

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANA PAULA MIKOS

USO DE GEOMEMBRANAS EM BARRAGENS DE TERRA – ESTUDO DE  
PERCOLAÇÃO EM MODELO REDUZIDO E NUMÉRICO

CURITIBA

2014

ANA PAULA MIKOS

USO DE GEOMEMBRANAS EM BARRAGENS DE TERRA – ESTUDO DE  
PERCOLAÇÃO EM MODELO REDUZIDO E NUMÉRICO

Trabalho de conclusão de curso apresentado à disciplina de Trabalho Final de Curso II, como requisito parcial à conclusão do Curso de Engenharia Civil, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Sidnei Helder Cardoso Teixeira

CURITIBA

2014

## TERMO DE APROVAÇÃO

ANA PAULA MIKOS

### USO DE GEOMEMBRANAS EM BARRAGENS DE TERRA – ESTUDO DE PERCOLAÇÃO EM MODELO REDUZIDO E NUMÉRICO

Trabalho apresentado como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel no curso de Engenharia Civil, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:

---

Prof. Dr. Sidnei Helder Cardoso Teixeira  
Departamento de Construção Civil , UFPR

Examinadores:

---

Prof. Dr. Alessandro Kormann  
Departamento de Construção Civil , UFPR

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Roberta Bomfim Boszczowski  
Departamento de Construção Civil , UFPR

Curitiba, 28 de novembro de 2014.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, pelo dom da vida.

A minha querida mãe, ao meu irmão e minha vó Martha pelo apoio, paciência e amor incondicional.

Ao meu namorado Roberto, pela ajuda na realização deste trabalho, pelo companheirismo, amor e carinho.

Ao mestre Rodrigo César Pierozan, pela oportunidade de participar do seu experimento e pelo conhecimento compartilhado.

A todos os professores da UFPR, pela experiência e conhecimentos compartilhados e adquiridos, principalmente ao meu professor orientador, Prof. Dr. Sidnei Helder Cardoso Teixeira, pelo apoio e ajuda na realização deste trabalho.

Aos colegas de trabalho da Intertechne Consultores S.A, pela contribuição pessoal e profissional.

Aos amigos do curso de Engenharia Civil, os quais me apoiaram no desenvolvimento deste trabalho.

*“Foi o tempo que dedicastes à tua  
rosa que a fez tão importante”*

(Saint-Exupéry)

## RESUMO

A aplicação de geossintéticos para melhoria das características do solo em obras geotécnicas é utilizada devido as suas vantagens ambientais, econômicas e construtivas. A geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD) é um material flexível, de baixíssima permeabilidade e alta resistência mecânica, e pode ser utilizada como tratamento de fundação em barragens de terra. O uso como tapete impermeável é uma alternativa quando o solo da fundação não apresenta boas propriedades e a camada é muito espessa. Neste trabalho foram realizados ensaios em modelo reduzido de barragem de terra, para obtenção de parâmetros utilizados na calibração e validação do modelo numérico. Os experimentos realizados consistiram em uso de geomembrana à montante da barragem, ocorrência de rasgos na geomembrana e nenhum tratamento de fundação. As simulações paramétricas foram realizadas quanto à posição da geomembrana na seção, variação de parâmetros geotécnicos do material da fundação e ocorrência de rasgos longitudinais. A avaliação ocorreu pela vazão de percolação, poropressão, cargas totais e posição da linha freática. Os resultados obtidos demonstram que a geomembrana aumenta o caminho de percolação da água na fundação, resultando em menores cargas de pressão sob a barragem e menores vazões de percolação, principalmente quando o tratamento é aplicado no talude de montante e estendido sobre a fundação.

Palavras-chaves: barragens de terra, tratamento de fundação, geomembrana de PEAD.

## **ABSTRACT**

The application of geosynthetics to improve soil characteristics in geotechnical works is used because of its environmental, economic and constructive benefits. The high-density polyethylene geomembrane (HDPE) is a flexible material with very low permeability and high mechanical strength, and can be used as the foundation of treatment earth dams. Use as layer in sealing system is an alternative when the soil of the foundation does not have good properties and the layer is too thick. This work carried out tests on scale model of earth dam, to obtain parameters used in the calibration and validation of the numerical model. The experiments consisted of use of geomembrane upstream of the dam, the occurrence of tears in the geomembrane and without treatment Foundation. Parametric simulations were performed on the geomembrane position in the section, variation of geotechnical parameters of the foundation material and occurrence of longitudinal tears. Tests were done by flow percolation, pore pressure, total loads and phreatic line position. The results demonstrate that the geomembrane increases the seepage of water in the foundation, resulting in lower loads of pressure on the dam and lower percolation flow, especially when the treatment is applied in the amount of slope and extended on the foundation.

Keywords: earth dams, foundation treatment, HDPE.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – BARRAGEM DE TERRA DA UHE TRÊS MARIAS .....	18
FIGURA 2 – TIPOS DE BARRAGENS DE TERRA.....	20
FIGURA 3 – TRATAMENTOS DE FUNDAÇÃO.....	24
FIGURA 4 – APLICAÇÃO DE GEOMEMBRANA DE PEAD EM RESERVATÓRIO .....	36
FIGURA 5 – DISPOSIÇÃO DE GEOMEMBRANAS EM BARRAGENS DE TERRA.....	38
FIGURA 6 – EMENDA POR FUSÃO TÉRMICA .....	40
FIGURA 7 – TRINCHEIRA DE ANCORAGEM NA UHE SÃO SALVADOR.....	41
FIGURA 8 – COLOCAÇÃO DA GEOMEMBRANA NA UHE SALTO.....	43
FIGURA 9 – TANQUE DE PERCOLAÇÃO .....	45
FIGURA 10 – DIMENSÕES DO MODELO REDUZIDO .....	45
FIGURA 11 – PERMEÂMETROS UTILIZADOS NOS ENSAIOS .....	48
FIGURA 12 – ENSAIO DE SEDIMENTAÇÃO.....	49
FIGURA 13 – DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA COM PICNÔMETROS .....	50
FIGURA 14 – PIEZÔMETROS INSTALADOS NO TANQUE DE PERCOLAÇÃO .....	52
FIGURA 15 – PAINEL DE LEITURA DAS CARGAS PIEZOMÉTRICAS .....	52
FIGURA 16 – TUBOS PIEZOMÉTRICOS DO MODELO REDUZIDO.....	54
FIGURA 17 – MEDIÇÃO DA VAZÃO DE ÁGUA PELO MODELO REDUZIDO .....	55
FIGURA 18 – MATERIAL DE FUNDAÇÃO E TAPETE HORIZONTAL .....	56
FIGURA 19 – CONSTRUÇÃO DO FILTRO VERTICAL .....	56
FIGURA 20 – MEMBRANA IMPERMEÁVEL DE MONTANTE.....	57
FIGURA 21 – MODELO FÍSICO DA BARRAGEM .....	57
FIGURA 22 – ENCHIMENTO DO RESERVATÓRIO .....	58
FIGURA 23 – CURVA GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL DA FUNDAÇÃO .....	66
FIGURA 24 – CURVA GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL DE ATERRO .....	67
FIGURA 25 – CURVA GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL GRANULAR .....	67
FIGURA 26 – CARGAS DE PRESSÃO NOS PIEZÔMETROS DA FUNDAÇÃO .....	70
FIGURA 27 – MODELAGEM NUMÉRICA SEM UTILIZAÇÃO DE GEOMEMBRANA .....	73

FIGURA 28 – MODELAGEM NUMÉRICA COM UTILIZAÇÃO DE GEOMEMBRANA .....	73
FIGURA 29 – LINHAS FREÁTICAS DAS VARIAÇÕES DE POSIÇÃO DA GEOMEMBRANA .....	78
FIGURA 30 – CARGAS TOTAIS DAS VARIAÇÕES DE POSIÇÃO DA GEOMEMBRANA..	79
FIGURA 31 – LINHAS FREÁTICAS PARA SIMULAÇÃO DA GEOMEMBRANA SOBRE A FUNDAÇÃO .....	81
FIGURA 32 – LINHAS FREÁTICAS PARA SIMULAÇÃO DA GEOMEMBRANA SOBRE A FUNDAÇÃO E ESTENDIDA A MEIA FACE DE MONTANTE .....	83
FIGURA 33 – LINHAS FREÁTICAS PARA SIMULAÇÃO DA GEOMEMBRANA SOBRE A FACE DE MONTANTE .....	84
FIGURA 34 – LINHAS FREÁTICAS PARA SIMULAÇÃO DA GEOMEMBRANA SOBRE A FACE DE MONTANTE E A FUNDAÇÃO.....	86
FIGURA 35 – MEDIÇÃO DE POROPRESSÃO NA SIMULAÇÃO COM RASGOS .....	88

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ENSAIOS EM GEOMEMBRANAS .....	30
TABELA 2 – DENSIDADE DAS GEOMEMBRANAS FABRICADAS NO BRASIL .....	32
TABELA 3 – ENSAIOS REALIZADOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA .....	46
TABELA 4 – CLASSIFICAÇÃO DO SOLO SEGUNDO A COMPACIDADE .....	51
TABELA 5 – COORDENADAS DOS PIEZÔMETROS NO MODELO REDUZIDO .....	53
TABELA 6 – SIMULAÇÕES COM VARIAÇÃO DA POSIÇÃO DA GEOMEMBRANA .....	61
TABELA 7 – SIMULAÇÕES COM VARIAÇÃO DE PERMEABILIDADE DO MATERIAL DE FUNDAÇÃO .....	62
TABELA 8 – SIMULAÇÕES COM RASGOS .....	62
TABELA 9 – CALIBRAÇÃO DA ALTURA DE QUEDA DO MATERIAL DE FUNDAÇÃO .....	63
TABELA 10 – CALIBRAÇÃO DA ALTURA DE QUEDA DO MATERIAL DE ATERRO.....	64
TABELA 11 – COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE .....	65
TABELA 12 – DENSIDADE REAL DOS SOLOS .....	68
TABELA 13 – COMPACIDADE RELATIVA DOS SOLOS .....	68
TABELA 14 – LEITURAS DOS PIEZÔMETROS DO MODELO REDUZIDO.....	69
TABELA 15 – LEITURA DA VAZÃO DE PERCOLAÇÃO NO MODELO REDUZIDO .....	70
TABELA 16 – PARÂMETROS ADOTADOS NO MODELO NUMÉRICO.....	71
TABELA 17 – VALORES DE VAZÃO DO MODELO REDUZIDO E NUMÉRICO .....	72
TABELA 18 – RESULTADOS OBTIDOS SEM UTILIZAÇÃO DA GEOMEMBRANA.....	74
TABELA 19 – RESULTADOS OBTIDOS COM UTILIZAÇÃO DA GEOMEMBRANA .....	75
TABELA 20 – VAZÕES DAS SIMULAÇÕES DA VARIAÇÃO DE POSIÇÃO DA GEOMEMBRANA.....	77
TABELA 21 – VARIAÇÃO DA VAZÃO PARA GEOMEMBRANA SOBRE A FUNDAÇÃO....	81
TABELA 22 – VARIAÇÃO DA VAZÃO PARA GEOMEMBRANA SOBRE A FUNDAÇÃO E ESTENDIDA A MEIA FACE DE MONTANTE .....	82
TABELA 23 – VARIAÇÃO DA VAZÃO PARA GEOMEMBRANA SOBRE A FACE DE MONTANTE .....	83

TABELA 24 – VARIAÇÃO DA VAZÃO PARA GEOMEMBRANA SOBRE A FACE DE MONTANTE E FUNDAÇÃO .....	85
TABELA 25 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA GEOMEMBRANA COM RASGOS .....	87
TABELA 26 – VARIAÇÃO DA VAZÃO PARA SIMULAÇÃO DE RASGOS.....	89

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional das Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
ASTM	<i>American Society of Testing and Materials</i>
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CIGB	<i>Comission Internationale des Grands Barrages</i>
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
FEMA	<i>Federal Emergency Management Agency</i>
GM	Geomembrana
ICOLD	<i>International Comission on Large Dams</i>
IGS	International Geosynthetics Society
MCA	Metros de coluna de água
ME	Massa Específica
NA	Nível d'água
NHI	National Highway Institute
PA	Piezômetro do aterro
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PELBD	Polietileno Linear de Baixa Densidade
PF	Piezômetro da fundação
PP	Polietileno
PVC	Policloreto de vinilla
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UHE	Usina Hidrelétrica
USCOLD	<i>United States Committee on Large Dams</i>
USSD	<i>United States Society on Dams</i>
UV	Ultravioleta

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1. OBJETIVO.....	16
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1. BARRAGEM DE TERRA.....	17
2.1.1. Finalidades .....	17
2.1.2. Tipos.....	19
2.2. TRATAMENTOS DE FUNDAÇÃO .....	23
2.2.1. Trincheiras de Vedação.....	25
2.2.2. Cortina de Injeção .....	25
2.2.3. Parede Diafragma .....	26
2.2.4. Tapete impermeável a montante.....	27
2.3. GEOMEMBRANAS .....	27
2.3.1. Histórico .....	28
2.3.2. Composição.....	29
2.3.3. Propriedades .....	30
2.3.4. Finalidades .....	35
2.4. UTILIZAÇÃO DE GEOMEMBRANAS EM BARRAGENS DE TERRA.....	36
2.4.1. Instalação .....	37
2.4.2. Histórico .....	41
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>44</b>
3.1. EXPERIMENTO EM MODELO REDUZIDO.....	44
3.1.1. Características Geométricas .....	44
3.1.2. Método de Deposição do Material .....	45
3.1.3. Caracterização Geotécnica .....	46
3.1.4. Instrumentação do Tanque de Percolação.....	51
3.1.5. Montagem do Modelo Reduzido.....	55
3.1.6. Enchimento do Reservatório .....	58
3.1.7. Ensaios Realizados .....	58

3.2. MODELO NUMÉRICO .....	59
3.2.1. Variáveis do Modelo Numérico de Fluxo .....	59
3.2.2. Calibração e Validação.....	60
3.2.3. Análises Paramétricas.....	60
<b>4. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>63</b>
4.1. EXPERIMENTO EM MODELO REDUZIDO.....	63
4.1.1. Método de Deposição dos Materiais .....	63
4.1.2. Caracterização Geotécnica .....	64
4.1.3. Leituras Realizadas no Modelo Reduzido .....	69
4.2. EXPERIMENTO EM MODELO NUMÉRICO .....	71
4.2.1. Parâmetros Utilizados .....	71
4.2.2. Calibração e Validação do Modelo Numérico.....	72
4.2.3. Análises Paramétricas.....	77
4.2.4. Considerações Finais .....	89
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>91</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>94</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização de geossintéticos em obras geotécnicas está crescendo devido às suas vantagens ambientais, econômicas e construtivas. O desenvolvimento dos materiais compostos por polímeros assumem papel fundamental em novos projetos, pois melhoram as características do solo, fornecem estabilidade e estanqueidade, além da redução dos custos e no tempo de instalação.

A aplicação de materiais sintéticos em barragens de terra pode contribuir para a segurança das diversas estruturas que a compõe, evitando impactos ambientais e sociais pela falta de controle do fluxo percolado. A geomembrana de PEAD é utilizada como tratamento de fundação no talude de montante e estendida na direção do reservatório. Devido à baixíssima permeabilidade do material sintético, sua aplicação tem objetivo de aumentar o caminho de percolação da água pela fundação, reduzindo as vazões e diminuindo as poropressões e gradientes hidráulicos.

As geomembranas são utilizadas como barreira de fluídos em barragens desde 1959 na Itália, ensaios indicam bom desempenho até os dias atuais. No Brasil, aplicações recentes de geomembranas de PEAD ocorreram nas barragens de terra da UHE Salto (116 MW) e UHE Salvador (243 MW), ambas apresentando resultados satisfatórios.

Para a análise do desempenho da geomembrana, neste trabalho foram realizados ensaios em modelo reduzido de barragem de terra, com avaliação da vazão de percolação e das cargas de pressão. Foram feitas simulações com o uso da geomembrana, ocorrência de rasgos longitudinais e sem tratamento de fundação.

Com os resultados obtidos no modelo reduzido foi realizada a calibração e validação do modelo numérico pelo *software* SEEP/W. Com isso, foram simulados e analisados demais aspectos construtivos, como o posicionamento da geomembrana na seção da barragem, os efeitos da variação da permeabilidade da fundação e avaliação da manta com presença de rasgos.

## 1.1. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento do fluxo em barragens de terra, com aplicação de geomembrana de PEAD em tratamento de fundações constituídas de materiais de alta permeabilidade. Neste contexto, é avaliada a redução das vazões de percolação e poropressão. As análises paramétricas têm finalidade de avaliar o desempenho da geomembrana em condições diversas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As barragens exercem papel de grande importância no armazenamento e gestão da água necessária para o sustento e desenvolvimento da civilização. Descobertas arqueológicas indicam que barragens simples de terra já eram construídas em 2.000 a.C. em praticamente todas as culturas (CRUZ, 2005).

O aperfeiçoamento dos métodos de transporte e desenvolvimento da mecânica dos solos, no século XIX, ocasionou um acréscimo considerável da vida útil e na segurança das barragens (FAO, 2011). No século seguinte, o tamanho das estruturas aumentou consideravelmente e atingiu o ápice de construções na década de 70, com mais de sete mil barragens inauguradas (CIGB, 2008). Hoje existem barragens de terra com mais de 300 metros de altura e o atual líder na construção de barragens de aterro é a China (USSD, 2009).

### 2.1. BARRAGEM DE TERRA

As barragens são definidas segundo o CBDB (2001), como uma estrutura construída transversalmente a um rio com finalidade de elevação do nível de água para armazenamento ou controle. Estas possuem a capacidade de retenção de água, líquidos, rejeitos ou detritos e variam de pequenos maciços de terra a grandes estruturas de concreto.

Barragem de terra é uma estrutura fundamentalmente constituída por materiais naturais provenientes de escavação ou de jazidas próximas a obra. É o tipo de barragem mais encontrada no mundo devido a sua estabilidade estar diretamente ligada com seu peso próprio e possuir uma estrutura simples, compactada e resistente (FAO, 2011).

#### 2.1.1. Finalidades

O Bureau of Reclamation (1987) classifica as barragens quanto ao seu uso, que podem ser de armazenamento, desvio ou retenção, embora muitas vezes sejam

construídas para atender mais de uma finalidade. As barragens de armazenamento acumulam a água dos períodos de cheia para fornecimento na época de seca ou estiagem, e também são utilizadas na geração de energia elétrica, irrigação, pesca e recreação.

No Brasil, a maioria das barragens é construída para produção de energia elétrica, e geram cerca de 90% de toda eletricidade consumida no país (ANEEL, 2002). As usinas hidrelétricas têm grande destaque devido ao seu caráter renovável, uma vez que produz energia elétrica através da energia potencial hidráulica adquirida pelo represamento de um rio.

As UHEs compreendem um complexo de projetos que englobam grandes áreas da engenharia civil, mecânica, elétrica, geotécnica, hidráulica, ambiental, florestal, entre outras. Além da barragem, as usinas são constituídas de outras estruturas importantes como tomada d'água, casa de força e vertedouro. Em um barramento o vertedouro é indispensável, pois ele que permite controlar o nível do reservatório, escoando vazões críticas e protegendo todas as estruturas vulneráveis aos efeitos de erosão (GAIOTO, 2003).

Na FIGURA 1 pode-se observar a Usina Três Marias (396 MW), localizada no Rio São Francisco em Minas Gerais, da CEMIG, que possui uma barragem de terra homogênea com 75 metros de altura e 2700 metros de extensão.



FIGURA 1 – BARRAGEM DE TERRA DA UHE TRÊS MARIAS

As barragens de desvio são utilizadas para transporte de água em valas e canais, usuais em irrigação e abastecimento industrial e municipal. Os barramentos de retenção são construídos para controlar e minimizar o efeito de enchentes, armazenando a água temporariamente e escoando por uma estrutura que controla sua velocidade. Também são utilizadas para auxílio na infiltração da água no solo e fundação da estrutura, com objetivo de reabastecimento do lençol freático (BUREAU OF RECLAMATION, 1987).

Ainda nesta classificação existem as barragens de rejeito, que são destinadas ao armazenamento de sedimentos (BUREAU OF RECLAMATION, 1987), comumente utilizadas para rejeitos de mineração. As barragens de rejeito se diferenciam das barragens convencionais pela natureza do material armazenado, utilização do próprio rejeito como material de construção e a construção realizada em etapas.

### 2.1.2. Tipos

As barragens de terra apresentam vantagens em relação aos demais tipos, os materiais utilizados são naturais, como argilas, siltes, areias e rochas, os procedimentos de projeto são simples e os requisitos para fundação são menos exigentes, além de apresentar custos inferiores a outros tipos de barragem (USSD, 2009).

