

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - UFPR

RODRIGO CÉSAR PIEROZAN

**APLICAÇÃO DE GEOMEMBRANAS EM TAPETES IMPERMEÁVEIS A
MONTANTE DE BARRAGENS DE TERRA**

CURITIBA - PR

2014

RODRIGO CÉSAR PIEROZAN

**APLICAÇÃO DE GEOMEMBRANAS EM TAPETES IMPERMEÁVEIS A
MONTANTE DE BARRAGENS DE TERRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil - PPGECC, Área de Concentração em Geotecnia, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Sidnei Helder Cardoso
Teixeira

CURITIBA – PR

2014

P662a Pierozan, Rodrigo César
Aplicação de geomembranas em tapetes impermeáveis a montante de barragens de terra / Rodrigo César Pierozan. – Curitiba, 2014.
182f. : il., tab.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia da Construção Civil.

Orientadora: Sidnei Helder Cardoso Teixeira
Bibliografia: p. 170-177.

1. Barragens de terra. 2. Barragens e açudes -- Segurança.
I. Teixeira, Sidnei Helder Cardoso. II. Universidade Federal do Paraná.
III. Título.

CDD: 627.83

TERMO DE APROVAÇÃO

RODRIGO CÉSAR PIEROZAN

APLICAÇÃO DE GEOMEMBRANAS EM TAPETES IMPERMEÁVEIS A MONTANTE DE BARRAGENS DE TERRA

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração: Geotecnia, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:


Orientador:



Prof. Dr. Sidnei Helder Cardoso Teixeira

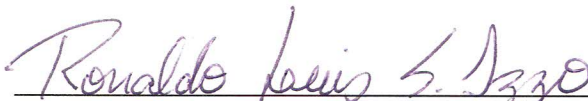
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil -
UFPR

Examinadores:



Prof. Dr. Alessander Christopher Morales Kormann

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil -
UFPR



Prof. Dr. Ronaldo Luis dos Santos Izzo

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - DACOC

Curitiba, 28 de maio de 2014

Aos meu pais, Itacir e Cleuza.

À Monalisa, por estar sempre presente nos momentos mais difíceis.

Por todo o amor, por quem sou e por tudo que alcancei.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao orientador, Prof. Dr. Sidnei Helder Cardoso Teixeira, por toda o apoio e ajuda dispensados durante a elaboração desta dissertação. O autor também agradece aos estudantes de graduação, Ana Paula Mikos e Roberto de Resende Lisboa Piassetta, pela ajuda durante a realização dos ensaios em laboratório. O autor agradece também à Prof. Dr. Andrea Sell Dyminski, por ter incentivado a busca pelo conhecimento.

O autor agradece à Rio Verde Energia, à TPI (Triunfo Participações e Investimentos) e à Construtora Triunfo por permitirem a divulgação das informações relativas à Usina Hidrelétrica Salto, contidas nesta dissertação. O autor agradece à equipe técnica da empresa Intertechne Consultores S.A, por fornecer o projeto da barragem em questão e, em especial, ao Engenheiro Alex Martins Calcina, por ajudar sempre que necessário. O autor agradece também à Engenheira Silvia Delattre Levis, anteriormente colaboradora da empresa Intertechne Consultores S.A, por ter auxiliado nos procedimentos corporativos para liberação dos dados utilizados.

“Ama-se mais o que se conquista com esforço”.
(Benjamin Disraeli)

RESUMO

O uso de geossintéticos vem sendo prática comum nas obras de engenharia geotécnica onde se necessita da melhoria das características do solo local, em virtude das vantagens de caráter técnico e econômico que os materiais sintéticos oferecem em relação aos materiais convencionais. Neste contexto, este trabalho apresenta uma avaliação do desempenho do tratamento de fundações de barragens de terra com o emprego de geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD), objetivando o entendimento dos fenômenos envolvidos e a otimização de sua utilização. Foram feitas simulações numéricas da solução em estudo, cujos parâmetros foram calibrados e validados com base em ensaios de laboratório em modelo reduzido e nos dados reais da Usina Hidrelétrica Salto (116 MW). O comportamento dos maciços de fundação e de aterro da barragem é avaliado em termos de redução das vazões e das cargas de pressão, além de serem verificados aspectos relativos aos gradientes hidráulicos. Os resultados obtidos mostram que a membrana impermeabilizante atua principalmente aumentando o caminho de percolação do fluxo através da fundação da barragem, resultando, dessa forma, em menores cargas de pressão sob a mesma. Como consequência, reduz-se a vazão de percolação através da barragem e da fundação. De forma geral, a utilização de membranas sintéticas mostrou-se uma boa solução para tratamento de fundações permeáveis.

Palavras-chave: Geomembrana. Tapete impermeável. Barragens de terra. Segurança de barragens.

ABSTRACT

The use of geosynthetic materials have been a common practice in geotechnical engineering works where it is needed to improve the characteristics of the local soil, as a result of the technical and economic advantages that synthetic materials offer over conventional materials. In this context, this research presents an evaluation of the performance of earth fill dam's foundations treated with geomembranes, composed of high density polyethylene (HDPE), aiming to understand the phenomena involved and to optimize their use. Numerical simulations of the solution were made, whose parameters were calibrated and validated based on scaled models laboratory tests and the actual data of Salto Hydroelectric Power Plant (116 MW). The behavior of the embankment and the foundation of the dam are assessed in terms of reduction of flow rates and pressure loads, besides being verified aspects of the hydraulic gradients. The results show that the geomembrane sealing system acts primarily by increasing the flow path through the foundation of the dam, resulting, thus, at lower pressure loads under the same. As a consequence, the seepage flow through the dam and its foundation is reduced. In a general way, the use o synthetic membranes showed to be a good solution for the treatment of pervious foundations.

Keywords: Geomembrane Sealing System. Impermeable blanket. Embankment dam. Dam safety.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Tipos usuais de barragens de terra.....	21
Figura 2.2 – Barragens de enrocamento com núcleo de terra.....	22
Figura 2.3 – Perfil usual de instalação de piezômetro, adaptado de Cruz (1996).....	33
Figura 2.4 – Leitura de um piezômetro e cargas hidráulicas	33
Figura 2.5 – Elemento de solo de dimensões infinitesimais	38
Figura 2.6 – Modelos reduzidos de (MARQUES E UNAS, 2010): (A) Barragem homogênea com dreno de pé de talude, e; (B) Barragem com núcleo de baixa permeabilidade	43
Figura 2.7 – Princípio de controle do fluxo	45
Figura 2.8 – Tratamento de fundação através de: (A) Trincheira de vedação (<i>Cut-off</i>); (B) Cortinas de injeção; (C) Parede diafragma, e; (D) Tapete impermeável a montante da barragem	50
Figura 2.9 – Barreiras impermeabilizantes empregadas em (NEOPLASTIC, 2014): (A) Aterro sanitário; (B) Canal de adução; (C) Reservatório de mineração, e; (D) Aterro industrial	52
Figura 2.10 – Tapete impermeável a montante da barragem de São Salvador (CARDOSO <i>et al.</i> , 2010): (A) Instalação da geomembrana, e; (B) Execução de emendas.....	53
Figura 3.1 – Localização geográfica da UHE Salto (GOOGLE MAPS, 2014).....	54
Figura 3.2 – A) Vertedouro em operação (Fev/2011); B) Imagem aérea (Jan/2010).....	54
Figura 3.3 – Arranjo geral da UHE Salto	55
Figura 3.4 – Imagem aérea da UHE Salto (17/01/2010). Fonte: Google Earth (2014).....	55
Figura 3.5 – Mapa geológico local (UHE Salto).....	58
Figura 3.6 – Geometria da seção transversal	60
Figura 3.7 – Investigações geotécnicas na barragem de terra da ombreira esquerda.....	61
Figura 3.8 – (A) Preparação do substrato para instalação da geomembrana; (B) Vala para ancoragem em solo; (C) Colocação da geomembrana; (D) Execução das emendas; (E) Camada de aterro de proteção, e; (E) Aspecto geral da instalação da geomembrana mostrando as camadas de proteção	66
Figura 3.9 – Sistema de drenagem interna da margem esquerda (UHE Salto).....	67
Figura 3.10 – Medidor de vazão (UHE Salto).....	70
Figura 3.11 – Instrumentação civil da barragem de terra da margem esquerda (UHE Salto).....	71
Figura 4.1 – Determinação dos coeficientes de permeabilidades dos seguintes materiais: (A) Fundação; (B) Aterro, e; (C) Filtro vertical e tapete horizontal.....	78
Figura 4.2 – (A) Material de fundação; (B) Material do aterro, e; (C) Material do sistema de drenagem	79
Figura 4.3 – Ensaio de determinação da densidade real das partículas sólidas.....	81
Figura 4.4 – (A) Densímetro, e; (B) Ensaio de sedimentação	82
Figura 4.5 – Tanque de percolação utilizado para ensaios em modelo reduzido	85
Figura 4.6 – Medição de cargas piezométricas no modelo reduzido	86
Figura 4.7 – (A) Instalação de piezômetro no tanque de percolação, e (B) Painel de leitura	87
Figura 4.8 – (A) Esquema de medição de vazão, e (B) Saída d'água a jusante do modelo reduzido.....	88
Figura 4.9 – (A) Construção do tapete horizontal, e; (B) Construção do filtro vertical.....	89
Figura 4.10 – (A) Membrana impermeável de montante, e (B) Traços auxiliares	90
Figura 4.11 – Modelo físico da barragem em estudo	90
Figura 4.12 – Enchimento do reservatório e estabilização do fluxo.....	91
Figura 4.13 – Utilização de geomembrana a montante da barragem	92
Figura 4.14 – Utilização de geomembrana sobre a fundação a montante da barragem.....	92
Figura 5.1 – Seções em estudo da Usina Hidrelétrica Salto.....	104
Figura 5.2 – Geometria da seção transversal do modelo de fluxo.....	109
Figura 5.3 – Curva de distribuição granulométrica do material de fundação	113
Figura 5.4 – Curva de distribuição granulométrica do material de aterro.....	113

Figura 5.5 – Curva de distribuição granulométrica do material do filtro vertical e tapete horizontal.....	114
Figura 5.6 – Calibração da altura de queda das partículas – Material de fundação	116
Figura 5.7 – Calibração da altura de queda das partículas – Material de aterro.....	117
Figura 5.8 – Cargas de pressão – Modelo reduzido.....	120
Figura 5.9 – Carga de pressão – Ausência de tratamento de fundação.....	125
Figura 5.10 – Carga de pressão – Tratamento de fundação através de geomembrana	126
Figura 5.11 – Seção 15 – Cargas de pressão com e sem a utilização de geomembrana ..	130
Figura 5.12 – Seção 17 – Cargas de pressão com e sem a utilização de geomembrana ..	132
Figura 5.13 – Seção 19 – Cargas de pressão com e sem a utilização de geomembrana ..	133
Figura 5.14 – Seção 21 – Cargas de pressão com e sem a utilização de geomembrana ..	135
Figura 5.15 – Ausência de tratamento de fundação.....	139
Figura 5.16 – Tratamento de fundação através de geomembrana.....	140
Figura 5.17 – Utilização de geomembrana apenas na face de montante da barragem.....	142
Figura 5.18 – Utilização de geomembrana na face de montante da barragem e sobre a fundação.....	143
Figura 5.19 – Variação do comprimento da membrana impermeabilizante – Cargas totais	145
Figura 5.20 – Variação do comprimento da membrana impermeabilizante – Cargas de pressão.....	146
Figura 5.21 – Variação do comprimento da membrana impermeabilizante – Gradientes hidráulicos	147
Figura 5.22 – Tapete de solo compactado a montante da barragem – Cargas totais.....	150
Figura 5.23 – Tapete de solo compactado a montante da barragem – Cargas de pressão	151
Figura 5.24 – Tapete de solo compactado a montante da barragem – Gradientes hidráulicos	152
Figura 5.25 – Simulação de rasgos longitudinais na membrana sintética – Carga total	155
Figura 5.26 – Simulação de rasgos longitudinais na membrana sintética – Carga de pressão	156
Figura 5.27 – Simulação de rasgos longitudinais na membrana sintética – Gradientes hidráulicos	157
Figura 5.28 – Ancoragem da membrana sintética no talude de montante – Cargas totais .	160
Figura 5.29 – Ancoragem da membrana sintética no talude de montante – Cargas de pressão.....	161
Figura 5.30 – Ancoragem da membrana sintética no talude de montante – Gradientes hidráulicos	162
Figura 5.31 – Ancoragem da membrana sintética no espaldar de montante.....	164

