominantemente com materiais terrosos vindos de áreas de empréstimo, que são compactados com equipamentos especiais sobre rigoroso processo executivo. De acordo com Burke (2011), pode-se entender, então, que essas estruturas têm boa aceitação técnica para sua construção, se houver abundância de material disponível com propriedades geotécnicas adequadas.

As barragens de terra se subdividem em diversos tipos, classificados com relação à deposição do material granular que a constitui e quanto ao seu processo de construção. Os mais comuns, segundo Silva (2007) são:

- a) Barragens de aterro homogêneo: caracterizada pela predominância de um único tipo de solo;
- b) Barragens de aterro homogêneo modificado: caracterizadas pela presença de um sistema de drenagem interno com o objetivo de dirigir de forma adequada o fluxo de água percolado através da estrutura. Esse tipo de barragem geralmente contém uma seção de filtro e proteção de taludes de montante e jusante, além de poder conter, na sua fundação a jusante, um tapete drenante para interceptar o fluxo de água. A Figura 3, à seguir, ilustra uma barragem de aterro modificado;

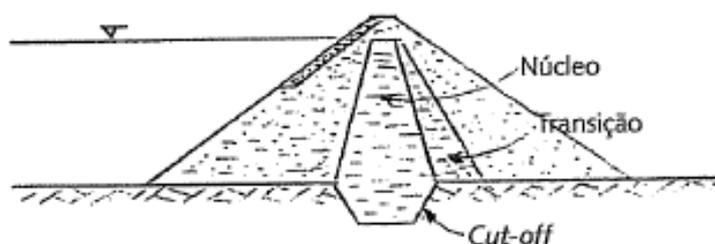
Figura 3: Barragem de aterro homogêneo modificado.



Fonte: Costa, 2012, adaptada.

- c) Barragens Zoneadas ou Zonadas: caracterizadas pela presença de materiais de diversas granulometrias, dispostas em seções bem definidas, como ilustra a Figura 4. Os materiais mais finos geralmente constituem o núcleo impermeável que garante a estanqueidade do barramento, já os de granulometria mais grossa são dispostos nas laterais.

Figura 4: Barragem de aterro zoneada.



Fonte: Costa, 2012, adaptada.

Apresentados os tipos mais comuns de barragens de terra, é possível atestar que as principais vantagens desse tipo de obra envolvem a possibilidade de utilização de materiais locais, as menores exigências em se tratando de fundações e a maior facilidade com que resistem ao assentamento e movimentos dos materiais que as constituem.

Como aspectos negativos pode-se dizer que se houver falha em sua compactação, a barragem terá sua integridade estrutural comprometida, e apresentará pontos preferenciais de infiltração (STEPHENS, 2011). Além disso, esse tipo de barramento exige manutenção frequente para que se evite o crescimento de árvores, danos provocados por animais, bem como problemas de erosão.

## **2.2 Fatores que influenciam a escolha do tipo de barragem**

São realizadas, normalmente, estimativas de custos junto aos projetos preliminares para afirmar, ou não, a viabilidade da construção de um barramento, seja qual for o seu tipo. Assim, a escolha final do tipo de barragem deve ser feita considerando as características físicas do local e a sua capacidade de adaptação ao projeto preliminar, isto é, a sua propensão em se adequar ao propósito construtivo inicial. Para isso, torna-se imperativo o cumprimento invariável de questões de segurança, de acordo com as condições climáticas da região, além de quesitos como a dimensão e a locação do vertedouro (GAIOTO, 1998).

Em relação aos custos, são fatores particularmente importantes durante a escolha da solução construtiva a ser adotada: a mão de obra, o tipo de solução de engenharia, o material disponível e, finalmente, as dificuldades de acesso.

É importante contar, ainda, com a colaboração de um geólogo para verificar se as fundações do local são compatíveis com as solicitações de carga da estrutura que se pretende construir. Além disso, o profissional de geologia de engenharia, na fase de estudos de viabilidade, auxilia a equipe com o mapeamento geológico de superfície, com a qualidade geomecânica do maciço rochoso, com os ensaios *in situ* do tipo sondagem a percussão – SPT (*Standard Penetration Test*), com a caracterização e avaliação volumétrica das áreas de empréstimo solicitadas e com o mapeamento geológico das possíveis áreas de inundação, entre outras atividades.

Para Filho & Geraldo (2009), as características investigadas são de bastante relevância para a elaboração do projeto executivo e de construção. Em obras de

concreto ou enrocamento os parâmetros a considerar são, principalmente, aqueles relacionados com escavação e estabilidade de taludes. Em contraste, nas barragens de terra, além das propriedades do solo utilizado como material de aterro, são muito importantes suas características de suporte e permeabilidade.

É também interessante ressaltar que durante a elaboração dos projetos de barragens, vem se dando grande importância às considerações ambientais, uma vez que a construção desse tipo de obra pode trazer grandes consequências negativas para a população e para a fauna e a flora da região de possível construção.

### **2.3 Principais elementos das barragens**

Pode-se dizer que os elementos básicos que formam um barramento são a sua fundação e o seu corpo estrutural. Isto posto, em vista dos inúmeros fatores que devem ser considerados quando da elaboração do projeto do barramento, dificilmente a mesma seção transversal de uma barragem será repetida para outras.

A seguir, estão listados alguns dos principais elementos que compõe um barramento.

#### *2.3.1 Fundação*

“Como fundação será considerado todo o embasamento geológico existente no local onde será assentada a barragem ou suas obras complementares” (GAIOTO, 1998, p. 16).

Os principais aspectos a se analisar para a construção de uma fundação de barragem são a deformabilidade, a estabilidade e a estanqueidade.

A deformabilidade diz respeito à deformação que a fundação pode apresentar sem que ocorram rupturas em sua estrutura. Já os aspectos de estabilidade estão relacionados ao estudo da possibilidade de ruptura em decorrência das cargas impostas pelo barramento ou pela presença de solos compressíveis ou de baixa resistência. A estanqueidade, por fim, está ligada ao impedimento da passagem de água por um maciço ou sua fundação (COSTA, 2012).

Para se investigar esses três aspectos, pode ser feito o estudo de mapas topográficos e geológicos, a realização de sondagens à percussão e rotativas, a abertura de poços e trincheiras de inspeção e os ensaios de laboratório para a caracterização de

material granular, a exemplo dos limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), ensaio de granulometria e compactação.

### **2.3.2** *Crista*

Determinada de acordo com as necessidades de tráfego que apresenta, a crista é a superfície superior da estrutura e tem tamanho que varia, normalmente, entre seis e doze metros. Segundo Gaioto (1998), não é recomendado que seu tamanho seja inferior a três metros, mesmo em barragens pequenas, para que as condições mínimas de acesso e segurança para a construção do barramento sejam atendidas.

### **2.3.3** *Núcleo*

Quando se quer limitar a percolação de água através do maciço, pode-se utilizar da diferença de características entre os materiais granulares para formar uma zona estável e com baixa permeabilidade. Aqueles materiais com maior resistência, como os pedregulhos podem ser colocados nas laterais, ou abas, do barramento, e aqueles com menor permeabilidade, como os solos argilosos, podem ser colocados na parte interna da seção da barragem, ou seja, no seu núcleo (GAIOTO, 1998).

Além de materiais argilosos, podem ser empregados nos núcleos impermeabilizantes de barragens, materiais betuminosos. Assim, foi construída, em 2010, a primeira barragem de enrocamento em solo brasileiro que utilizou concreto asfáltico em seu núcleo. É interessante frisar que esse tipo de núcleo traz algumas vantagens significativas, dentre elas, a possibilidade de aproveitar a grande quantidade de enrocamento disponível a partir das escavações, o status relativamente rápido do processo construtivo e a viabilidade de construção em regiões com alto índice pluviométrico (NETO, 2013).

### **2.3.4** *Sistema de drenagem interna*

O controle de fluxo é um dos básicos de projeto que devem ser obedecidos a fim de garantir a consolidação de fatores como a segurança e a estabilidade de uma barragem. Segundo Cruz (1996), a saída de água no talude de jusante pode ocasionar problemas de instabilidade no barramento, além disso, fugas excessivas de água podem

comprometer o nível de armazenamento e causar a erosão do próprio talude, tornando proeminentes os riscos de eventualidades.

As linhas de fluxo, como ilustra a Figura 5, mostram o caminho de percolação da água pelo maciço da barragem. Tais linhas limitam a barragem em duas regiões, sendo uma infiltrada e outra não infiltrada. Marangon (2004) afirma que, a partir dessas linhas se pode calcular a vazão de infiltração pelo corpo da barragem e também proporcionar certo controle a respeito de como a água irá percolar pelo solo.

Figura 5: Esquema de linha de fluxo em uma barragem de terra.



Fonte: MASSAD, 2010, adaptada.

Busca-se, então, conduzir e reduzir a passagem de água pela fundação e maciço da barragem, mediante a execução de drenos e filtros. Dessa forma, é possível controlar de certa forma o fluxo de água para níveis aceitáveis, isto é, que não causem problemas de instabilidade e sejam compatíveis com o objetivo segundo o qual a barragem foi construída.

Os filtros são construídos de modo a evitar o carreamento excessivo do material do maciço e da fundação, sendo constituídos, tradicionalmente, por zonas de camadas granulares relativamente delgadas que evitem que as partículas do maciço se desloquem e obstruam os vazios de um material drenante. De acordo com o Manual para Avaliação de Pequenas Barragens do Bureau of Reclamation (2002, p.55), o projeto de um filtro “deve ter como base fundamental a granulometria do material a ser empregado”. O material mais fino deve ser retido pelo filtro e deve se acomodar nos vazios entre as partículas maiores. Além disso, a permeabilidade do filtro deve ser maior que a do material protegido para que haja o livre escoamento das águas infiltradas.

Segundo Azevedo (2005), o tipo de drenagem a ser adotado numa barragem de terra irá depender de fatores ligados à permeabilidade do maciço, do tipo e material constituinte da fundação, e das características de materiais drenantes disponíveis, sendo

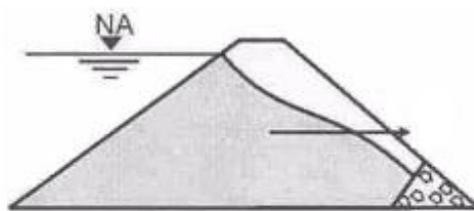
alguns exemplos desses sistemas os drenos de pé, tapetes e cortinas drenantes e trincheiras de vedação.

#### 2.3.4.1 Dreno de pé

Esse sistema capta a água que percola sobre o maciço e chega ao pé de jusante, evitando a diminuição da resistência no pé do talude. Essa estrutura é comumente constituída por uma seção de enrocamento, sendo necessária uma zona de transição de materiais com granulometrias intermediárias entre o material da barragem, as rochas e os pedregulhos do dreno (SILVA, 2007).

A Figura 6, a seguir, ilustra uma barragem com um dreno de pé:

Figura 6: Esquema de dreno de pé em uma barragem.

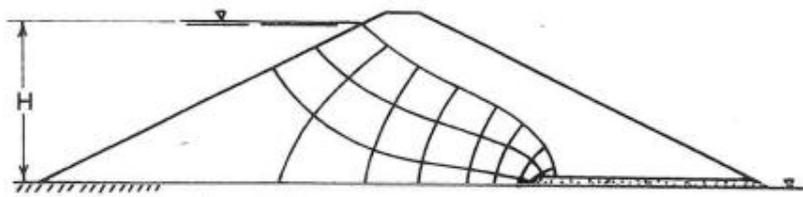


Fonte: MASSAD, 2010, adaptada.

#### 2.3.4.2 Tapete drenante

Essa estrutura é constituída de um dreno horizontal na base de jusante da barragem e tem como principal função administrar o fluxo percolado pela fundação, controlando a subpressão e mantendo a zona de jusante não saturada. A Figura 7 ilustra de que modo o tapete drenante age sobre a rede de fluxo de uma barragem.

Figura 7: Esquema de tapete drenante em uma barragem.



Fonte: CESAR, 2010, adaptada.