Existem três tipos de barragens de terra: homogênea, zoneada ou de aterro hidráulico, que são escolhidos principalmente pelas características e disponibilidade dos materiais para a construção, características da fundação, condições climáticas, cronograma da obra, esquema de desvio e integração ao arranjo geral (ELETROBRÁS, 2003). Os três tipos podem ser comparados na FIGURA 2.

Os primeiros aterros eram compostos por uma parede de solo transversalmente a um rio. Estas estruturas eram baratas e seguras quando corretamente construídas. No entanto, se apresentam inferiores aos métodos atuais de construção zoneada, que utilizam apenas o núcleo central com material impermeável (FAO, 2011). Já os aterros hidráulicos consistem na utilização de material em forma de lama e são utilizados desde os antigos egípcios (CRUZ, 2005).

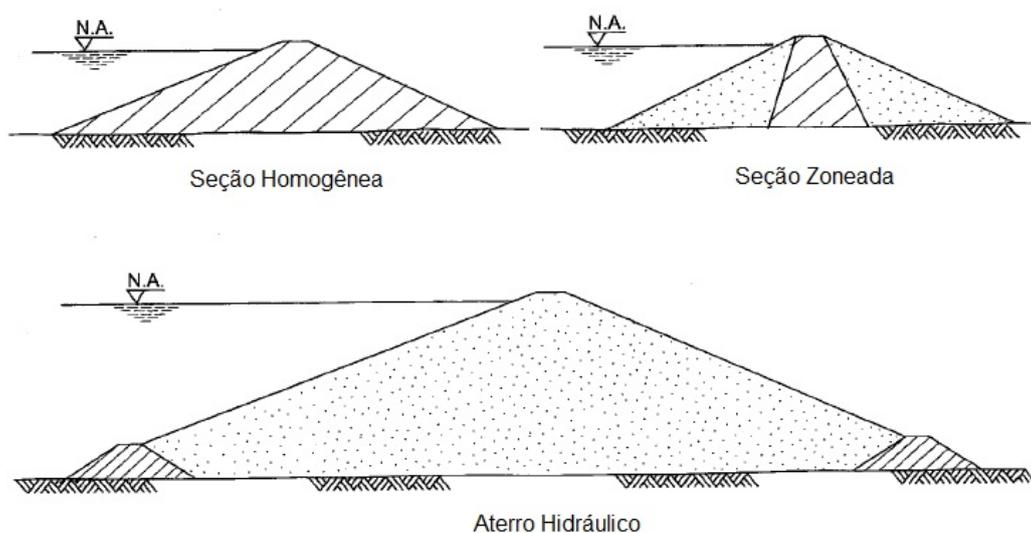


FIGURA 2 – TIPOS DE BARRAGENS DE TERRA

FONTE: GAIOTO (2003)

#### 2.1.2.1. Seção Homogênea

As barragens de seção homogênea são compostas por apenas um tipo de material, que é suficientemente impermeável para fornecer uma estanqueidade de água adequada para segurança da barragem (BUREAU OF RECLAMATION, 1987). O material deve possuir duas características principais: vedação e resistência, para isso são escolhidas áreas de empréstimo que apresentem semelhança quanto ao tipo de material, sem muita variação de suas propriedades (GAIOTO, 2003).

Para se obter um aterro homogêneo, ele deve ser compactado e Cruz (2005) ainda salienta que é necessário saber o comportamento da compressibilidade, resistência e permeabilidade do solo, quando seu grau de compactação é alterado. Também deve haver o controle de compactação e verificação dos equipamentos que vão realizar as escavações, transporte, escarificação, umedecimento, espalhamento e compactação dos materiais.

Em uma seção completamente homogênea é inevitável que infiltrações apareçam no talude de jusante, independente da declividade e permeabilidade do aterro. Para barragens que mantêm um nível alto de água ou variações rápidas do NA por longos períodos de tempo ou para fundações impermeáveis, a ocorrência de

percolação e acúmulo de poropressão no aterro pode se tornar um problema. Se o fluxo de água for excessivo, pode ocorrer instabilidade e eventualmente a ruptura da face de jusante (FAO, 2011), por isso o sistema de drenagem interno deve prever dreno de pé, tapete drenante junto à fundação e filtro chaminé (ELETROBRÁS, 2003).

A drenagem assume um papel importante no controle do fluxo de água pela barragem e fundação. Conforme Silveira (2006), o sistema de drenagem interna das barragens de terra homogêneas normalmente é composto por filtros verticais e horizontais. O filtro chaminé pode ser vertical ou inclinado, e intercepta a água que percola pelo maciço, com finalidade de assegurar uma região à sua jusante praticamente sem fluxo de água, melhorando as condições de estabilidade. O tapete drenante coleta o fluxo do filtro e do maciço da fundação, recebendo maiores vazões e conseqüentemente possuindo maior espessura. O dreno de pé reúne toda a água do sistema de drenagem interna para lançar novamente a jusante do rio.

A declividade dos taludes é definida com a variação do nível do reservatório e características do material, normalmente são construídos taludes mais brandos e planos que se adaptam facilmente a qualquer tipo de fundação, garantindo assim a estabilidade do maciço (ELETROBRÁS, 2003).

#### 2.1.2.2. Seção Zoneada

A seção mais comum de barragens de terra é a zoneada, esta possui um núcleo central impermeável que fica entre os espaldares de materiais permeáveis. O principal aspecto que determina a escolha deste tipo de seção é a disponibilidade de materiais diversos, provenientes de escavações obrigatórias, para que a correta disposição dos materiais na seção forneça melhor compatibilização das deformações entre o núcleo, transições e espaldares.

A fundação deve possuir boa resistência para garantir a estabilidade dos taludes mais íngremes (ELETROBRÁS, 2003) e a utilização de trincheira de vedação abaixo do núcleo é eficaz contra infiltrações (FAO, 2011).

Os espaldares protegem o núcleo e podem consistir de areia, cascalho, rochas ou mistura destes materiais. O aterro de jusante atua como dreno e ajuda a diminuir a superfície freática, já o de montante proporciona estabilidade à barragem.

Em muitos casos é necessário um filtro de drenagem entre o núcleo e o aterro de jusante e entre o aterro de jusante e a fundação (BUREAU OF RECLAMATION, 1987).

A largura máxima do núcleo impermeável é definida pelas características geotécnicas, disponibilidade de material e pela estabilidade adquirida. A Eletrobrás (2003) indica que a largura mínima deve ser 30% da altura de carga hidráulica do reservatório e a crista deve possuir no mínimo 3 metros de largura devido a fatores construtivos. Os taludes de barragens zoneadas podem ter taludes mais íngremes, quando comparadas com seções homogêneas.

#### 2.1.2.3. Aterro Hidráulico

Os aterros hidráulicos são barragens construídas por hidromecanização, que consiste em uma técnica que reúne processos envolvendo a exploração, transporte e deposição de um solo com auxílio de água. Este método é utilizado desde os antigos egípcios e representou a solução empregada na construção das primeiras barragens do Brasil (CRUZ, 2005).

De acordo com Gaioto (2003), o uso foi intenso no início do século XX, pois não havia muitos equipamentos de escavação, transporte e compactação. Ocorreu a ruptura de algumas barragens, como a de Ford Peck em 1938, nos Estados Unidos, por liquefação do aterro devido a um terremoto. Mesmo com os ocorridos, alguns países da antiga União Soviética desenvolveram e aprimoraram este método, que é utilizado até os dias atuais, em vários países.

A seção de aterro hidráulico é utilizada principalmente em barragens de rejeito e são construídas com o próprio material descartado da mineração, quando apresenta teor razoável de partículas grossas para permitir uma drenagem mais rápida e conseqüente ganho de resistência (GAIOTO, 2003).

O material em forma de lama é transportado por meio de tubulações ou calhas e são lançados entre diques transversais e longitudinais. Os diques são construídos com o mesmo material do aterro e funcionam na contenção lateral e na drenagem da água em excesso. O sistema definitivo de drenagem geralmente é dreno de pé de jusante (GAIOTO, 2003).

Segundo a FAO (2011), devido à ausência de compactação, a resistência da barragem é muito baixa, gerando a necessidade de taludes mais suaves em comparação com as barragens de seção homogênea e zoneada.

## 2.2. TRATAMENTOS DE FUNDAÇÃO

A fundação de uma barragem de terra é o maciço de rocha e/ou solo que forma a base para a estrutura da barragem, ombreiras e estruturas associadas. As condições físicas deste maciço são afetadas pela construção, que deve possuir estabilidade suficiente para suportar com segurança a distribuição dos esforços da barragem (ELETROBRÁS, 2003).

Para a análise do maciço da fundação devem ser realizadas investigações geológico-geotécnicas para determinação de características dos solos e rochas. Nos materiais de fundação são analisadas as propriedades na condição indeformada e segundo Gaioto (2003), os parâmetros mais importantes são: resistência, permeabilidade e compressibilidade.

Quando a fundação apresenta características indesejáveis, algumas alternativas podem ser estudadas como remoção da camada, adequação do projeto às condições da fundação e tratamento da camada.

A remoção da camada de solo indesejado depende da espessura da mesma, no entanto os materiais que apresentam baixa resistência e elevada compressibilidade, normalmente são removidos para construção do maciço. (CRUZ, 2005). Quanto à adequação do projeto, busca-se melhorar a distribuição das deformações causadas pela barragem, com alteração da inclinação dos taludes e aterros mais brandos.

O tratamento objetiva essencialmente melhorar as características quanto à permeabilidade, diminuindo e homogeneizando a percolação de água pela fundação. Também controla as poropressões, evita o carreamento de partículas pela fundação e melhora as condições de resistência e deformabilidade da barragem (ELETROBRÁS, 2003).

O controle do fluxo pela drenagem da fundação obteve uma mudança de conceito, pois inicialmente buscava-se impermeabilizar ao máximo as barragens

com finalidade de impedir a percolação de água à jusante. No entanto, com o passar do tempo, percebeu-se que era praticamente impossível construir uma barragem totalmente impermeável, sendo necessária e fundamental a existência de uma vazão de percolação no maciço (GAIOTO, 2003). Cruz (2005) afirma que projetar uma barragem é a arte de controlar este fluxo.

Em alguns casos existe a ocorrência de materiais com características aceitáveis de compressibilidade e resistência, porém muito permeáveis. Mesmo não apresentando problemas na estabilidade da barragem, podem permitir elevado fluxo de água pela fundação, gerando consequências como perda excessiva de água armazenada, aumento da poropressão e *piping*. Por isso, a fundação deve ser interceptada por sistemas de vedação ou impermeabilização, junto com um bom sistema de drenagem (CRUZ, 2005).

Os tratamentos analisados neste trabalho foram: trincheira de vedação, cortina de injeção, parede diafragma e tapete impermeável e podem ser observados na FIGURA 3.

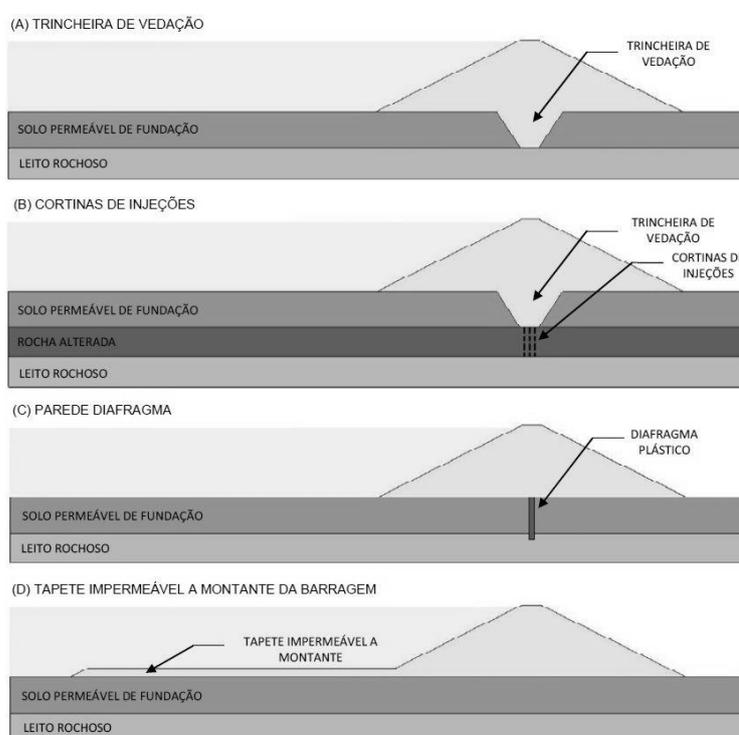


FIGURA 3 – TRATAMENTOS DE FUNDAÇÃO

FONTE: PIEROZAN (2014)

### 2.2.1. Trincheiras de Vedação

A trincheira de vedação, também conhecida por *cut-off*, é utilizada em barragens com núcleo impermeável e consiste na escavação do material permeável da fundação, substituição com material menos permeável e compactação com as mesmas propriedades do núcleo (GAIOTO, 2003). É necessário que o solo limite a passagem da água, mas não a ponto de gerar diferenciais de pressão indesejáveis no aterro. Além de reduzir a percolação, este tratamento também melhora a estabilidade da barragem.

Segundo Cruz (2005), o *cut-off* é o dispositivo de controle de vazão mais eficaz, pois intercepta inteiramente as camadas permeáveis da fundação onde deseja-se interromper o fluxo de água. Quando utilizada somente a trincheira, e de modo parcial, esta solução se torna extremamente ineficaz (OLIVEIRA, 2008).

Cruz (2005), ainda afirma que a posição ideal da trincheira é central e abaixo do núcleo da barragem. Sua base deve ser dimensionada para permitir o tráfego de equipamentos para a compactação do solo, com no mínimo 6 metros, porém raramente é maior que 10 metros. A profundidade fica limitada às condições da escavação caso seja executada mecanicamente (GAIOTO, 2005).

A compatibilidade das deformações do *cut-off* e do material adjacente deve ser estudada a fim de que a trincheira não sofra arqueamento. Normalmente é recomendado que seja assentado sobre um solo com altos níveis de grau de compactação ou escavada até a rocha, de modo a oferecer uma boa base para a trincheira (FAO, 2011) e evitar rupturas hidráulicas. Outro fator importante é a estabilidade dos taludes de escavação da trincheira para evitar que ocorram deslocamentos de material (CRUZ, 2005).

### 2.2.2. Cortina de Injeção

A cortina de injeção é utilizada quando existe a necessidade de tratamento abaixo do *cut-off*, caso o maciço rochoso apresente fraturamentos ou o solo ainda apresente alta permeabilidade. Este tratamento consiste na aplicação de material impermeabilizante como cimento, silicatos ou resinas. As injeções de cimento estão

sendo muito utilizadas no Brasil com objetivo de uniformização da permeabilidade dos maciços rochosos (CRUZ, 2005).

A cortina é formada por uma ou mais linhas de furos, executadas na rocha com equipamentos rotativos ou roto-percussivos e posteriormente preenchidas com material impermeável. A injeção é realizada com pressão controlada a fim de não aumentar o fraturamento do maciço (GAIOTO, 2003). O espaçamento dos furos, número de linhas e profundidade podem ser definidos com ensaios de perda de água e injetabilidade, realizados inicialmente nas investigações geológico-geotécnicas.

Quando a cortina é executada em solo, é utilizada uma técnica diferente, pois existe a possibilidade de fechamento do fuste, por isso é necessária a utilização de revestimento. Como o uso de obturadores fica impossibilitado, então foi desenvolvido o tubo “manchettes” que possui membranas de borracha e possibilita a injeção do material várias vezes no mesmo trecho (GAIOTO, 2003).

### 2.2.3. Parede Diafragma

A parede diafragma é constituída por estacas ou painéis de concreto ou solo-cimento (diafragma plástico) e são utilizadas na impermeabilização de camadas aluvionares permeáveis, formações arenosas e cascalho (CRUZ, 2005) e são construídas sob o núcleo da barragem (GAIOTO, 2003).

A eficácia é excelente quando a parede diafragma não possui imperfeições, no entanto é uma estrutura muito sensível quanto ao surgimento de fissuras e aberturas que comprometem seu desempenho (OLIVEIRA, 2008). O método construtivo é semelhante ao utilizado em escavações profundas sem o rebaixamento do lençol freático.

De acordo com Gaioto (2003), a vantagem deste método é não introduzir um elemento de maior rigidez na fundação. Deste modo, este método não gera concentrações de tensão na zona de aterro sobre o topo da parede, devido a recalques diferenciais.

#### 2.2.4. Tapete impermeável a montante

O tapete impermeável a montante de barragens de terra exerce controle do fluxo de água na fundação da barragem, aumentando do caminho de percolação e reduzindo o gradiente hidráulico. Quando a camada permeável a ser tratada é muito espessa, este método se torna economicamente viável comparado com as cortinas de injeção e parede diafragma (GAIOTO, 2003).

Segundo o CIGB (2010), a barreira de infiltração de água pode ser constituída de materiais naturais como solos de baixa permeabilidade, materiais feitos pelo homem: concreto ou concreto asfáltico ou também de materiais sintéticos como geomembranas. Este tratamento deve ser combinado com um sistema de drenagem interno a jusante, para um controle adequado da percolação (GAIOTO, 2003).

O tapete impermeável apresenta uma crescente eficácia com seu comprimento, chegando a 60% para tapetes com comprimento de 240 metros, quando comparado com nenhum tratamento. Para uma relação do comprimento do tapete pela largura da base da barragem acima de 1,70 o aumento de eficácia não estabelece aumentos significativos (OLIVEIRA, 2008).

### 2.3. GEOMEMBRANAS

Os geossintéticos são produtos artificiais empregados em obras de engenharia geotécnica, ambiental, hidráulica e viária, e está se aperfeiçoando cada vez mais. A razão para o aumento do uso desta nova tecnologia é devido a fatores como controle da qualidade na sua fabricação, fornecimento de melhor estabilidade estrutural, utilização de pouco ou nenhum recurso natural, além de ser um material flexível com diversas aplicações, possuir instalação rápida, fácil transporte e alta disponibilidade no mercado (CIGB, 2010).

Nas obras de engenharia, os geossintéticos possuem diversas funções como controle da erosão superficial, drenagem, filtração, impermeabilização, proteção reforço e/ou separação (VERTEMATTI, 2004). A Sociedade Internacional de Geossintéticos (International Geosynthetic Society – IGS) explica que geomembrana é um composto geossintético contínuo e flexível, constituído de um

ou mais matérias sintéticas. Por apresentar baixíssima permeabilidade é utilizada como barreira de fluídos, gases ou vapores.

### 2.3.1. Histórico

Em 1883, com a curiosidade da instabilidade da borracha natural, que é rígida no frio e apresenta elasticidade no calor, Charles Goodyear misturou-a com enxofre, e com um processo químico obteve a borracha sintética, que foi muito utilizada no revestimento de reservatórios de água. Atualmente é designada por polímero termofixo (KOERNER, 2005).

Nos anos 80 a indústria deixou de produzir polímeros termofixos para produção de termoplásticos (KOERNER, 2005). As geomembranas termoplásticas podem ser retrabalhadas, mantendo suas propriedades com resfriamento e aquecimento, tornando vantajosas nas operações de solda a quentes e nos casos de exposição à alta temperatura. No entanto, as termofixas não podem ser processadas mais de uma vez, pois o material é degradado (VERTEMATTI, 2004).

O polietileno é um termoplástico formado pela polimerização de compostos que contém uma ligação insaturada entre dois átomos de carbono. Inicialmente era utilizado em indústrias de revestimento e moldagem e com sua variedade de densidades, o polietileno passou a ser o polímero mais utilizado na fabricação de geomembranas. Sua produção em larga escala se iniciou em 1943, primeiramente na Europa e África do Sul, se estendendo em seguida para a América do Norte (KOERNER, 2005).

O policloreto de vinila também faz parte do grupo dos termoplásticos, foi desenvolvido em 1939 e teve uso extensivo. Era usualmente empregado na fabricação de geotubos e geomembranas quando plastificado, inicialmente utilizado nos Estados Unidos e depois na Europa (KOERNER, 2005).

Segundo CIGB (2010), atualmente as geomembranas são fabricadas com diversas resinas termoplásticas e distribuídas em todo o mundo, com diversos tipos de produtos disponíveis.

### 2.3.2. Composição

Vertematti (2004) afirma que a geomembrana é um produto bidimensional de baixíssima permeabilidade, composto predominantemente por termoplásticos, elastoméricos e asfálticos e são utilizadas para controle de fluxo e separação, impedindo mistura ou interação de materiais. Segundo Koerner (2005) as geomembranas mais utilizadas são:

- Policloreto de vinila (PVC);
- Polietileno de alta densidade (PEAD);
- Polietileno linear de baixa densidade (PELBD).

O composto de PVC é um termoplástico amorfo formado pela polimerização de vinil clorado e aditivos. As geomembranas de PVC apresentam boa flexibilidade, bom atrito de interface, facilidade de soldagem e boa resistência mecânica. No entanto, apresenta baixa resistência á: produtos químicos, raios ultravioletas, ozônio, sulfetos e intempéries, além de possui baixo desempenho em altas e baixas temperaturas (VERTEMATTI, 2004).