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Barragens de terra usuais	21
Tabela 2.2 – Causas de danos e falhas em barragens (adaptado de ICOLD, 1984).....	23
Tabela 2.3 – Abrangência da Lei nº 12.334/2010	26
Tabela 2.4 – Geossintéticos utilizados em barragens (adaptado de FEMA, 2008).....	51
Tabela 3.1 – Aspectos geológicos regionais e locais (UHE Salto)	56
Tabela 3.2 – Material da membrana sintética	63
Tabela 3.3 – Especificações para emendas.....	64
Tabela 3.4 – Dimensões do tapete sanduíche	67
Tabela 3.5 – Piezometria da barragem de terra da margem esquerda (UHE Salto).....	69
Tabela 3.6 – Medidores de vazão da margem esquerda (UHE Salto).....	70
Tabela 4.1 – Método da pesquisa	72
Tabela 4.2 – Seções da UHE Salto em estudo e sondagens representativas.....	74
Tabela 4.3 – Ensaios laboratoriais realizados	79
Tabela 4.4 – Classificação da densidade de solos granulares (adaptado de Lambe e Whitman, 1979)	83
Tabela 4.5 – Piezômetros instalados no aterro e fundação do modelo reduzido.....	87
Tabela 4.6 – Variáveis representativas do modelo de fluxo	93
Tabela 4.7 – Simulações efetuadas no modelo numérico	95
Tabela 4.8 – Simulações efetuadas para o tapete impermeável a montante da barragem ..	97
Tabela 4.9 – Simulações efetuadas para a utilização de geomembrana na face de montante da barragem	97
Tabela 4.10 – Simulações efetuadas variando-se o comprimento da membrana sintética... 98	
Tabela 4.11 – Simulações efetuadas variando-se a espessura do solo compactado.....	98
Tabela 4.12 – Simulações efetuadas a respeito da ocorrência de rasgos na geomembrana	99
Tabela 4.13 – Simulações efetuadas variando-se o comprimento da ancoragem no talude de montante.....	99
Tabela 5.1 – Altura da barragem nas seções 15, 17, 19, 21 e 22 da UHE Salto.....	102
Tabela 5.2 – Altura da barragem e espessura do material permeável da fundação	103
Tabela 5.3 – Altura da barragem e espessura do material permeável da fundação	103
Tabela 5.4 – Altura da barragem e comprimento da membrana impermeável	104
Tabela 5.5 – Coeficientes de permeabilidade da fundação da UHE Salto.....	105
Tabela 5.6 – Coeficientes de permeabilidade do aterro da UHE Salto.....	106
Tabela 5.7 – Retroanálise com base nos resultados da instrumentação da UHE Salto	107
Tabela 5.8 – Coeficientes de permeabilidade dos materiais utilizados no modelo reduzido	111
Tabela 5.9 – Resumo dos resultados de ensaios de caracterização.....	112
Tabela 5.10 – Diâmetros correspondentes a 15 e 85% das partículas de solo	115
Tabela 5.11 – Calibração da altura de queda livre do material de fundação	116
Tabela 5.12 – Curva de distribuição granulométrica do material do filtro vertical e tapete horizontal.....	117
Tabela 5.13 – Resultados obtidos nos ensaios em modelo reduzido	118
Tabela 5.14 – Características geométricas e espessura da fundação	121
Tabela 5.15 – Coeficientes de permeabilidade dos materiais de aterro e de fundação	122
Tabela 5.16 – Resultados obtidos nos ensaios e simulações sem a utilização de geomembrana.....	123
Tabela 5.17 – Resultados obtidos nos ensaios e simulações com a utilização de geomembrana.....	124
Tabela 5.18 – Vazões de percolação – Seção 15	129
Tabela 5.19 – Vazões de percolação – Seção 17	131
Tabela 5.20 – Vazões de percolação – Seção 19	134

Tabela 5.21 – Vazões de percolação – Seção 21	136
Tabela 5.22 – Coeficientes de permeabilidade considerados no modelo numérico	137
Tabela 5.23 – Vazões de percolação no aterro e na fundação	138
Tabela 5.24 – Vazões de percolação no aterro e na fundação	141
Tabela 5.25 – Vazões de percolação – Comprimento da membrana sintética igual a 24 e 48 m	148
Tabela 5.26 – Vazões de percolação – Comprimento da membrana sintética igual a 72 e 96 m	148
Tabela 5.27 – Vazões pelo aterro e fundação com a variação do comprimento da membrana sintética	148
Tabela 5.28 – Vazões de percolação – Tapetes de solo compactado.....	153
Tabela 5.29 – Vazões de percolação – Ocorrência de 1 rasgo longitudinal	154
Tabela 5.30 – Vazões de percolação – Ocorrência de 3 rasgos longitudinais.....	154
Tabela 5.31 – Vazões de percolação (valores de protótipo) – Ensaio de laboratório	154
Tabela 5.32 – Vazões de percolação – Extensão da manta sobre o talude de montante...	159
Tabela 5.33 – Vazões de percolação – Extensão da manta sobre o talude de montante...	159

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALARP	<i>Reducing Risks as Low as Reasonably Practicable</i>
ANCOLD	<i>Australian National Committee on Large Dams</i>
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>
BVA	Basalto vesículo-amigdaloidal
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CIGB	<i>Comission Internationale des Grands Barrages</i>
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EBMUD	<i>The East Bay Municipal Utility District</i>
FEMA	<i>Federal Emergency Management Agency</i>
FERC	<i>Federal Energy Regulatory Commission</i>
GA	Geomanta
GC	Geocomposto
GCD	Geocomposto para drenagem
GCL	Geocomposto Argiloso
GG	Geogrelha
GL	Geocélula
GM	Geomembrana
GN	Georrede
GTnw	Geotêxtil não tecido
GTw	Geotêxtil tecido
ICOLD	<i>International Commission on Large Dams</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
PA	Piezômetro do aterro
PBF	Polietileno Bastante Flexível
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PELBD	Polietileno Linear de Baixa Densidade
PF	Piezômetro da fundação
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PVC	Polivinil Clorado
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
TPI	Triunfo Participações e Investimentos
UHE	Usina Hidrelétrica
USCOLD	<i>United States Committee on Large Dams</i>
USSD	<i>United States Society on Dams</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	OBJETIVO.....	17
1.2	JUSTIFICATIVA	17
1.2.1	Justificativa ambiental.....	18
1.2.2	Justificativa social	18
1.2.3	Justificativa econômica	18
1.2.4	Justificativa tecnológica.....	18
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	BARRAGENS DE TERRA E/OU ENROCAMENTO.....	20
2.1.1	Principais tipos de barragens de terra e enrocamento	20
2.1.2	Principais causas de deterioração e falhas	23
2.2	SEGURANÇA DE BARRAGENS.....	24
2.2.1	Legislação nacional e fiscalização	26
2.3	AUSCULTAÇÃO GEOTÉCNICA	27
2.3.1	Instrumentação	27
2.3.2	Inspeções visuais.....	30
2.4	FLUXO DE ÁGUA EM MEIOS POROSOS	31
2.4.1	Cargas hidráulicas	31
2.4.2	Lei de Darcy.....	33
2.4.3	Fatores que afetam a condutividade hidráulica	34
2.4.4	Equação diferencial governante de escoamentos	38
2.5	PERCOLAÇÃO EM BARRAGENS DE TERRA	40
2.5.1	Gradiente hidráulico crítico.....	41
2.5.2	Análises de percolação	41
2.5.3	Controle da percolação em barragens de terra	45
2.5.4	Barreiras impermeabilizantes compostas por geomembrana	50
3	BARRAGEM EM ESTUDO - UHE SALTO (116 MW).....	54
3.1	ASPECTOS GEOLÓGICOS.....	55
3.1.1	Aspectos geológicos regionais.....	56
3.1.2	Condicionantes geológicos no sítio da barragem	57
3.2	TRECHO AVALIADO DA UHE SALTO.....	59
3.2.1	Características geométricas da barragem.....	59
3.2.2	Características geotécnicas dos solos de aterro e de fundação	60
3.2.3	Tratamento de fundação	62
3.2.4	Sistema de drenagem interna	67
3.2.5	Instrumentação civil	68
4	MÉTODO DA PESQUISA	72
4.1	TRATAMENTO DOS DADOS DA USINA HIDRELÉTRICA SALTO.....	73
4.1.1	Geometria da barragem e espessura da fundação.....	73
4.1.2	Condutividade hidráulica dos materiais de aterro e de fundação.....	74
4.2	EXPERIMENTO EM MODELO REDUZIDO.....	75
4.2.1	Características geométricas e condições de contorno	75
4.2.2	Condutividade hidráulica dos materiais de aterro e de fundação.....	76
4.2.3	Caracterização geotécnica dos materiais empregados	78
4.2.4	Critérios de filtração e drenagem para materiais granulares	83
4.2.5	Método de deposição do material granular.....	84
4.2.6	Procedimento de ensaio.....	85
4.3	MODELO NUMÉRICO DE FLUXO	93
4.3.1	Variáveis independentes do modelo numérico.....	94

4.3.2	Calibração e validação do modelo numérico	94
4.3.3	Análises paramétricas.....	96
4.4	LIMITAÇÕES.....	100
5	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	102
5.1	TRATAMENTO DOS DADOS DA USINA HIDRELÉTRICA SALTO.....	102
5.1.1	Geometria da barragem e condições de contorno.....	102
5.1.2	Condutividade hidráulica dos materiais de aterro e de fundação.....	104
5.2	EXPERIMENTO EM MODELO REDUZIDO.....	108
5.2.1	Características geométricas e condições de contorno	108
5.2.2	Condutividade hidráulica dos materiais de aterro e de fundação.....	110
5.2.3	Caracterização geotécnica dos materiais empregados	111
5.2.4	Critérios de filtração e drenagem para materiais granulares	114
5.2.5	Método de deposição do material granular.....	115
5.2.6	Leituras de instrumentação	118
5.3	MODELO NUMÉRICO DE FLUXO	121
5.3.1	Variáveis independentes do modelo numérico	121
5.3.2	Calibração e validação do modelo numérico	122
5.3.3	Análises paramétricas.....	137
6	CONCLUSÕES.....	165
6.1	RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	168

1 INTRODUÇÃO

Uma usina hidrelétrica pode ser definida como um conjunto de obras e equipamentos cuja finalidade é a geração elétrica, através de aproveitamento do potencial hidráulico existente em um rio (FURNAS, 2014). As barragens constituem obras complexas e de grande porte, possuindo altos custos de implantação. Dessa forma, é importante o estudo de alternativas que reduzam os custos e melhorem as características técnicas das mesmas.