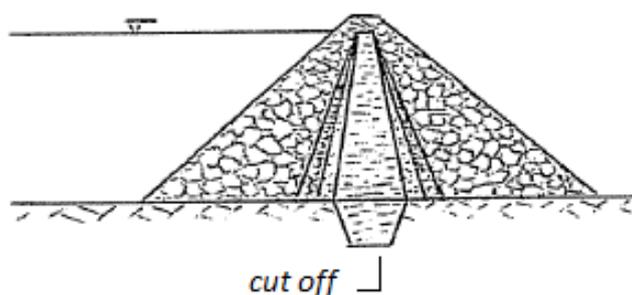
O seu comprimento irá se basear na posição em que se pretende posicionar a linha freática no interior do maciço, sendo o aumento no tamanho do tapete um fator que implica uma melhoria na estabilidade da estrutura, já que uma maior parte do paramento de jusante da barragem irá se manter seco (SILVA, 2007).

É interessante observar que Oliveira (2008) comprovou a hipótese de que a implantação do tapete drenante associado a outro dispositivo de drenagem, dependendo das condições do projeto, pode ser mais eficiente do que se utilizado como solução única de drenagem. Tal verificação se deu por meio de uma de suas simulações, utilizadas para analisar a eficácia dos dispositivos de vedação e drenagem em fundações permeáveis de barragens de terra.

#### 2.3.4.3 Trincheira de vedação - cut off

De acordo com Gaioto (1998), a trincheira de vedação, ou cut off, é executada quando a fundação possui boas características em relação à sua resistência e compressibilidade, no entanto, não possuem boas características de permeabilidade. É então escavada uma trincheira que liga a parte mais impermeável da fundação até a parte impermeável da barragem, como demonstra a Figura 8.

Figura 8: Cut-off no centro de uma barragem de enrocamento.



Fonte: COSTA, 2012, adaptada.

A sua profundidade é limitada de acordo com as características do subsolo local e da viabilidade de sua execução através da lâmina de tratores e escavadeiras. Além disso, segundo Gaioto (1998), seu preenchimento é feito nas mesmas condições do núcleo impermeável da barragem, caso esta seja do tipo terra zoneada, ou deve ser compactado nas mesmas condições do maciço, caso este seja do tipo de terra homogêneo.

### 2.3.5 Proteções dos taludes

Após a elaboração da concepção preliminar da barragem e das seções transversais que compõem o maciço, diversos autores recomendam que sejam feitas análises de estabilidade de taludes, considerando os parâmetros geotécnicos obtidos através de estudos no local de construção. Isso se dá em virtude da necessidade de utilizar uma geometria e coeficientes de segurança admissíveis e, por consequência, condizente com as condições de segurança impostas.

Além de considerar soluções construtivas que levem em conta a estabilidade de taludes, é recomendado que o talude de montante, nas barragens de aterro, seja protegido contra a ação erosiva das ondas que surgem no volume acumulado do reservatório. Essas proteções podem ser executadas através de estruturas como o *rip rap*, a aplicação de concreto projetado, de concreto betuminoso ou de solo-cimento (LIMA, 2011).

Silva (2007) explica que o *rip rap* é uma proteção de talude constituído de enrocamentos de diâmetro adequado, espalhados na face do talude numa camada espessura determinada em projeto, de modo a obter uma superfície estável. A eficácia dessa proteção depende principalmente da dimensão, forma e qualidade da rocha escolhida. Além disso, de acordo com Lima (2011), são normalmente previstos materiais filtrantes entre a superfície do talude e o maciço de terra compactada para evitar a erosão do paramento.

Quando não é possível ou quando se é economicamente inviável a obtenção de material rochoso adequado para a execução do *rip rap*, há a possibilidade da utilização de camadas de solo-cimento compactadas ou camadas de concreto projetado.

Por sua vez, é recomendado que os taludes de jusante sejam protegidos em relação à erosão causada pela chuva e vento, podendo, para isso, ser feita uma proteção contra a ação direta desses agentes meteorológicos, mediante a aplicação de uma camada de grama ou de uma manta protetora.

### 3 MECANISMOS DE RUPTURAS EM BARRAGENS DE TERRA

A ruptura de uma barragem se constitui num fenômeno altamente devastador, podendo destruir cidades e vitimar milhares de pessoas. Santos et al. (2007), explicam que as suas causas podem ser determinadas por um fator isolado ou por uma combinação de fatores que culmine em um processo de ruptura do barramento.

Assim, segundo Filho & Geraldo (2009), os mecanismos mais comuns de acidentes das barragens de terra são: o galgamento, o deslizamento de taludes, a erosão interna e o fissuramento.

#### 3.1 Galgamento (*Overtopping*)

Nas barragens de terra, o galgamento é a causa mais frequente de problemas, tendo em vista que as barragens de aterro não resistem à passagem de água sobre as mesmas (FILHO & GERALDO, 2009). Esse tipo de fenômeno ocorre quando o nível de água do reservatório ultrapassa a cota da crista da barragem, provocando um arraste de materiais.

Para Perini (2009), tanto as forças hidráulicas atuantes quanto a susceptibilidade do material constituinte da barragem à erosão, desempenham um papel na ruptura por galgamento. O fluxo de água que transborda pela crista da estrutura passa por três momentos que correspondem a três potenciais erosivos correspondentes.

No primeiro momento, a água, que antes estava em situação estática, ganha velocidade quando passa pela crista; em um segundo momento, já próximo ao talude de jusante, ela atinge uma velocidade crítica e, no terceiro, no talude de jusante, atinge uma velocidade ainda maior que os dos seus momentos anteriores.

Quando a velocidade do fluxo de água é baixa, os seus esforços de cisalhamento correspondentes também são baixos e o processo erosivo apenas ocorrerá se o material for altamente erodível. A partir do momento em que a velocidade da água for aumentando, os níveis de energia também aumentarão, resultando num aumento do potencial erosivo.

Ainda segundo Perini (2009), o início da erosão pode se iniciar em qualquer parte do talude de jusante, no entanto, geralmente se inicia no pé da barragem. No momento em que aparecem as primeiras discontinuidades nos taludes, o fluxo de água

começa a fluir em forma de cascata, e buracos podem aparecer no local da queda d'água, como ilustra a Figura 9.

Figura 9: Sequência erosiva devido ao galgamento em uma barragem de terra homogênea.



Fonte: PERINI, 2009.

### 3.2 Deslizamento de Taludes

O deslizamento é um:

[...] movimento de descida de rocha, solo, ou ambos, em declive, que ocorre na ruptura de uma superfície — ruptura curva (escorregamento rotacional) ou ruptura plana (escorregamento translacional) — na qual a maior parte do material move-se como uma massa coerente ou semicoerente, com pequena deformação interna (HIGHLAND & BROBOWSKI, 2008, p.25).

Esse mecanismo de ruptura pode ocorrer por diversos motivos, como por exemplo, abalos sísmicos, problemas de drenagem e infiltração, problemas durante a construção e compactação da barragem, defeitos e recalque da fundação ou falhas de projeto. Ele geralmente ocorre quando as tensões cisalhantes, ao longo de uma determinada superfície, ultrapassam a resistência média dos materiais que a compõem.

De acordo com o tipo de movimento e com o tipo de material envolvido, o deslizamento pode ser caracterizado em diferentes tipos básicos. De acordo com HIGHLAND & BROBOWSKI (2008), são alguns deles: a queda, o escorregamento, o tombamento e o espalhamento.

Na queda, o solo ou rocha se desprendem bruscamente e o material desce e cai num ângulo menor que o ângulo de queda, podendo causar um salto de material. Seus riscos podem ser minimizados através da execução de coberturas de proteção, explosão

de áreas de risco e execução de muros de contenção. Já os escorregamentos são caracterizados por um volume bem definido de material que se desprende, sendo que seu centro de gravidade se desloca para baixo e fora do talude. Segundo Gaioto (1998), esse fenômeno pode ser dito rotacional, quando a superfície de ruptura é curva e o movimento do material é rotatório em torno de um eixo, ou translacional, quando a superfície de ruptura é relativamente plana.

A ruptura por tombamento é caracterizada por um movimento de rotação, seja de solo ou rocha, em torno de um ponto abaixo do seu centro de gravidade. Esse mecanismo pode ser gerado pelo peso da parte superior do material deslocado, pela água que infiltra em fissuras e também por erosões causadas por cursos de água.

Por fim, no espalhamento, a massa de solo, rocha ou sua combinação, se estende ao mesmo tempo em que há um afundamento em direção a uma camada inferior do solo. Este tipo de deslizamento ocorre mais frequentemente em terrenos planos e taludes de baixa inclinação (HIGHLAND & BROBOWSKI, 2008).

As soluções para esses tipos de deslizamento devem ser escolhidas de acordo com o seu tipo de mecanismo de desencadeamento, com o material que sofre o desprendimento e de acordo com as condições de projeto e disponibilidade de material existente no talude. Alguns exemplos dessas soluções incluem o retaludamento, a execução de um sistema de drenagem adequado, o nivelamento do solo, a aplicação de vegetação para proteger a face do talude, além de soluções mais sofisticadas de estabilização, como a aplicação de tirantes, ancoragens e grampos.

### **3.3 Erosão interna (*Piping*)**

Os fenômenos de erosão interna constituem um dos mecanismos de acidentes mais frequentes em barragens de aterro, como afirmam Filho & Geraldo (2009). A denominação desse fenômeno como *piping*, ou entubamento, deu-se por conta da forma com que a erosão evolui de um ponto de saída até um ponto de montante, tendendo a criar um conduto em forma de tubo sobre a barragem, ou através dela, de modo a arrastar as partículas de solo.

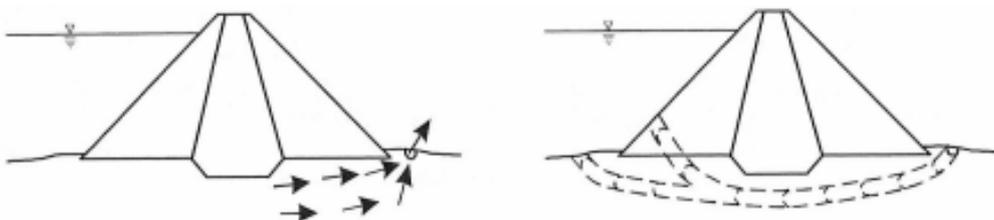
Alamdari et al. (2012), mostram pesquisas que indicam as condições devem ser satisfeitas, simultaneamente, para que a erosão interna aconteça, são elas:

- Existência de um caminho de linhas de fluxo e uma fonte de água;

- Deve haver a presença de materiais erodíveis no caminho do fluxo de água e esses materiais devem ser carregados pelo fluxo de água;
- Uma saída desprotegida pela qual o material erodido possa passar.

A erosão interna pode ocorrer através da fundação ou através do corpo da barragem, como ilustram as Figuras 10 e 11.

Figura 10: Ilustração do desenvolvimento de erosão interna na fundação de uma barragem.



Fonte: MATTSSON et al, 2008, adaptada.

Figura 11: Ilustração de erosão interna no corpo do maciço de uma barragem.



Fonte: MATTSSON et al, 2008, adaptada.

Esse fenômeno, mais comum em barragens constituídas de solos finos e de baixa coesão, também pode acontecer no contato entre o núcleo e um filtro mal dimensionado, entre o núcleo e uma seção de enrocamento ou em uma seção de transição mal graduada.

Entre algumas das causas conhecidas da erosão interna, pode-se citar o filtro mal graduado e de baixa permeabilidade, as fissuras na rocha de fundação, as trincas devido a recalques, as seções diferenciais, entre outras.

Segundo Foster et al (2000, apud PERINI, 2009), os seguintes processos podem desencadear a formação do *piping* em barragens de terra:

- a) Erosão regressiva: a erosão se inicia no talude de jusante e a água percolada que sai pelo talude de jusante mesmo provoca uma erosão a partir do ponto em que escoar até o reservatório, num caminho contrário ao fluxo;
- b) Erosão por meio de trincas existentes na barragem: a percolação de água por essas fissuras existentes causam um fluxo concentrado que alarga o caminho da água e vai formando uma passagem em forma de tubo;
- c) Erosão devido ao carreamento de finos: o arraste de material fino pelo maciço da barragem pode desestabilizar internamente a estrutura.