O polietileno (PP) é um produto da polimerização de monômeros de etileno e é um termoplástico muito cristalino, por isso sua característica de baixa permeabilidade. Existem alguns tipos de polietileno, entre eles o de alta densidade (PEAD) e o polietileno linear de baixa densidade (PELBD).

Ambos são utilizados como geomembranas e possuem vantagens como boa resistência contra agentes químicos, alta resistência mecânica, bom desempenho quando utilizado em baixas temperaturas, baixo atrito de interface e boas características quanto à resistência e solda. No entanto podem apresentar difícil conformação ao subleito devido à formação de rugas e é sujeita a *stress cracking*. O *stress cracking* é a fissuração sobtensão (KOENER, 2005).

Nenhum geossintético é 100% composto por resina de polímero, na maioria dos casos é misturado com aditivos que melhoram o processo de fabricação ou modificam o comportamento do polímero base (VERTEMATTI, 2004).

O negro-de-fumo é um aditivo utilizado como estabilizador térmico contra as radiações UV na proporção de 2 a 3%. É principalmente aplicado em compostos de

polietileno devido à deterioração das geomembranas causada pela alta incidência de radiação solar (KOENER, 2005). Os plastificantes são muito utilizados na fabricação do PVC para oferecer maior flexibilidade à manta. Os antioxidantes têm dois propósitos diferentes, proteção contra altas temperaturas no processo de extrusão e baixas temperaturas quanto à degradação do polímero.

Outros aditivos são aplicados como pigmentos ou corantes, retardadores de chama, estabilizadores térmicos e agentes antiestéticos. Os aditivos que são compostos de materiais pesados estão sendo substituídos para evitar danos ao meio ambiente (KOENER, 2005).

### 2.3.3. Propriedades

As geomembranas são fabricadas com diferentes tipos de polímeros, possuindo diversas espessuras e superfícies, por isso é necessário realizar ensaios de caracterização, em campo ou laboratório, a fim de determinar suas propriedades (VERTEMATTI, 2004). Os testes devem demonstrar a capacidade de a membrana desempenhar sua função de impermeabilização e resistência, com as tensões e condições locais (ROLLIN e RIGO, 1991). Na TABELA 1 estão listados os principais ensaios realizados em geomembranas, bem como sua norma regularizadora.

TABELA 1 – ENSAIOS EM GEOMEMBRANAS

FONTE: VERTEMATTI (2004)

<b>ENSAIOS EM GEOMEMBRANAS</b>	
<b>PROPRIEDADES</b>	<b>NORMAS</b>
FÍSICA	
Espessura	ASTM D 751 e 5199; ASTM 5994
Densidade	ASTM D 792; ASTM D 1505; ASTM D 297; ISO 1183
Índice de fluidez	ASTM D 1238
Dureza	ASTM D 2240; ISO 868
Estabilidade dimensional	ASTM D 1204

<b>ENSAIOS EM GEOMEMBRANAS</b>	
<b>PROPRIEDADES</b>	<b>NORMAS</b>
<b>MECÂNICA</b>	
Resistência à tração	NBR 12824; ASTM D 4885; ASTM D 638; ASTM D 882; ISO 37; ISO527; ISO 1424
Resistência à rasgos	ASTM D 1004; ISO 4674
Resistência contra puncionamento estático	NBR 13359; ASTM D 4833; ISO 12236
Resistência contra puncionamento dinâmico	NBR 14971
<b>DESEMPENHO</b>	
Resistência à radiação ultravioleta	ASTM G 26; ISO 4892
Resistência química	ENV ISO 12960; ENV 12225
Resistência à degradação biológica	PR EM ISO 13430
Resistência à degradação térmica	ASTM D 794
Resistência das soldas	ASTM D 4545
Resistência contra fissuração sobtensão	ASTM D 1693; ISO 4599; ASTM 5397; ISO 6252
Atrito de interface	ASTM D 5321

### 2.3.3.1. Propriedades Físicas

As principais propriedades físicas de interesse são espessura, densidade e índice de fluidez. As espessuras das geomembranas lisas normalmente estão entre 0,5 e 2 mm e pode ser determinada com ensaios de pressão aplicada por placa. Para as geomembranas texturizadas é recomendado adotar a espessura sem levar em consideração as saliências (VERTEMATTI, 2004).

A densidade exprime a relação entre a unidade de peso da geomembrana ensaiada em relação ao peso da unidade de água (ROLLIN e RIGO, 1991) e esta depende de qual polímero base foi produzida. Ela é definida pelo método do deslocamento, gradiente de densidades ou do picnômetro, e se encontram entre 0,85 e 1,5 g/cm<sup>3</sup> de acordo com sua variedade (KOENER, 2005). Na TABELA 2 é apresentada a densidade das principais geomembranas fabricadas no Brasil.

TABELA 2 – DENSIDADE DAS GEOMEMBRANAS FABRICADAS NO BRASIL

FONTE: VERTEMATTI (2004)

<b>TIPO DE GEOMEMBRANA</b>	<b>DENSIDADE (g/cm<sup>3</sup>)</b>
PVC	1,340
PEAD	0,940
PELBD	0,935

O teste de índice de fluidez é comumente realizado pelos fabricantes da geomembrana como um método de controlar a uniformidade e facilidade de processamento do polímero relatando a fluidez da manta no estado fundido (KOENER, 2005). Este índice é medido em gramas por carga e por temperatura, e expressa a velocidade de fluxo do polímero em extrusão sob carga constante da geomembrana empurrada através de um orifício (VERTEMATTI, 2004).

#### 2.3.3.2. Propriedades Mecânicas

Existem vários ensaios que determinam e avaliam a resistência das mantas sintéticas, e estes são utilizados como parâmetro de controle e garantia de qualidade do fabricante.

As geomembranas sofrem solicitações de esforços de tração em muitas situações de projeto, para isso são realizados ensaios de tração unidirecional e multidirecional, normalmente feita com pequenas amostras do geossintéticos (VERTEMATTI, 2004). Estes ensaios são utilizados como teste de identificação, desempenho, controle e envelhecimento, pois indicam a qualidade do composto polimérico (ROLLIN e RIGO, 1991).

De acordo com Koener (2005), a manta de PEAD chega a uma extensão de 1000% até sua falha e as geomembranas de PELBD e PVC apresentam uma resposta mais suave, porém chegam até 700% e 480% de deformação, respectivamente. Os resultados obtidos nestes ensaios são muito importantes para determinação de curvas de estresse x tensão que indicam as máximas deformações e tensões máximas até a ruptura.

A resistência a rasgos determina a possibilidade da ocorrência de rasgos, principalmente nas geomembranas mais finas e não reforçadas, e que possuem

resistência relativamente baixa. Os rasgos podem ocorrer pela solicitação de tração em direções oposta da manta e também em situações tridimensionais (VERTEMATTI, 2004) e é avaliado de acordo com a iniciação e propagação (ROLLIN e RIGO, 1991). A implicação da resistência é importante principalmente no período de construção e instalação das geomembranas, por ser o período mais suscetíveis a rasgos.

Os ensaios de resistência ao puncionamento determinam a capacidade do material resistir à punção na parte acima ou abaixo da geomembrana. (ROLLIN e RIGO, 1991). A consideração mais importante é o puncionamento superior à membrana, que normalmente ocorre após a instalação, e uma vez coberta, só pode ser detectado após algum vazamento. A punção pode ocorrer por esforços estáticos e dinâmicos, e pode ser melhorada com a utilização de geotêxtil como reforço (VERTEMATTI, 2004).

#### 2.3.3.3. Propriedades de Desempenho

Essas propriedades são determinadas a partir de ensaios de caracterização e desempenho, realizados em campo ou em laboratório e são fundamentais para reproduzir a interação da geomembrana com o ambiente que será inserido (VERTEMATTI, 2004).

De acordo com Vertematti (2004), para estabelecer resistência a raios ultravioletas e oxidação, as geomembranas possuem vários aditivos em sua composição, como negro-de-fumo, antioxidantes e outros agentes estabilizantes. Os ensaios de laboratório consistem em expor a manta em condições controladas de raios ultravioletas, ou em ambiente externo com luz solar. Estes ensaios são comparados com a manta sem exposição aos raios, obtendo uma porcentagem de resistência retida após determinado tempo de exposição.

Quanto à degradação térmica, a geomembrana é avaliada pela perda de plastificantes e aditivos que causam seu enrijecimento. Para esta análise, as mantas são colocadas em estufas (75°C) com circulação de ar e posteriormente estudadas as análises de interesse, como resistência a tração, rasgos, puncionamento, entre outras (VERTEMATTI, 2004).

As geomembranas em campo são submetidas a ataques químicos, (ROLLIN e RIGO, 1991), e estes produtos podem afetar a membrana, alterando suas características físicas, tais como o volume, massa, propriedades de tensão e deformação e comportamento. Estas alterações podem estar acompanhadas por uma pressão de inchaço, que eventualmente pode dissolver totalmente a geomembrana, além de ocasionar a extração ou modificação dos aditivos. A resistência química pode ser estudada por testes de imersão, onde amostras são mantidas imersas em substâncias químicas e avaliadas pela alteração das propriedades (MÜLLER, 2007).

A resistência biológica das geomembranas é dividida pelo efeito microbiológico (devido aos animais e plantas), do efeito microbiológico (devido ao ataque de fungos e bactérias). No que diz respeito à resistência aos animais não existe nenhum teste estabelecido, o que é levado em consideração é que a manta mais resistente e mais grossa possui maior resistência ao ataque animal. Em relação às plantas, algumas geomembranas podem ser transpostas pelas raízes, por isso devem ser evitadas próximas a manta (ROLLIN e RIGO, 1991). O ensaio para resistência ao efeito microbiológico, segundo Vertematti (2004), compara amostras enterradas em solo orgânico com fungos e bactérias e outro em condição artificial, para posterior comparação.

As emendas devem assegurar uma vedação contínua entre dois painéis de geomembrana, para evitar a perda de líquido, além de fornecer resistência às tensões aplicadas na manta durante os procedimentos de instalação e de serviço da obra (ROLLIN e RIGO, 1991). Para obtenção da resistência, corpos de provas são submetidos a ensaios de tração que simulam as condições de cisalhamento ou adesão (VERTEMATTI, 2004).

As geomembranas, de acordo com sua composição e suas condições de carga, podem estar sujeitas a ruptura por fissuras de tração, conhecida por *stress cracking*. Esta ruptura ou quebra da membrana ocorre com uma tensão de tração inferior à resistência de tração, e acontece por alguns fatores como exposição a variações de temperatura, presença de ranhuras e arranhões e deformações concentradas (VERTEMATTI, 2004).

Para determinação da resistência de interface é necessário conhecer o material que está em contato com a geomembrana, seja ele o solo subjacente ou outros geossintéticos. Os ensaios que fornecem estas resistências são: ensaio de cisalhamento, ensaio de plano inclinado e ensaio de arrancamento (VERTEMATTI, 2004).

#### 2.3.4. Finalidades

Devido à baixa permeabilidade e boas características de resistência química e mecânica, as geomembranas possuem várias aplicações visando controle de fluxo e separação de materiais (VERTEMATTI, 2004), como barragens, lagoas de contenção, reservatórios, canais, aterros hidráulicos, túneis, estruturas subterrâneas, entre outros.

Inicialmente, nas barragens que necessitavam de impermeabilização na face de montante, eram utilizadas camadas compactadas de solo de baixa permeabilidade, concreto e concreto asfáltico como barreira. Hoje em dia, essa prática pode ser substituída pelo uso da geomembrana, que reduz ou evita a infiltração da água no maciço (CIGB, 2010).

Lagoas de contenção, reservatórios e canais também podem ser revestidas com geomembrana como barreira de fluídos, não permitindo a infiltração de líquidos no solo, conforme a FIGURA 4. Em obras subterrâneas como túneis e galerias, a geomembrana tem função de assegurar a estanqueidade durante sua vida útil protegendo a estrutura contra a agressividade das águas infiltradas (KOERNER, 2005).



FIGURA 4 – APLICAÇÃO DE GEOMEMBRANA DE PEAD EM RESERVATÓRIO

FONTE: NORTENE (2014)

A aplicação de geomembranas para a disposição de resíduos é de âmbito ambiental é de extrema responsabilidade social e econômica. Podem ser utilizadas em aterros de resíduos, lagoas de efluentes e estações de tratamento de água ou esgoto, no controle de infiltrações, percolações e fluxo de resíduos como choro e gases tóxicos (NORTENE, 2014). Tem objetivo de evitar a contaminação do solo, rios e de lençóis subterrâneos, para não causar danos e riscos ao meio ambiente e a saúde pública.

Segundo a IGS, a utilização das geomembranas também têm aplicações na agricultura, primeiramente aplicadas em valas para armazenamento de água e revestimento de pequenas lagoas em fazendas. Atualmente são utilizadas para proteção de águas subterrâneas e superficiais da contaminação de resíduos de origem animal como digestores anaeróbios. Também é possível o uso em reservatórios para irrigação, cisternas, tanques para piscicultura e carcinicultura, entre outros (NORTENE, 2014).

#### 2.4. UTILIZAÇÃO DE GEOMEMBRANAS EM BARRAGENS DE TERRA

Os geossintéticos estão cada vez mais sendo utilizados em obras hidráulicas, pois a interação da água com essas estruturas pode causar diversos desgastes. A geomembrana tem função de reduzir ou evitar a infiltração de água e quando utilizada como revestimento, também previne a erosão dos taludes.

A utilização de compostos artificiais é uma prática relativamente nova e uma boa alternativa quando o material utilizado na impermeabilização da barragem é insuficiente, inapropriado, possui custo muito elevado ou difícil execução de outros métodos (CIGB, 2010). As geomembranas podem ser utilizadas como a principal barreira hidráulica de uma barragem com materiais permeáveis, como prevenção de degradação devido a infiltrações e na redução de processos de deterioração de barragens já existentes.

Os principais requisitos que devem ser atendidos pela geomembrana são:

- Estanqueidade;
- Ligação eficiente com a fundação da barragem;
- Elasticidade para boa adaptação ao corpo da barragem;
- Sistema de ancoragem para a geomembrana não se movimentar.

#### 2.4.1. Instalação

O manuseio, armazenamento e instalação das geomembranas devem ser realizados conforme as recomendações do fabricante, seguindo o projeto e suas especificações. Além de ser necessário o conhecimento das condições naturais locais como regime de chuvas, variações de temperatura, umidade relativa e regime de ventos (VERTEMATTI, 2004).

A geomembrana pode ser instalada de duas maneiras, na face de montante da barragem ou internamente. A opção mais usual é a aplicação do sistema a montante da barragem, e pode ser exposto ou coberto (CIGB, 2011). A impermeabilização do talude de montante aumenta a segurança da barragem, pois a manta faz com que não exista excesso de pressões neutras no maciço. A manta que é exposta tem a vantagem de reparo e substituição em caso de danos, no entanto, quando a geomembrana é coberta ela fica protegida dos agentes externos.

Existem algumas alternativas no uso da geomembrana, esta pode estar conectada a cortina de injeção, conectada ao cut-off ou estendido a montante como mostra a

FIGURA 5.

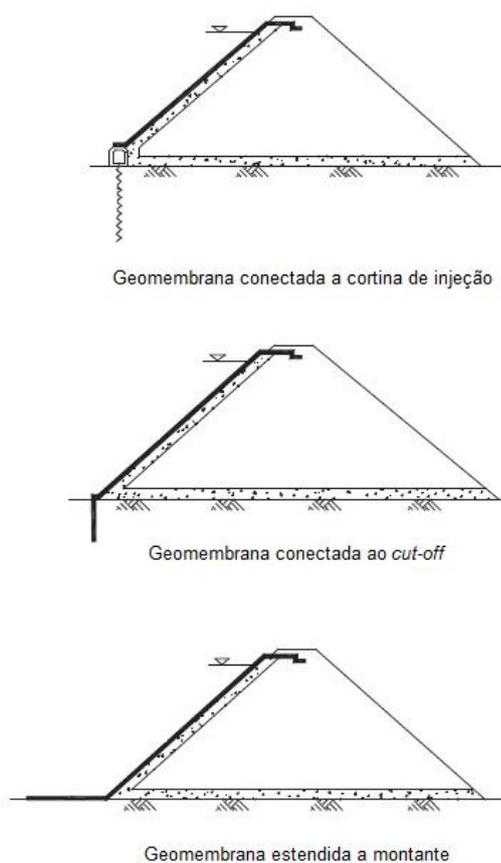


FIGURA 5 – DISPOSIÇÃO DE GEOMEMBRANAS EM BARRAGENS DE TERRA

FONTE: (CIGB, 2011)

A geomembrana além de ser de fácil e rápida instalação e depender unicamente das condições climáticas, sua instalação pode ser executada junto ao corpo da barragem, reduzindo significativamente o cronograma da obra (CIGB, 2011). Na instalação três etapas são importantes para a eficiência do sistema: preparação do subleito, emendas realizadas em campo e ancoragem (NHI, 1988).

#### 2.4.1.1. Preparação do Subleito

O subleito deve ser bem compactado de modo a fornecer suporte para a manta, e desprovido de rochas grandes, pedras afiadas, galhos de árvore ou qualquer outro objeto que possa perfurar a geomembrana. Frequentemente é utilizado um geotêxtil sob a manta para aumentar a resistência ao puncionamento, protegendo contra o impacto de rochas e o tráfego de pedestres (KOENER, 2005). O

geotêxtil também é utilizado para desabafar gases que provem de orgânicos em decomposição na camada subjacente, no alívio do excesso de pressão hidrostática e redução do risco de levantamento pelo vento (NHI, 1988).

#### 2.4.1.2. Emendas

O aspecto mais crucial na instalação das geomembranas são as emendas. A qualidade de uma emenda realizada em campo depende de muitos fatores como as condições atmosféricas, concepção do projeto e técnica de soldagem utilizada. Os parâmetros da membrana que influenciam o método de soldagem adotado são: composição, espessura, limpeza da superfície e largura da emenda. Para a obtenção de qualidade também são levadas em consideração as condições atmosféricas, como temperatura, vento e umidade do ar (ROLLIN e RIGO, 1991).

As geomembranas flexíveis, como as de PVC, normalmente são utilizadas em painéis emendados na fábrica, gerando emendas muito boas, pois são realizadas em um ambiente controlado e limpo, e com bom controle de qualidade (KOENER, 2005). Estes painéis pré-fabricados diminuem a probabilidade de falhas e imperfeições, no entanto cuidados com os equipamentos de movimentação e acessos disponíveis na obra devem ser levados em consideração no dimensionamento dos painéis ou bobinas (VERTEMATTI, 2004). Os métodos utilizados para a emenda das mantas de PVC são: fusão térmica, emendas químicas e emendas por adesão.

Na instalação das geomembranas de polietileno, as emendas devem ser previstas para realização em campo, pois mesmo com a possibilidade de serem soldadas na fábrica, o dobramento deve ser evitado, o que inviabiliza o uso de painéis (VERTEMATTI, 2004).

As geomembranas de PEAD e PELBD são fornecidas em forma de rolos e vão diretamente para o local de instalação. Por serem realizadas em campo, as emendas são muito vulneráveis a problemas e vazamentos, que podem surgir se o controle de qualidade na obra não for rigoroso. São aplicáveis as emendas por extrusão e por fusão térmica (KOENER, 2005).

Como as geomembranas são termoplásticas, a estrutura do polímero pode ser reorganizada com processos térmicos ou químicos, o que torna possível a união

entre elas. O método de extrusão consiste na colocação de uma fita de polímero fundido e extrusado sobre a borda ou entre duas superfícies a serem unidas. O polímero derretido aquece e derrete a manta fazendo a ligação (KOENER, 2005).

A fusão térmica utiliza uma cunha metálica aquecida por resistência elétrica ou ar aquecido na junção das geomembranas que em seguida é pressionada por rolos unindo-as (VERTEMATTI, 2004), como indicado na FIGURA 6. Na fusão química é aplicado um solvente e posteriormente pressionado para unir as mantas. E por fim, nas emendas por adesão são utilizadas colas químicas ou de contato. A execução das emendas é complementada com testes de resistência e estanqueidade.



FIGURA 6 – EMENDA POR FUSÃO TÉRMICA

FONTE: CARDOSO *et al.* (2010)

#### 2.4.1.3. Ancoragem

Como a área de vedação é muito grande e fica sujeita a forças externas, é necessário à estabilização da manta com ancoragem ou lastros de brita. Na instalação é executada a ancoragem provisória nas membranas espalhadas, realizada com auxílio de sacos de areia ao longo das bordas e cantos dos painéis (CIGB, 2010). O reaterro da canaleta de ancoragem deve ser executado cuidadosamente.