Entre as alternativas existentes, o uso de geossintéticos vem sendo prática comum nas obras de engenharia geotécnica onde se necessita de melhoria das características do solo local, apresentando vantagens em relação aos materiais e às tecnologias tradicionais, como, por exemplo, menores custos, facilidade de instalação e menor tempo de execução das obras.

O crescimento da utilização dos geossintéticos, nos últimos anos, vem despertando a atenção dos engenheiros e pesquisadores, uma vez que os materiais em questão possuem características particulares e diferenciadas em relação aos materiais geotécnicos tradicionais. Surge então a necessidade de novos estudos experimentais e modelos de análise aplicáveis aos materiais em questão.

Neste contexto, este trabalho apresenta um estudo sobre tratamento de fundação de barragens de terra com utilização de geomembrana, em substituição às técnicas usualmente empregadas. A avaliação de desempenho do tratamento é feita com base em ensaios em modelo reduzido e na avaliação do comportamento da Usina Hidrelétrica Salto (116 MW), a qual contém a solução em questão em sua margem esquerda.

A partir dos resultados encontrados nos ensaios em modelo reduzido e na avaliação do comportamento da UHE Salto, é feita a calibração e validação de modelo numérico, certificando-se que o mesmo seja representativo das condições de fluxo observadas em campo e em laboratório. Os parâmetros analisados são as cargas de pressão, as vazões de percolação e os gradientes hidráulicos.

Após a calibração e a validação do modelo numérico, são feitas simulações com a finalidade de avaliar aspectos construtivos relativos à utilização de geomembranas em barragens. Neste trabalho, estuda-se a possibilidade de utilização de membranas sintéticas sobre o talude de montante e os efeitos da variação do comprimento da geomembrana sobre a fundação. Além disso, avaliam-se os efeitos da ocorrência de rasgos longitudinais

na geomembrana e a necessidade de ancoragem das mesmas no talude de montante da barragem.

Na sequência, o tópico 1.1 descreve o objetivo do trabalho em questão, enquanto que o tópico 1.2 expõe aspectos ambientais, sociais, econômicos e tecnológicos que justificam o estudo do tema proposto. O tópico 1.3, por sua vez, descreve a estrutura da dissertação.

1.1 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é a avaliação do desempenho do tratamento de fundação de barragens de terra com o emprego de geomembranas, sendo o mesmo caracterizado em termos de redução de vazões, de pressões neutras e de gradientes hidráulicos. Os estudos apresentados têm por finalidade a geração de conhecimentos para aplicação prática em projetos e obras de barragens assentes em fundações de alta permeabilidade.

1.2 JUSTIFICATIVA

O Brasil detém um dos maiores potenciais de produção de energia hidrelétrica do mundo. Conforme COPEL (2009), quando se trata de eletricidade, os empreendimentos hidrelétricos somam 74% da capacidade instalada do sistema interligado brasileiro, sendo o restante oriundo de geração térmica, cujos insumos incluem gás natural, óleo diesel, carvão mineral e energia nuclear.

Apesar da grande quantidade de barragens já existentes para produção de energia elétrica, ainda há grande potencial de aproveitamento de recursos hídricos, tanto no Brasil quanto internacionalmente. Dessa forma, fazem-se necessários estudos com o objetivo de tornar as obras em questão mais eficientes e econômicas. Atualmente, materiais sintéticos têm sido empregados com as finalidades em questão.

Na sequência, são apresentadas as justificativas ambientais (tópico 1.2.1), sociais (tópico 1.2.2), econômicas (tópico 1.2.3) e tecnológicas (tópico 1.2.4) que incentivaram o estudo do tratamento de fundações de alta permeabilidade através da utilização de materiais sintéticos, melhorando a performance das barragens.

1.2.1 Justificativa ambiental

O setor energético é considerado um dos pilares da sociedade moderna (COPEL, 2009). A matriz energética brasileira se destaca em relação a de outros países por deter sua geração de eletricidade baseada fundamentalmente em obras hidráulicas, as quais envolvem o represamento de grandes volumes de água.

O desenvolvimento do potencial hidráulico de uma região deve cuidar para que os impactos ambientais gerados pelo mesmo sejam mitigados (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2007). A utilização de materiais sintéticos em barragens pode contribuir para a segurança e eficiência das diversas estruturas que compõem a mesma, reduzindo assim possíveis impactos ambientais oriundos do mal funcionamento.

1.2.2 Justificativa social

O aproveitamento de recursos hídricos é um vetor importante no desenvolvimento regional, devendo ser planejado levando-se em consideração os interesses dos diversos agentes ou pessoas influenciadas (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2007). Dessa forma, estudos envolvendo a melhor utilização dos recursos disponíveis tem papel fundamental para que a construção e a operação de barragens atendam aos interesses da sociedade.

1.2.3 Justificativa econômica

A matriz energética brasileira é baseada em até 74% na hidroeletricidade (COPEL, 2009) e os investimentos tendem a continuar nos próximos anos. Dessa forma, a utilização de materiais sintéticos, que aumentem a eficiência das obras e possibilitem a redução de custos, assume papel fundamental nos projetos de novos empreendimentos.

1.2.4 Justificativa tecnológica

Materiais naturais, em geral vegetais constituídos de fibras resistentes, vêm sendo utilizados para melhorar a qualidade dos solos desde 3000 a.C. (VERTEMATTI, 2004).

Entretanto, com o desenvolvimento da tecnologia dos polímeros, foi possível integrar materiais sintéticos ao solo como forma de melhorar as características do mesmo.

Entre os materiais sintéticos utilizados em barragens, podem ser citadas as geomembranas, as quais possuem baixíssima permeabilidade e são utilizadas para controle de fluxo e separação (ABNT NBR 12.533/2003). Devido à constante evolução da tecnologia e a existência de grande variedade de produtos no mercado, o estudo das mesmas torna-se relevante não apenas para segurança de barragens e de outras estruturas nas quais é instalada, mas também para constante evolução do conhecimento.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está estruturada em capítulos, os quais compreendem: exposição do problema, revisão da literatura, descrição dos materiais e métodos empregados na pesquisa, resultados obtidos e análises envolvendo os mesmos e conclusões relativas ao tema em questão.

O presente capítulo apresenta as considerações iniciais sobre o tema, define o problema estudado e apresenta a justificativa e os objetivos da pesquisa. O segundo capítulo consiste na revisão da literatura, onde é descrito o estado atual dos conhecimentos e delimita-se o problema em investigação.

O terceiro capítulo descreve a barragem da Usina Hidrelétrica Salto, a qual constituiu fonte de dados para esta pesquisa. O quarto capítulo apresenta os métodos empregados na pesquisa, compreendo os ensaios laboratoriais em modelo reduzido, o tratamento dos dados da UHE Salto e as simulações numéricas empregadas.

O entendimento completo do tema em questão está exposto no quinto capítulo, onde são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Conclusões e recomendações para pesquisas futuras podem ser consultadas no sexto capítulo. Informações e dados complementares para o entendimento da pesquisa estão apresentadas nos anexos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão da literatura aqui apresentada tem por finalidade descrever os seguintes tópicos: barragens de terra e enrocamento, segurança de barragens, auscultação geotécnica, fluxo d'água em meios porosos e percolação em barragens de terra. Procura-se expor o estado atual dos conhecimentos relativos aos temas em questão, salientando-se as lacunas existentes e a contribuição da investigação para o desenvolvimento do conhecimento.

2.1 BARRAGENS DE TERRA E/OU ENROCAMENTO

As barragens de terra e/ou enrocamento são aquelas construídas com materiais naturais, tais como argilas, siltes e areias, ou com materiais produzidos artificialmente, tais como britas e enrocamentos. Entre as principais vantagens que apresentam em relação aos outros tipos de barragens, podem ser citadas (USSD, 2009): possibilidade de construção em condições variadas do terreno de fundação; disponibilidade de materiais de construção, em geral, a menores distâncias, e; custos inferiores em relação a outros tipos de barragens.

A tecnologia de construção de barragens de terra e enrocamento evoluiu consideravelmente nas últimas décadas, em função da implantação de reservatórios em locais impróprios para barragens de concreto, além da necessidade de assentamento das mesmas em solos de baixa capacidade de suporte e em áreas sujeitas à sismicidade (CIGB/ICOLD, 1990). Os tópicos 2.1.1 e 2.1.2 apresentam os principais tipos de barragens de aterro e as principais causas de deterioração e falhas associadas às mesmas.

2.1.1 Principais tipos de barragens de terra e enrocamento

O aterro, a fundação e as estruturas anexas de barragens de terra e/ou enrocamento devem ser estáveis contra recalques, escorregamentos e perda de materiais durante a construção, em todas as condições de operação do reservatório e na ocorrência de eventos incomuns, como terremotos e inundações (USSD, 2009). Por esse motivo, as mesmas podem apresentar variações em suas seções transversais, as quais são definidas em projeto em função da disponibilidade de materiais de construção e de outras necessidades específicas.

As barragens de terra são compostas por solos de propriedades adequadas, obtidos em áreas em empréstimo ou através de escavação, sendo os mesmos compactados em camadas por meios mecânicos (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2004). As barragens de terra convencionais possuem seção homogênea, zoneada ou de aterro hidráulico, conforme mostra a Figura 2.1. A Tabela 2.1, por sua vez, apresenta uma descrição dos principais tipos de seções utilizadas em barragens de terra.

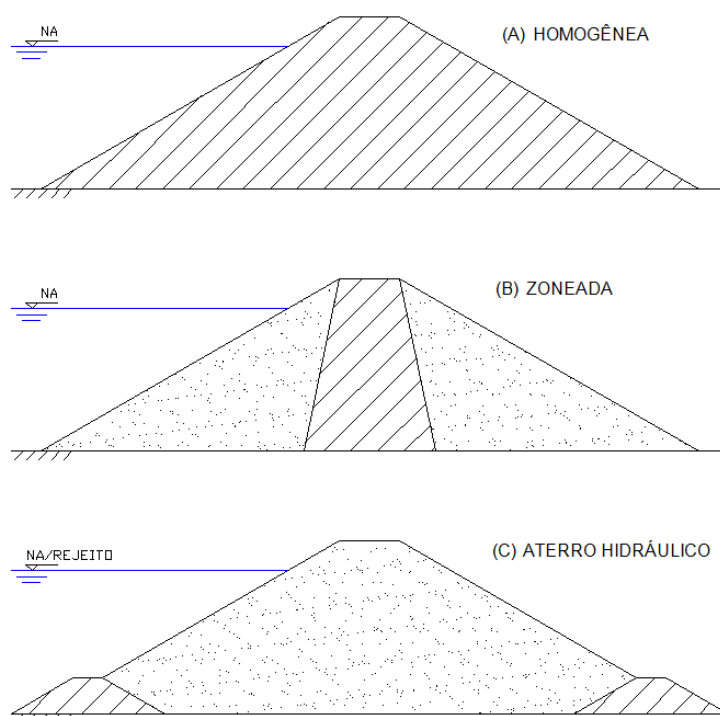


Figura 2.1 – Tipos usuais de barragens de terra

Tabela 2.1 – Barragens de terra usuais

TIPO	DESCRIÇÃO	UTILIZAÇÃO
Homogênea	Seção transversal constituída por apenas um tipo de material.	Em locais onde as áreas de empréstimo não apresentam grandes variações em relação ao tipo do material (GAIOTO, 2003).
Zoneada	Seção transversal constituída por zonas distintas de materiais argilosos e granulares.	Quando há facilidade de se explorar as áreas de empréstimo de forma discriminada em relação aos materiais argilosos e granulares (GAIOTO, 2003).
Aterro hidráulico	Construídas por meio de processos de hidromecanização (conjunto de processos que envolve a exploração, transporte e deposição de um solo em uma área predeterminada, com o auxílio de água).	Aterro de grandes áreas, como por exemplo aeroportos, estradas e zonas comerciais e residenciais, além da construção de barragens e diques (CRUZ, 1996).