Já o mecanismo de brecha, que é o estágio que leva a ruptura, pode ser desencadeado pelo alargamento excessivo da erosão em forma de tubo, de modo que a estrutura não possua resistência suficiente e desabe. Além disso, pode acontecer através da formação de buracos na crista, que podem causar o fenômeno de galgamento, dos escorregamentos do talude de jusante e da desagregação do material do pé da barragem de terra.

É interessante ressaltar que a pesquisa de Perini (2009) destaca a possibilidade de que ocorra uma instabilidade de taludes sem que haja uma progressão do *piping* até o mecanismo de brecha, uma vez que pequenos incrementos de permeabilidade podem acarretar o aumento de poropressão e, assim, causar instabilidade.

Um caso de ocorrência de erosão interna aconteceu em 1967, na Inglaterra, envolvendo a barragem de Balderhead. Após o enchimento do seu reservatório, apareceu uma depressão na crista da barragem. Nesse caso, segundo Cruz (1996), foi constatado que uma enorme quantidade de solo foi carregada através do filtro por erosão interna iniciada através da percolação de água por fraturas hidráulicas que ocorreram logo após o seu enchimento.

## 4 CONSIDERAÇÕES SOBRE GEOSINTÉTICOS

Geossintéticos são produtos poliméricos, sintéticos ou naturais, industrializados, que podem ser utilizados em diversas aplicações, sobre variados tipos de solo ou em combinações de solo e rocha como parte de projetos e soluções de engenharia geotécnica (VERTEMATTI, 2004). A Figura 12 ilustra diversos tipos desse material.

Figura 12: Exemplos de geossintéticos.



Fonte: FEMA, 2008.

Algumas das vantagens da utilização dos geossintéticos, de acordo com a IGS Brasil (2007), são:

- Preservação ambiental considerável, uma vez que são produtos alternativos a materiais granulares e solos;
- Facilidade de instalação em relação aos agregados naturais, que exigem equipamentos de grande porte;
- Disponibilidade de produtos com propriedades hidráulicas e mecânicas de boa capacidade de suporte;
- Versatilidade de aplicações.

### 4.1 Classificação

Algumas denominações desses materiais, segundo a NBR 12553 – Geossintéticos – Terminologia, são brevemente descritas a seguir.

#### 4.1.1 Geotêxteis

São produtos têxteis e permeáveis, com boa capacidade de filtração, que têm propriedades hidráulicas e mecânicas que permitem seu bom desempenho em diversas obras geotécnicas. Um exemplo de sua utilização, em se tratando de taludes, pode ser observado na Figura 13 a seguir.

Figura 13: Instalação de geotêxtil em talude.



Fonte: BIDIM, 2003.

As principais funções em que pode atuar, segundo a IGS BRASIL (2007), são as de proteção, filtração, separação e drenagem. Eles podem ser utilizados, além de outros casos, no controle de erosões, na melhoria das propriedades de solos, na drenagem/filtração de rodovias e ferrovias, e em projetos de aterros e barragens.

Diante da grande diversidade de geotêxteis produzidos pelas indústrias atualmente, duas classes principais podem ser identificadas. Para Costa et al. (2008), a primeira delas é a de geotêxteis tecidos, que são formados por intermédio do entrelaçamento de fios em direções preferenciais, e a segunda é a de geotêxteis não tecidos, compostos por fibras ou filamentos contínuos, distribuídos aleatoriamente.

#### 4.1.2 Geogrelhas

São materiais resistentes à tração, em forma de grelha, com o principal objetivo de reforço e cujas aberturas ocasionam uma boa interação e ancoragem com o meio em

que estão aplicadas. A sua principal característica é a abertura da malha que a compõe, que deve ter um tamanho suficiente para que o material granular em que esteja inserida proporcione uma boa interação solo/geossintético (NORTÈNE, 2012).

A Figura 14 ilustra dois tipos de geomembrana.

Figura 14: Geogrelhas.



Fonte: MACCAFERRI, 2008.

#### 4.1.3 Geomembranas

São mantas contínuas, de baixa permeabilidade, que podem ser constituídas de um ou mais materiais sintéticos. Sua principal função, segundo a ABNT – NBR 12553, é a de impermeabilização e elas podem ser usadas, por exemplo, em canais de irrigação e adução, barragens e bacias de contenção. A figura 15, à seguir ilustra a aplicação de geomembrana em um canal.

Figura 15: Geomembrana em um canal



Fonte: GEOFOCO, 2016.

#### 4.1.4 Georredes

São materiais com forma semelhante às geogrelhas, sendo a drenagem sua principal aplicação. É comum que seu uso seja feito em conjunto com outros geossintéticos, formando assim geocompostos. Podem ser usadas, por exemplo, juntamente com uma camada de geotêxtil para evitar que haja o entupimento de suas aberturas (IGS- Brasil, 2007).

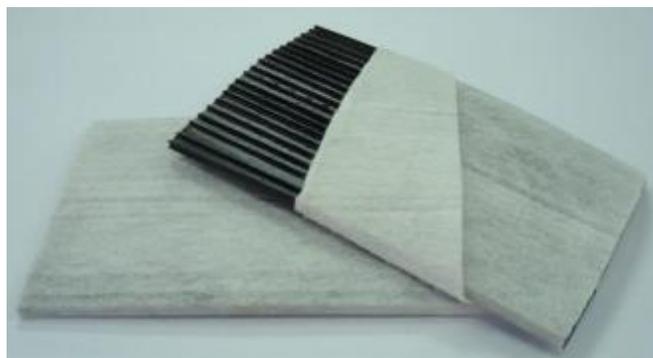
Alguns exemplos de suas aplicações são em colchões drenantes de aterros sanitários, drenagem em sistemas de impermeabilizações em túneis e drenagem em campos esportivos.

#### 4.1.5 Geocompostos

São materiais formados pela associação entre dois geossintéticos ou entre um geossintético e outros produtos, geralmente criados para desempenhar uma função específica (MACCAFERRI, 2008).

Como exemplos, têm-se os geodrenos, como ilustrado na Figura 16, constituídos com um núcleo plástico drenante e com uma camada externa de geotêxtil. Além disso, têm-se também os geocompostos drenantes, a utilização conjunta da georrede e geomembrana e os geocompostos argilosos (GCL'S), fabricados com uma camada de bentonita entre geotêxteis que aumentam sua resistência ao cisalhamento.

Figura 16: Geocomposto geodreno



Fonte: MACCAFERRI, 2008.

#### 4.1.6 Geotubos

Os geotubos são produtos poliméricos de forma tubular, perfurados ou não, usados predominantemente para a drenagem de líquidos ou gases. Podem ser utilizados, por exemplo, para a coleta de chorumes em aterros sanitários, em valas de absorção e drenagem superficial em coberturas de aterros e valas (NORTÈNE, 2012).

A Figura 17 ilustra esse tipo de material.

Figura 17: Ilustração de um geotubo flexível.



Fonte: CITIMAT, 2006.

#### 4.1.7 Geocélula

É um sistema de confinamento celular, relativamente espesso, constituído por tiras poliméricas. As células são conectadas e podem ser preenchidas com solo, concreto ou materiais granulares. Suas principais funções são de confinamento, proteção reforço, revestimento e contenção (GEOFOCO, 2016).

Devido ao efeito de confinamento que provoca, esse material impede a ruptura por cisalhamento, além de estabilizar seu material de preenchimento, provocando uma boa distribuição de cargas ao solo (NORTÈNE, 2012). Para que exerça essa ação estabilizante, pode-se aplicar esse material na face de um talude, como ilustra a Figura 18.

Figura 18: Geocélula aplicada na face de um talude como elemento de reforço.



Fonte: NORTÈNE, 2012.

## 4.2 Propriedades e ensaios

Como todo material industrializado, os geossintéticos devem obedecer a um rigoroso controle de qualidade de produção. Segundo Vertematti (2004), é recomendado que ensaios de recebimento sejam realizados para que se confirme que o produto entregue na obra possua as características técnicas especificadas pelo projetista. De acordo com as normas e com a literatura existente sobre o assunto, as propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas dos geossintéticos devem ser analisadas de acordo com ensaios pré-estabelecidos.

### 4.2.1 Propriedades físicas

As propriedades físicas de mais interesse para a aplicação desse material incluem a sua gramatura, espessura nominal e porcentagem de área aberta. Tem-se a seguir uma breve descrição dessas propriedades, de acordo com Bueno & Vilar (2004):

- Gramatura é a relação de massa por unidade de área da manta, expressa em  $\text{g/m}^2$ . Ela deve ser entendida como um índice de caracterização e ser utilizada como elemento de comparação entre geossintéticos com mesmo processo de fabricação, pois dependendo desse processo, o geossintético pode apresentar propriedades hidráulicas e mecânicas muito diferentes;
- A espessura é expressa em milímetros e é determinada a partir da medição em milímetros entre duas placas rígidas que comprimem um corpo de prova, com

uma força de 2kPa. A norma da ABNT NBR ISO 9863-1 de 2013, comenta sobre a determinação da espessura de geotêxteis. Os ensaios utilizam as normas norte-americanas ASTM D 5199/01 e ASTM D 6525/00 como parâmetro de execução;

- A porcentagem de área aberta equivale aos espaços vazios resultantes do processo de fabricação.

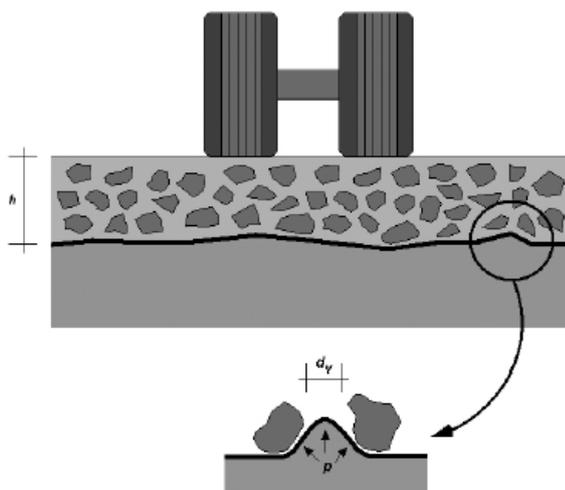
#### 4.2.2 *Propriedades mecânicas*

De acordo com Bueno & Vilar (2004), essas propriedades expressam relações entre o carregamento imposto ao material e as deformações que ele sofre, além de fornecer dados utilizados no dimensionamento de projetos. Algumas dessas propriedades são brevemente comentadas a seguir:

- **Compressibilidade:** Obtida através da medição da espessura do geossintético através de diferentes tipos de carregamento em corpos de prova, utilizando normalmente tensões de 10, 20, 50, 100 e 200 kPa;
- **Resistência à tração:** A pressão causada entre o contato das partículas de solo sobre o geossintético, causam uma tensão de tração lateral sobre o material. É, então, recomendado que seja estimada a máxima deformação que esse material sintético sofrerá. A norma da ABNT, NBR ISO 10319 de 2013 (Geotêxteis - Determinação da resistência à tração não confinada - Ensaio de tração de faixa larga - Método de ensaio) determina as condições de aplicação do ensaio de tração através da aplicação de uma força crescente num corpo de prova, até que ocorra sua ruptura;
- **Resistência à punção:** Quando submetidos a esforços de compressão causados pelo contato com grãos isolados, o material geossintético pode sofrer perfurações. A norma da ABNT, NBR ISO 12236 de 2013 explicita as recomendações sobre o ensaio para determinar a resistência ao puncionamento tipo CBR. Esse ensaio é realizado a partir da aplicação de pressões em corpos de prova através de um cilindro metálico, que tenta perfurar o material ensaiado. Essa é uma importante propriedade em relação à instalação do geossintético no canteiro de obras, uma vez que esse material deve resistir ao processo de aplicação intacto, de forma a garantir suas características técnicas de utilização;

- Resistência ao rasgo: Durante a instalação ou manuseio do geossintético, pode haver a ocorrência de um corte que pode se propagar e causar a perda da integridade física desse material. O ensaio de propagação do rasgo trapezoidal mede a resistência à propagação de um rasgo pelas fibras do geotêxtil e materiais correlatos;
- Resistência ao estouro: Há a possibilidade, em situações particulares, que o geossintético penetre nos espaços entre as partículas granulares onde foi aplicado e assuma uma forma esférica. A Figura 19, a seguir, ilustra essa situação.