A trincheira de ancoragens deve ser escavada antes da colocação da geomembrana para evitar danos futuros causados pela chuva, ressecamento com trincas e abatimento das laterais (CIGB, 2010). A seção desta trincheira deve ser bem especificada conciliando sua seção com as características da geomembrana, como rigidez e dificuldades em dobras. No caso de solos duros, a canaleta deverá ter as bordas levemente arredondadas, também pode ser utilizado geotêxtil para evitar danos no reservatório.

A trincheira de vedação executada na UHE São Salvador é apresentada na FIGURA 7.



FIGURA 7 – TRINCHEIRA DE ANCORAGEM NA UHE SÃO SALVADOR

FONTE: CARDOSO *et al.* (2010)

#### 2.4.2. Histórico

A utilização inicial de geomembranas aconteceu em barragens de terra, pois algumas destas eram muito permeáveis e necessitavam de um elemento separador para proporcionar impermeabilidade. A solução com geossintéticos se apresentou econômica e de fácil instalação quando comparado com os sistemas tradicionais de impermeabilização.

A primeira aplicação de geomembranas como barreira de água aconteceu em 1959 na barragem de enrocamento da Contrada Sabetta, na Itália. A geomembrana foi instalada durante a construção na face de montante, protegida com uma camada de concreto. Em 1998, algumas amostras da membrana foram testadas e ainda apresentou comportamento satisfatório (KOENER, 2005).

Posteriormente, o uso de geomembrana de impermeabilização começou a ser utilizado em barragens de terra, na maioria das vezes com uma camada de proteção contra agentes externos. Também existiram muitos casos do uso do geossintéticos na reabilitação de barragens de terra e enrocamento para minimizar as infiltrações (CIGB, 2010)

No Brasil, um caso inédito do uso de geomembranas como tapete impermeável em barragem de terra ocorreu em 2010 na UHE São Salvador (243 MW), no Estado de Tocantins. A fundação da barragem apresentava um maciço rochoso heterogêneo e muito permeável, por isso foram estudadas diferentes alternativas de tratamento de fundação (CARDOSO *et al.*, 2010).

A trincheira de vedação (*cut-off*) e a cortina de injeções se mostraram inviáveis devido à grande profundidade do maciço de alta permeabilidade, no entanto, resultados obtidos com o tapete impermeável foram satisfatórios. Dentre as alternativas, optou-se pelo uso de tapete impermeabilizante a montante com a aplicação de geomembrana de PEAD com 200 metros de extensão e 80 metros de comprimento, antes do enchimento do reservatório.

Na execução foi prevista uma camada de solo como substrato e outra sobre a manta, para evitar ruptura por puncionamento, o sistema de ancoragem foi executado no talude de montante da barragem por meio de trincheiras escavadas no solo. O desempenho do sistema foi acompanhado por um medidor de vazão instalado na região, que após um ano da instalação da geomembrana, apresentou valores próximos dos obtidos nos modelos numéricos, comprovando a eficácia do tratamento.

Outro caso no Brasil aconteceu na UHE Salto (116 MW), no Estado de Goiás. A barragem de terra da margem esquerda apresentava uma fundação muito permeável, para isso foram analisados tratamentos como trincheira de vedação (*cut-off*), cortina e injeções de calda de cimento, cortina de estacas prancha, diafragmas

executados in-situ (plástico e rígido) e tapetes impermeabilizantes de montante. A alternativa que apresentou melhor viabilidade técnica e econômica foi o tapete a montante com o uso de geomembrana de PEAD, mostrando-se uma boa solução para redução de vazões e pressões sob a barragem (PIEROZAN *et al.*, 2014).

A FIGURA 8 representa a instalação da geomembrana na UHE Salto.



FIGURA 8 – COLOCAÇÃO DA GEOMEMBRANA NA UHE SALTO

FONTE: PIEROZAN (2014)

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. EXPERIMENTO EM MODELO REDUZIDO

Modelos reduzidos em escalas ou modelos físicos são utilizados na representação ou interpretação simplificada de modelos reais, normalmente empregados na calibração do modelo numérico. Os dados utilizados foram baseados nos estudos de Pierozan (2014), que realizou simulações numéricas com parâmetros calibrados e validados nos ensaios do modelo reduzido em laboratório e com dados reais da UHE Salto (116MW), o que não foi levado em consideração neste trabalho. Os ensaios geotécnicos e a montagem do modelo reduzido foram realizados nos laboratórios do CESEC/UFPR.

Para o modelo reduzido foram adotadas características geométricas de contorno e a espessura da fundação. Os materiais geotécnicos empregados no experimento foram analisados e ensaiados, de modo a proporcionar boa representação das características do aterro e fundação.

O experimento simulou a percolação do fluxo de água pela barragem, com a finalidade de avaliar a eficácia do tratamento de fundação na redução das vazões e pressões neutras do modelo com e sem o uso da geomembrana. Para sua realização foi utilizado um tanque de percolação com instrumentação necessária para medição do nível piezométrico e da vazão de percolação.

##### 3.1.1. Características Geométricas

As características geométricas do modelo reduzido foram adotadas de acordo com as condições do tanque de percolação. Este dispositivo de pesquisa possui 250 cm de comprimento, 45 cm de largura e 60 cm de altura, resultando em um volume de 0,675 m<sup>3</sup>, demonstrado na FIGURA 9. Este instrumento já foi utilizado anteriormente por Araújo (2013) no estudo de equivalência entre drenos franceses e tapetes drenantes em barragens de terra.

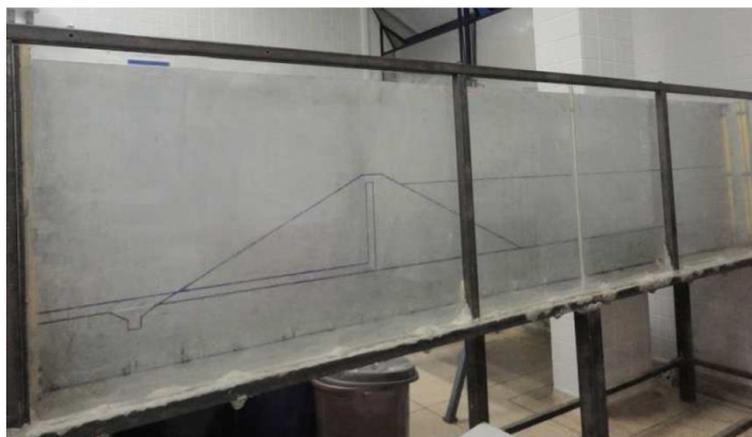


FIGURA 9 – TANQUE DE PERCOLAÇÃO

A camada de fundação considerada foi de 12 cm, a altura da barragem de 24 cm e a crista com 6 cm de largura. Os taludes foram definidos com inclinação de 1V:2H, também foi adotado um sistema de drenagem interna composto por filtro vertical e tapete horizontal, com aproximadamente 2 cm de espessura, para fácil execução no modelo, como indicado na FIGURA 10.

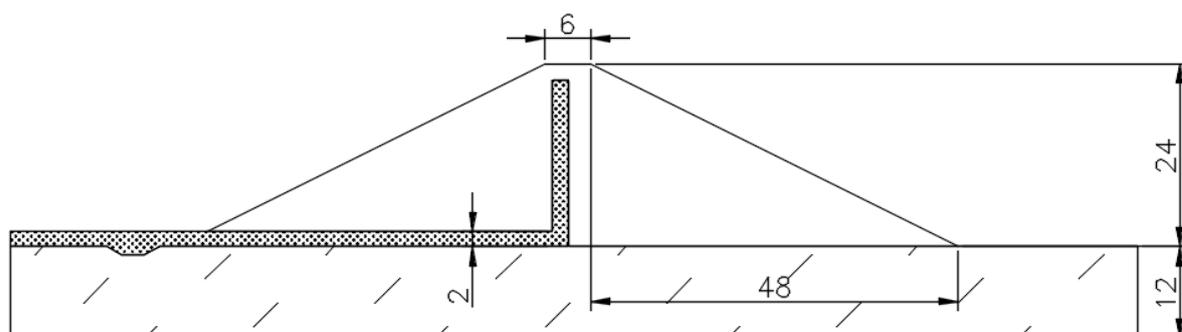


FIGURA 10 – DIMENSÕES DO MODELO REDUZIDO

### 3.1.2. Método de Deposição do Material

A permeabilidade dos materiais depende da sua compactidade, que está associada a uma determinada altura de queda livre das partículas. Neste trabalho foi adotado o método da "chuva de areia" para deposição dos materiais nos ensaios de

permeabilidade, compactidade e no modelo reduzido. Esta técnica consiste na precipitação da areia em condições pré-estabelecidas, com finalidade de se obter um material homogêneo, com permeabilidade desejada, sem segregação e sem necessidade da utilização de equipamentos de compactação.

Anteriormente, Araújo (2013) realizou ensaios em modelo reduzido e adotou a altura de queda de 12 cm, com materiais de propriedades similares aos utilizados neste trabalho. Com amostras do solo da fundação e aterro, foi realizada a calibração do método com alturas de queda padrão (5, 10, 15 e 20 cm), despejadas com funil de abertura de 5 mm em amostras cilíndricas de volume aproximado de 1000 cm<sup>3</sup>. Após o ensaio foram obtidos os valores de índice de vazios e a massa específica aparente para cada altura de queda.

### 3.1.3. Caracterização Geotécnica

A caracterização geotécnica dos materiais é de suma importância para o conhecimento da variabilidade do comportamento dos solos no modelo reduzido, e para calibração do modelo numérico. As propriedades dos materiais utilizados para a fundação, aterro, filtro vertical e tapete drenante estudadas no presente trabalho foram: permeabilidade, granulometria, densidade real dos grãos e compactidade, como indica a TABELA 3.

A preparação das amostras seguiu os procedimentos descritos pela ABNT NBR 6457, estas foram secas ao ar, até que fosse atingida a umidade higroscópica, sendo então destorroadas e homogeneizadas.

TABELA 3 – ENSAIOS REALIZADOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

<b>ENSAIO</b>	<b>MATERIAL DE FUNDAÇÃO</b>	<b>MATERIAL DE ATERRO</b>	<b>MATERIAL DO FILTRO</b>
Permeabilidade	X	X	X
Análise Granulométrica	X	X	X
Densidade Real dos Grãos	X	X	
Compactidade	X	X	

### 3.1.3.1. Permeabilidade

A permeabilidade é a propriedade que demonstra a capacidade de escoamento de um fluido pelos poros do solo, e são influenciadas diretamente pela granulometria, compactidade, composição e temperatura. Os ensaios para obtenção desta característica foram realizados com o permeômetro de carga constante, conforme a ABNT NBR 13292. As amostras foram depositadas no equipamento com a altura de queda obtida pelo método da “chuva de areia”.

O experimento consistiu na utilização de dois reservatórios com níveis de água constantes e a medição da água excedente. Conhecida a vazão e as dimensões do corpo de prova obtém-se o valor do coeficiente de permeabilidade  $k$  pela equação (1).

$$k = \frac{V \times L}{t \times h \times A} \quad (1)$$

Sendo:  $k$  = Coeficiente de permeabilidade (cm/s);

$V$  = Volume de água percolada (cm<sup>3</sup>);

$L$  = Altura do corpo de prova (cm);

$t$  = Tempo decorrido (s);

$h$  = Carga Hidráulica (cm);

$A$  = Área do corpo de prova (cm).

Para a determinação da permeabilidade dos materiais de aterro e fundação, foi admitida a relação do modelo real utilizado por Pierozan (2014), consistindo em uma fundação com alta permeabilidade, para ocorrência de fluxo, e material da barragem com baixa permeabilidade, conforme mostra a equação (2).

$$\frac{k_{FUNDACA\tilde{O}}}{k_{ATERRO}} = 50 \quad (2)$$

Sendo:  $k_{FUNDACA\tilde{O}}$  = Coeficiente de permeabilidade da fundação;

$k_{ATERRO}$  = Coeficiente de permeabilidade do aterro;

Em laboratório existia material arenoso suficiente para a construção do modelo reduzido e como este material era permeável, foi separada a quantidade necessária para a construção do aterro da barragem. O material restante foi trabalhado de modo a obter-se a permeabilidade desejada para o aterro. Para isso, foram adicionadas e misturadas porções de solo arenoso, passante na peneira nº200, e posteriormente foram realizados ensaios para determinação da condutividade hidráulica, até a obtenção da permeabilidade requerida.

Os materiais granulares utilizados no filtro vertical e tapete horizontal também foram ensaiados de modo que a permeabilidade fosse muito superior à do aterro e da fundação, para alcançar sua função filtrante e drenante. A FIGURA 11 apresenta os permeômetros utilizados na obtenção da permeabilidade dos materiais da fundação, aterro e filtro e tapete, respectivamente.



FIGURA 11 – PERMEÔMETROS UTILIZADOS NOS ENSAIOS

### 3.1.3.2. Análise Granulométrica

A análise granulométrica consiste na determinação do comportamento e classificação das partículas que constituem o solo, sendo divididas em frações conforme seu tamanho. Os ensaios foram realizados conforme a ABNT NBR 7181, que avalia o peneiramento grosso e peneiramento fino.

O peneiramento consiste na pesagem do material que fica em cada peneira, referido à massa seca total da amostra, esta então é considerada “porcentagem retida”. Este ensaio tem como limitação a abertura da peneira nº 200 (0,075 mm), sendo então necessária a complementação dos resultados através do ensaio de sedimentação.

A sedimentação é um processo simples de separação de sólido em meios líquidos pela força gravitacional. O ensaio de sedimentação se baseia na Lei de Stokes, onde a velocidade de sedimentação dos grãos aumenta com o diâmetro das partículas presentes no solo. As densidades de suspensão são determinadas com um densímetro e após as medições obtêm-se a distribuição granulométrica das partículas com diâmetro inferior a 0,075 mm. O ensaio realizado em laboratório é demonstrado na FIGURA 12.



FIGURA 12 – ENSAIO DE SEDIMENTAÇÃO

### 3.1.3.3. Densidade Real do Solo

A densidade real dos grãos expressa a relação entre a massa específica (ME) do solo e da água. A ME é a relação entre a massa e o volume do solo e é obtida pelo ensaio do picnômetro, segundo a ABNT NBR 6508, como indica a FIGURA 13.



FIGURA 13 – DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA COM PICNÔMETROS

Este procedimento consiste na determinação das massas dos picnômetros vazios, com amostra de solo, com amostra de solo mais água e somente com água. Os picnômetros são aquecidos por no mínimo 15 minutos e pesados novamente para obtenção do peso e volume de água que foi substituída pelo solo. Com o peso e volume encontra-se a massa específica. Foram realizados os ensaios com amostras de solo da fundação e do aterro da barragem.

### 3.1.3.4. Compacidade

A compacidade é um parâmetro que relaciona o índice de vazios que o solo se encontra com seus valores máximos e mínimos atingíveis, pois somente o índice de vazios fornece pouca informação sobre o comportamento do solo. A determinação da compacidade relativa de materiais granulares não coesivos foi realizada conforme as especificações da ABNT NBR 12051, com a equação (3).

$$CR = \frac{e_{m\acute{a}x} - e}{e_{m\acute{a}x} - e_{m\acute{i}n}} \times 100 \quad (3)$$

Sendo: CR = Compacidade relativa (%);

$e_{m\acute{a}x}$  = Índice de vazios máximo;

$e_{m\grave{i}n}$  = Índice de vazios mínimo;

$e$  = Índice de vazios da amostra.

Quanto maior o índice CR, mais compacto é o solo, que em geral apresentam maior resistência e menor deformabilidade. Terzaghi sugeriu a terminologia apresentada na TABELA 4.

TABELA 4 – CLASSIFICAÇÃO DO SOLO SEGUNDO A COMPACIDADE

<b>CLASSIFICAÇÃO DO SOLO</b>	<b>CR</b>
Fofo	Abaixo de 33%
Compacidade média	Entre 33% e 66%
Compacto	Acima de 66%

#### 3.1.4. Instrumentação do Tanque de Percolação

O tanque de percolação permite a experimentação de modelos reduzidos tridimensionais e o estudo do comportamento da estrutura nele construída. Uma de suas faces laterais possui placa acrílica possibilitando a visualização do fluxo e estabilidade da barragem, além de uma instrumentação adequada para medição das cotas piezométricas e estudo da percolação pela fundação e aterro.

##### 3.1.4.1. Cargas Piezométricas

Para a determinação das cargas de pressão exercida pela água no modelo reduzido, foram instalados piezômetros na fundação e no aterro da barragem. Os piezômetros são tubos que possuem uma extremidade no tanque, protegida com papel filtro e geotêxtil não-tecido a fim de evitar a entrada de finos, como indicado na FIGURA 14. Para que não houvesse o vazamento de água pelos furos feitos no

tanque, os tubos foram marcados na sua altura correta de medição e fixados com silicone.



FIGURA 14 – PIEZÔMETROS INSTALADOS NO TANQUE DE PERCOLAÇÃO

A outra extremidade do tubo ficou localizada em um painel atrás do tanque para leitura das cargas hidráulicas. Este painel foi ajustado de modo que a cota do tanque fosse exatamente igual a cota zero do painel de leitura, para obtenção corretas das cargas piezométricas. O painel de leituras pode ser visualizado na FIGURA 15.



FIGURA 15 – PAINEL DE LEITURA DAS CARGAS PIEZOMÉTRICAS

Para melhor localização dos tubos, a TABELA 5 apresenta as coordenadas de locação dos piezômetros, com origem na extremidade inferior esquerda do tanque, com eixo “x” representando sua seção longitudinal e o eixo “y”, a altura que os piezômetros se encontram em relação ao fundo do tanque.

TABELA 5 – COORDENADAS DOS PIEZÔMETROS NO MODELO REDUZIDO

<b>FUNDAÇÃO</b>		
<b>PIEZÔMETRO</b>	<b>x (cm)</b>	<b>y (cm)</b>
PF-1	16,0	6,0
PF-2	25,8	6,0
PF-3	49,8	9,0
PF-4	49,8	6,0
PF-5	49,8	1,0
PF-6	67,3	9,0
PF-7	67,3	6,0
PF-8	67,3	1,0
PF-9	85,0	6,0
PF-10	97,8	6,0
PF-11	110,5	6,0
PF-12	130,5	6,0
PF-13	145,5	6,0
PF-14	160,5	6,0
PF-15	175,2	6,0
PF-16	189,9	6,0
PF-17	204,6	6,0
PF-18	219,3	6,0
<b>ATERRO</b>		
<b>PIEZÔMETRO</b>	<b>x (cm)</b>	<b>y (cm)</b>
PA-1	85,0	24,8
PA-2	85,0	12,0
PA-3	97,8	18,4
PA-4	110,5	12,0

Os tubos piezométricos distribuídos na fundação são representados pela sigla PF (piezômetro de fundação), e os presentes na barragem pela sigla PA (piezômetros de aterro), como indicado na FIGURA 16.

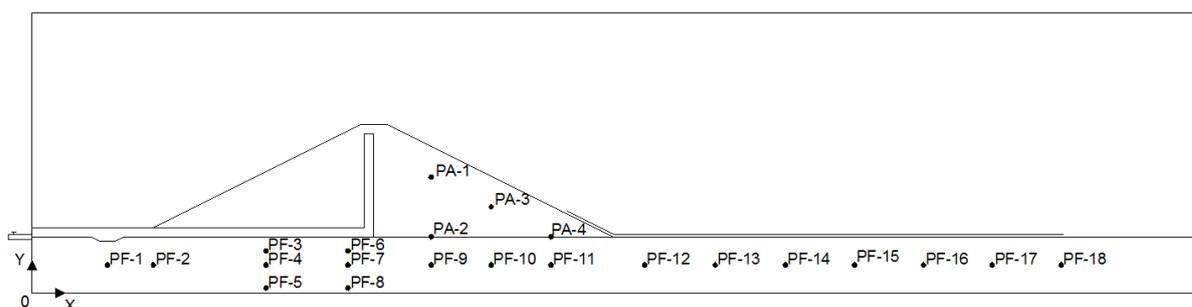


FIGURA 16 – TUBOS PIEZOMÉTRICOS DO MODELO REDUZIDO

#### 3.1.4.2. Vazão de Percolação

A vazão de água que percola pela barragem e sua fundação deve ser controlada a fim de que o experimento mantenha um nível de água constante. Para o controle deste nível existem duas saídas, uma no fundo do tanque, à montante e outra na parede lateral, a jusante da barragem.

Neste experimento foi utilizada a torneira localizada na parede lateral, que está aproximadamente a 10 cm do fundo do tanque e que coincide com a localização do tapete drenante, possibilitando a captação da água do sistema de drenagem da barragem. Da mesma forma que nos piezômetros, a saída d'água foi protegida com geotêxtil não-tecido para evitar o entupimento com material fino.

Para medição da vazão, foi utilizada uma proveta graduada para captação da água, por certo período de tempo. Com a relação entre o volume e o tempo cronometrado, foram obtidas as vazões de percolação através do aterro e da fundação, conforme a FIGURA 17.