As barragens de enrocamento, por sua vez, são compostas por rocha fragmentada e núcleo composto por material de baixa permeabilidade. Pode-se considerar a utilização de uma membrana de concreto ou de asfalto na face de montante da barragem, em substituição ao núcleo de baixa permeabilidade, em casos onde não haja material suficiente para construção do mesmo (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2004).

No caso da utilização de núcleo impermeável em barragens de enrocamento, o mesmo deve possuir espessura suficiente para controlar a percolação d'água, permitir a passagem eficiente dos equipamentos de compactação e minimizar os efeitos de recalques diferenciais e possíveis fissuras. Usualmente, empregam-se núcleos verticais ou inclinados, conforme mostra a Figura 2.2.

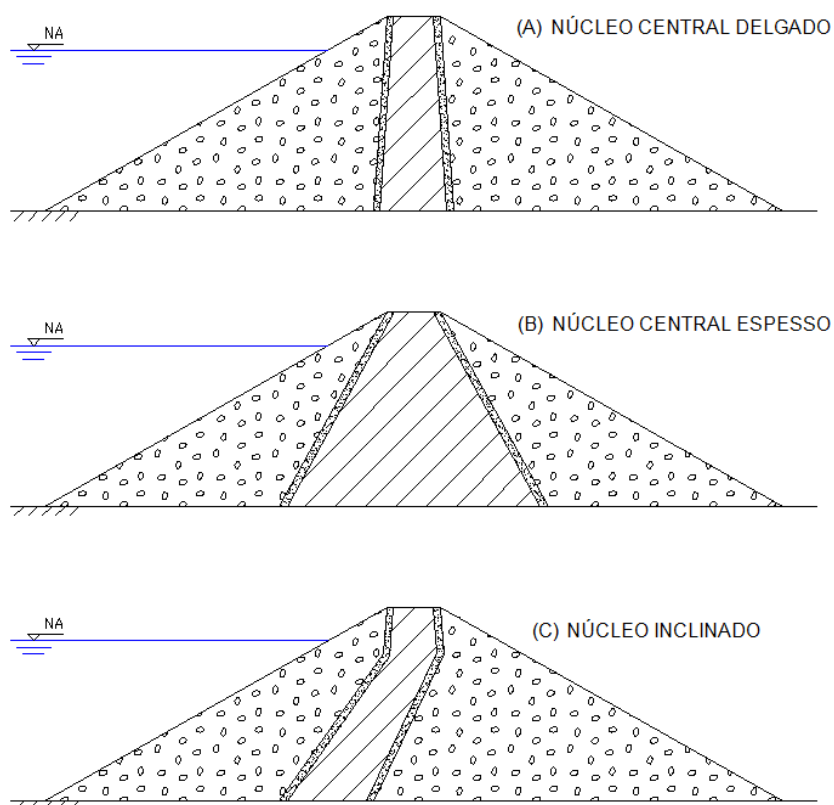


Figura 2.2 – Barragens de enrocamento com núcleo de terra

Além dos tipos apresentados de seção transversal de barragens de terra e enrocamento, outras possibilidades têm sido utilizadas com funções específicas definidas em projeto, como por exemplo a utilização de geossintéticos como barreiras de fluxo d'água em barragens (USSD, 2009). Detalhes a respeito da utilização de geomembranas em barragens, com a finalidade de controlar o fluxo, estão apresentados no Tópico 2.5.4.

2.1.2 Principais causas de deterioração e falhas

O entendimento das causas de incidentes é um elemento crítico no projeto e na construção de novas barragens e na avaliação das existentes. Segundo dados americanos (*US ARMY CORPS OF ENGINEERS*, 2004), entre as principais causas de incidentes em barragens, estão: ocorrência de galgamento, como resultado do dimensionamento inadequado do vertedouro; infiltração de água e erosão interna (*piping*); instabilidade de taludes, e; vazamentos nos condutos de descarga.

Uma revisão dos dados publicados em estudos de 1975 e 1988 por ASCE/USCOLD (*apud*. USSD, 2009) indicam que aproximadamente 40% das falhas ou acidentes em barragens de terra ou enrocamento são resultado de infiltração e erosão interna (*piping*) pela barragem. Segundo o mesmo estudo, descarga de cheias e/ou galgamento são a segunda maior causa de incidentes e falhas.

ICOLD (1984) apresenta uma compilação de dados acerca de incidentes e falhas em barragens, no qual são classificadas as principais causas ou tipos de deterioração que afetam barragens de concreto, barragens de alvenaria, barragens de terra e/ou enrocamento, obras anexas e reservatórios, conforme Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Causas de danos e falhas em barragens (adaptado de ICOLD, 1984)

Tipo de barragem	Causas de danos e falhas
Barragens de Terra e/ou Enrocamento	> Galgamento durante descarga de cheia, devido à capacidade inadequada do vertedouro ou problemas com as comportas;
	> Erosão interna ao longo da interface da barragem com a fundação ou ao longo do contato do aterro com estruturas anexas ou adjacentes, ou <i>piping</i> concentrado no próprio aterro devido à zona de filtração inadequada ou inexistente;
	> Não homogeneidade no aterro e/ou na fundação, levando à ruptura da fundação ou erosão;
	> Recalques em excesso na fundação;
	> Fissuras devidas a recalques, resultando em <i>piping</i> ;
	> Liquefação.
Barragens de concreto	> Resistência ao cisalhamento insuficiente e presença de descontinuidades na fundação;
	> Excesso de subpressão nas fundações devido a drenagem inadequada ou inexistente;
	> Falta de estabilidade da barragem;
	> Falta de precauções para lidar com deformações excessivas ou diferenciais da fundação;
	> <i>Piping</i> e erosão da fundação causadas pela alta permeabilidade.

No caso de barragens de terra e/ou enrocamento, através da Tabela 2.2 observa-se que muitos dos fenômenos que levam a danos e falhas estão relacionados à percolação d'água através da barragem, reforçando a necessidade de estudos que tenham por finalidade a redução das vazões de percolação e o controle das cargas de pressão hidráulica dentro do maciço de aterro e da fundação da barragem.

O número, a altura e a quantidade de barragens têm aumentado nos últimos anos, assim como a quantidade de problemas técnicos apresentados pelas mesmas (CIGB/ICOLD, 1987). Por esse motivo, torna-se necessário o estudo de procedimentos que visem à segurança dessas estruturas, assim como expõe o tópico 2.2.

2.2 SEGURANÇA DE BARRAGENS

Uma barragem pode ser construída para atender a uma finalidade específica ou a finalidades múltiplas, entre as quais podem ser citadas: geração de energia elétrica, abastecimento de água, controle de enchentes, navegação, saneamento, irrigação e contenção de rejeitos (GAIOTO, 2003).

A garantia das condições de segurança de uma barragem é resultante de uma série de fatores, entre os quais podem ser citados aspectos estruturais, geotécnicos, hidráulicos, operacionais e ambientais, visando a estabelecer conhecimento contínuo e adequado do comportamento da mesma (CBDB, 2001). A garantia das condições de segurança das barragens existentes é um processo constante, necessitando de reavaliações regulares do estado das mesmas e de todas as demais estruturas e instalações (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2002).

Ao longo da história, a população humana foi afetada por várias rupturas de barragens, como por exemplo as barragens de St. Francis e Teton (GRAHAN, 1999). Até mesmo na atualidade, esse tipo de desastre é passível de ocorrência, como documentado em barragens britânicas (CHARLES *et al.*, 2011), barragens de rejeito europeias (RICO *et al.*, 2008), barragens chinesas (HE *et al.*, 2008) e barragens americanas (DAM SAFETY, 2014). No Brasil, a situação não é diferente e muitos incidentes envolvendo barragens ocorreram nos últimos anos, como por exemplo em Camará/2004, Campos Novos/2006 e Algodões/2008, conforme Menescal (2009). Situações como as citadas tornam pública a necessidade de estudos envolvendo a segurança de barragens.

Recentemente, tem havido um aumento na quantidade de falhas e danos em barragens, como consequência do envelhecimento das mesmas e mudanças atípicas no

clima, entre outros fatores, fazendo com que a segurança dessas estruturas seja um fator de grande importância na atualidade (JEON *et al.*, 2009). Como consequência do exposto, novas normas e critérios de projeto, construção, observação, inspeção e acompanhamento da operação de barragens tem sido elaborados, demonstrando a crescente preocupação com a segurança dessas estruturas.

Sortis *et al.* (2007) expõem que o comportamento de barragens pode ser analisado através de ferramentas estatísticas e de técnicas de identificação estrutural (baseadas no método dos elementos finitos), apresentando uma discussão a respeito dos métodos citados. Como resultado, o método baseado na identificação estrutural dos parâmetros da barragem, formulado com base no método dos elementos finitos, resultou em maior eficiência na predição do comportamento futuro da barragem.

Harrald *et al.* (2006) fazem uma revisão de literatura a respeito das diferentes metodologias empregadas na priorização de riscos e tomada de decisões relativas à operação e à manutenção de barragens, visando a segurança das mesmas. Essa fonte define que riscos, de uma maneira simplificada, podem ser definidos como a probabilidade de ocorrência de um evento desfavorável, multiplicada pela consequência do mesmo caso ele ocorra. Através das metodologias apresentadas na obra, pretende-se evitar acidentes.

Um acidente é resultado de uma combinação de vários eventos individuais, os quais em conjunto resultarão na falha (PERINI, 2009). O mesmo autor complementa que esses eventos geralmente são difíceis de serem estimados, compreendidos e quantificados, o que dificulta a avaliação de risco para barragens. Dessa forma, a segurança de barragens está associada aos riscos tolerados.

As diretrizes publicadas por ANCOLD (2001) definem um princípio fundamental relativo a riscos, conhecido como ALARP (*reducing risks as low as reasonably practicable*). O mesmo diz respeito a “reduzir os riscos tanto quanto razoavelmente praticável”. O princípio ALARP baseia-se na obrigação legal dos proprietários de barragens a reduzirem os riscos até o ponto no qual qualquer redução adicional de riscos resultaria em custos maiores do que o benefício (redução de risco) atingido. Uma discussão sobre avaliação de risco e tomada de decisões em segurança de barragens pode ser encontrada em Bowles (2003).

Yiadom e Bialek (2009) apresentam o panorama de contribuição do Programa de Segurança de Barragens EBMUD (*The East Bay Municipal Utility District*). O programa citado visa prevenir danos a propriedades, danos pessoais e perda de vida quando da ocorrência de falhas em barragens. Para tanto, o mesmo se baseia no monitoramento da instrumentação, inspeções visuais e revisões periódicas da segurança da barragem.