Figura 19: Formação de uma calota esférica no geossintético.



Fonte: KOERNER, 2005, adaptada.

O ensaio de resistência ao estouro fornece, então, um índice de classificação qualitativa dos geossintéticos em relação a esse tipo de deformação.

- Fluência em tração: Os geossintéticos, quando submetidos a esforços de cisalhamento, tração ou compressão, por longos períodos de tempo, podem vir a fluir ou escoar. Esse fenômeno dependerá da magnitude do esforço e também da temperatura ao qual ele estará submetido. O ensaio em que se analisa esse tipo de fenômeno tem como resultado curvas que relacionam carga e deformação para um tempo determinado, além de uma curva de fluência, a partir da qual se pode estabelecer tempos de ruptura para os tipos de carregamento (VERTEMATTI, 2004).

### 4.2.3 Propriedades hidráulicas

Essas propriedades, segundo Costa et al. (2008), são mais importantes no emprego dos materiais geossintéticos como filtros e drenos. Os ensaios mais utilizados são os destinados à determinação do coeficiente de permeabilidade, que indica a facilidade que o fluido tem para percolar, e a determinação da abertura de filtração.

- **Permissividade:** A permissividade é um parâmetro que relaciona a permeabilidade do geossintético e a sua espessura. No procedimento do ensaio necessário para determinar essa propriedade, são realizadas leituras de diferentes cargas de fluido, num determinado tempo, que passam por um corpo de prova com dimensões normatizadas (MACCAFERRI, 2008);
- **Transmissividade:** Este parâmetro se traduz no produto entre a permeabilidade do geossintético e a sua espessura sobre uma determinada tensão normal de confinamento, ou seja, é a quantidade de água que passa por um corpo de prova em um intervalo de tempo sobre uma carga normal e um gradiente hidráulico específico (NORTÈNE, 2012);
- **Abertura de Filtração:** Pode ser definida como a abertura do geotêxtil equivalente ao maior diâmetro do agregado granular que por ele pode passar, como afirma Muñoz (2005). Esse é o índice mais utilizado para definir o potencial de filtração e para o dimensionamento de filtros.

### 4.3 Aplicações

Os geossintéticos devem ser especificados para cumprir determinadas funções associadas às propriedades específicas de cada obra, sejam elas geotécnicas, ambientais ou hidráulicas. Para Bueno (2003), as propriedades ditas dominantes caracterizam a função do geossintético na obra, já as características essenciais permitem que o material desempenhe a sua função dominante.

A Tabela 1 relaciona algumas funções dos geossintéticos e suas propriedades:

Tabela 1: Propriedades importantes em cada função dos geossintéticos.

<b>Função</b>	<b>Propriedades Dominantes</b>	<b>Propriedades Essenciais</b>
<b>Drenagem</b>	Permeabilidade	Compressibilidade. Fluência em compressão.
<b>Filtração</b>	Abertura dos poros	Gramatura. Espessura. Compressibilidade.
<b>Separação</b>	Abertura dos poros ou estanqueidade	Gramatura. Espessura. Compressibilidade.
<b>Reforço</b>	Resistência à tração	Fluência em tração

Fonte: BUENO (2003), adaptada.

As funções que se destacam quando os geossintéticos são aplicados isoladamente são: separação, filtração, drenagem, reforço, contenção de fluidos/gases, o controle de processos Erosivos e a impermeabilização. Sendo importante observar que esses materiais podem desempenhar mais de uma função simultaneamente (BUENO, 2003).

#### **4.3.1 Filtração**

O geossintético que realiza essa função permite que haja a livre passagem de fluidos através do solo, sem deixar que haja a movimentação de partículas sólidas. Os geotêxteis, por exemplo, podem ser utilizados para evitar a entrada de solo em tubulações ou agregados drenantes (VERTEMATTI, 2004).

#### **4.3.2 Drenagem**

O geossintético pode agir como um dreno que colete ou facilite os movimentos dos fluidos através de solos com menor permeabilidade. Drenos de agregados naturais podem ser substituídos, por exemplo, pelas georredes, que garantem vantagens em relação à rapidez da execução e economia de espaço, já que uma *geonet* de 5 mm de espessura pode substituir uma camada drenante de areia grossa de 30 cm (NORTÈNE, 2012).

### *4.3.3 Reforço*

Na vida útil da obra e na sua construção, os geossintéticos geralmente estão sujeitos às solicitações mecânicas como, por exemplo, a resistência à tração, resistência à perfuração e à penetração. Para que esse material exerça a função de reforço, deve-se haver a combinação do solo e do geossintético, convenientemente orientados, para obter um produto com melhor capacidade de resistência e com deformações restritas em comparação com o solo natural. Segundo Vertematti (2004), essa forma de emprego do geossintético viabiliza a realização de aterros e fundações sobre solos moles, reforço e contenções de taludes, além do seu uso em obras de pavimentação, através da melhoria na capacidade de suporte mecânico das camadas do pavimento.

### *4.3.4 Separação*

A mistura de camadas de solos diferentes pode alterar suas propriedades e comprometer a qualidade do projeto. Portanto, deve ser mantida a espessura de projeto da camada de solo e prevenir a entrada de finos para o interior de camadas granulares. Uma solução convencional para essa situação é a introdução de uma camada de sacrifício de agregado. No entanto, segundo a IGS Brasil (2007), essa camada aumenta o custo da obra e, em longo prazo, não garante a integridade das camadas de solo, tornando conveniente o uso de geossintéticos.

### *4.3.5 Controle de Processos Erosivos*

Em locais onde a vegetação natural por si só não promove proteção suficiente contra a erosão superficial, pode-se utilizar um material geossintético com o objetivo de reduzir os efeitos da erosão produzida por eventos naturais, como chuvas ou ventos. De acordo com Highland & Brobowski (2008), hoje em dia, alguns desses materiais são biodegradáveis, fabricados para reter a vegetação natural, conservar a umidade do solo, além de oferecer sombra parcial para que o desenvolvimento das sementes seja favorecido.

### *4.3.6 Impermeabilização*

Esta função faz referência à criação de uma barreira hidráulica que reduza ou evite a infiltração de água. O uso de geossintéticos com o objetivo de atuar como barreira impermeabilizante, data desde a década de 70, sendo aplicados em obras

ambientais para armazenamento ou contenção de resíduos, de forma a proteger a fundação, aquíferos e encostas contra a contaminação (SANTOS, 2014).

Segundo a IGS – Brasil (2007), a utilização de geossintéticos com função de impermeabilização, tem se mostrado bastante útil na recuperação de barragens de concreto.

## **5 UTILIZAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS EM BARRAGENS DE TERRA E ENROCAMENTO**

Diversos pesquisadores têm estudado a utilização de material geossintético em substituição a materiais naturais em barragens de terra como uma solução viável diante da falta de disponibilidade ou do alto custo do material granular tradicionalmente utilizado.

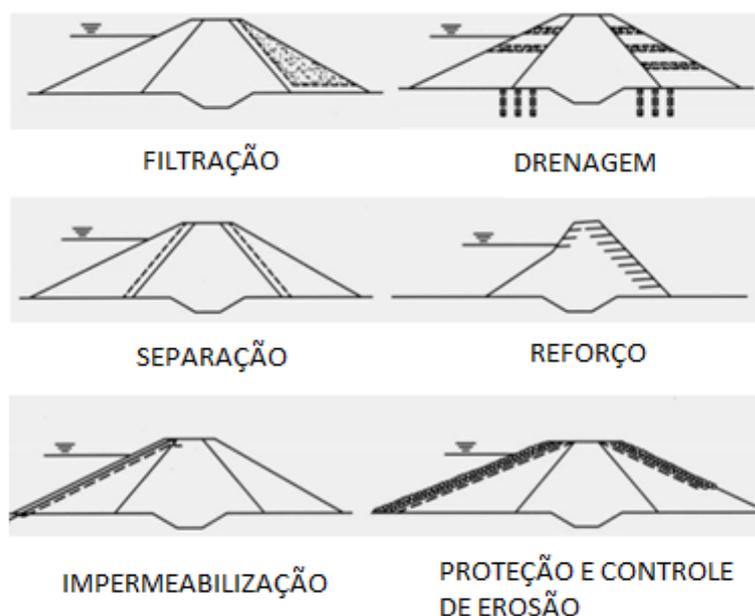
Segundo Artières et al. (2009), a primeira grande barragem em que se foi utilizado material geossintético foi construída na França em 1970, com um geotêxtil agindo no talude de montante como elemento separador entre a face de enrocamento e o solo, e no talude de jusante, como elemento filtrante, junto aos drenos granulares. Desde então, diversas pesquisas têm sido feitas em relação ao comportamento desses materiais nas barragens em relação à sua durabilidade, condições de aplicação em função de suas propriedades, questões de segurança, além de estudos de viabilidade e comparativo de custos.

Os geossintéticos têm sido considerados pelos pesquisadores e construtores para a realização das seguintes funções nas barragens de terra:

- Filtração e drenagem;
- Separação;
- Reforço;
- Proteção e controle de erosões de superfície;
- Impermeabilização.

A Figura 20 ilustra algumas dessas funções:

Figura 20: Utilizações mais frequentes de geossintéticos em barragens.



Fonte: GOBLA, 2009, adaptada.

Os geossintéticos vêm sendo utilizados mais frequentemente como elementos separadores de elementos drenantes, como *rip rap* e reforços de solo e de estabilidade dos taludes, e menos frequentemente como elementos que compõe os sistemas de drenagem interna das barragens (GOBLA, 2009).

Esses materiais sintéticos irão atuar de acordo com suas propriedades mecânicas, hidráulicas e de desempenho. A Tabela 2, a seguir, relaciona o tipo de geossintético com sua respectiva função principal quando aplicados em barragens de aterro:

**Tabela 2:** Principais funções dos geossintéticos aplicados em barragens de aterro.

Principal Função	Produtos típicos	Barragens de aterro
<b>Drenagem</b>	Geotêxtil, Georrede, Geomembrana	Construção e Reabilitação de barragens antigas.
<b>Separação</b>	Geotêxtil, Geomembrana	Construção e Reabilitação de barragens antigas.
<b>Controle de erosão superficial</b>	Geotêxtil, Geocélula	Construção e Reabilitação de barragens antigas.

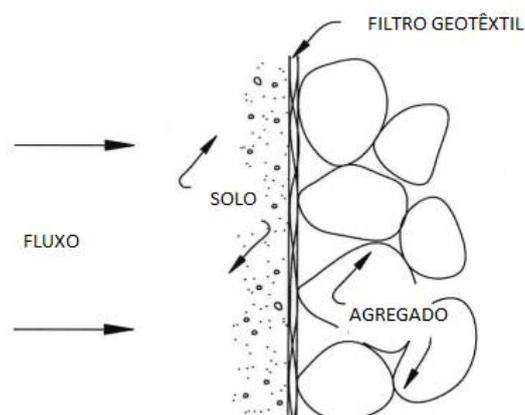
<b>Filtração</b>	Geotêxtil	Construção e Reabilitação de barragens antigas.
<b>Impermeabilização</b>	Geomembranas, Geocompostos	Construção e Reabilitação de barragens antigas.
<b>Proteção</b>	Georede, Geotêxtil	Construção e Reabilitação de barragens antigas.
<b>Reforço</b>	Geotêxtil, Geogrelha	Construção e Reabilitação de barragens antigas.

Fonte: MAIONE et al, 2000, adaptada.

### 5.1 Filtração e drenagem

Quando aplicado em sistemas de filtração e drenagem, o geossintético deverá permitir a máxima vazão do fluido percolado pela barragem, sem permitir que um movimento de partículas de solo ocorra. Além disso, busca-se conduzir de forma segura o fluxo de água para que não ocorram subpressões na seção de jusante da barragem, que causem sua instabilidade (FEMA, 2008). A Figura 21 mostra a utilização de geotêxtil como filtro, junto à uma camada de dreno granular:

Figura 21: Geotêxtil utilizado como filtro.



Fonte: FEMA, 2008.