FIGURA 17 – MEDIÇÃO DA VAZÃO DE ÁGUA PELO MODELO REDUZIDO

### 3.1.5. Montagem do Modelo Reduzido

O modelo reduzido foi construído no laboratório da UFPR, no tanque de percolação instrumentado. A técnica utilizada para a deposição dos materiais foi a “chuva de areia” já comentada anteriormente, com altura de queda constante utilizando funis com gabaritos acoplados.

A geometria da barragem foi desenhada na chapa interna do tanque, para melhor orientação das regiões do modelo. Os piezômetros foram posicionados nas alturas estabelecidas, para não ocorrerem erros de medição.

Primeiramente, foi depositado o material da fundação, tomando os devidos cuidados para manter a trincheira drenante a jusante da barragem. Após atingir a cota determinada, foi colocado um geotêxtil de modo a separar o material da fundação do material do tapete horizontal. Sobre o geotêxtil foi lançado o material granular, em uma camada de aproximadamente 2 cm, como mostra a FIGURA 18.



FIGURA 18 – MATERIAL DE FUNDAÇÃO E TAPETE HORIZONTAL

O material do aterro foi depositado sobre o tapete drenante, a jusante, e sobre a fundação, a montante. A construção do filtro vertical, também com 2 cm de espessura, aconteceu paralelamente ao lançamento do material de aterro. Para possibilitar a verticalidade do filtro, conforme a FIGURA 19, foram utilizadas hastes de madeira para auxiliar na deposição do material.



FIGURA 19 – CONSTRUÇÃO DO FILTRO VERTICAL

Após a construção da barragem, foi realizada a instalação da membrana impermeável sobre a fundação exposta a montante. Para essa solução, foram aplicadas diversas camadas de parafina e gaze, a fim de se tornar impermeável, com comprimento de 96 cm sobre a fundação e estendido aproximadamente 15 cm no talude de montante. Não foi utilizada a geomembrana pela dificuldade de fixação da mesma no modelo, sem a realização de ancoragens. Sobre a parafina foi

aplicada uma pequena camada de silicone líquido, para evitar possíveis vazamentos e garantir a estanqueidade do procedimento.

Como mostra a FIGURA 20, alguns traços de 6 cm também foram desenhados para determinar a localização dos rasgos a serem ensaiados, representando 50% das emendas comprometidas na geomembrana sobre a fundação.



FIGURA 20 – MEMBRANA IMPERMEÁVEL DE MONTANTE

A disposição final dos materiais do modelo reduzido no tanque de percolação, bem como a membrana impermeável pode ser observada na FIGURA 21.



FIGURA 21 – MODELO FÍSICO DA BARRAGEM

### 3.1.6. Enchimento do Reservatório

Para que não houvesse a instabilidade dos taludes da barragem, o enchimento do reservatório do modelo reduzido foi realizado com ajuda de uma mangueira, de vazão constante e controlada. Também foi aplicado vácuo nos piezômetros, de modo a forçar sua saturação eliminando bolhas de ar. Considerando o fundo do tanque como cota zero, o nível de água do reservatório foi estabilizado e mantido constante na cota 33 cm, como mostra a FIGURA 22.



FIGURA 22 – ENCHIMENTO DO RESERVATÓRIO

### 3.1.7. Ensaio Realizados

As simulações realizadas no modelo físico foram divididas em três etapas: utilização de geomembrana impermeável a montante da barragem, geomembrana com rasgos longitudinais e ausência de tratamento de fundação. Foram obtidas as leituras de poropressão e as vazões de percolação, após a estabilização do fluxo.

A primeira situação analisou a barragem com presença da geomembrana como tratamento de fundação. A geomembrana tem a extensão de 96 cm sobre a fundação e está na cota 19 cm na face de montante, que representa um terço da área do talude exposta à água. Para análise dos resultados obtidos pelo ensaio, foi considerado que a membrana se aderiu perfeitamente ao solo, sem rasgos e descontinuidades.

A simulação seguinte consistiu na presença de rasgos na membrana, exemplificando os danos que podem ocorrer na fase de instalação e operação da

geomembrana. Os rasgos foram realizados em locais pré-determinados, como indicado na FIGURA 20, considerando-se 50% da área de emendas comprometida.

Para a terceira e última simulação, foi retirada a membrana de parafina do modelo, e obtidas as leituras sem o tratamento de fundação. Estas análises possibilitaram a comparação entre os resultados de vazão e poropressão com e sem o uso da geomembrana.

### 3.2. MODELO NUMÉRICO

As análises numéricas geram resultados efetivos e semelhantes aos reais, permitindo realizar simulações que normalmente não podem ser executadas na prática. No presente trabalho, os dados obtidos pelo modelo numérico são comparados com os laboratoriais, permitindo verificar a consistência dos dados das simulações e do modelo reduzido.

As análises de fluxo em regime permanente foram realizadas com o auxílio do *software* SEEP/W, da GEO-SLOPE do Canadá, versão estudante, que utiliza o método dos elementos finitos para obtenção dos resultados. Foi desenhada uma malha através da interface gráfica do programa, e obtidas as vazões de percolação, poropressão, cargas totais e a posição da linha freática.

#### 3.2.1. Variáveis do Modelo Numérico de Fluxo

No modelo numérico, as características geométricas como: a altura da barragem, a inclinação dos taludes, a largura da crista e a espessura da fundação foram baseadas no modelo reduzido. Os parâmetros de permeabilidade para os materiais da seção são os obtidos pelos ensaios de laboratório.

As variáveis dependentes são obtidas pelo modelo numérico: vazão de percolação e poropressão que estão diretamente relacionadas com as condições de contorno e com os parâmetros utilizados nas análises. A vazão de percolação demonstra a quantidade de água que passa pela barragem e fundação. Como o modelo numérico é bidimensional a vazão é considerada para uma seção com um metro de largura. A poropressão representa a altura de uma coluna de água

necessária para haver equilíbrio em um determinado ponto, e a linha freática é a equipotencial de poropressão igual a pressão atmosférica (zero).

As condições de contorno representaram três situações, a utilização de geomembrana a montante da barragem de terra, presença de rasgos na manta e a ausência de tratamento de fundação.

### 3.2.2. Calibração e Validação

A calibração e validação do modelo numérico de fluxo são importantes para verdadeira representação do comportamento do modelo físico. Neste trabalho, foi determinado que a anisotropia dos materiais é igual a um, ou seja, a permeabilidade vertical é igual a permeabilidade horizontal ( $k_y/k_x = 1$ ), além de considerar que os maciços são homogêneos.

A validação ocorreu pela comparação entre as vazões de percolação dos resultados obtidos em laboratório com os resultados apresentados pelo programa. Para isso, foram utilizadas as simulações com e sem a utilização de geomembrana.

As cargas de pressão determinadas pelos piezômetros instalados no modelo reduzido foram comparadas com os valores fornecidos através do modelo numérico, nos mesmos pontos. Com os valores de poropressão foi realizada uma análise de correlação com objetivo de avaliar o grau de dependência entre as variáveis.

### 3.2.3. Análises Paramétricas

Com base no modelo de fluxo calibrado e validado, foi possível realizar simulações para avaliação do desempenho e comportamento da geomembrana como tratamento de fundação, em diversas situações e condições de contorno.

#### 3.2.3.1. Variação da Posição da Geomembrana

Para as análises realizadas neste tópico, a geomembrana foi instalada em diversas posições diferentes da barragem. Com isso foi comparada a vazão e posição da linha freática. As simulações são apresentadas na TABELA 6.

TABELA 6 – SIMULAÇÕES COM VARIAÇÃO DA POSIÇÃO DA GEOMEMBRANA

<b>POSIÇÃO DA GEOMEMBRANA</b>
Sobre a fundação
Sobre a fundação e estendida a meia face de montante
Sobre a face de montante
Sobre a face de montante e fundação

Na simulação do tratamento somente sobre a fundação, é considerada a manta com comprimento de 96 cm, mesmo valor utilizado no modelo reduzido. A simulação seguinte ocorreu com a geomembrana sobre a fundação e estendida até a meia face de montante com comprimento de 23,5 cm. A extensão foi determinada até a cota 22,5 cm, no meio do talude com presença de água.

Para a análise da geomembrana somente na face de montante, foi considerada que toda a face está impermeabilizada. A última simulação ocorreu com a utilização do tratamento em toda a face de montante e sobre a fundação.

Estas simulações também são comparadas com as vazões obtidas na calibração e validação do modelo numérico, que avalia a seção com e sem a aplicação da manta impermeável.

#### 3.2.3.2. Variação da Permeabilidade do Material da Fundação

Para análise do desempenho da geomembrana em barragens com parâmetros geotécnicos diferentes, foram alterados os coeficientes de permeabilidade do material da fundação, como mostra a TABELA 7. A permeabilidade do aterro foi mantida constante ( $2,0 \times 10^{-6}$  m/s) e a seção foi avaliada nas mesmas situações do item 3.2.3.1.

TABELA 7 – SIMULAÇÕES COM VARIAÇÃO DE PERMEABILIDADE DO MATERIAL DE FUNDAÇÃO

$k_{FUNDACÃO}$ (m/s)
1,0 x 10-4
1,0 x 10-6
1,0 x 10-8

### 3.2.3.3. Avaliação dos Rasgos

A simulação realizada com a geomembrana apresentando rasgos longitudinais foi avaliada no modelo reduzido, com 50% das áreas de emendas comprometidas. Na primeira etapa desta avaliação foi comparada a vazão e a poropressão entre os modelos físico e numérico.

Na segunda etapa foi avaliado somente um rasgo no meio da face de montante e um rasgo a 25 cm do pé do talude, além de ser simulado para duas permeabilidades do material de fundação, como mostra a TABELA 8.

TABELA 8 – SIMULAÇÕES COM RASGOS

$k_{FUNDACÃO}$ (m/s)	LOCALIZAÇÃO DO RASGO
1,0 x 10-4	Meio da face de montante
1,0 x 10-4	25 cm do pé do talude
1,0 x 10-6	Meio da face de montante
1,0 x 10-6	25 cm do pé do talude

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os parâmetros obtidos pelos ensaios laboratoriais dos materiais do modelo reduzido e utilizados no modelo numérico. Também exibe as leituras piezométricas e vazão do modelo reduzido e os resultados das simulações realizadas no modelo numérico.

### 4.1. EXPERIMENTO EM MODELO REDUZIDO

O modelo reduzido foi construído com materiais do laboratório, e para conhecimento do solo foi necessário realizar ensaios de caracterização. Após a construção do modelo reduzido foram realizadas as simulações e obtidas as leituras dos resultados através da instrumentação do tanque de percolação.

#### 4.1.1. Método de Deposição dos Materiais

A análise da deposição do material granular foi realizada com o método da “chuva de areia”, que avalia a altura de queda das partículas. Para determinação desta altura, foi realizada a calibração do método para 5, 10, 12 e 20 cm.

A TABELA 9 indica os resultados obtidos nos ensaios com o material da fundação, relacionando as alturas de queda livre ( $h$ ), índice de vazios ( $e$ ) e massas específicas aparentes ( $\gamma_s$ ).

TABELA 9 – CALIBRAÇÃO DA ALTURA DE QUEDA DO MATERIAL DE FUNDAÇÃO

FUNDAÇÃO		
$h$ (cm)	$e$	$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )
5	0,664	1,596
10	0,646	1,614
12	0,641	1,618
20	0,634	1,625

É possível perceber que o número de vazios diminui com o aumento da altura de queda, devido a maior compactação do solo. O peso específico aparente aumenta pelo maior número de grãos em um mesmo volume. Com base nos resultados, o valor adotado para deposição deste material foi de 12 cm, pois os valores de peso específico apresentam pouca variação e também pela utilização deste valor nos ensaios de Araújo (2013).

Os resultados obtidos nos ensaios com o material de aterro estão representados na TABELA 10.

TABELA 10 – CALIBRAÇÃO DA ALTURA DE QUEDA DO MATERIAL DE ATERRO

<b>ATERRO</b>		
<b>h (cm)</b>	<b>e</b>	<b><math>\gamma_s</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>
5	0,750	1,510
10	0,727	1,531
12	0,722	1,535
20	0,713	1,543

Como para a fundação, o material de aterro com maior altura de queda, também apresentou uma pequena diminuição do índice de vazios e um aumento do peso específico. Para padronização dos ensaios, foi adotada a altura de queda de 12 cm.

#### 4.1.2. Caracterização Geotécnica

Para caracterização dos materiais de aterro, fundação e filtro foram realizados ensaios de caracterização geotécnica. Foram obtidos os valores de permeabilidade, densidade real do solo e compacidade relativa, além da curva granulométrica.

#### 4.1.2.1. Permeabilidade

A condutividade hidráulica dos materiais utilizados no modelo reduzido foi determinada pela calibração da altura de disposição nos permeômetros, calibrada pela “chuva de areia”, com valor de 12 cm. Primeiramente, foi reservado o material arenoso necessário para a construção do aterro e da barragem. Uma amostra deste material foi submetida ao ensaio de permeabilidade de carga constante, obtendo permeabilidade de 0,0001 m/s.

Na semelhança com a UHE Salto, utilizada por Pierozan (2014), a permeabilidade da fundação deveria ser 50 vezes maior que do aterro. Segundo a equação (2), com a determinação do coeficiente de permeabilidade do material de fundação, a permeabilidade do material do aterro estimada foi de  $2,0 \times 10^{-6}$  m/s. Para atingir essa condutibilidade hidráulica foram realizadas adições de material argiloso, tornando o material menos permeável.

$$\frac{k_{FUNDACÃO}}{k_{ATERRO}} = \frac{0,0001}{0,000002} = 50 \quad (2)$$

Foi realizado o ensaio de permeabilidade para o material utilizado como filtro e dreno, obtendo um valor de 0,05 m/s. Este valor indica uma condutibilidade hidráulica 500 vezes maior que o material da fundação, se apresentando adequado para compor o modelo, devido a sua alta permeabilidade. Os resultados obtidos para podem ser observados na TABELA 11.

TABELA 11 – COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE

<b>MATERIAL</b>	<b>PERMEABILIDADE (m/s)</b>
Filtro vertical e Tapete horizontal	$5,0 \times 10^{-2}$
Fundação	$1,0 \times 10^{-4}$
Aterro	$2,0 \times 10^{-6}$

#### 4.1.2.2. Análise Granulométrica

Os ensaios realizados na determinação das dimensões das partículas dos materiais foram o peneiramento grosso e fino, e o material passante na peneira nº 200 foi submetido ao ensaio de sedimentação.

Os materiais de aterro e fundação apresentaram grande quantidade de material fino, e como estes influenciam o comportamento do fluxo, foi necessária a realização dos ensaios de sedimentação para melhor caracterização.

As curvas granulométricas do material da fundação e do aterro são apresentadas na FIGURA 23 e na FIGURA 24, respectivamente. É possível perceber maior quantidade de finos no material do aterro, devido à adição de material argiloso para diminuir a permeabilidade do mesmo.

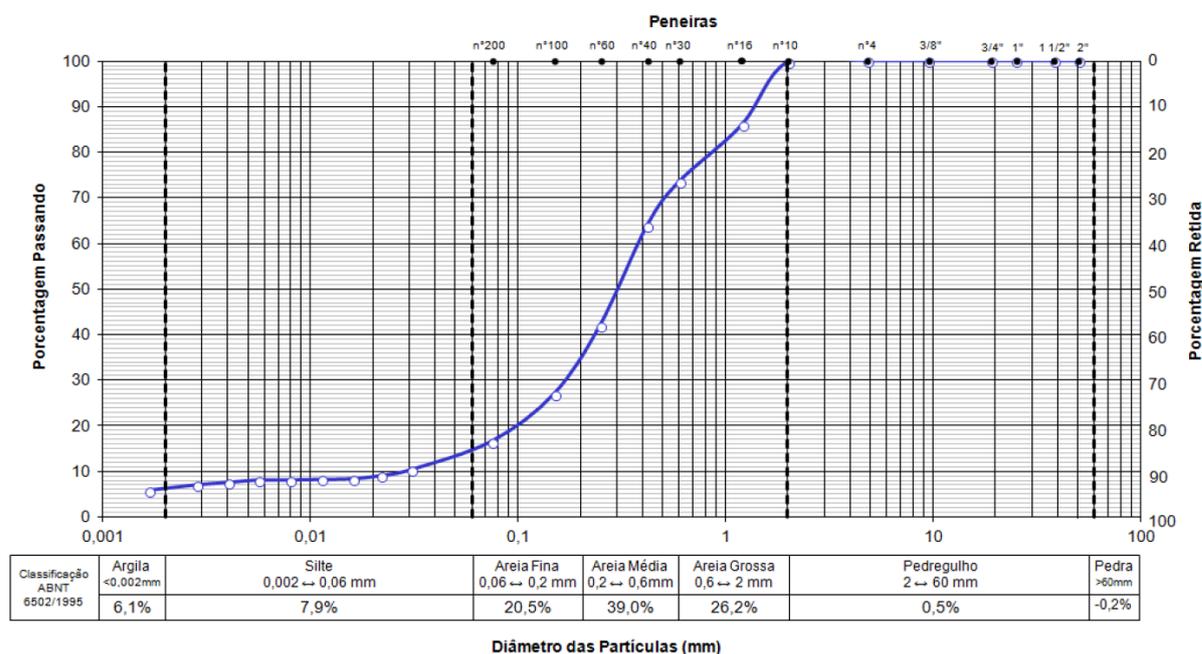


FIGURA 23 – CURVA GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL DA FUNDAÇÃO

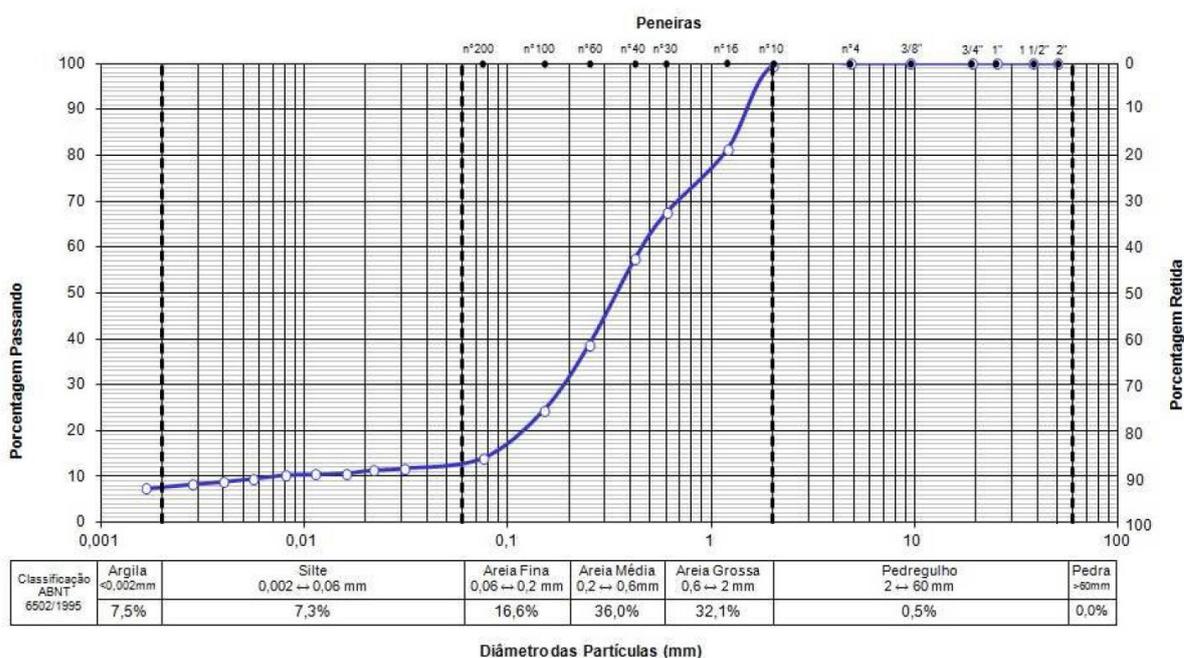


FIGURA 24 – CURVA GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL DE ATERRO

O material do filtro e tapete drenante foi submetido apenas aos ensaios de peneiramento, pois apresentou uma quantidade de finos desprezível. A curva granulométrica deste material pode ser observada na FIGURA 25.