2.2.1 Legislação nacional e fiscalização

Neste tópico, são apresentados os principais aspectos de interesse à esse trabalho com relação à legislação em vigor no Brasil, no tocante à segurança de barragens. Com este propósito, também são descritas as responsabilidades de três das principais entidades que controlam a geração hidrelétrica, o uso de recursos hídricos e a disposição de rejeitos da mineração.

O Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) é vinculado ao Ministério de Minas e Energia, possuindo a finalidade de promover o planejamento e o fomento da exploração e do aproveitamento dos recursos minerais, bem como assegurar, controlar e fiscalizar o exercício das atividades de mineração em todo o território nacional. Estas responsabilidades foram estabelecidas através da Lei 8.876/1994 (BRASIL, 1994).

A Lei nº 9.427/1996 (BRASIL, 1996) institui a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a qual tem por finalidade regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do governo federal. A lei citada passou por algumas revisões (consultar BRASIL, 2013).

No dia 20/09/2010, foi promulgada a Lei nº 12.334/2010 (BRASIL, 2010), a qual estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, além de criar o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Esta lei aplica-se às categorias de barragens citadas acima, desde que possuam alguma das características apresentadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Abrangência da Lei nº 12.334/2010

Critério	Descrição
Altura do maciço	Contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15 m
Capacidade total do reservatório	Maior ou igual a 3.000.000 m ³
Conteúdo do reservatório	Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis
Categoria de dano potencial associado	Médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas

De acordo com a PNSB, o empreendedor é o responsável legal pela segurança da barragem, cabendo ao mesmo o desenvolvimento de ações para garanti-la. Empreendedor

é definido como o agente privado ou governamental com direito real sobre as terras onde se localizam a barragem e o reservatório ou que explore a barragem para benefício próprio ou da coletividade.

Com a promulgação da Lei nº 12.334/2010, a Agência Nacional das Águas (ANA) assumiu as atribuições de organizar, implantar e gerir o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), de promover a articulação entre os órgãos fiscalizadores de barragens, de coordenar a elaboração do Relatório de Segurança de Barragens e de fiscalizar a segurança das barragens por ela outorgadas (ANA, 2013).

Em face do exposto, a Agência Nacional das Águas (ANA) editou a Resolução nº 91/2012 (ANA, 2012), a qual estabelece a periodicidade de atualização, a qualificação do responsável e equipe técnica, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento tanto do Plano de Segurança da Barragem quanto da Revisão Periódica de Segurança da Barragem.

O Plano de Segurança da Barragem é um instrumento da Política Nacional de Segurança de Barragens, cuja implementação pelo empreendedor é obrigatória, com o objetivo de auxiliá-lo na gestão da segurança da barragem (ANA, 2012). Conforme a resolução, a extensão e detalhamento de cada volume do Plano de Segurança da Barragem deverá ser proporcional à complexidade da barragem e suficiente para garantir condições de segurança adequadas à mesma.

2.3 AUSCULTAÇÃO GEOTÉCNICA

Auscultação é o nome dado ao conjunto de formas de observação do comportamento de uma barragem e de suas fundações, com o objetivo de controlar suas condições de segurança, comprovar as hipóteses e métodos de cálculo adotados em projeto e verificar a necessidade de medidas corretivas, caso haja algum desvio em relação ao esperado (ITAIPU, 2014). Dessa forma, os procedimentos de auscultação englobam não somente a instrumentação da barragem (tópico 2.3.1), mas também as inspeções visuais efetuadas pelas equipes de segurança de barragem (tópico 2.3.2).

2.3.1 Instrumentação

O sistema de instrumentação é uma das principais formas de avaliação das condições de segurança de uma determinada barragem. Instrumentação pode ser definida

como a aquisição, apresentação e avaliação de informação oriunda de dispositivos de medição instalados em barragens ou próximo às mesmas (*DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES AND MINES, 2002*).

As leituras de instrumentação e monitoramento de performance devem ser realizadas durante a construção, primeiro enchimento, operação inicial (chamada de comportamento a curto prazo) e durante o período de operação (denominado comportamento a longo prazo), como salienta FERC (2010). O sistema de monitoramento permite aos engenheiros validar as hipóteses e métodos de cálculo desenvolvidos durante o projeto e avaliar como a barragem, estruturas auxiliares e sua fundação se comportam ao longo do ciclo de vida.

A avaliação das condições de segurança de uma barragem, através de um plano de instrumentação, pressupõe a existência de medidas reparadoras que tenham sido estudadas e que possuam viabilidade técnica e econômica, as quais devem ser facilmente aplicadas para sanar as eventuais deficiências detectadas (CRUZ, 1996).

A seleção de um determinado instrumento deve auxiliar na obtenção de uma resposta específica, ou seja, caso não haja questionamento então não há necessidade de instrumentação (DUNNICLIFF, 1988). Existem muitos parâmetros que podem ser analisados ao longo do tempo para assegurar as condições de segurança de uma barragem, entre os quais podem ser citados (CIGB/ICOLD, 1988): deslocamentos horizontais e verticais, tensões, rotações (para barragens de concreto), poropressão e subpressão, fluxo através da barragem e sua fundação, temperatura (barragens de concreto) e movimentação de juntas (barragens de concreto).

Os parâmetros citados podem ser quantificados através de diferentes tipos de instrumentos, como piezômetros, medidores de nível d'água, medidores de vazão, marcos superficiais, medidores de recalque e células de pressão total. O tipo, número e localização de uma determinada instrumentação depende do *layout* de projeto e das técnicas de construção adotadas (*US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2004*). Barragens de terra e/ou enrocamento possuem requisitos especiais de instrumentação, conforme exposto no tópico 2.3.1.1. As limitações da instrumentação encontram-se expostas no tópico 2.3.1.2.

2.3.1.1 Instrumentação de barragens de terra e enrocamento

FERC (2010) apresenta recomendações de instrumentação mínima para vários tipos de barragens, existentes (já construídas) ou em projeto, de acordo com a classificação

de risco potencial. Para barragens de terra e/ou enrocamento existentes com riscos potenciais significantes, são recomendadas as seguintes medições: inspeções visuais, nível do reservatório, nível de jusante, vazões de drenagem, infiltração e vazamento, poropressão e subpressão (nas estruturas de concreto).

As recomendações de instrumentação propostas por FERC (2010) para barragens propostas (projeto) são menos rigorosas que as apresentadas para barragens existentes, pois nestas torna-se desnecessária a instalação de instrumentos com a finalidade de monitorar a construção e primeiro enchimento. De acordo com a fonte citada, no caso de barragens em projeto, além dos instrumentos já citados, recomenda-se também a medição deslocamentos e recalques da crista, movimentação da fundação e cargas sísmicas.

No caso das medições de nível d'água e de poropressão, no aterro e na fundação de barragens, é geralmente possível utilizar instrumentos simples, como por exemplo piezômetros de tubo aberto, desde que os materiais no entorno não sejam de granulação fina (CIGB/ICOLD, 1988). Quando necessárias respostas rápidas, no caso de materiais de baixa permeabilidade, as mesmas podem ser obtidas através de outros aparelhos, como por exemplo piezômetros elétricos de resistência.

Os medidores de recalques objetivam a medição de deslocamentos verticais absolutos, sejam os mesmos da fundação ou do maciço compactado (CRUZ, 1996). A mesma fonte cita como instrumentos com essa finalidade: medidores de recalque de tubos telescópios, tipo USBR, tipo KM, tipo magnético e tipo caixa sueca.

A medição dos movimentos horizontais, na supervisão do comportamento das barragens de terra ou enrocamento, é geralmente de grande importância, pois os mesmos são decorrentes da compressibilidade dos materiais do aterro, assim como podem ser influenciados pela forma do vale ao longo das ombreiras (SILVEIRA, 2006). Como exemplos de equipamentos instalados com esta finalidade, podem ser citados os seguintes instrumentos: extensômetros múltiplos horizontais (de fio, de haste e magnético) e inclinômetros.

Os medidores de vazão objetivam determinar as vazões individuais de drenos ou somatórios ao longo de trechos ou da totalidade da estrutura, além de determinar vazões de percolação por maciços de terra ou rocha (CRUZ, 1996). Dois tipos de instrumentos com a finalidade de determinar vazões são geralmente utilizados em barragens: vertedores *Parshall* e vertedores triangulares ou retangulares.

Algumas vezes é também necessário o conhecimento da pressão total dentro do aterro ou entre o aterro e a fundação ou estruturas adjacentes (CIGB/ICOLD, 1988). Para esta finalidade, podem ser utilizadas células de pressão total. Caso haja algum piezômetro

instalado próximo à célula, é possível avaliar a tensão efetiva atuante no ponto de instalação através da análise conjunta dos instrumentos.

2.3.1.2 Limitações da instrumentação

Apesar de a instrumentação ser uma ferramenta útil para avaliação das condições de segurança de um empreendimento e verificação das hipóteses adotadas em projeto, a mesma está sujeita a diversas limitações. Cruz (1996) lista uma série de limitações da instrumentação, entre as quais podem ser citadas:

- A instalação do instrumento pode ser conduzida de tal modo que altere as condições prevalentes no local, obtendo-se um valor falso que não condiz com a realidade;
- Após a instalação, vários tipos de medidores não permitem uma verificação completa do funcionamento dos mesmos;
- Na maioria dos casos os instrumentos indicam um comportamento médio das estruturas, suprimindo os extremos de comportamento, os quais podem constituir dados de grande importância;
- Alguns tipos de instrumentos são susceptíveis a danos irreparáveis, como no caso de atravessarem zonas submetidas a deslocamentos concentrados ao longo de uma superfície, ou camada de espessura relativamente pequena, causando o cisalhamento dos mesmos.

Em face das limitações expostas, os dados de instrumentação devem ser analisados em conjunto com inspeções visuais e outros sistemas de observação, como forma de verificação das condições de segurança de uma determinada barragem. A avaliação dos dados de instrumentação, em muitos casos, também pode exigir a aplicação de métodos estatísticos, numéricos e computacionais.

2.3.2 Inspeções visuais

Entre as práticas mais importantes em um programa de segurança de barragens estão as inspeções visuais, as quais possuem a finalidade de identificar comportamentos anômalos e possíveis deteriorações das estruturas das mesmas (*DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES AND MINES*, 2002). Essa importância é justificada em face das limitações expostas no Tópico 2.3.1.2.

Através de inspeções visuais pode-se facilmente detectar indícios de mau desempenho de barragens, tais como deslocamentos, cisalhamentos, saliências, depressões, infiltrações, vazamentos, trincas e fissuras, além de ser possível determinar espacialmente a distribuição dos mesmos (FERC, 2010). Por esse motivo, inspeções visuais (dados qualitativos) devem ser feitas em conjunto com o monitoramento da instrumentação (dados quantitativos), constituindo os principais meios para engenheiros verificarem as condições de segurança de barragens em serviço ou construção.

Informações mais detalhadas acerca de inspeções visuais podem ser consultadas em Ministério de Integração Nacional (2002), o qual apresenta uma relação das principais anomalias geralmente encontradas em barragens de terra e concreto, além de indicar as causas e possíveis consequências das manifestações patológicas.

2.4 FLUXO DE ÁGUA EM MEIOS POROSOS

Permeabilidade é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento de fluidos através de sua matriz porosa. O estudo do fluxo de água é de grande importância na engenharia geotécnica, pois a água, ao percolar no interior do solo, exerce em suas partículas forças que alteram o estado de tensão do maciço, podendo resultar na instabilidade do mesmo, além de induzir outros mecanismos de deterioração.