Beirigo (2015) comenta em sua dissertação de mestrado que geotêxteis vêm sendo aplicados em barragens de terra compactada há mais de vinte e cinco anos. No entanto, é importante salientar que muitos pesquisadores têm questionado se esses produtos atendem aos requerimentos necessários para garantir a segurança de uma

barragem, motivo pelo qual, ainda não são largamente utilizados por projetistas de barragens.

A primeira barragem projetada com geotêxtil foi executada na França e projetada por J. P. Giroud. Segundo Galvis (2016), ela foi analisada por diversas vezes ao longo dos anos para que se estudasse o comportamento do geotêxtil nela aplicado. Ensaio de gramatura, espessura, abertura de filtração e permissividade foram realizados a partir da análise de amostras do material, recolhidas em 1976 e 1992.

Após vinte anos de uso nessa barragem, os geotêxteis continuavam apresentando bom desempenho mecânico e boa conservação de suas propriedades hidráulicas, apesar de sua permissividade estar ligeiramente mais baixa nos pontos em que as amostras foram coletadas próximas ao enrocamento do dreno de pé onde foram utilizados.

A Tabela 3 expõe algumas barragens em diferentes lugares do mundo, construídas utilizando geossintéticos como material de filtração e drenagem em seus elementos constituintes.

**Tabela 3:** Exemplos de barragens construídas com geossintéticos com função de filtração.

<b>Lugar/ano de construção</b>	<b>Barragem</b>
França / 1970	Barragem de Valcros
França / 1973	Barragem de Brugnens
Alemanha / 1975	Barragem de Formitz
Nigéria / 2001	Barragem de Samira
Estados Unidos / 2012	Barragem Red Willow

Fonte: Gobla, 2009, adaptada.

A Figura 22, a seguir, ilustra um exemplo de utilização de geotêxtil como filtro na barragem de Samira, na Nigéria.

Figura 22: Utilização de geossintético como filtro na barragem de Samira.



Fonte: Gobla, 2009.

Em 2012, foram realizadas obras de reparos na barragem de Red Willow, no estado de Nebraska, nos Estados Unidos. Os trabalhos realizados incluíam a escavação do aterro e do dreno de pé, construção de um dreno horizontal, colocação de um geocomposto com georrede e geotêxtil na face escavada com o aterro, entre outras intervenções para garantir a estabilidade da barragem.

No entanto, de acordo com Gobla (2009), essa aplicação de geocomposto como sistema de drenagem interna principal na barragem, gerou diversos debates na comunidade científica sobre o seu desempenho em relação ao entupimento e às suas condições de projeto, que necessitaram de uma análise profunda.

A seguir, discute-se as vantagens e desvantagens, da utilização de material geossintético como elementos de filtração e drenagem, a partir de discussões, como as que foram levantadas sobre a barragem de Red Willow, e análises feitas por pesquisadores.

### *5.1.1 Algumas vantagens e desvantagens*

De acordo com a FEMA (2008), em algumas aplicações de filtração e drenagem, o uso de material geossintético, em detrimento de materiais granulares, leva vantagem em relação à:

- Facilidade de construção;

- Redução de material escavado e menor desperdício de material;
- Menor risco de segregação de material drenante durante sua instalação;
- Menor uso de material drenante de qualidade inferior;
- Custos de transporte.

Alguns tipos de filtros se dizem críticos quando sua falha gera um aumento considerável na probabilidade de haver a ruptura da barragem por *piping*. Segundo Fell et al. (2005), esses tipos de filtros, quando construídos em uma nova barragem ou quando implantados na reabilitação de um barramento já existente, devem atender critérios estritos de filtração.

Apesar das aparentes vantagens que podem apresentar, é interessante comentar que muitos autores não recomendam que o material geossintético seja utilizado como filtros críticos e como única defesa contra a erosão interna e contra a ruptura causada pelo fluxo de água desordenado pelo maciço de terra.

A comissão internacional de grandes barragens (ICOLD), em seu boletim de 1986 (55ª edição), comenta alguns motivos pelos quais o uso de geossintéticos como filtros críticos e drenos em barragens devem ser tratados com bastante atenção e cautela:

- Fenômenos como a oxidação, ataques químicos e a prolongada imersão desse material em água pode afetar negativamente o seu desempenho;
- Os geotêxteis são suscetíveis a entupimento causado pela aglomeração de material fino;
- A criação de fungos ou de material biológico pode entupir os espaços do geotêxtil, diminuindo assim sua permissividade.

Além disso, segundo a FEMA (2008), o desempenho do geossintético pode ser afetado negativamente, por danos causados na sua instalação, danos causados pela vegetação ou drenos mal graduados, presença de raízes e ação de animais.

A Figura 23 ilustra uma manta geotêxtil perfurada devido a problemas na aplicação no canteiro de obra.

Figura 23: Manta geotêxtil com rasgo.



Fonte: Gobla, 2009.

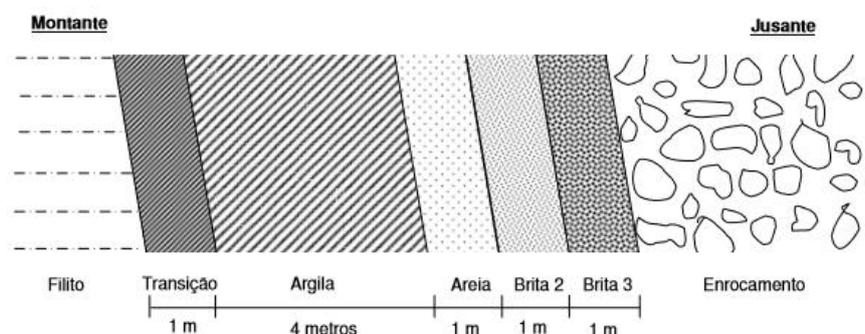
### 5.1.2 Exemplo de utilização em barragens

Em relação à filtração e drenagem, existem casos de geossintéticos utilizados nos drenos de pé, tapetes drenantes e trincheiras de vedação na construção ou reabilitação de algumas barragens pelo mundo.

Como exemplo da utilização de geotêxtil no filtro de transição de jusante de uma barragem, tem-se o caso da barragem do Palmital em Mairinque – São Paulo. Nessa obra, foi feita uma alteração do projeto de acordo com as necessidades do solo, vantagem econômica apresentada e vantagens de caráter técnico, utilizando geotêxtil em substituição a materiais argilosos propostos no projeto original da barragem (BIDIM, 2011).

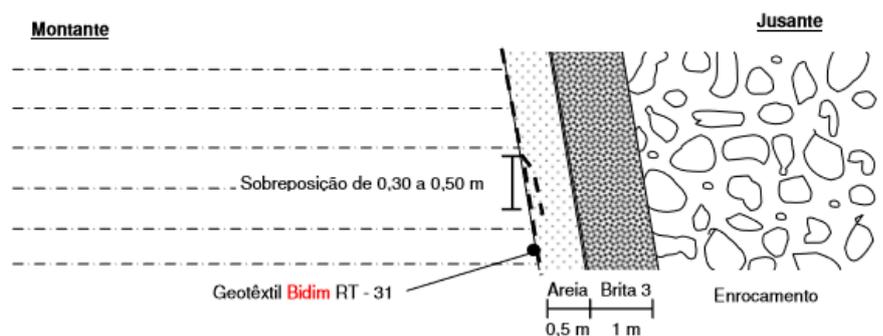
Inicialmente o projeto previa a execução dos filtros em argila, areia e dois tipos de brita, mas por causa da difícil obtenção desse material na região da obra, o projeto da barragem principal teve de ser modificado, o que determinou que os filtros fossem constituídos por uma manta de geotêxtil juntamente com uma camada de brita, como explicita as Figuras 24 e 25.

Figura 24: Esquema inicial de filtro.



Fonte: Casos de Obra (BIDIM, 2011, adaptada).

Figura 25: Esquema do filtro após a alteração no projeto.



Fonte: Casos de Obra (BIDIM, 2011, adaptada).

Nesse caso, além de proporcionar a aceleração na execução da obra, a utilização desse geossintético trouxe também vantagens econômicas a partir da diminuição da camada de argila compactada antes dimensionada com 4 metros.

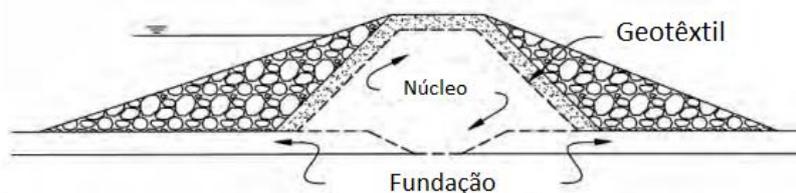
## 5.2 Separação e proteção

Atualmente, a utilização mais comum de materiais geossintéticos em barragens é a de elemento separador entre materiais granulares. Nesse caso, ao mesmo tempo em que o material geossintético funciona como elemento separador entre camadas de granulometria diferente, ele impede que algum material, como solo ou rocha, penetre em outra camada e danifique o material a ser protegido (FEMA, 2008).

Segundo Palmeira & Fonseca (2004), para que um geossintético exerça a função principal de separação, é necessário que ele seja capaz de reter os finos provenientes do solo de fundação e seja resistente aos esforços a que será submetido ao longo da vida útil da obra, como por exemplo, a tração localizada, o estouro e forças que o possam perfurar.

Os geotêxteis utilizados nesse tipo de aplicação podem trazer benefícios e vantagens econômicas, uma vez que com sua aplicação, existe a possibilidade de haver a integridade de camadas no maciço da barragem, podendo vir a reduzir custos de manutenção e, também, a diminuição de riscos de acidentes. A Figura 26, a seguir, ilustra a aplicação de geotêxtil com função de separação entre o núcleo argiloso, o material de fundação e o material de enrocamento que constitui os taludes da barragem.

Figura 26: Utilização de geotêxtil como elemento separador entre o núcleo, fundação e enrocamento de uma barragem.



Fonte: FEMA, 2008, adaptada.

Outro exemplo de aplicação se mostra na Figura 27, onde um geotêxtil atua como elemento separador entre o *rip rap* e o talude de montante de uma barragem de terra.

Figura 27: Utilização de geotêxtil como elemento separador entre *rip rap* e talude de montante de uma barragem.



Fonte: FEMA, 2008, adaptada.

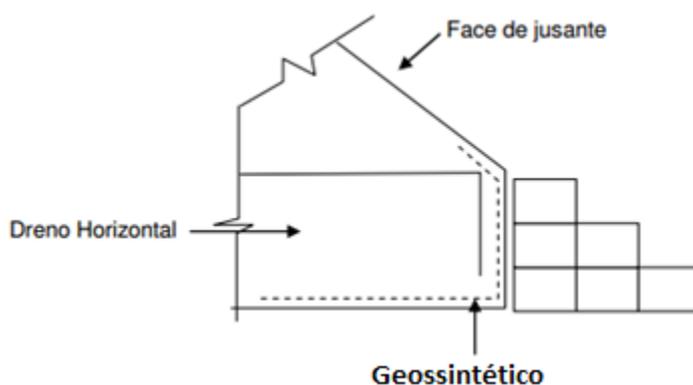
### 5.2.1 Exemplo de utilização em barragens

Como exemplo de aplicação, pode-se citar a utilização do Geotêxtil da marca Bidim, não tecido, como elemento de separação em várias estruturas executadas em gabiões na Barragem do Rio do Chico, no estado do Paraná.

Foi instalado geotêxtil em gabiões que compõe a escada de dissipação do vertedouro, na face de montante da barragem e entre o dreno horizontal e os gabiões próximos à face de jusante. Nesse último local a instalação se deu a partir, primeiramente, da limpeza do canal do rio e da execução do gabião e, posteriormente, da aplicação do geotêxtil sobre o fundo do canal (BIDIM, 1994).

Assim, após a aplicação do material geossintético, deu-se a execução do dreno horizontal, como ilustra a Figura 28.

Figura 28: Utilização de geotêxtil como elemento separador entre o dreno horizontal e gabiões numa barragem de terra.



Fonte: Bidim , 1994, adaptada.