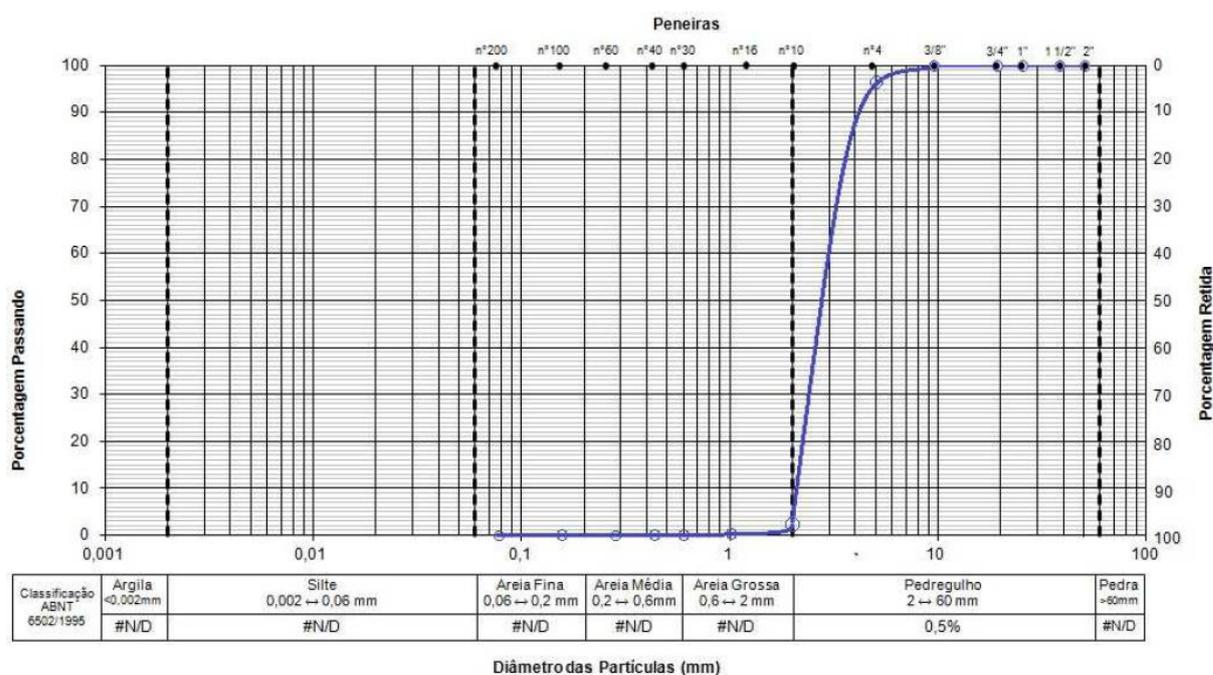


FIGURA 25 – CURVA GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL GRANULAR

O material granular pode ser classificado como pedregulho, pois aproximadamente 98% das suas partículas têm diâmetro entre 2 e 4,8 mm.

#### 4.1.2.3. Densidade Real do Solo e Compacidade

A massa específica foi obtida com o ensaio do picnômetro, obtendo os valores da densidade real do material de fundação e aterro. Os resultados estão na TABELA 12.

TABELA 12 – DENSIDADE REAL DOS SOLOS

<b>MATERIAL</b>	<b>DENSIDADE REAL</b>
Fundação	2,656
Aterro	2,643

O índice de vazios máximos indica o estado mais fofo do material, enquanto o índice de vazios mínimo representa o estado mais compacto. Para a obtenção do índice de vazios natural, foi considerada a deposição do mesmo com altura de queda calibrada de 12 cm. Os valores obtidos nos ensaios podem ser observados na TABELA 13.

TABELA 13 – COMPACIDADE RELATIVA DOS SOLOS

<b>MATERIAL</b>	$e_{máx}$	$e_{mín}$	$e$	<b>CR</b>
Fundação	0,672	0,484	0,641	16,5%
Aterro	0,762	0,535	0,722	17,6%

O material de aterro apresentou uma compacidade relativa pouco mais de 1% maior que o material da fundação, devido a adição de material argiloso na sua composição, tornando pouco mais compacto.

#### 4.1.3. Leituras Realizadas no Modelo Reduzido

A primeira simulação realizada no modelo foi com a utilização da geomembrana devido à facilidade construtiva, posteriormente a simulação com rasgos e após a retirada da parafina, a avaliação sem tratamento de fundação. Antes da leitura das cargas foi necessário retirar do ar dos tubos por sucção e aguardar a estabilização do fluxo do reservatório. A estabilização se deu com a equivalência do volume de água colocado no reservatório com o volume recolhido pelo sistema de drenagem.

Os valores obtidos estão demonstrados na TABELA 14.

TABELA 14 – LEITURAS DOS PIEZÔMETROS DO MODELO REDUZIDO

<b>PIEZÔMETRO</b>	<b>x (cm)</b>	<b>y (cm)</b>	<b>COM GEOMEMBRANA (cm)</b>	<b>GEOMEMBRANA COM RASGOS (cm)</b>	<b>SEM GEOMEMBRANA (cm)</b>
PF-1	16,0	6,0	4,0	4,0	4,0
PF-2	25,8	6,0	4,2	4,4	4,5
PF-3	49,8	9,0	3,0	3,2	3,2
PF-4	49,8	6,0	6,3	6,3	6,3
PF-5	49,8	1,0	11,2	11,3	11,3
PF-6	67,3	9,0	3,7	3,9	4,0
PF-7	67,3	6,0	6,7	6,8	7,0
PF-8	67,3	1,0	12,2	12,6	12,8
PF-9	85,0	6,0	10,5	12,4	12,7
PF-10	97,8	6,0	13,3	16,5	16,9
PF-11	110,5	6,0	15,1	20,6	21,2
PF-12	130,5	6,0	18,8	24,9	26,1
PF-13	145,5	6,0	20,3	25,3	26,7
PF-14	160,5	6,0	21,7	26,1	26,9
PF-15	175,2	6,0	23,6	26,3	27,0
PF-16	189,9	6,0	24,4	26,4	26,9
PF-17	204,6	6,0	26,1	26,9	27,0
PF-18	219,3	6,0	26,9	27,0	27,0
PA-1	85,0	24,8	3,2	3,9	4,0
PA-2	85,0	12,0	4,1	6,3	6,8
PA-3	97,8	18,4	8,1	10,0	10,5
PA-4	110,5	12,0	9,1	15,0	16,7

A leitura dos piezômetros que estão presentes na fundação demonstrou que a utilização da geomembrana reduz as cargas de pressão quando comparados com a simulação sem tratamento, principalmente os piezômetros sob o aterro de montante e na fundação sob a geomembrana. O PF-11 e o PF-12 foram os que tiveram maior variação, com aproximadamente 28% de redução da poropressão. Esta variação pode ser observada na FIGURA 26. Os piezômetros PF-1, PF-2 e PF-4 apresentaram pequenas variações, não sendo influenciados pelo uso da geomembrana.

Nos pontos localizados no aterro de montante e os de interface do solo de aterro com fundação, também houve diminuição das cargas em função do tratamento. A simulação com rasgos na geomembrana mostrou pouca redução de poropressão, apresentando comportamento semelhante à solução sem tratamento.

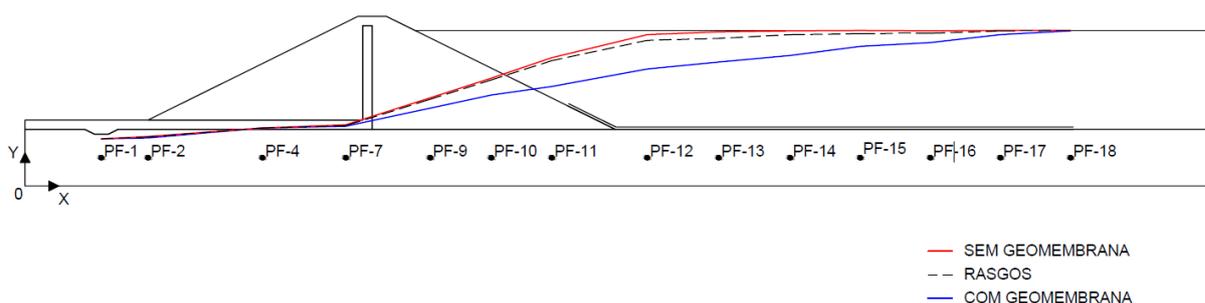


FIGURA 26 – CARGAS DE PRESSÃO NOS PIEZÔMETROS DA FUNDAÇÃO

As vazões de percolação do modelo reduzido foram obtidas com o fluxo de água na barragem estabilizado. Os valores são apresentados na TABELA 15.

TABELA 15 – LEITURA DA VAZÃO DE PERCOLAÇÃO NO MODELO REDUZIDO

SIMULAÇÃO	VAZÃO DE PERCOLAÇÃO (m <sup>3</sup> /s.m)
Com Geomembrana	2,13 x 10 <sup>-6</sup>
Geomembrana com Rasgos	3,62 x 10 <sup>-6</sup>
Sem Geomembrana	3,94 x 10 <sup>-6</sup>

A vazão resultante com uso da geomembrana se apresentou 46% menor, quando comparada com a solução sem tratamento de fundação. A presença de rasgos na geomembrana reduziu em apenas 8% a vazão que ocorre sem o tratamento.

## 4.2. EXPERIMENTO EM MODELO NUMÉRICO

Para boa representatividade do desempenho da geomembrana no modelo de fluxo, foram utilizados parâmetros já conhecidos do modelo reduzido para calibração e validação do modelo numérico. Os parâmetros utilizados, bem como as simulações são apresentados a seguir.

### 4.2.1. Parâmetros Utilizados

Para as análises do modelo numérico, a geometria adotada foi a mesma do modelo físico, bem como os coeficientes de permeabilidade, que foram obtidos dos ensaios laboratoriais realizados com os materiais utilizados no modelo reduzido. Os parâmetros adotados são apresentados na TABELA 16.

TABELA 16 – PARÂMETROS ADOTADOS NO MODELO NUMÉRICO

<b>PARÂMETROS</b>	
Altura da Barragem	24 cm
Inclinação dos Taludes	1V:2H
Largura da Crista	6 cm
Espessura da Fundação	12 cm
Permeabilidade do Material de Filtro	$5,0 \times 10^{-2}$ m/s
Permeabilidade do Material da Fundação	$1,0 \times 10^{-4}$ m/s
Permeabilidade do Material Aterro	$2,0 \times 10^{-6}$ m/s

#### 4.2.2. Calibração e Validação do Modelo Numérico

Na calibração e validação do modelo numérico foram utilizados os valores obtidos através do experimento em modelo reduzido para verificação da semelhança dos dados com a análise numérica. Foram realizadas comparações dos valores de vazão e poropressão para as condições de contorno estabelecidas: ausência de tratamento de fundação e com a aplicação da geomembrana.

##### 4.2.2.1. Vazão de Percolação

Para comparação das vazões foi utilizado o *software* SEEP/W com os parâmetros já apresentados. Os valores obtidos estão expostos na TABELA 17.

TABELA 17 – VALORES DE VAZÃO DO MODELO REDUZIDO E NUMÉRICO

SIMULAÇÃO	VAZÃO DE PERCOLAÇÃO (m <sup>3</sup> /s.m)	
	MODELO REDUZIDO	MODELO NUMÉRICO
Sem Geomembrana	3,94 x 10-6	3,85 x 10-6
Com Geomembrana	2,13 x 10-6	2,43 x 10-6

A vazão encontrada no modelo numérico apresentou um valor muito próximo ao encontrado no modelo reduzido, aproximadamente 2,3% menor. A simulação numérica com a instalação da geomembrana apresentou uma vazão 14% maior comparada com a vazão do modelo físico, podendo ser justificada pela análise conservadora da modelagem numérica. Enquanto os ensaios realizados em laboratório apresentaram uma redução de 46% da vazão com o uso do tratamento de fundação, o modelador de fluxo proporcionou um decréscimo de 37%.

##### 4.2.2.2. Poropressão

A poropressão é a pressão que o fluido exerce nos poros do solo, também conhecida por carga piezométrica. As simulações realizadas no modelador de fluxo podem ser observadas na FIGURA 27 e FIGURA 28.

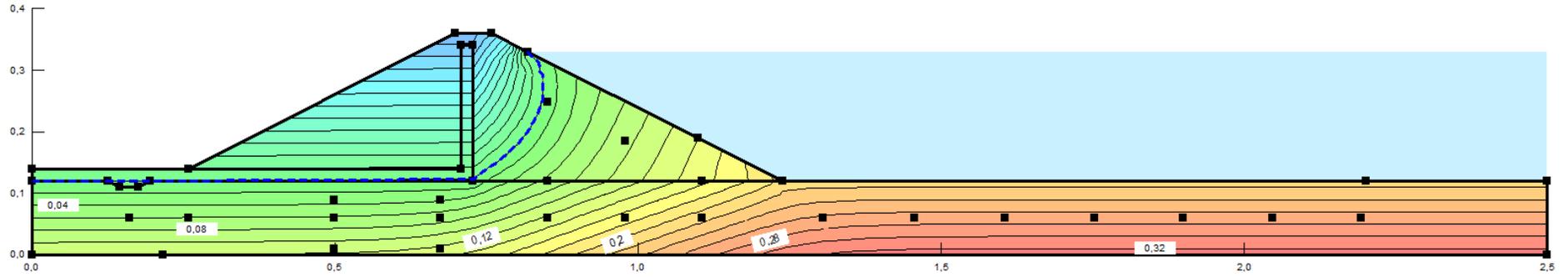


FIGURA 27 – MODELAGEM NUMÉRICA SEM UTILIZAÇÃO DE GEOMEMBRANA

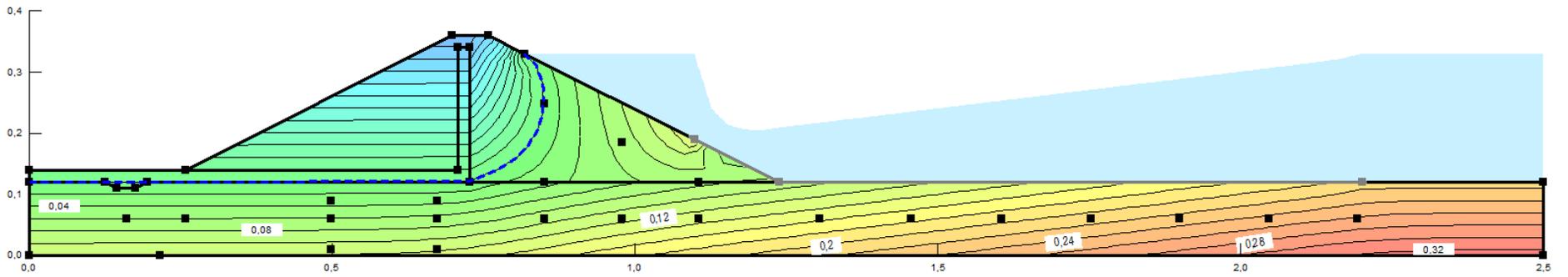


FIGURA 28 – MODELAGEM NUMÉRICA COM UTILIZAÇÃO DE GEOMEMBRANA

Pela coloração da modelagem numérica é possível perceber a redução das cargas que ocorrem na fundação e no espaldar de montante, quando aplicado o tratamento de impermeabilização com a geomembrana.

A comparação das cargas de poropressão obtidas no modelo numérico e no modelo reduzido, sem a aplicação da geomembrana, é apresentada na TABELA 18.

TABELA 18 – RESULTADOS OBTIDOS SEM UTILIZAÇÃO DA GEOMEMBRANA

<b>SIMULAÇÃO SEM GEOMEMBRANA</b>				
<b>PIEZÔMETRO</b>	<b>x (cm)</b>	<b>y (cm)</b>	<b>MODELO REDUZIDO (cm)</b>	<b>MODELO NUMÉRICO (cm)</b>
PF-1	16,0	6,0	4,0	6,02
PF-2	25,8	6,0	4,5	6,06
PF-3	49,8	9,0	3,2	3,21
PF-4	49,8	6,0	6,3	6,25
PF-5	49,8	1,0	11,3	11,29
PF-6	67,3	9,0	4,0	3,74
PF-7	67,3	6,0	7,0	7,14
PF-8	67,3	1,0	12,8	12,43
PF-9	85,0	6,0	12,7	12,39
PF-10	97,8	6,0	16,9	16,93
PF-11	110,5	6,0	21,2	21,25
PF-12	130,5	6,0	26,1	26,34
PF-13	145,5	6,0	26,7	26,91
PF-14	160,5	6,0	26,9	26,16
PF-15	175,2	6,0	27,0	26,98
PF-16	189,9	6,0	26,9	26,99
PF-17	204,6	6,0	27,0	26,99
PF-18	219,3	6,0	27,0	27,00
PA-1	85,0	24,8	4,0	0,97
PA-2	85,0	12,0	6,8	6,40
PA-3	97,8	18,4	10,5	9,40
PA-4	110,5	12,0	16,7	15,35

Os piezômetros instalados na fundação, a jusante da barragem (PF-01 e PF-02) apresentaram uma pequena variação, isto ocorre pelas condições de contorno de saída da água no modelo numérico. Os demais piezômetros da fundação obtiveram resultados semelhantes ao modelo reduzido entre o PF-13 e o PF-18 as cargas se apresentaram praticamente iguais.

O piezômetro PA-1 que está localizado no aterro apresentou uma diferença de medição devido à proximidade da linha freática. Os demais pontos que estão no aterro obtiveram um comportamento próximo ao modelo físico.

Foi realizado um teste de correlação entre os valores do modelo numérico e modelo reduzido que resultou em um valor de 99,5%, o que indica uma correlação muito forte entre as variáveis.

Os resultados obtidos no modelo reduzido com a utilização da geomembrana, bem como os valores do modelo numérico são expostos na TABELA 19.

TABELA 19 – RESULTADOS OBTIDOS COM UTILIZAÇÃO DA GEOMEMBRANA

<b>SIMULAÇÃO COM GEOMEMBRANA</b>				
<b>PIEZÔMETRO</b>	<b>x (cm)</b>	<b>y (cm)</b>	<b>MODELO REDUZIDO (cm)</b>	<b>MODELO NUMÉRICO (cm)</b>
PF-1	16,0	6,0	4,0	6,01
PF-2	25,8	6,0	4,2	6,03
PF-3	49,8	9,0	3,0	3,11
PF-4	49,8	6,0	6,3	6,13
PF-5	49,8	1,0	11,2	11,15
PF-6	67,3	9,0	3,7	3,38
PF-7	67,3	6,0	6,7	6,58
PF-8	67,3	1,0	12,2	11,73
PF-9	85,0	6,0	10,5	9,41
PF-10	97,8	6,0	13,3	11,38
PF-11	110,5	6,0	15,1	13,20
PF-12	130,5	6,0	18,8	15,62
PF-13	145,5	6,0	20,3	17,46
PF-14	160,5	6,0	21,7	19,27
PF-15	175,2	6,0	23,6	21,04
PF-16	189,9	6,0	24,4	22,81
PF-17	204,6	6,0	26,1	24,58
PF-18	219,3	6,0	26,9	26,29
PA-1	85,0	24,8	3,2	0,20
PA-2	85,0	12,0	4,1	3,26
PA-3	97,8	18,4	8,1	6,88
PA-4	110,5	12,0	9,1	7,31

Os resultados obtidos pelo modelo numérico se apresentaram semelhantes ao do modelo reduzido, na maioria dos pontos possuem valores inferiores. O piezômetro do aterro PA-1 apresentou bastante variação devido à posição da linha freática desenhada pelo programa. O teste de correlação apresentou um valor de 98,7%, indicando alto grau de correlação entre as variáveis, porém menor que na comparação dos resultados sem o tratamento.

Em comparação com os valores obtidos sem a utilização da geomembrana, pode-se afirmar que os piezômetros instalados na fundação sob o tratamento e sob o espaldar de montante obtiveram reduções das cargas de pressão com a utilização da manta impermeável. Nos piezômetros PF-11, PF-12 e PF-13 ocorreu a maior variação de carga, com redução da poropressão de 38%, 41% e 35%, respectivamente.

Os pontos localizados no aterro de montante também apresentaram uma variação significativa, principalmente o PA-2 e PA-4 que estão na interface do solo de fundação e aterro, com diminuição de 49% e 52%, respectivamente, das cargas de pressão.

Os piezômetros que estão sob o espaldar de jusante, próximos ao filtro apresentaram pequenas reduções de pressão, entre 6 a 10%, no entanto os PF-1, PF-2, PF-3, PF-4 e PF-5 não demonstraram grande variação, sendo pouco influenciados pelo tratamento.

#### 4.2.2.3. Considerações

Os resultados obtidos no modelo reduzido se apresentaram semelhantes aos do modelo numérico. A comparação entre os resultados indica que o uso do tratamento de fundação com tapete impermeável reduz as vazões de percolação, gerando menos fluxo na fundação e na barragem. As cargas de pressão reduziram principalmente sob o espaldar de montante e na fundação sob a geomembrana.

Devido à grande semelhança dos resultados entre modelo numérico e físico foi confirmada a validade do mesmo. Para o modelo de fluxo foi utilizada a mesma permeabilidade obtida em laboratório com os materiais do modelo reduzido e mantida a anisotropia dos materiais igual a um.

### 4.2.3. Análises Paramétricas

Com a validação do modelo numérico é possível analisar o comportamento e desempenho da geomembrana em situações diversas. Para isso, foram realizadas simulações com a variação da posição da geomembrana na seção, variação do coeficiente de permeabilidade do material da fundação e análise de rasgos na geomembrana.