Os principais conceitos relacionados a fluxo estão descritos nos tópicos 2.4.1 a 2.4.4. De uma forma geral, os conceitos de fluxo de água nos solos podem ser aplicados nos seguintes estudos: estimativa de vazão de percolação em aterros; rebaixamento de lençóis freáticos; dimensionamento de sistemas de drenagem; previsão de recalques ao longo do tempo; análises de estabilidade de taludes, e; estudos relacionados a erosão e *piping*.

2.4.1 Cargas hidráulicas

A Equação de Bernoulli traduz o princípio de conservação de energia ao escoamento de um fluido incompressível, não viscoso e em regime permanente. Segundo esse princípio, a energia potencial total (carga total) de um fluido em escoamento corresponde à soma das cargas altimétrica, de pressão e cinética no ponto considerado, conforme mostra a Equação 2.1.

$$h_T = h_A + h_p + h_c = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \quad (2.1)$$

Sendo:

- h_T : carga total;
- h_A : carga altimétrica (ou de elevação);
- h_p : carga de pressão;
- h_c : carga cinética (de velocidade);
- z : elevação do ponto;
- p : pressão no ponto;
- v : velocidade no ponto;
- γ : peso específico do fluido;
- g : gravidade.

No caso de fluxo em solos, a velocidade do fluxo é muito baixa, tornando a carga cinética desprezível (LAMBE E WHITMAN, 1979). Por esse motivo, neste caso, pode-se considerar que a carga total é equivalente à soma da carga de pressão com a carga de elevação, conforme mostra a Equação 2.2. Para que ocorra fluxo entre dois pontos no interior do maciço de solo, é necessário que haja diferença de carga total entre os mesmos.

$$h_T = h_A + h_p = z + \frac{p}{\gamma} \quad (2.2)$$

O instrumento utilizado para determinação da carga de pressão na massa de solo é denominado piezômetro (Figura 2.3). Dunicliff (1988) define que o mesmo consiste em um instrumento confinado abaixo da superfície do solo, de tal forma que responde pela poropressão apenas ao redor de si mesmo, no nível em que foi instalado.

Supondo um piezômetro colocado num ponto qualquer do solo, a água se eleva até uma determinada cota. A carga total corresponde à diferença entre a cota atingida pela água e a cota do plano de referência, enquanto que a carga de pressão corresponde a altura que a água se eleva dentro do tubo em relação ao ponto de instalação. A Figura 2.4 ilustra o exposto.

A carga piezométrica pode ser apresentada em unidades de pressão, sendo então denominada poropressão. Dunicliff (1988) explica que a poropressão pode ser positiva, correspondendo à pressões acima da pressão atmosférica, ou negativa, nos casos onde a pressão da água é inferior à atmosférica.

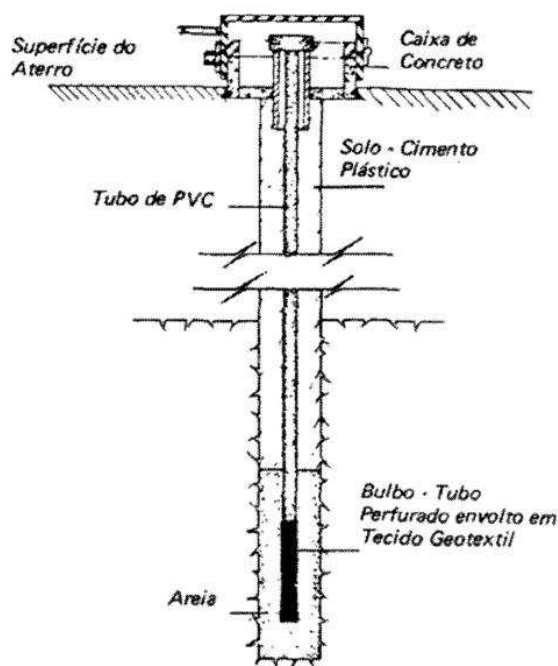


Figura 2.3 – Perfil usual de instalação de piezômetro, adaptado de Cruz (1996)

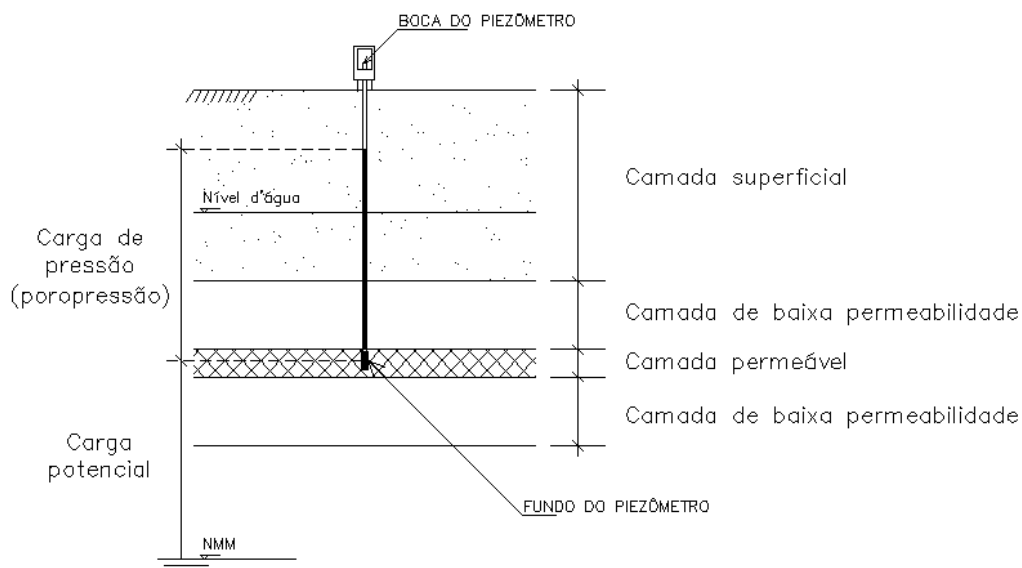


Figura 2.4 – Leitura de um piezômetro e cargas hidráulicas

2.4.2 Lei de Darcy

Nos anos 1850, Darcy estudou as propriedades do fluxo d'água em meios porosos, através de ensaios em permeâmetros. A experiência consistiu em percolar água através do

solo, variando-se o comprimento da amostra e a pressão d'água nas faces da mesma, medindo-se a vazão resultante.

A relação entre a carga dissipada na percolação e a distância ao longo da qual a carga se dissipa é chamada de gradiente hidráulico, conforme Equação 2.3. Os resultados do experimento de Darcy indicaram que a velocidade de percolação é proporcional ao gradiente hidráulico, surgindo o conceito de coeficiente de permeabilidade do solo, apresentado na Equação 2.4. Igualando-se os termos, a lei de Darcy pode ser escrita conforme a Equação 2.5.

$$i = \frac{h}{L} \quad (2.3)$$

$$v = k * i = \frac{Q}{A} \quad (2.4)$$

$$Q = k * i * A = k * \frac{h}{L} * A \quad (2.5)$$

Sendo: i : gradiente hidráulico;
 h : carga dissipada na percolação;
 L : distância ao longo da qual a carga de dissipa;
 k : coeficiente de permeabilidade do solo;
 A : área do permeâmetro.

Uma premissa básica da lei de Darcy é que o fluxo seja laminar e constante ao longo do meio poroso saturado (MITCHELL E SOGA, 2005). Segundo a mesma fonte, no caso de fluxo entre partículas de grande diâmetro pode ocorrer fluxo turbulento, para o qual a lei de Darcy não se aplica. Condições para ocorrência de fluxo turbulento podem ser encontradas em pedregulhos e enrocamentos.

2.4.3 Fatores que afetam a condutividade hidráulica

Taylor (1948) elaborou uma equação relacionando a permeabilidade determinadas do características do líquido em percolação e do solo, conforme a Equação 2.6. A mesma pressupõe que o fluxo através de meios porosos é similar ao fluxo em um conjunto de tubos capilares.

$$k = D^2 * \frac{\gamma_w}{\mu} * \frac{e^3}{1 + e} * C \quad (2.6)$$

Sendo: k : coeficiente de permeabilidade;
 D : diâmetro de uma esfera equivalente ao tamanho dos grãos do solo;
 γ_w : peso específico do líquido;
 μ : viscosidade do líquido;
 e : índice de vazios do solo;
 C : coeficiente de forma.

Da mesma forma que Taylor (1948), Lambe e Whitman (1979) também apontam que tanto características do líquido em percolação quanto características do solo influenciam na permeabilidade. Os principais fatores que afetam a permeabilidade do solo estão descritos nos tópicos 2.4.3.1 a 2.4.3.6.

2.4.3.1 Influência da temperatura

Uma vez que o coeficiente de permeabilidade depende do peso específico e da viscosidade do líquido, o mesmo está relacionado à temperatura do líquido no momento de execução do ensaio. Convencionou-se adotar o coeficiente referido à temperatura de 20 graus Celsius, aplicando-se a correção apresentada na Equação 2.7.

$$k_{20} = k * \frac{\mu}{\mu_{20}} \quad (2.7)$$

Sendo: k_{20} : coeficiente de permeabilidade a 20°C;
 μ_{20} : viscosidade do líquido a 20°C.

2.4.3.2 Influência da granulometria

Estudos experimentais sugerem que as partículas finas do solo possuem maior influência na permeabilidade (LAMBE E WHITMAN, 1979). Estudos de Hazen (1892) mostram que, no caso de areias saturadas, a permeabilidade do solo está relacionada fundamentalmente com o diâmetro abaixo do qual se situam 10% em peso das partículas

(D_{10}), conforme mostra a Equação 2.8. O diâmetro em questão também é conhecido como diâmetro efetivo do solo, denominação que se origina da boa correlação entre ele e a permeabilidade dos solos.

$$k = C_H * D_{10}^2 \quad (2.8)$$

Sendo: k : permeabilidade (cm/s);
 C_H : coeficiente empírico de Hazen;
 D_{10} : diâmetro abaixo do qual se situam 10% em peso das partículas (cm).

A Equação 2.8 fornece resultados aproximados, uma vez o coeficiente empírico pode assumir uma série de valores, conforme a natureza do solo em estudo. Cedergren (1989) sugere que o coeficiente C_H varia entre 90 a 120, enquanto que Lambe e Whitman (1979) sugerem que a variação ocorra entre 1 a 42.

2.4.3.3 Influência do estado do solo

O estado do solo pode ser expresso em termos de compactidade, a qual refere-se ao solos grossos (areias e pedregulhos) e indica o quão próximas as partículas sólidas se encontram umas das outras. Solos densos possuem menor índice de vazios e menor porosidade em relação a solos menos densos, resultando em menor permeabilidade. Deste modo, a compactidade é um dos fatores que influenciam o coeficiente de permeabilidade.

2.4.3.4 Influência da composição do solo

A composição do solo geralmente possui pequena influência no parâmetro em questão, no caso de siltes, de areias e de pedregulhos. Entretanto a predominância de alguns tipos de minerais na constituição dos solos pode influenciar significativamente a permeabilidade. Lambe e Whitman (1979) citam quem no caso de argilas, a magnitude da permeabilidade é muito influenciada pela composição do solo, podendo apresentar grandes variações.