### 5.3 Reforço

Os materiais geossintéticos vêm sendo utilizados como elemento de reforço de solo de forma a produzir uma redistribuição global das tensões, quando aplicados no aterro ou na fundação da barragem, conferindo a resistência à tração que o solo não possui. Desse modo, através de sua utilização na estrutura da barragem de aterro, ela se torna capaz de resistir a um valor maior de recalque diferencial ou resistir a tensões que causem movimentações de massa, como escorregamentos e quedas. Com sua utilização,

pode-se ainda aumentar o coeficiente de segurança dos taludes da barragem e até aumentar a altura da barragem.

De acordo com Maione et al. (2000), ao desempenhar essa função, as principais vantagens que o uso de geossintéticos apresenta são:

- Menor custo global, uma vez que a possibilidade de construção de taludes mais íngremes faz com que haja uma menor necessidade de material granular para preencher o aterro;
- Não há a necessidade de utilizar solos com ótimas propriedades, que serão mais caros;
- Há a possibilidade de construir diretamente em solos que não possuem boa capacidade de suporte;
- Aceleração do processo de adensamento do maciço, caso o reforço também venha a atuar como elemento drenante.

Para que esse material sintético realize a função de reforço no solo, além do correto dimensionamento dos esforços atuantes no geossintético, ele deve ser especificado de acordo com propriedades como resistência à tração, comportamento em fluência, resistência à degradação ambiental e interação mecânica com o solo envolvente (VERTEMATTI, 2004).

Em relação à função de reforço em barragens, os geossintéticos podem ser utilizados em dois tipos de situações: para reforçar fundações sobre aterros e para aumentar a resistência dos taludes de montante e jusante.

### **5.3.1** *Aterros em solos de baixa resistência*

Segundo Palmeira & Ortigão (2004), executar aterros em solos de fundação de baixa resistência é uma atividade que requer uma solução de estabilização, como por exemplo, a construção de bermas de equilíbrio, melhoramento do solo, aplicação de geossintéticos, entre outros.

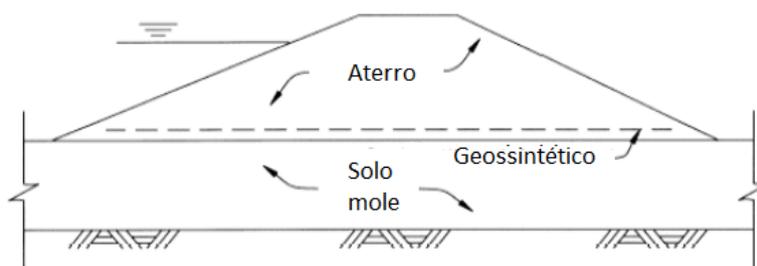
Nesse caso, Moraes (2002) afirma que os mecanismos de instabilidade de solos moles podem se desenvolver por meio da expulsão do solo mole de fundação, pela ocorrência de uma ruptura generalizada envolvendo o talude e a fundação, ou por ruptura no interior do aterro, envolvendo o deslocamento lateral do aterro.

As barragens de aterro, quando construídas em solos menos resistentes, tem certa tendência a sofrer um espalhamento lateral causado por pressões da massa do aterro que ocasionam tensões de cisalhamento na base do barramento. De acordo com a FEMA (2008), a fundação, por não conseguir resistir a essa tensão de cisalhamento, pode ter sua estabilidade comprometida e sofrer risco de ruptura.

De acordo com suas propriedades de resistência à tração, comportamento em fluência, resistência à degradação ambiental e com o tipo de interação com o solo onde será envolvido, aplicam-se geossintéticos para reforçar fundações de forma a prover reforço em relação à tensão de cisalhamento que o aterro aplica na fundação, em todas as direções possíveis.

Esse material sintético é aplicado entre o solo mole e o aterro, como mostra a Figura 29.

Figura 29: Geossintético utilizado como reforço de fundação em solo mole.

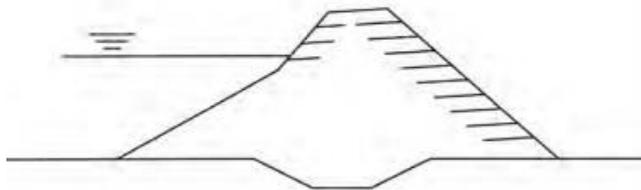


Fonte: FEMA, 2008, adaptada.

### 5.3.2 Reforço de Taludes

Segundo Azambuja et al. (2004), a aplicação de material geossintético em maciços de solo, permite que haja uma redistribuição de tensões e deformações de modo que sua estabilidade seja beneficiada e que taludes mais íngremes possam ser construídos. A Figura 30 ilustra esse caso de utilização.

Figura 30: Talude de barragem reforçado com geossintéticos.



Fonte: FEMA, 2008, adaptada.

Para que esta função seja garantida, o geossintético deve passar pela potencial superfície de ruptura da massa de solo e deve agir de modo a restringir a movimentação e deformações do solo ao qual foi aplicado, fornecendo-lhe, assim, tensões resistentes adicionais (MIRAFI, 2007). Nesse caso, os geossintéticos mais aplicados são os geotêxteis tecidos e não tecidos, as geogrelhas e os geocompostos resistentes.

Dentre algumas vantagens citadas por Azambuja et al (2004) estão a minimização do impacto ambiental decorrente das obras de contenção de solos, a possibilidade de adotar diversos tipos de acabamento de face dos taludes, a redução considerável do tempo de construção da obra, além da possibilidade da execução desse tipo de obra em lugares de difícil acesso.

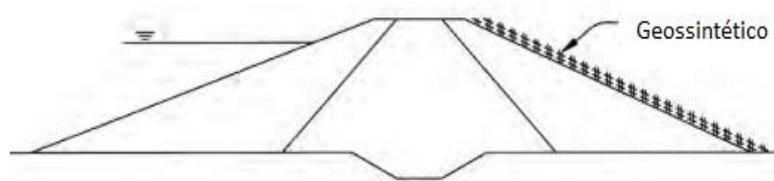
#### 5.4 Estabilização de face

Os geossintéticos escolhidos para desempenhar a função de controle de erosão, são aplicados para garantir os taludes das barragens contra a ocorrência de processos erosivos. Segundo Marques (2004), nesse tipo de utilização, alguns fatores relevantes que os geossintéticos devem atender são a retenção de partículas finas provenientes dos materiais erodíveis transportados e a resistência à velocidade de escoamento do fluxo de material erodível que passa pelo talude.

Para essa aplicação os materiais utilizados podem ser classificados em temporários ou permanentes, sendo os primeiros produtos degradáveis que facilitam o desenvolvimento de vegetação, e os segundos materiais que precisam ser utilizados em locais que necessitam de imediata proteção contra erosão. Geotêxteis podem ser utilizados como proteção temporária de erosão, de forma a minimizá-la e evitar o transporte de sedimentos durante a construção de barragens de aterro (FEMA, 2008).

A Figura 31, a seguir, ilustra um exemplo da aplicação de geossintético atuando com a principal função de proteger a superfície do talude da barragem contra a erosão superficial.

Figura 31: Geossintético atuando com a função principal de evitar erosão de face no talude da barragem.



Fonte: FEMA, 2008, adaptada.

## 5.5 Impermeabilização

No Brasil, a vedação da face de montante de barragens de enrocamento de face de concreto é geralmente executada em concreto armado e moldada *in loco*. De acordo com Colmanetti (2006), a desvantagem da utilização desse tipo de material está ligada à rigidez da face em relação ao maciço de enrocamento. Após o enchimento do reservatório, essa diferença de rigidez pode causar deformações que podem gerar a formação de fissuras e trincas na estrutura. Além disso, a face de concreto pode se tornar bastante onerosa por causa do número de juntas necessária para que possa acompanhar as deformações do maciço e por causa dos cuidados especiais que necessita para ser executada.

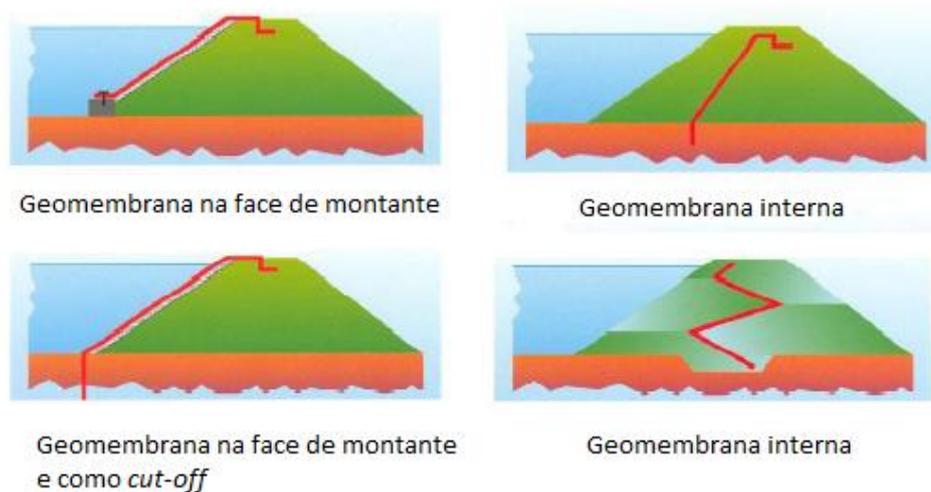
Como solução a este problema tem-se a aplicação de geomembranas, um material mais flexível, que pode acompanhar essas deformações do maciço durante o enchimento do reservatório.

Nas barragens de terra, as geomembranas também reagem bem a deformações do maciço e apresentam como vantagens sua simples aplicação, possibilidade de substituição de camadas de materiais granulares mais onerosos, além da redução do tempo de construção (SANTOS, 2014).

Esse tipo de geossintético foi utilizado como face impermeabilizante em uma barragem de enrocamento pela primeira vez na década de 50, na barragem *Contrada Sabetta* (ICOLD, 1991). A única grande intervenção realizada nessa obra foi nos anos 90, por causa de infiltrações. Além disso, as investigações realizadas na época indicaram que a geomembrana apresentava um bom comportamento em relação às suas propriedades físicas e mecânicas.

De acordo com Colmanetti (2006), nas barragens de enrocamento e de terra as opções de aplicação da geomembrana são na face de montante ou na parte central. No primeiro local, o geossintético reduz a presença de água no corpo da barragem e assim, evita o carreamento de finos. Já no segundo local, como a pressão da água chega até o ponto central da barragem onde o geossintético está aplicado, a estabilidade é principalmente garantida pelo maciço de jusante. Neste último caso, é requerido menos material sintético para a execução da obra, no entanto, sua posição dificulta o acesso durante sua instalação e reparos posteriores. A Figura 32 a seguir, ilustra as possíveis localizações de aplicação das geomembranas nas barragens de terra e enrocamento.

Figura 32: Posições da geomembrana em barragens de aterro



Fonte: Colmanetti, 2006, adaptada.

## 6 NORMAS VIGENTES

No Brasil, é prioridade para os engenheiros utilizar as normas técnicas brasileiras. Porém, na inexistência ou insuficiência dessas, é comum que se recorra a normas internacionais semelhantes que se adequem da melhor forma possível às peculiaridades do país.

A Tabela 4 resume algumas normas referentes às propriedades, ensaios e aplicações de geossintéticos.