#### 4.2.3.1. Variação da Posição da Geomembrana

A posição da geomembrana foi alterada para avaliar a alteração da vazão e do traçado da linha freática na seção. Foi avaliada a geomembrana sobre a fundação, sobre a fundação e estendida a meia face de montante, sobre a face de montante e simultaneamente sobre a face de montante e fundação. Estas vazões também foram comparadas com as simulações com o sem o tratamento de fundação, já realizadas anteriormente. As vazões obtidas estão representadas na TABELA 20.

TABELA 20 – VAZÕES DAS SIMULAÇÕES DA VARIAÇÃO DE POSIÇÃO DA GEOMEMBRANA

<b>SIMULAÇÃO</b>	<b>VAZÃO (m<sup>3</sup>/s.m)</b>
<i>Sem tratamento de fundação</i>	<i>3,85 x 10-6</i>
<i>Com tratamento de fundação</i>	<i>2,43 x 10-6</i>
Sobre a fundação	3,58 x 10-6
Sobre a fundação e estendida a meia face de montante	2,27 x 10-6
Sobre a face de montante	3,16 x 10-6
Sobre a face de montante e fundação	1,41 x 10-6

Nestas análises realizadas foi possível perceber que quando a geomembrana é instalada sobre a fundação, a vazão de percolação reduz apenas 7% em relação à situação sem tratamento. Com a extensão da geomembrana em um terço e a

metade da face de montante, as vazões diminuem 32% e 36% respectivamente, comparadas com a instalação somente na fundação.

A vazão percolada na barragem com o tratamento somente na face de montante reduz 18% da vazão sem tratamento e também é 12% menor de quando utilizada somente na fundação.

A utilização na face de montante e na fundação simultaneamente reduz em 63% da vazão comparada sem tratamento, é 60% menor do que a vazão com o tratamento somente na fundação e 55% menor que da utilização somente sobre a face de montante. Este tratamento foi o que apresentou melhor desempenho.

Para melhores avaliações também foram verificadas as posições das linhas freáticas para as 4 soluções, como indica a FIGURA 29.

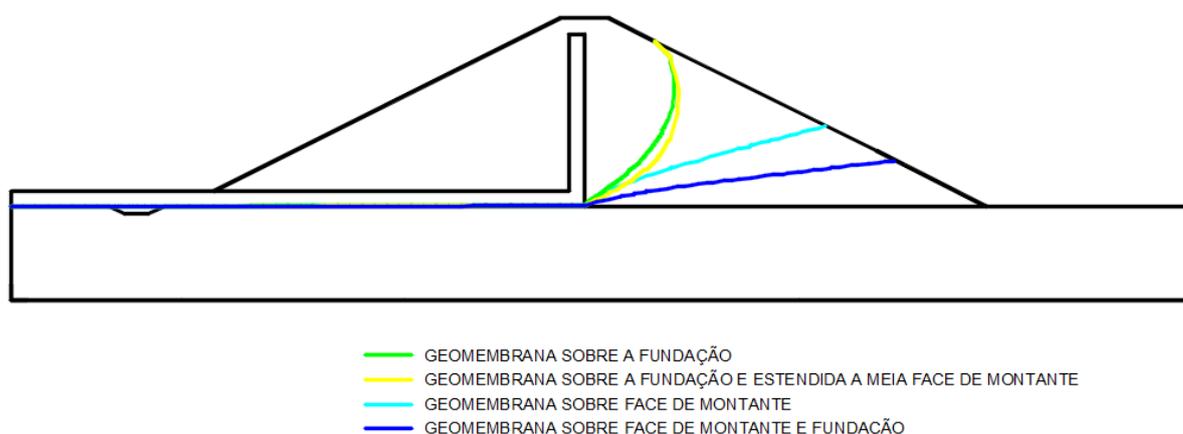


FIGURA 29 – LINHAS FREÁTICAS DAS VARIAÇÕES DE POSIÇÃO DA GEOMEMBRANA

As linhas freáticas indicam onde a poropressão é igual a zero. Pode-se perceber que a solução com geomembrana sobre a fundação e sobre a fundação e estendida a meia face de montante apresentaram linhas freáticas muito semelhantes e indicando maior poropressão no aterro de montante. As cargas de pressão nas simulações com a geomembrana presente na face de montante se apresentaram bem inferiores devido à perda de carga que ocorre no espaldar de montante por não haver fluxo.

O tratamento com a geomembrana na fundação e estendida a meia face de montante gera um maior caminho de percolação da água, por isso, mesmo com maiores cargas de poropressão no aterro de montante, esta simulação apresentou uma vazão 28% menor, quando comparada com a simulação de somente a face impermeabilizada. Isto ocorre, pois quando somente a face está com a geomembrana existe uma área muito grande de infiltração da água pela fundação.

Para melhor avaliação das cargas foram analisadas as seções com as pressões totais que ocorrem em cada situação, como apresentado na FIGURA 30.

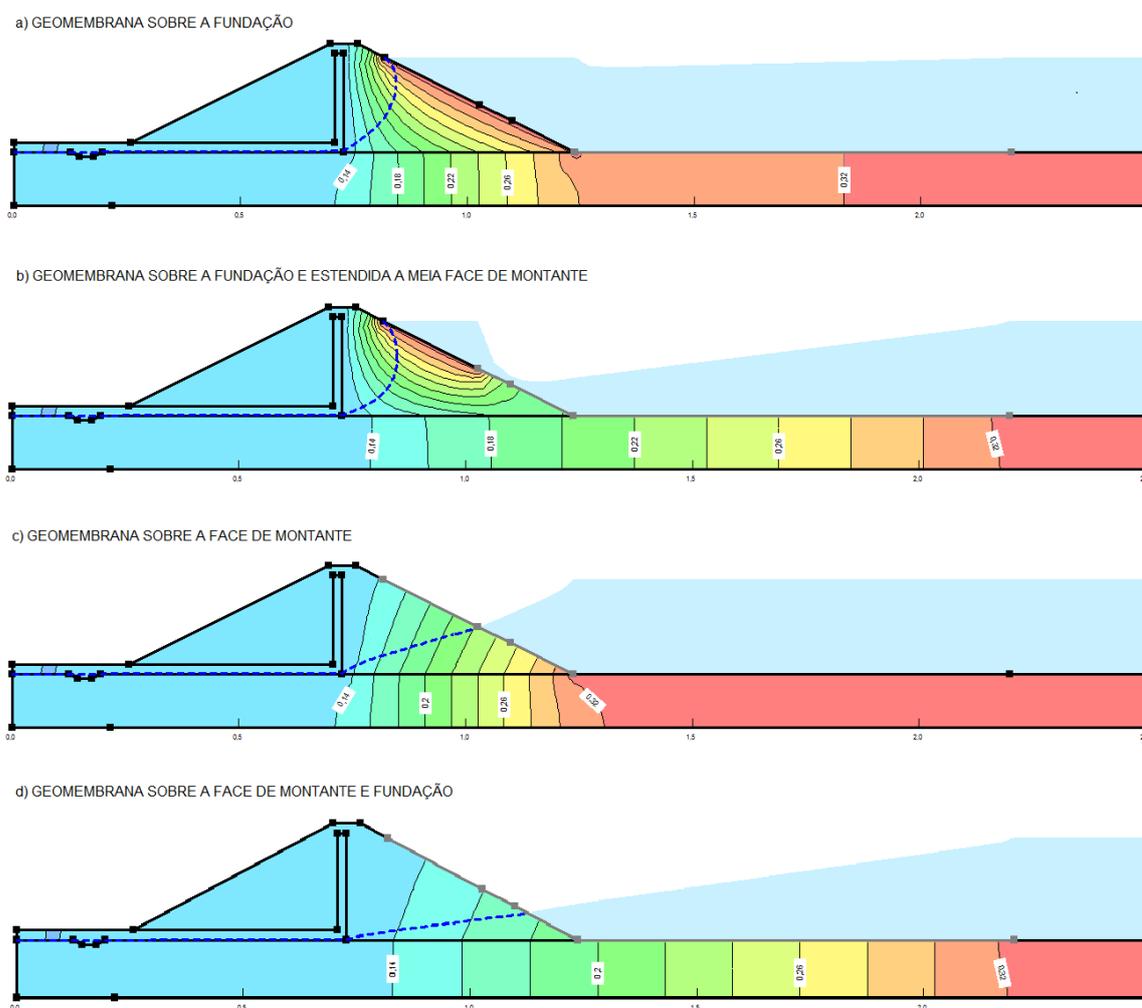


FIGURA 30 – CARGAS TOTAIS DAS VARIAÇÕES DE POSIÇÃO DA GEOMEMBRANA

As cargas de pressão variam de acordo com a posição da geomembrana. Com as análises obtidas pelo *software* é possível perceber que as soluções com a geomembrana somente sobre a fundação e somente sobre a face de montante não obtiveram perdas de cargas e diminuição da vazão significativa, como as demais soluções.

As opções com a geomembrana sobre a fundação resultam em um maior caminho de percolação do fluxo, porém na simulação do tratamento somente na fundação não se mostrou eficaz. Isto ocorre porque o fluxo que percola pela face de montante gera cargas de pressão no aterro e na fundação. Quando a solução é alterada e estendida a meia face, a vazão reduz 36%, as cargas totais reduzem próximo a manta e a fundação, e diminuem consideravelmente na fundação. Por isso percebe-se a necessidade da extensão da manta sobre a face de montante.

Os resultados indicam que a melhor solução é a instalação da geomembrana na fundação, porém a face de montante também deve ser impermeabilizada parcialmente ou inteira, resultando em menores cargas de pressão e menores vazões.

#### 4.2.3.2. Variação da Permeabilidade do Material da Fundação

O desempenho do tratamento foi avaliado com a variação da permeabilidade da fundação, com as posições verificadas no item 4.2.3.1. O coeficiente de permeabilidade do aterro foi mantido constante no valor de  $2,0 \times 10^{-6}$  m/s. Para cada simulação foi obtida a vazão e as linhas freáticas.

##### A. *Geomembrana sobre a fundação*

No tratamento com geomembrana somente sobre a fundação foram obtidas as vazões presentes na TABELA 21.

TABELA 21 – VARIACÃO DA VAZÃO PARA GEOMEMBRANA SOBRE A FUNDAÇÃO

GEOMEMBRANA SOBRE A FUNDAÇÃO	
$k_{FUNDAÇÃO}$ (m/s)	VAZÃO (m <sup>3</sup> /s.m)
1,0 x 10 <sup>-4</sup>	3,58 x 10 <sup>-6</sup>
1,0 x 10 <sup>-6</sup>	6,56 x 10 <sup>-7</sup>
1,0 x 10 <sup>-8</sup>	6,14 x 10 <sup>-7</sup>

A permeabilidade do solo da fundação foi reduzida 100 e 10.000 vezes, e com isso as vazões diminuíram 82% e 83%, respectivamente. A redução da vazão, com a permeabilidade variando de 1,0 x 10<sup>-6</sup> m/s até 1,0 x 10<sup>-8</sup> m/s, foi de apenas 6,4%. Esta pequena variação indica que quando a permeabilidade já está muito baixa na fundação, com a existência do tratamento que aumenta o caminho de percolação do fluxo, a maioria da vazão que percola pela barragem provem do aterro, que nestas situações apresenta uma permeabilidade maior que a fundação.

Também foi avaliada a linha freática para as três simulações, como mostra a FIGURA 31.

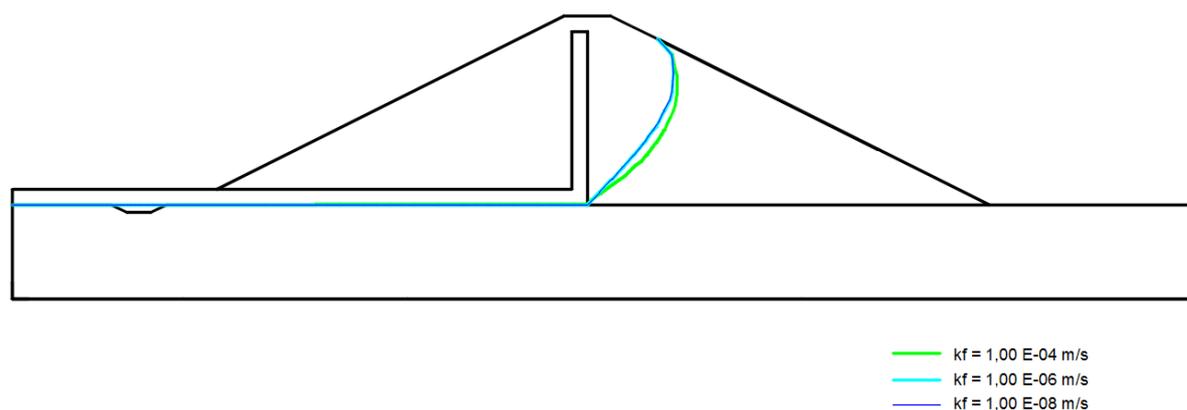


FIGURA 31 – LINHAS FREÁTICAS PARA SIMULAÇÃO DA GEOMEMBRANA SOBRE A FUNDAÇÃO

A linha freática na simulação da permeabilidade de  $1,0 \times 10^{-4}$  se apresentou um pouco abaixo das demais, indicando menor poropressão no aterro de montante. Já as linhas freáticas para permeabilidade de  $1,0 \times 10^{-6}$  m/s e  $1,0 \times 10^{-8}$  m/s, foram muito semelhantes. Esta proximidade ocorre devido ao material do aterro não sofrer alterações de permeabilidade e o tratamento estar localizado somente na fundação.

### *B. Geomembrana sobre a fundação e estendida a meia face de montante*

Para esta simulação da variação de posição da geomembrana foram encontrados os valores da TABELA 22.

TABELA 22 – VARIÇÃO DA VAZÃO PARA GEOMEMBRANA SOBRE A FUNDAÇÃO E ESTENDIDA A MEIA FACE DE MONTANTE

<b>GEOMEMBRANA SOBRE A FUNDAÇÃO E ESTENDIDA A MEIA FACE DE MONTANTE</b>	
<b><math>k_{FUNDAÇÃO}</math> (m/s)</b>	<b>VAZÃO (m<sup>3</sup>/s.m)</b>
1,0 x 10 <sup>-4</sup>	2,27 x 10 <sup>-6</sup>
1,0 x 10 <sup>-6</sup>	6,49 x 10 <sup>-7</sup>
1,0 x 10 <sup>-8</sup>	6,09 x 10 <sup>-7</sup>

Com a permeabilidade reduzida 100 vezes, a vazão diminuiu 71% e para alteração em 10.000 vezes, reduziu 73%. A redução da vazão não foi tão alta quanto na simulação com tratamento somente na fundação, pois neste caso também apresenta impermeabilização em meia face de montante, de onde provem o maior fluxo nesta situação. No entanto, na variação da permeabilidade de  $1,0 \times 10^{-6}$  m/s para  $1,0 \times 10^{-8}$  m/s, a redução foi de 6,1%, muito semelhante ao resultado obtido anteriormente, indicando que a maior parte da vazão final obtida vem do aterro. Com a diminuição da permeabilidade da fundação e com a geomembrana aumentando o caminho de percolação, o fluxo que provem da fundação é pequeno.

As linhas freáticas da seção são representadas na FIGURA 32.

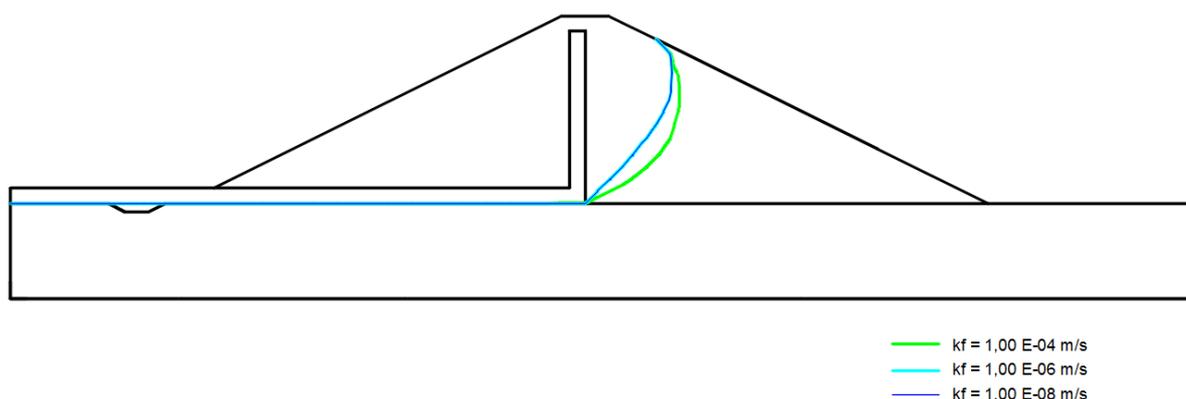


FIGURA 32 – LINHAS FREÁTICAS PARA SIMULAÇÃO DA GEOMEMBRANA SOBRE A FUNDAÇÃO E ESTENDIDA A MEIA FACE DE MONTANTE

A poropressão no talude de montante se apresentou menor para a condição de permeabilidade de  $1,0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ . Também apresentou maior sensibilidade quando comparado com as outras duas menores permeabilidades, que ficam praticamente na mesma posição.

### C. Geomembrana sobre a face de montante

Na simulação com a impermeabilização somente na face de montantes foram encontradas as vazões apresentadas na TABELA 23.

TABELA 23 – VARIAÇÃO DA VAZÃO PARA GEOMEMBRANA SOBRE A FACE DE MONTANTE

<b>GEOMEMBRANA SOBRE A FACE DE MONTANTE</b>	
$k_{\text{FUNDAÇÃO}} \text{ (m/s)}$	<b>VAZÃO (m<sup>3</sup>/s.m)</b>
$1,0 \times 10^{-4}$	$3,16 \times 10^{-6}$
$1,0 \times 10^{-6}$	$8,41 \times 10^{-8}$
$1,0 \times 10^{-8}$	$4,16 \times 10^{-8}$

As vazões obtidas para permeabilidade da fundação de  $1,0 \times 10^{-6}$  m/s e para  $1,0 \times 10^{-8}$  m/s, são respectivamente 97% e 99% menores que a vazão para  $1,0 \times 10^{-4}$  m/s. Essa alta redução da vazão, maior que nos casos anteriores, ocorre devido ao fato da permeabilidade do aterro se tornar maior que da fundação e a geomembrana na face não permite o fluxo da água. Na variação da permeabilidade de  $1,0 \times 10^{-6}$  m/s para  $1,0 \times 10^{-8}$  m/s a vazão reduz em 50%, pois todo o fluxo que percola pela barragem é proveniente da fundação.

As linhas freáticas estão representadas na FIGURA 33.

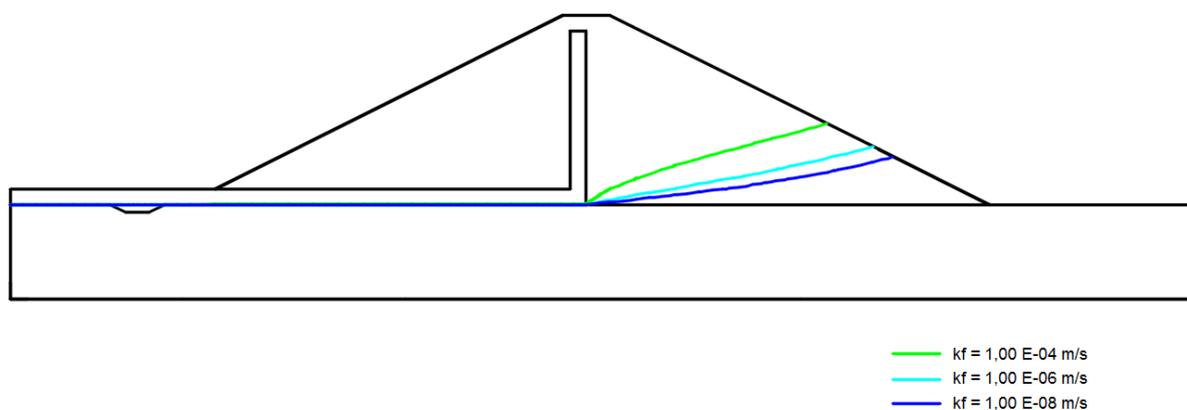


FIGURA 33 – LINHAS FREÁTICAS PARA SIMULAÇÃO DA GEOMEMBRANA SOBRE A FACE DE MONTANTE

Com a redução da permeabilidade da fundação, pode se observar que o nível da linha freática também diminui, indicando menores poropressões no aterro de montante. Esta diminuição da freática ocorre porque a vazão percolada pela fundação é menor, gerando menores poropressões. A linha freática para as permeabilidades de fundação de  $1,0 \times 10^{-6}$  m/s e  $1,0 \times 10^{-8}$  m/s estão mais próximas, pois as vazões apresentam diferença de 50%, enquanto entre  $1,0 \times 10^{-4}$  m/s e  $1,0 \times 10^{-6}$  m/s, a vazão é 94% menor.