2.4.3.5 Influência da estrutura do solo

As relações teóricas apresentadas anteriormente (Equações 2.6 e 2.8), indicam que a permeabilidade de um solo é função do tamanho das partículas e, como consequência, dos vazios deixado entre elas. Dessa forma, o arranjo das partículas tem grande influência na permeabilidade do solo. Mitchell e Soga (2005) afirmam que estruturas com maior proporção de poros grandes são mais permeáveis que estruturas formadas por poros pequenos, mesmo nos casos onde o índice de vazios permanece constante.

No caso das argilas, atuam forças de natureza capilar e molecular que definem a estrutura do solo. Se as forças atuantes entre duas partículas de argila resultam em atração, as mesmas tendem a se aproximar e formar uma estrutura floculada, a qual apresenta vazios maiores. Entretanto, caso a resultante seja de repulsão, surge uma estrutura dispersa, na qual as partículas se encontram mais paralelas entre si, resultando em vazios menores, mesmo que em igual volume. Por esse motivo, Lambe e Whitman (1979) concluem que a estrutura floculada favorece o fluxo em detrimento da estrutura dispersa.

Souza Pinto (2006) salienta que o solo, em geral, não é isotrópico em permeabilidade. O mesmo autor afirma que solos sedimentares costumam apresentar maiores coeficientes de permeabilidade na direção horizontal do que na vertical, em decorrência do fato das partículas tenderem a ficar com suas maiores dimensões orientadas na posição horizontal, além de que as camadas decorrentes da sedimentação apresentarem permeabilidades distintas.

A anisotropia da permeabilidade nas direções horizontal e vertical não ocorre somente para solos sedimentares, sendo também verificada em solos compactados. Maciços de solo naturais ou compactados são muitas vezes caracterizados por heterogeneidade espacial resultante da variação aleatória das propriedades dos materiais por causa de processos geomofológicos, tais como sedimentação ou intempéries em solos naturais ou o processo de construção, em estruturas de terra.

Cho (2012) apresenta uma discussão a respeito da consideração de variabilidade espacial da permeabilidade em aterros, como resultado da estratificação das camadas. Souza Pinto (2006) afirma que coeficientes médios de permeabilidade na direção horizontal comumente são de 5 a 15 vezes maiores que na vertical, enquanto que Cruz (1996) afirma que, no caso de barragens, essa diferença comumente é igual a 5 vezes.

2.4.3.6 Influência do grau de saturação

A Lei de Darcy (Equação 2.5) também pode ser aplicada em solos não saturados, como por exemplo aqueles acima do nível freático, onde atuam poropressões negativas (MITCHELL E SOGA, 2005). No caso de solos não saturados, permanecem bolhas de ar contidas pela tensão superficial da água, as quais constituem obstáculos ao fluxo, reduzindo portanto a permeabilidade. Dessa forma, considera-se que o grau de saturação do solo é um dos fatores que possuem influência sobre a permeabilidade do mesmo.

2.4.4 Equação diferencial governante de escoamentos

O entendimento do escoamento de fluidos através do solo pode ser feito a partir de um elemento de solo de dimensões infinitesimais, como o apresentado na Figura 2.5. Pode-se dizer que ocorre um fluxo laminar “ q ” através do mesmo, com componentes nas direções “ x ”, “ y ” e “ z ”, conforme a Equação 2.9.

$$q = q_x + q_y + q_z \quad (2.9)$$

Sendo: q : fluxo laminar através do elemento de solo;
 q_x , q_y , q_z : componentes do fluxo nas direções “ x ”, “ y ” e “ z ”, respectivamente.

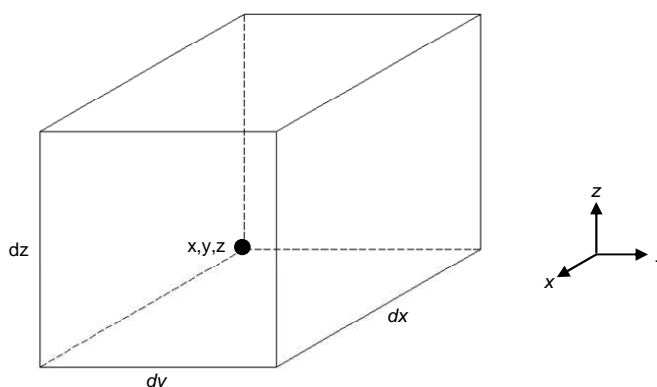


Figura 2.5 – Elemento de solo de dimensões infinitesimais

Considerando-se a Lei de Darcy, cada uma das componentes do fluxo pode ser escrita no formato ($q=k.i.a$), sendo “ a ” equivalente à área infinitesimal da face do cubo, na

direção em questão. Entretanto, considerando-se fluxo bidimensional (2-D) ocorrendo apenas nas direções “x” e “z”, temos que a vazão ao longo da direção “y” é nula ($q_y=0$). Dessa forma, restam apenas as parcelas “ q_x ” e “ q_z ”, vide Equação 2.10.

$$q = k_x \cdot i \cdot a + k_z \cdot i \cdot a \quad (2.10)$$

A variação de fluxo, que ocorre internamente ao elemento segundo determinada direção, será igual à diferença entre o fluxo que entra por determinada face e sai pela face oposta. Considerando-se que o coeficiente de permeabilidade é constante, pode-se anular a parcela referente ao mesmo ($\partial k_x / \partial x = \partial k_z / \partial z = 0$). Dessa forma, obtêm-se a Equação 2.11.

$$\Delta q = \Delta q_x + \Delta q_z = \left(k_z \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + k_x \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right) \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (2.11)$$

Sendo: h : carga total;
 k_x, k_z : permeabilidade nas direções “x” e “z”, no ponto (X, Y, Z).

O volume de água dentro do elemento de solo pode ser expresso conforme a Equação 2.12. A taxa de variação do volume de água dentro do elemento de solo, por sua vez, pode ser escrita conforme a Equação 2.13. Por outro lado, considerando-se que o volume de sólidos dentro do elemento é constante, pode-se escrever taxa de variação do volume de água conforme a Equação 2.14.

$$V_w = \frac{S \cdot e}{1 + e} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (2.12)$$

$$\Delta q = \frac{\partial V_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S \cdot e}{1 + e} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \right) \quad (2.13)$$

$$\Delta q = \frac{dx \cdot dy \cdot dz}{1 + e} \cdot \frac{\partial (S \cdot e)}{\partial t} \quad (2.14)$$

Sendo: e : índice de vazios do solo;
 S : grau de saturação do solo;
 t : parcela referente ao tempo.

Igualando-se as Equações 2.13 e 2.14, obtêm-se a Equação 2.15, a qual é representativa do fluxo laminar bidimensional em solos. Considerando-se que o fluxo é constante, tanto o índice de vazios quanto a saturação não irão se alterar ao longo do tempo. Dessa forma, surge a Equação 2.16, representativa do fluxo constante ao longo do tempo, com anisotropia de permeabilidade nas direções horizontal e vertical.

$$k_z \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + k_x \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{1}{1+e} \cdot \left(e \cdot \frac{\partial S}{\partial t} + S \cdot \frac{\partial e}{\partial t} \right) \quad (2.15)$$

$$k_z \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + k_x \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0 \quad (2.16)$$

Considerando-se que não haja anisotropia entre as direções horizontal e vertical ($k_x=k_z$), a Equação 2.16 pode ser escrita no formato da Equação 2.17, a qual é conhecida como Equação de Continuidade de Laplace. A mesma indica que as linhas de fluxo interceptam as linhas equipotenciais em ângulos retos.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0 \quad (2.17)$$

2.5 PERCOLAÇÃO EM BARRAGENS DE TERRA

Conforme apresentado na Equação 2.2, para que haja fluxo entre dois pontos no interior do maciço de solo, é necessário que haja diferença de carga total entre os mesmos. Sendo assim, em função da diferença de carga hidráulica total entre os níveis de montante e jusante de uma barragem, há a tendência de fluxo d'água através do aterro e da fundação.

A percolação d'água em barragens de terra e de enrocamento pode resultar no excesso de pressões neutras, na instabilidade do maciço de jusante, em erosão interna (*piping*) através do aterro e/ou fundação, além da formação de caminhos preferenciais na fundação e na base da barragem (*US ARMY CORPS OF ENGINEERS*, 2004). Por esse motivo, torna-se necessário o estudo dos fenômenos envolvidos.

O tópico 2.5.1 apresenta o conceito de gradiente crítico, enquanto que o tópico 2.5.2 apresenta os principais métodos empregados em análises de percolação. As principais formas de controle da percolação em barragens de terra estão descritas no tópico 2.5.3. O tópico 2.5.4 apresenta os fundamentos da utilização de barreiras impermeabilizantes compostas por geomembranas.

2.5.1 Gradiente hidráulico crítico

Solos granulares possuem resistência ao cisalhamento proporcional à tensão efetiva no ponto considerado, uma vez que não apresentam coesão (LAMBE E WHITMAN, 1979). Por esse motivo, quando um solo sem coesão é submetido a uma condição de fluxo que resulta em pressão efetiva nula, o mesmo perde sua resistência ao cisalhamento, resultando no fenômeno conhecido como “areia movediça”.

O fenômeno da “areia movediça” é verificado em fluxos ascendentes, em situações nas quais a magnitude do mesmo é suficiente para igualar o peso do solo submerso, resultando em tensão efetiva nula. O gradiente hidráulico crítico que resulta no fenômeno em questão pode ser escrito conforme a Equação 2.18.

$$i_{crítico} = \frac{\gamma_{submerso}}{\gamma_w} = \frac{\gamma_{saturado} - \gamma_w}{\gamma_w} \quad (2.18)$$

Sendo:

- $i_{crítico}$: gradiente hidráulico crítico;
- $\gamma_{submerso}$: peso específico submerso do solo;
- $\gamma_{saturado}$: peso específico saturado do solo;
- γ_w : peso específico da água.

A perda de resistência e da estabilidade de uma massa de solo, por efeito das forças de percolação, é chamada de ruptura hidráulica. Quando a perda de resistência se inicia em um ponto, ocorre erosão neste local, o que provoca ainda maior concentração de fluxo na região em questão, resultando em mais erosão, a qual aumenta progressivamente. Este fenômeno, conhecido por erosão regressiva (*piping*), é uma das formas mais frequentes de ruptura de barragens.

2.5.2 Análises de percolação

As análises de percolação têm como objetivo principal a estimativa das vazões de percolação, das pressões neutras e dos gradientes hidráulicos no maciço da barragem e na fundação, como forma de verificar as condições de segurança da obra. De um modo geral, o aterro da barragem e seu núcleo, por serem construídos de forma controlada, possuem

permeabilidade inferior à da fundação, mesmo após os tratamentos de impermeabilização aplicados na mesma (GAIOTO, 2003).

As análises de percolação são feitas através de métodos gráficos (tópico 2.5.2.1), de métodos analíticos (tópico 2.5.2.2), de modelos em escala reduzida (tópico 2.5.2.3) e de ferramentas numéricas (tópico 2.5.2.4). Independentemente do método de análise utilizado, deve-se obedecer a correlação fundamental estabelecida pela equação de Laplace, a qual determina que as linhas equipotenciais e as linhas de fluxo são perpendiculares entre si.

2.5.2.1 Método gráfico

Pelo método gráfico, o traçado da rede de fluxo é elaborado considerando-se os enrocamentos e os elementos de filtro como francamente drenantes, através dos quais a água percola sem perda de carga (GAIOTO, 2003). Dessa forma, são determinadas as vazões de percolação, os valores de subpressão e os gradientes hidráulicos esperados.