**Tabela 4:** Normas referentes aos ensaios realizados em geotêxteis e produtos similares.

<b>Propriedade</b>	<b>Normas</b>
<b>Propriedades físicas</b>	
<b>Gramatura</b>	<p><b>ASTM D 5261/92</b> - <i>Standard Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Geotextiles;</i></p> <p><b>ASTM D 6566/00</b> - <i>Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Turf Reinforcement Mats;</i></p> <p><b>NBR ISO 9864:2013</b> – Geossintéticos — Método de ensaio para determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos correlatos.</p>
<b>Espessura</b>	<p><b>ASTM D 5199/01</b> - <i>Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics;</i></p> <p><b>ASTM D 6525/00</b> - <i>Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Permanent Rolled Erosion Control Products;</i></p> <p><b>NBR ISO 9863-1:2013</b> – Geossintéticos — Determinação da espessura a pressões especificadas. Parte 1: Camada única</p>
<b>Propriedades mecânicas</b>	
<b>Resistência à tração</b>	<p><b>ASTM D 6637</b> – <i>Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Geogrids by the Single or Multi-Rib Tensile Method;</i></p>

	<b>NBR ISO 10319:2013</b> - Geossintéticos — Ensaio de tração faixa larga.
<b>Resistência ao puncionamento</b>	<b>ASTM D 6241-99</b> - <i>Standard Test Method for the Static Puncture Strength of Geotextiles and Geotextile</i> ; <b>NBR ISO 12236:2013</b> - Geossintéticos — Ensaio de puncionamento estático (punção CBR).
<b>Resistência à propagação de rasgo</b>	<b>ASTM D 4533</b> – <i>Standard Test Method for Trapezoid Tearing Strength of Geotextiles</i> .
<b>Resistência ao estouro</b>	<b>ASTM D 3786</b> – <i>Standard Test Method for Hydraulic Bursting Strength of Textile Fabrics — Diaphragm Bursting Strength Tester Method</i> .
<b>Fluência sob tração</b>	<b>ASTM D 4751</b> - <i>Standard Test Method for Evaluating the Unconfined Tension Creep and Creep Rupture Behavior of Geosynthetics</i> .
<b>Propriedades Hidráulicas</b>	
<b>Permissividade</b>	<b>ASTM D 4491 – 99a</b> - <i>Standard Test Methods for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity</i> ; <b>NBR ISO 11058: 2013</b> - Geotêxteis e produtos correlatos — Determinação das características de permeabilidade hidráulica normal ao plano e sem confinamento.
<b>Transmissividade</b>	<b>NBR ISO 12958:2013</b> - Geotêxteis e produtos correlatos — Determinação da capacidade de fluxo no plano.
<b>Abertura de filtração</b>	<b>NBR ISO 12956:2013</b> - Geotêxteis e produtos correlatos — Determinação da abertura de filtração característica.
<b>Desempenho</b>	
<b>Danos de instalação</b>	<b>ISO 10722</b> - <i>Geosynthetics -- Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading --</i>

	<i>Damage caused by granular material;</i> <b>ASTM D 5818</b> - <i>Standard Practice for Exposure and Retrieval of Samples to Evaluate Installation Damage of Geosynthetics.</i>
<b>Resistência à abrasão</b>	<b>ISO 13427</b> - <i>Geosynthetics - Abrasion damage simulation (sliding block test).</i>

Fonte: Maccaferri (2008), Bueno & Vilar (2004).

## 7 POTENCIAIS PROBLEMAS DE DESEMPENHO

Como qualquer material utilizado na engenharia civil, os geossintéticos precisam ser estocados, manuseados e instalados de forma correta, caso contrário, suas vantagens econômicas e técnicas de utilização podem ser comprometidas.

Segundo a FEMA (2008), problemas de desempenho desses materiais são divididos em três grandes grupos:

1. Limitações devido ao dimensionamento, propriedades e material constituinte;
2. Meio ambiente onde foi aplicado com alto poder de degradação;
3. Aplicações de alto risco.

O primeiro grupo se refere principalmente às propriedades dos geossintéticos e incertezas quanto à degradação desse material. Como eles são produtos manufaturados, é possível que haja certo controle em sua aplicação e no seu dimensionamento, de acordo com a função em que se deseja aplicá-lo. Já o segundo grupo inclui as degradações provenientes do meio em que o geossintético foi instalado, levando em conta altas temperaturas, raios ultravioletas e microrganismos.

O último grupo, por sua vez, envolve a utilização em casos de alto risco, onde se requer atenção redobrada a diversos detalhes construtivos. Um exemplo desse caso é a utilização de geossintéticos em filtros de locais onde não se possui fácil acessibilidade ou possibilidade de reabilitação em uma barragem, o que causaria grandes riscos econômicos e de segurança.

Koerner (2005) mostra que existem diversos fatores que podem levar a problemas de desempenho em uma estrutura que utiliza geossintéticos, sendo alguns deles:

- Entupimento excessivo;
- Distorção do material;
- Degradação ambiental;
- Rupturas.

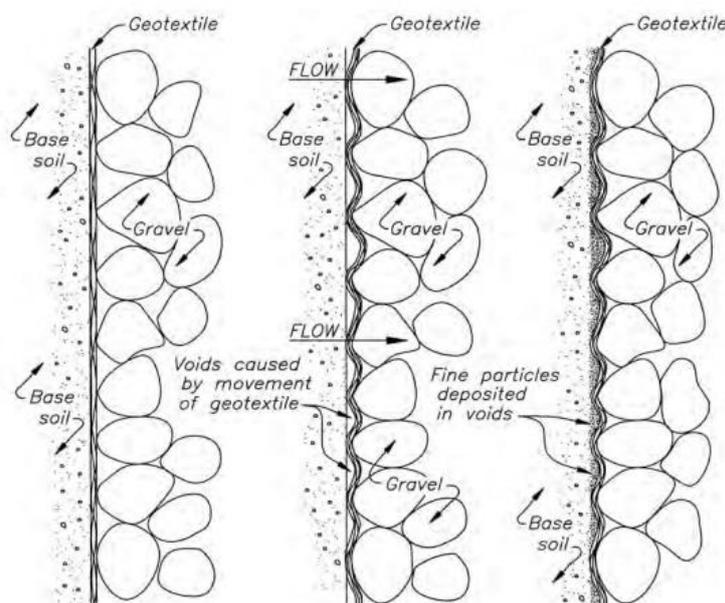
A FEMA (2008) também explica que o entupimento do geotêxtil ocorre quando seus vazios são preenchidos por partículas, o que diminui sua capacidade de condutividade hidráulica. Esse fenômeno pode acontecer mediante o preenchimento dos

vazios por partículas de solo, microrganismos (criando zonas chamadas de biofilmes) ou partículas químicas precipitadas.

Caso a ocorrência de entupimento no geotêxtil seja excessiva, ele não poderá desempenhar de forma correta suas funções de filtração e drenagem, além de poder causar um aumento perigoso do nível da água do reservatório, o que gera a possibilidade do aparecimento de erosões e transbordamento.

Segundo Koerner (2005), um caso de entupimento de geotêxtil se dá quando esse material não é capaz de resistir às forças do fluxo de água que o atravessam e quando o agregado utilizado como dreno possui partículas muito grandes. Quando um geotêxtil é instalado entre uma camada de solo e uma camada de enrocamento com diâmetro muito grande, por exemplo, o fluxo de água que passará pelo material geossintético pode movimentá-lo, gerando cavidades entre o solo e o geotêxtil, como mostra a Figura 33. As partículas finas do solo preenchem, então, essas cavidades e criam uma zona de baixa permeabilidade, fazendo com que o filtro se torne ineficiente.

Figura 33: Ilustração de entupimento do geotêxtil.



Fonte: FEMA, 2008.

## 7.1 Alguns comentários sobre durabilidade

As aplicações de geossintéticos em obras de engenharia civil vêm aumentando continuamente. A durabilidade desses materiais surge então como uma importante

limitação à sua aplicação. Essa característica depende do tipo de polímero pelo qual é constituído, a sua capacidade de resistir aos mecanismos de degradação, do seu processo de fabricação, o meio sobre o qual está inserido e a sua forma de aplicação.

O uso de material de boa qualidade, o controle e a correta instalação dos geossintéticos podem evitar danos consideráveis e conseqüentemente aumentar a durabilidade desses materiais. De acordo com Vidal (2015), processos como a oxidação, fotodegradação, degradação mecânica e química devem ser evitados de modo a prover uma durabilidade proporcional ao tempo de vida da obra.

Além disso, é importante frisar a importância de um projeto bem concebido e respaldado em especificações técnicas disponíveis na literatura, com base nas funções esperadas pelo material, especificando o polímero adequado em função das características geotécnicas e ambientais da obra.

Alguns cuidados com a estocagem, transporte e instalação dos geossintéticos em obras de engenharia civil, citados por Vertematti (2004) no Manual Brasileiro de Geossintéticos, são:

- Caso o geossintético seja estocado de maneira indevida, com exposição a intempéries e solventes, por exemplo, é recomendado sacrificar as primeiras partes do material, utilizando apenas o material intacto;
- Deve-se tomar cuidado para que o material não seja cortado ou perfurado durante o transporte;
- Devem-se minimizar as solicitações em regiões de união de geossintéticos, uma vez que representam descontinuidades, sendo a união por sobreposição a forma mais simples de garantir a maior continuidade possível;
- No caso de lançamento de agregados, quando feitos em alturas maiores que dois metros e com grãos maiores que dez centímetros, recomenda-se que o geossintético seja forrado com uma camada granular amortecedora;
- Em barragens, por serem obras de grande porte, é recomendado que sejam realizados ensaios simulados de campo ou laboratório.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do presente estudo foi possível verificar que o uso de geossintéticos em barragens de terra e enrocamento pode apresentar uma série de vantagens em sua aplicação. Algumas dessas vantagens estão relacionadas à possível redução de custos na obra, redução de danos ambientais, praticidade de execução e à sua grande versatilidade de uso.

Nas barragens de terra e enrocamento, esses materiais podem ser utilizados em estruturas como o *rip rap*, drenos de pé, filtros, tapetes drenantes, e em reforços dos taludes. A utilização mais usual, no entanto, é como elemento separador, não sendo indicado em elementos críticos de drenagem interna.

O desenvolvimento contínuo por parte dos fabricantes de novas tecnologias e novos materiais torna os geossintéticos uma alternativa convidativa como solução para os diversos problemas enfrentados na construção de barragens de aterro. Porém, faz-se necessário selecionar produtos que atendam os aspectos fundamentais do comportamento de cada estrutura componente da barragem, isto é, o tipo mais adequado para a estrutura em que se deseja aplicá-lo. Ainda, faz-se necessária a verificação das propriedades adequadas, tendo sempre em mente que a perspectiva de redução dos custos não deve ser jamais considerada isoladamente.

As barragens de aterro são grandes obras, cuja ruptura pode gerar enormes prejuízos, contabilizados tanto em vidas humanas quanto em custos. Quando nelas são projetadas estruturas utilizando material sintético, certos problemas de desempenho podem vir a se manifestar com o tempo. Tais falhas derivam, por exemplo, de projetos mal concebidos, de uma instalação imprópria e também por meio da degradação, em si, do material.

Isto posto, uma vez que os geossintéticos têm certa probabilidade de sofrer danos durante a instalação e danos por ruptura ou entupimento, muitos projetistas de barragens avaliam a sua utilização com bastante cautela. Por isso, em barragens cujo mal desempenho dos geossintéticos possa causar o rompimento da estrutura, não é recomendada a aplicação desses materiais.

Outro fator essencial à ponderação da aplicabilidade dos geossintéticos é o ambiente alvo de implantação, uma vez que este pode ocasionar problemas de desempenho nos materiais. Todavia, essas condições de aplicação podem ser investigadas previamente através de ensaios, investigação do local de construção, e,

sobretudo, da análise da experiência de outros projetistas em condições semelhantes de aplicação.

Conclui-se, então, que os projetistas devem avaliar as condições de construção e funcionamento da barragem, e que, a partir daí, decidam se os riscos de ruptura apresentados valem a pena quando comparados às vantagens oferecidas pelos geossintéticos. Assim, recomenda-se que sejam feitos estudos prévios de viabilidade econômica, estabilidade da barragem, além dos estudos geotécnicos e hídricos pertinentes, de forma a assegurar o emprego do material mais adequado.

Por fim, constata-se que o Brasil ainda se mostra incipiente na área, apresentando certa escassez de informação e, conseqüentemente, morosidade no desenvolvimento de normas e legislações referentes a estes materiais sintéticos. Tal fato, por diversas vezes, faz com que os projetistas tenham que recorrer a normas internacionais, que, por não legislarem de acordo com as especificidades materiais do país, tornam-se inadequadas.

## REFERÊNCIAS

ABNT – Associação brasileira de normas técnicas, **NBR. 12553: Geossintéticos – Terminologia**. Jul. 2003.

ALAMDARI, N. Z. BANIHASHEMI, M. MIRGHASEMI, A. **A numerical Modeling of Piping Phenomenon in Earth Dams**. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*. Vol:6, No:10, 2012.

ARTIÈRES, O; OBERREITER, K; ASCHAUER, F. **Geosynthetic Systems for Earth Dams-35 Years of Experience**. Estados Unidos, 2009. Disponível em: <<http://www.tencate.com>>. Acesso em: outubro de 2016.