#### D. Geomembrana sobre a face de montante e fundação

As vazões encontradas com a geomembrana sobre a face de montante e sobre a fundação estão expostas na TABELA 24.

TABELA 24 – VARIAÇÃO DA VAZÃO PARA GEOMEMBRANA SOBRE A FACE DE MONTANTE E FUNDAÇÃO

<b>GEOMEMBRANA SOBRE A FACE DE MONTANTE E FUNDAÇÃO</b>	
<b><math>k_{FUNDAÇÃO}</math> (m/s)</b>	<b>VAZÃO (m<sup>3</sup>/s.m)</b>
1,0 x 10 <sup>-4</sup>	1,41 x 10 <sup>-6</sup>
1,0 x 10 <sup>-6</sup>	1,78 x 10 <sup>-8</sup>
1,0 x 10 <sup>-8</sup>	1,96 x 10 <sup>-10</sup>

A posição da geomembrana já avaliada anteriormente apresentou o melhor desempenho para diminuição das poropressões e da vazão de percolação. Com a variação da permeabilidade da fundação, pode-se perceber a alta redução dos valores de vazão. A vazão para permeabilidade de 1,0 x 10<sup>-4</sup> m/s, se apresentou aproximadamente 80 vezes maior que para permeabilidade de 1,0 x 10<sup>-6</sup> m/s, e 7.200 vezes maior quando comparada com 1,0 x 10<sup>-8</sup> m/s.

A representação das linhas freáticas está na FIGURA 34.

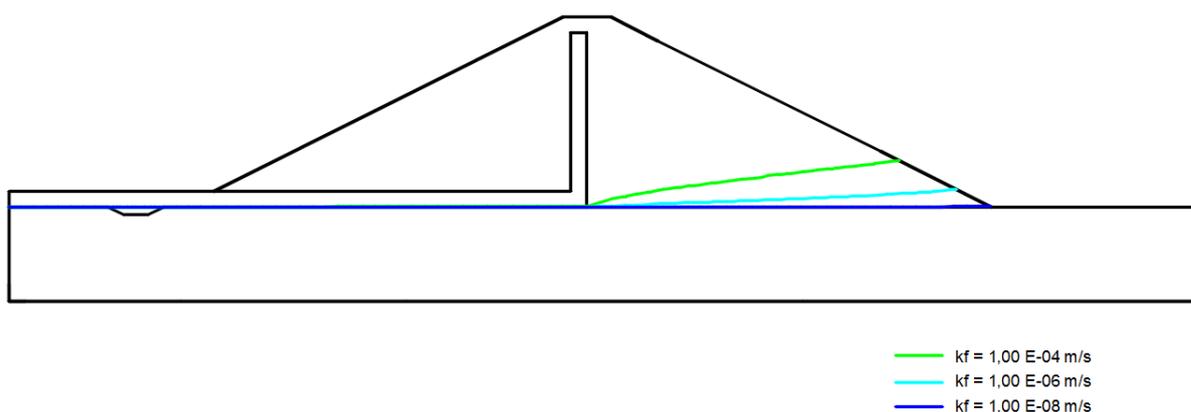


FIGURA 34 – LINHAS FREÁTICAS PARA SIMULAÇÃO DA GEOMEMBRANA SOBRE A FACE DE MONTANTE E A FUNDAÇÃO

As linhas de poropressão igual a zero se apresentam bem baixas, indicando pequenas ou nenhuma carga neutra no maciço de aterro. Para a permeabilidade de  $1,0 \times 10^{-8}$  m/s, a linha freática se encontra paralelamente a camada de fundação, representando baixíssimas cargas na fundação e nenhuma no aterro, devido à pequena vazão que flui por um grande caminho de percolação, reduzindo as cargas.

De modo geral, todas as simulações apresentaram redução das vazões com a diminuição da permeabilidade da fundação. No entanto, as simulações do tratamento somente sobre a fundação e também estendido a meia face de montante apresentaram vazões muito semelhantes quando a permeabilidade da fundação foi diminuída. Isto ocorre devido a permeabilidade do aterro ( $2,0 \times 10^{-6}$  m/s) ser maior que as da fundação ( $1,0 \times 10^{-6}$  m/s e  $1,0 \times 10^{-8}$  m/s), indicando que a maior parcela de vazão provem do aterro e a extensão da geomembrana na face de montante não é necessária.

A simulação com geomembrana sobre a face de montante se mostrou eficaz quando o material da fundação é mais impermeável, indicando que a maior parcela da vazão é proveniente do aterro. O tratamento sobre a face de montante e sobre a fundação obteve alta redução das vazões com a diminuição da permeabilidade do material da fundação.

#### 4.2.3.3. Avaliação dos Rasgos

A simulação com rasgos foi avaliada em duas etapas, primeiramente ocorreu a comparação entre as medições de poropressão do modelo reduzido com o modelo numérico. Os rasgos longitudinais representaram as emendase foram simulados com 6 cm de comprimento. Foi considerado que 50% das emendas estavam comprometidas, totalizando 6 rasgos de mesma dimensão na geomembrana sobre a fundação, iniciando a contagem à 6 cm do pé do talude.

Os resultados obtidos pela leitura nos piezômetros do modelo reduzido e no modelo numérico estão apresentados na TABELA 25.

TABELA 25 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA GEOMEMBRANA COM RAGOS

<b>SIMULAÇÃO COM GEOMEMBRANA COM RAGOS</b>				
<b>PIEZÔMETRO</b>	<b>x (cm)</b>	<b>y (cm)</b>	<b>MODELO REDUZIDO (cm)</b>	<b>MODELO NUMÉRICO (cm)</b>
PF-1	16,0	6,0	4,0	6,02
PF-2	25,8	6,0	4,2	6,06
PF-3	49,8	9,0	3,0	3,20
PF-4	49,8	6,0	6,3	6,23
PF-5	49,8	1,0	11,2	11,26
PF-6	67,3	9,0	3,7	3,65
PF-7	67,3	6,0	6,7	7,03
PF-8	67,3	1,0	12,2	12,27
PF-9	85,0	6,0	10,5	11,74
PF-10	97,8	6,0	13,3	15,81
PF-11	110,5	6,0	15,1	19,63
PF-12	130,5	6,0	18,8	25,37
PF-13	145,5	6,0	20,3	25,88
PF-14	160,5	6,0	21,7	25,95
PF-15	175,2	6,0	23,6	26,43
PF-16	189,9	6,0	24,4	26,69
PF-17	204,6	6,0	26,1	26,98
PF-18	219,3	6,0	26,9	26,99
PA-1	85,0	24,8	3,2	0,90
PA-2	85,0	12,0	4,1	5,75
PA-3	97,8	18,4	8,1	8,87
PA-4	110,5	12,0	9,1	13,83
<b>VAZÃO (m³/s.m)</b>			3,62 x 10-6	3,71 x 10-6

Os dados obtidos pelo modelo numérico foram retirados da seção apresentada na FIGURA 35.

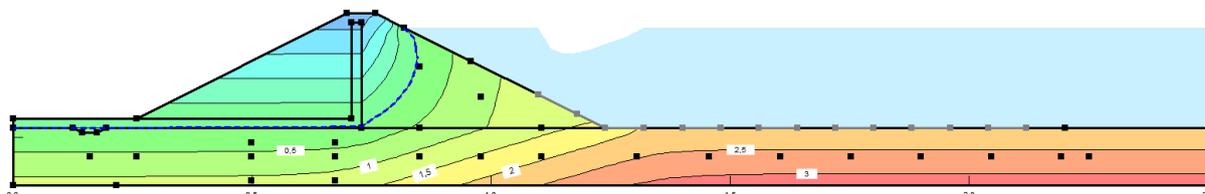


FIGURA 35 – MEDIÇÃO DE POROPRESSÃO NA SIMULAÇÃO COM RASGOS

O modelo numérico apresentou nos piezômetros instalados na fundação sob a geomembrana, valores de poropressão superiores aos obtidos pelo modelo físico, indicando que a geomembrana rasgada não influenciou na diminuição das cargas neutras, se assemelhando com os valores obtidos sem nenhum tratamento.

Os piezômetros do aterro também apresentaram pequenas variações, com cargas inferiores no modelo reduzido, principalmente no PA-4, com variação de mais de 4 cm de carga. Os aterros na fundação sob o espaldar de jusantes não apresentaram grandes variações.

Mesmo com a diferença da poropressão encontrada na simulação a vazão do modelo reduzido se apresentou bem semelhante a do modelo numérico, com variação de 2,4%.

Na segunda etapa, a seção foi avaliada para um rasgo no meio da face de montante e a 25 cm do pé do talude, para duas permeabilidades diferentes da fundação ( $1,0 \times 10^{-4}$  m/s e  $1,0 \times 10^{-6}$  m/s). Também foram comparados com as vazões obtidas para as duas permeabilidades na simulação de geomembrana sobre a face de montante e fundação.

Os resultados obtidos presentes estão na TABELA 26.

TABELA 26 – VARIAÇÃO DA VAZÃO PARA SIMULAÇÃO DE RASGOS

SIMULAÇÃO	VAZÃO (m <sup>3</sup> /s.m)	
	$k_F = 1,0 \times 10^{-4}$ m/s	$k_F = 1,0 \times 10^{-6}$ m/s
Geomembrana sobre a face de montante e fundação	1,41 x 10 <sup>-6</sup>	1,78 x 10 <sup>-8</sup>
Rasgo no meio da face de montante	1,81 x 10 <sup>-6</sup>	2,52 x 10 <sup>-7</sup>
Rasgo a 25 cm do pé do talude	2,29 x 10 <sup>-6</sup>	3,47 x 10 <sup>-8</sup>

O rasgo localizado no meio da face de montante apresentou para a permeabilidade da fundação de  $1,0 \times 10^{-4}$  cm/s, um aumento da vazão de 22%, enquanto para o rasgo a 25 cm do pé do talude aumentou 38%, quando comparados a solução com geomembrana na face e sobre a fundação. Como o tamanho dos rasgos é o mesmo, pode-se perceber que o rasgo na geomembrana localizada no reservatório tem maior influência no aumento da vazão, devido a permeabilidade da fundação ser maior que do aterro, permitindo maior fluxo de água.

Para a permeabilidade da fundação de  $1,0 \times 10^{-6}$  cm/s, acontece o contrário, o rasgo sobre a face de montante provocou um aumento de 93% da vazão e no rasgo sobre a fundação 49% em relação ao tratamento sem nenhum rasgo. Essa variação ocorre devido à permeabilidade do aterro ser o dobro da permeabilidade da fundação, apresentando maior fluxo pelo aterro.

Com a diminuição da permeabilidade em 100 vezes, a vazão da barragem que ocorre com o rasgo no meio da face de montante diminuiu 86%, e para o rasgo a 25 cm do pé do talude, diminuiu praticamente 100%.

#### 4.2.4. Considerações Finais

A utilização da versão estudante do software de análise de fluxo SEEP/W foi um fator limitante na precisão dos dados obtidos. O programa também considera fluxo em meios não saturados, por isso a linha freática apresentou em alguns casos uma curva e não a configuração usual na literatura. A zona não saturada fica situada

acima da região de ascensão capilar, e também apresenta fluxo, porém os poros são preenchidos por água e por ar.

Outra limitação foi a análise numérica 2D, onde em casos reais, a ocorrência de fluxo tangencial às seções transversais pode influenciar nos parâmetros estudados, sendo necessária uma análise tridimensional.

## 5. CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou o desempenho da aplicação de geomembranas em barragens de terra. A seção foi avaliada com e sem o uso do tratamento de fundação, segundo a variação das vazões e poropressões. Neste contexto, foram realizadas simulações em modelo reduzido a fim de calibrar e validar o modelo numérico.

O modelo reduzido se apresentou viável e importante para o entendimento da percolação da água na seção da barragem. Nos experimentos realizados, a utilização da geomembrana diminuiu em até 28% as cargas de pressão na fundação e espaldar de montante, além da redução em 46% da vazão, quando comparado a nenhum tratamento. A simulação com ocorrência de rasgos se mostrou semelhante a sem utilização de tratamento, a redução da vazão foi de apenas 8%.

Para calibração e validação do modelo numérico foram realizadas as mesmas análises do modelo físico, a fim de se obter resultados representativos. A vazão e as cargas de pressão dos modelos apresentaram valores muito semelhantes, confirmando a validade do modelo numérico para os mesmos parâmetros de permeabilidade do modelo físico e anisotropia igual a um.

Como no modelo reduzido, a modelagem numérica também apresentou redução das poropressões no aterro de montante e na fundação, com o uso da geomembrana. A vazão mostrou um valor 2,3% menor que a do modelo físico, sem a utilização de nenhum tratamento, e na simulação com a geomembrana a vazão foi 14% maior.

Foram realizadas análises paramétricas para analisar o desempenho do tratamento de fundação com a variação de posição da geomembrana, variação da permeabilidade do solo da fundação e ocorrência de rasgos na manta impermeável.

Quando a geomembrana é aplicada somente sobre a fundação, a vazão reduz apenas 7% comparado sem nenhum tratamento, já com sua extensão até um terço e metade da face de montante as vazões reduzem em 32% e 36% respectivamente. A utilização da geomembrana sobre a fundação e estendido na face de montante também apresentou uma redução considerável das poropressões

da fundação. Estes resultados indicam que existe a necessidade da extensão da manta na face de montante para melhor eficácia do tratamento sobre a fundação.

Na simulação da geomembrana somente na face de montante, a vazão reduz 18% da vazão sem tratamento. As poropressões no aterro de montante diminuem, porém as cargas de pressão na fundação não são alteradas, inviabilizando a utilização da geomembrana nesta posição.

O tratamento que apresentou melhor desempenho foi a utilização da geomembrana sobre a fundação e por toda a face de montante, com redução de 63% da vazão, quando comparada sem nenhum tratamento. As cargas de pressão também reduzem significativamente na fundação e no aterro.

Para as posições apresentadas acima, foram realizadas simulações para fundações mais impermeáveis e de modo geral, todas apresentaram redução da vazão com a diminuição da permeabilidade.

Na simulação com a geomembrana somente sobre a fundação, a vazão foi praticamente igual ao tratamento também estendido à meia face de montante, quando a permeabilidade da fundação foi reduzida em 100 e 10.000 vezes. Esta semelhança de resultados exprime que a maior parcela de vazão provem do aterro e que a extensão sobre a face de montante só é eficaz quando a fundação apresenta maior permeabilidade. A variação da linha freática nas simulações não mostrou reduções de poropressão significativas com a alteração de características geotécnicas da fundação.

O tratamento somente na face de montante apresentou menores vazões na diminuição da permeabilidade da fundação, quando comparado com os tratamentos sobre a fundação. Isto indica que o fluxo percola preferencialmente pelo aterro devido a sua maior permeabilidade. Quando a fundação é mais impermeável que o aterro, a utilização da geomembrana sobre a face de montante apresenta bom desempenho na redução de vazões, comparado com a utilização sobre a fundação. As pressões neutras no aterro de montante também se apresentaram menores para menor permeabilidade da fundação.

A posição da geomembrana sobre toda a face de montante e sobre a fundação obteve alta redução das vazões, com a diminuição da permeabilidade do material da fundação. Também apresentou menores cargas de pressão na fundação

e praticamente nula no aterro de montante. Esta posição do tratamento é a mais eficaz independente das características dos materiais da barragem e da fundação.

Quando se deseja obter menores vazões de percolação sem a utilização da geomembrana simultaneamente na fundação e toda a face de montante, e a permeabilidade da fundação for maior, a aplicação indicada é sobre a fundação e estendida parcialmente na face de montante. Enquanto para maior permeabilidade do aterro a indicação é o posicionamento na face de montante.

Em relação aos rasgos, foi realizada uma simulação numérica comparativa com o modelo reduzido, com 50% das emendas comprometidas. As vazões obtidas em ambos os modelos foram muito semelhantes, porém no modelo numérico as cargas de pressão foram maiores e se apresentaram próximas das obtidas sem nenhum tratamento.

Na simulação de apenas um rasgo no meio da face de montante, a vazão aumentou 22%, e no rasgo a 25 cm do pé do talude aumentou 38%, comparados à simulação com tratamento na fundação e estendido por toda face de montante. O tamanho de ambos os rasgos é de 6 cm, indicando que o rasgo sobre a fundação tem maior influência no aumento da vazão pela sua maior permeabilidade.

Com o aumento da permeabilidade da fundação em 100 vezes e com a simulação dos rasgos na mesma posição anterior, ocorre maior fluxo pelo aterro devido a sua maior permeabilidade. O rasgo sobre a face de montante provocou um aumento de 93% da vazão, enquanto o rasgo sobre a fundação aumentou somente 49% em relação ao tratamento sem nenhum rasgo.

Os resultados obtidos indicam que o tapete impermeável a montante é eficaz no controle do fluxo de água em barragens de terra com fundação permeável, e atua no aumento do caminho de percolação e conseqüentemente reduz as poropressões sob a barragem e na fundação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6.508 – **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm** – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7.181 – **Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1984 (1988).

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6.457 – **Amostras de solo** – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13.292 – **Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante** – Solo. Rio de Janeiro, 1995.

ANEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica no Brasil**. Brasília, 2002.

ARAUJO, M. C. N. de. **Estudo de Equivalência entre Drenos Franceses e Tapetes Drenantes em Barragens de Terra**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil, Dissertação de Mestrado, 2013.

BUREAU OF RECLAMATION. **Design of Small Dams**: A water resources technical publication. 3 ed., 1987.

CARDOSO, R. M.; CALCINA, A. M.; OLIVEIRA, C. A. de; CARVALHO, A. H. E.; SARLO, R. J. F. **Utilização de Geomembrana de PEAD em Tratamento de**

**Fundação na Barragem de São Salvador.** Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Gramado: ABMS, 2010.

CBDB, **Guia Básico de Segurança de Barragens**, Núcleo Regional de São Paulo, Comissão de segurança de barragens, São Paulo, 2001.

CIGB – COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES/ ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **As Barragens e a Água do Mundo** um livro educativo que explica como as barragens ajudam a administrar a água do mundo. 23º Congresso da Internacional de Grandes Barragens, 2009.

CIGB – COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES/ ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Geomembrane Sealing Systems for Dams** – Design principles and review of experience. Bulletin 135. Paris, 2010.

CRUZ, P. T. **100 Barragens Brasileiras:** casos históricos, materiais de construção, projeto. São Paulo, Editora Oficina de Textos, 1996.

ELETROBRÁS. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas.** Eletrobrás/ CBDB, Brasília, 2003.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Manual sobre Pequenas Barragens de Terra:** Guia para localização, projeto e construção. Roma, 2011.

GAIOTO, N. **Introdução ao Projeto de Barragens de Terra e de Enrocamento.** Universidade de São Paulo – USP, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia. São Carlos: EDUSP, 1 ed., 2003.

GIROUD, J. P.; BONAPARTE, R. **Leakage through Liners Constructed with Geomembranes** – Part I. Geomembrane Liners. Geotextiles and Geomembranes, Elsevier Science Publishers Ltd, Inglaterra, 1989.

IGS BRASIL. **Classificação dos Geossintéticos**. Disponível em: <<http://igsbrasil.org.br/wp-content/uploads/geossinteticos/1.pdf>>. Acesso em: 22/03/2014.

KOERNER, R.M. **Designing with Geosynthetics** – Prentice Hall, N.J., 5 ed.; 2005.

MÜLLER, W. **HDPE Geomembranes in Geotechnics**, Springer-Verlag Publ., Berlin, 2007.

NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE – NHI. **Geosynthetic Design and Construction Guidelines** – Participant Notebook. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington – DC, 1988.

NEOPLASTIC. Disponível em: <<http://www.neoplastic.com.br/pt/produtos/geomembrana>>. Acessado em: 22/06/2014.

OLIVEIRA, A. G. S. de. **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, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

PIEROZAN, R. C. **Aplicação de Geomembranas em Tapetes Impermeáveis a Montante de Barragens de Terra**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia da Construção Civil, Curitiba, 2014.

PIEROZAN, R. C.; MIQUELETTO, M.; TEIXEIRA, S. H. C. **Utilização de Tapete de Controle de Fluxo a Montante de Barragens de Terra e Enrocamento Através de Geomembrana.** Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Goiânia, 2014.

ROLLIN, A.; RIGO, J. M. **Geomembranes:** Identification and Performance Testing. Chapman and Hall Publ., Londres, 1991.

SILVA FILHO, F. C. da. **Tapetes Impermeabilizantes a Montante de Barragens Sobre Aluviões Permeáveis.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento.** Oficina de Textos, São Paulo-Brasil, 2006.

USSD – United States Society on Dams. **Materials for Embankment Dams.** USSD Committee on Materials for Embankment Dams, Denver - Estados Unidos, 2009.

VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos.** Editora Blucher, São Paulo, 2004.