AZAMBUJA, E. SAYÃO, A. EHRLICH, M. GOMES, R. C. **Muros e Taludes Reforçados**. Manual Brasileiro de Geossintéticos. P. 84-123. São Paulo: Blutches, 2004.

AZEVEDO, M. P. N. **Barragens de Terra: Sistemas de Drenagem Interna**. Dissertação (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Anhembí Morumbi, São Paulo, 2005.

BEIRIGO, E. A. **Comportamento filtro drenante de geotêxteis em barragens de rejeitos de mineração**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, outubro de 2015, 192 p.

BIDIM, **Utilização de geotêxtil bidim no filtro de transição de jusante da barragem do palmital grupo Votorantin**. 2011. Disponível em: <<http://www.bidim.com.br/casosdeobra>>. Acesso em: outubro de 2016.

BIDIM, **Utilização do geotêxtil bidim como filtro e elemento de separação em estruturas de gabião na barragem do rio Chico**. 1994. Disponível em: <[www.bidim.com.br/casosdeobra](http://www.bidim.com.br/casosdeobra)>. Acesso em: outubro de 2016.

BUENO, B. S. **Propriedades. Especificações. Ensaios**. *in*: Anais do 4º Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, p. 163-176, Porto Alegre-RS, 2003.

BUENO, B. S. VILAR, O. M. **Propriedades, Ensaios e Normas**. Manual Brasileiro de Geossintéticos. P. 27-62. São Paulo: Blucher, 2004.

BUREAU OF RECLAMATION. **Manual para avaliação de pequenas barragens**. 2002. Disponível em: <[www.codevasf.gov.br/principal/publicacoes/publicacoes/barragens.pdf](http://www.codevasf.gov.br/principal/publicacoes/publicacoes/barragens.pdf)>. Acesso em: nov. 2015.

BURKE, J. **Barragens de Terra**. Manual sobre Pequenas Barragens de Terra. Organização das Nações Unidas para a alimentação e a agricultura. p. 11-19. Roma, 2011. Disponível em: <<http://www.fao.org/home/en/>>. Acesso em: outubro de 2016.

CESAR, R. **Barragens de Terra e de Enrocamento**. Departamento de Engenharia Civil - UFOP, 2010. Notas de aula. Disponível em: <<http://www.em.ufop.br/deciv/departamento/~romerocesar>>. Acesso em: outubro de 2016.

CIGB. **Comitê Brasileiro de Grandes Barragens**. 2013. Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/>> Acesso em novembro de 2016.

CITIMAT. **Citimat Impermeabilizantes**. 2006. Disponível em: <<http://www.citimat.com.br/geotubo.html>>. Acesso em: outubro de 2016.

COLMANETTI, J. N. **Estudos sobre a aplicação de geomembranas na impermeabilização da face de montante de barragens de enrocamento**. Maio 2006. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 303 p.

COSTA, C. M. L. LODI, P. C. COSTA, Y. D. J. BUENO, B. S. **Avaliação de recomendações normativas sobre o uso de ensaios no controle de qualidade de fabricação de geossintéticos**. Associação Brasileira de Polímeros, vol 18 nº 2, São Carlos, 2008.

COSTA, W. D. **Geologia de Barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 352 p.

CRUZ, C. P. **100 Barragens Brasileiras**. São Paulo: Oficina de Textos, 1996, 330 p.

CRUZ, P. T. MATERÓN, B. FREITAS, M. **Barragens de Enrocamento com Face de Concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 448 p.

DNOCS. **Barragem Edson Queiroz**. 2007. Disponível em: <<http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/barragens/Barragem%20do%20Ceara/serrrote.htm>>. Acesso em: outubro de 2016.

FELL R. MCGREGOR P. STAPLEDON D. BELL G. FOSTER M. **Geotechnical Engineering of Dams**. CRC Press, 2005.

FEMA, *Federal Emergency Management Agency*. **Geotextiles in embankment dams**, 2008, 254 p.

FILHO, P. L. M. GERALDO. A. **Barragens e reservatórios**. In: OLIVEIRA, A. M. S. BRITO, S. N. A. (Eds). *Geologia de Engenharia*. P. 397-418. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 2009.

GAIOTO, N. **Barragens de terra e de enrocamento**. Departamento de Geotecnia - São Carlos, 1998. Notas de Aula, 50 p.

GALVIS, H. L. T. **Avaliação da abertura de filtração de geotêxteis sob confinamento e parcialmente colmatados**. Março 2016. Dissertação de Mestrado.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 142 p.

GEOFOCO. **Geomembranas**. 2016. Disponível em: < [http://geofoco.com.br/geossinteticos/geomembrana/geomembrana\\_06/](http://geofoco.com.br/geossinteticos/geomembrana/geomembrana_06/)> . Acesso em Novembro 2016.

GOBLA, M. J. **Geotextiles in Embankment Dams**. U. S. *Department of The Interior, Bureau of Reclamatio*, 2009. Disponível em: <<http://www.damsafety.org/>>. Acesso em: outubro de 2016.

HIGHLAND, L. M. BROBOWSKY, P. **O Manual de Deslizamento – Um guia para a compreensão de deslizamentos**. Virginia, 2008. Disponível em: <<https://www.gfdrr.org/>>. Acesso em: outubro de 2016.

ICOLD - *International comission on Large Dams*; **Geotextiles as filters and transitions in fill dams**, Paris, 1986.

IGS - BRASIL – Sociedade internacional de geossintéticos. **Classificação dos geossintéticos**. 2007. Disponível em: <<http://igsbrasil.org.br/wp-content/uploads/geossinteticos/1.pdf>>. Acesso em: setembro de 2016.

IGS BRASIL - Associação Brasileira de Geossintéticos. **Características requeridas para o Emprego de Geossintéticos: Parte 1- Geotêxteis e Produtos Correlatos**, 2007. Disponível em: <<http://igsbrasil.org.br>>. Acesso em: outubro de 2016.

IGS- BRASIL – Sociedade internacional de geossintéticos. **Geossintéticos em projetos hidráulicos**. 2007. Disponível em: <<http://www.geosyntheticssociety.org/wp-content/plugins/resources/documents/Hydraulic%20Projects/Portuguese.pdf>>. Acesso em: setembro de 2016.

IGS BRASIL – Sociedade internacional de geossintéticos. **Geossintéticos em drenagem e filtração**. 2007. Disponível em: <<http://www.geosyntheticssociety.org/wp-content/plugins/resources/documents/Drainage%20and%20Filtration/Portuguese.pdf>>. Acesso em: outubro de 2016.

KOERNER, R. **Designing with Geosynthetics**, Prentice Hall, 5ª Ed, 2005. 526 p.

LIMA, M. J. C. P. **Introdução ao Estudo das Barragens de Terra**. Instituto Militar de Engenharia, Curso de Construção, 2011. Notas de Aula. Disponível em: <<ftp://ftp-acd.puc-campinas.edu.br/pub/professores/ceatec/rodrigo.urban>>. Acesso em: outubro de 2016.

MACCAFERRI. **Manual Técnico: Critérios gerais para projeto, especificação e aplicação de geossintéticos**. São Paulo, Brasil. 2008.

MAIONE, Ugo; MAJONE-LEHTO, B.; MONTI, R. **New trends in water and environmental engineering for safety and life**. Rotterdam, CRC Press, 2000.

MARANGON M. **Barragens de terra e enrocamento**. Notas de aula, unidade 05, Núcleo de Geotecnia - UFJF, 2004. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/nugeo/files>> Acesso em: setembro de 2016.

MARQUES, A. C. M. **Aplicações em controle de erosão superficial**. Manual Brasileiro de Geossintéticos. P. 322-334. São Paulo: Blutches, 2004.

MASSAD, F. **Obras de Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010, 203 p.

MATTSSON, H. HELLSTROM, J. G. I. LUNDSTROM, T. S. **On internal erosion in embankment dams: a literature survey of the phenomena and the prospect to model it numerically**. *Division of Mining and Geotechnical Engineering, Luleå University of Technology, Suécia*, 2008. Disponível em: <<http://epubl.ltu.se/1402-1528/2008/>>. Acesso em: outubro de 2016.

MIRAFI. **Geosynthetics for soil reinforcement**. 2007. Disponível em: <<http://www.tencate.com>>. Acesso em: outubro de 2016.

MORAES, C. M. **Aterros reforçados sobre solos moles – Análise numérica e analítica**. 2002. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002. 222 p.

MUÑOZ, C. S. **Desempenho de Geotêxteis na Filtração de solos Internamente Instáveis**. Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2005. 119 p.

NETO, F.A. D. S. **Concreto Asfáltico para Núcleo de Barragem - Caso da UHE Jirau**. 131 p. Monografia - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil, 2013.

NORTÈNE. **Manual de geossintéticos**. Departamento Técnico Nortene Plásticos Ltda São Paulo. 2012. 81 p.

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

PALMEIRA, E. M. FONSECA, E. C. **Aplicações em Separação de Materiais**. Manual Brasileiro de Geossintéticos. P. 241-257. São Paulo: Blucher, 2004.

PALMEIRA, E. M. ORTIGÃO, A. **Aterros sobre solos moles**. Manual Brasileiro de Geossintéticos. P. 72-83. São Paulo: Blutches, 2004.

PERINI, D. S. **Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra**. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Brasília, 2009. 128 p.

PIEROZAN. R. C; CARDOSO. S. H; ARAÚJO. G. L. S. **Aplicação de Geomembranas em Tapetes Impermeáveis a Montante de Barragens de Terra –**

**Estudo Experimental e Numérico.** 2015. Disponível em: <<http://gr2015.net.br/trabalhos-arquivos/arquivos/5095.Pdf>>. Acesso em: outubro de 2016.

RECLAMATION, **Construction Continues at Red Willow Dam**, Estados Unidos, 2012. Disponível em: <<http://www.usbr.gov/newsroom/newsrelease/detail.cfm?RecordID=40724>> Acesso em: outubro de 2016.

SANTOS, J. B. FRANCA, M. J. ALMEIDA, A. B. **Risco Associado à Ruptura por Galgamento de Barragens de Aterro.** *Fundación Para El Fomento De La Ingenieria del Agua*. Vol 14, N° 04, 2007.

SANTOS, L. S. **Estudo da durabilidade de geomembranas utilizadas na impermeabilização de reservatórios das barragens de Rejeito de Ouro.** 2014. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, 180 p.

SILVA, A. F. ASSIS, A. P. **Comportamento de barragens de enrocamento com face de concreto sujeitas a diferentes condições de fundação.** Comitê brasileiro de barragens, XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens. Salvador, 2003. Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/>>. Acesso em: outubro de 2016.

SILVA, T. C. **Unidade I: Considerações Básicas sobre o Barramento.** Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2007. Notas de aula.

SILVA, T. C. **Unidade II: Estudos Básico Para o Barramento.** Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2007. Notas de aula.

STEPHENS, J. **Seleção do Local e Pesquisas Preliminares.** Manual sobre Pequenas Barragens de Terra. Organização das Nações Unidas para a alimentação e a agricultura. Roma, 2011, p. 29-39. Disponível em: <<http://www.fao.org/home/en/>>. Acesso em: outubro de 2016.

TERRA. **Desastre em Mariana é o maior acidente mundial com barragens.** 2016. Disponível em: <<https://noticias.terra.com.br>>. Acesso em: novembro de 2016.

THOMAZ, E. C. S. **Barragens de concreto em abóbada com dupla curvatura.** Departamento de Ciência e Tecnologia, Instituto Militar de Engenharia – IME, 2008. Notas de aula. Disponível em: <[http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/barragem/barr\\_abob04.pdf](http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/barragem/barr_abob04.pdf)>. Acesso em: outubro de 2016.

VERTEMATTI, J. C. **Aplicações em Reforço de Solos.** Manual Brasileiro de Geossintéticos. P. 63-169. São Paulo: Blucher, 2004.

VERTEMATTI, J. C., **Manual Brasileiro de Geossintéticos.** ABINT. São Paulo, Brasil, 2004. 410 p.

VIDAL, I. G. **Durabilidade dos Geossintéticos - Importância da Qualidade na Durabilidade.** São Paulo, 2015. Disponível em: <<http://gr2015.net.br/trabalhos-arquivos/>>. Acesso em: outubro de 2016.