O método gráfico consiste na representação da rede de fluxo através de uma malha formada por linhas equipotenciais e linhas de fluxo, ortogonais entre si, cujo conceito baseia-se na Equação da Continuidade de Laplace (Equação 2.17). Considerações acerca deste método podem ser encontradas em Cedergren (1989).

2.5.2.2 Métodos analíticos

Os métodos analíticos constituem-se, basicamente, em soluções matemáticas desenvolvidas a partir da Equação da Continuidade de Laplace (Equação 2.17). Os modelos elaborados consideram fluxo em meio homogêneo e condições de contorno bem definidas. Lambe e Whitman (1979) citam, como exemplo, o método analítico desenvolvido por Kozeny e Casagrande para determinação da linha freática em barragem de terra. Algumas considerações acerca destes métodos podem ser encontradas em Muskat (1937) e Cedergren (1989).

2.5.2.3 Modelos em escala reduzida

O uso de modelos em escala reduzida, na engenharia geotécnica, oferece as vantagens de simular fenômenos complexos através de condições controladas, obtendo-se

informações acerca dos mecanismos que regem os fenômenos estudados. Além de permitirem a interpretação qualitativa, os resultados com modelo em escala reduzida são muitas vezes utilizados como referência de calibração para os métodos analíticos, ou para fazer previsões quantitativas da resposta do protótipo.

Os modelos físicos, no entanto, em geral são de uso limitado para solução de problemas de fluxo, devido ao tempo e esforço necessários para construção dos modelos, além das dificuldades causadas pela capilaridade durante os ensaios (LAMBE E WHITMAN, 1979). Por esse motivo, o modelo físico tem sido utilizado para entendimento dos fenômenos envolvidos no fluxo e calibração do modelo numérico. A partir da calibração do modelo numérico, o mesmo é utilizado para as simulações.

Trabalhos têm sido publicados, envolvendo o uso de modelos reduzidos para pesquisas relacionados à geotecnia. Dell'Avanzi *et al.* (2004) apresentam um estudo acerca dos fatores de escala a serem considerados na modelagem centrífuga, considerando-se o fluxo não saturado e a sucção matricial.

Marques e Unas (2010) utilizam modelos reduzidos de barragens de terra para estudos relativos à percolação, nos quais avalia-se o potencial de utilização de tapetes drenantes, drenos de pé de talude, drenos chaminé e núcleo central de baixa permeabilidade. Os resultados obtidos através da análise experimental mostraram-se compatíveis com os valores previstos no modelo numérico, confirmando a validade do mesmo. A partir da calibração e validação do modelo numérico, são feitas simulações com a finalidade de avaliar como os parâmetros adotados no modelo influenciam no fluxo. Na Figura 2.6 são apresentadas fotografias de seções da barragem estudadas através de modelos reduzidos.



Figura 2.6 – Modelos reduzidos de (MARQUES E UNAS, 2010): (A) Barragem homogênea com dreno de pé de talude, e; (B) Barragem com núcleo de baixa permeabilidade

Araújo (2013), por sua vez, utiliza modelagem física em estudo de equivalência entre drenos franceses e tapetes drenantes, em barragens de terra. Através dos ensaios em modelo reduzido, foi possível avaliar da superfície freática tridimensional no interior do maciço da barragem, em função de variações aplicadas no sistema de drenagem interna.

As relações físicas entre o modelo em escala reduzida e o correspondente comportamento do protótipo são descritas pela teoria da semelhança. Segundo a mesma, dois escoamentos são semelhantes se suas características geométricas e físicas, em postos e instantes homólogos, mantém entre si uma relação bem definida.

A semelhança integral exige que se tenha, simultaneamente, semelhança geométrica, cinemática, dinâmica e, eventualmente, termodinâmica. Em termos práticos, contudo, apenas os três tipos primeiros de semelhança são consideradas quando se usam modelos em escala reduzida para representar determinado protótipo (CARGILL E KO, 1983).

A semelhança geométrica é satisfeita quando há uma razão constante de dimensões, entre pontos homólogos do modelo e do protótipo. A semelhança cinemática requer que, além da semelhança geométrica, haja uma razão constante de velocidades e de acelerações. A semelhança dinâmica, por sua vez, é assegurada quando há uma razão constante entre as forças no modelo e no protótipo.

2.5.2.4 Análises numéricas

A Equação da Continuidade de Laplace (Equação 2.17) pode ser resolvida por aproximações através do uso de técnicas de análise numérica. Devido à dificuldade de se obter soluções analíticas para resolver problemas de fluxo em condições de campo, análises numéricas têm sido utilizadas como ferramenta de estudo. Um modelo numérico representa uma simulação matemática de um processo físico real.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma das técnicas usuais para análise de problemas de fluxo. O método em questão consiste em um método numérico aproximado para análise de diversos fenômenos físicos que ocorrem em meios contínuos e que podem ser descritos através de equações diferentes. Para tanto, o mesmo baseia-se na subdivisão da geometria do problema em elementos menores, chamados de elementos finitos, nos quais a aproximação da solução exata pode ser obtida por interpolação de uma solução aproximada. O método em questão encontra-se pormenorizado em Zienkiewicz *et al.* (2013).

2.5.3 Controle da percolação em barragens de terra

Em projetos de barragens, o controle de fluxo pelo maciço, fundação e ombreiras constitui um dos requisitos fundamentais à segurança da obra, visto que a falta de um sistema eficiente de controle de fluxo é uma das causas majoritárias de acidentes e rupturas de barragens (CRUZ, 1996).

O controle da percolação em barragens de terra e enrocamento é necessário para prevenir o excesso de pressões neutras, instabilidade do maciço de jusante, erosão interna (*piping*) através do aterro e/ou fundação, além da formação de caminhos preferenciais na fundação e na base da barragem (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2004). Dessa forma, são necessários trabalhos essencialmente direcionados ao controle da percolação e da erosão (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2002).

Cruz (1996) descreve que o projeto de uma barragem está ligado à arte de controlar o fluxo d'água pelo conjunto barragem/fundação. Conforme o mesmo autor, considerando-se o eixo de simetria de uma barragem genérica, haverá duas situações distintas para controle do fluxo (Figura 2.7): a montante do eixo, todo esforço deve ser concentrado no sentido de vedar ao máximo a barragem e a fundação, e; a jusante do eixo, deve ser facilitada ao máximo a saída da água, através dos sistemas de drenagem da barragem e de sua fundação.

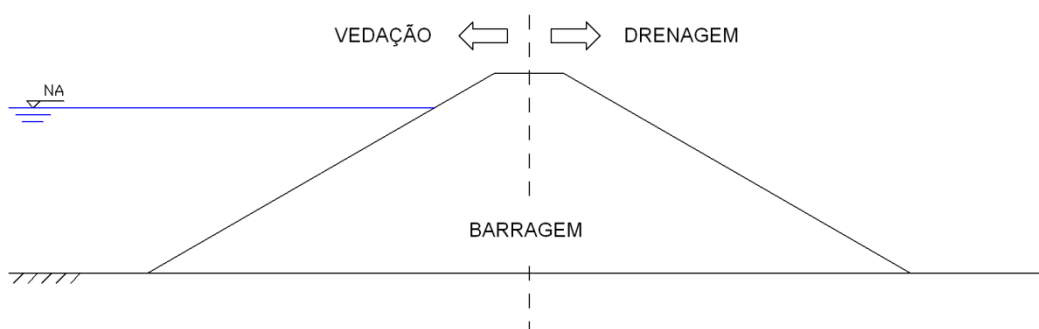


Figura 2.7 – Princípio de controle do fluxo

Sendo inevitável a ocorrência de vazão de percolação, o seu controle passa a ser importante e, na maioria dos casos, fundamental. Por esse motivo, são utilizados dispositivos de drenagem interna da barragem, os quais têm por finalidade a captação e condução da água percolada através da barragem e da fundação, de forma adequada, sem oferecer riscos à segurança da barragem. Entre os principais dispositivos de drenagem

interna de uma barragem, podem ser citados: filtro em chaminé; tapete drenante; dreno de pé de barragem; trincheira drenante, e; poços de alívio.

Os filtros em chaminé podem ser construídos de forma vertical ou inclinada, possuindo a finalidade de interceptar o fluxo horizontal que ocorre no aterro da barragem, evitando a saturação do espaldar de montante da barragem. Os tapetes drenantes, por sua vez, têm a função de conduzir para o pé de jusante da barragem as águas coletadas pelo filtro em chaminé, além da água percolada através da fundação. O dreno de pé reúne a água coletada pelos sistema de drenagem interna da barragem, lançando-a de volta ao talvegue do rio, a jusante da barragem (GAIOTO, 2003).

As trincheiras drenantes têm por objetivo a interceptação de fluxo de água através de camadas permeáveis mais superficiais da fundação. Os poços de alívio, por sua vez, são dispositivos utilizados para reduzir as subpressões desenvolvidas pela percolação de água nos estratos permeáveis da fundação, sendo geralmente construídos sob o dreno de pé ou a montante deste.

Segundo Gaioto (2003), os materiais de fundação que apresentam baixa resistência e elevada compressibilidade são geralmente removidos para a construção do maciço da barragem. Entretanto, segundo o mesmo autor, muitas vezes ocorrem na área de fundação materiais ou horizontes muito permeáveis, mas com características aceitáveis quanto à sua resistência e compressibilidade, os quais exigem a definição de um sistema de tratamento da fundação. Os principais sistemas de tratamento da fundação estão descritos no tópico 2.5.3.1.

2.5.3.1 Tratamento da fundação de barragens de terra

Em barragens, a permeabilidade da fundação tem um papel dominante no fluxo (CRUZ, 1996). Por esse motivo, nas barragens assentes em fundação permeável, a análise do fluxo através da fundação assume grande importância. A percolação não controlada, pela fundação, pode resultar em processos de deterioração, comprometendo a segurança da estrutura.

A necessidade de construção de barragens sobre os mais diversos locais deu origem a vários dispositivos de controle de percolação pela fundação. Entre os dispositivos usualmente empregados no controle da percolação através de fundação, podem ser citadas as trincheiras de vedação, as cortinas de injeção, as paredes diafragma e as barreiras impermeabilizantes a montante da barragem.

A) Trincheiras de vedação (“Cut-offs”)

O tratamento de impermeabilização da fundação pode ser feito através da escavação dos materiais permeáveis presentes na mesma, sob a base do núcleo da barragem. O material escavado é então substituído por aterro, compactado nas mesmas condições que o núcleo, constituindo uma trincheira de vedação (GAIOTO, 2003). Segundo Cruz (1996), as trincheiras de vedação possuem grande eficiência, principalmente quando interceptam integralmente a feição permeável onde se deseja reduzir o fluxo.

A escavação de trincheiras de vedação oferecem uma série de vantagens em relação às outras alternativas de tratamento de fundação. Entre as vantagens, Cedergren (1989) cita as seguintes: constitui um tratamento de grandes proporções, o qual permite a visualização das camadas do solo de fundação; permite o controle do processo executivo da construção do aterro, sendo realizados tratamentos na rocha exposta, quando necessário, e; permite a instalação de filtros e tapetes drenantes para controlar a percolação em camadas de solo de partículas grossas.

A construção de trincheiras de vedação é usualmente empregada quando a camada impermeável encontra-se a pequenas profundidades, de cerca de 5 a 8 metros (CIGB/ICOLD, 2013). Para profundidades maiores, torna-se interessante o estudo econômico da utilização de outras alternativas de controle do fluxo. A Figura 2.8 (A) apresenta um exemplo de escavação de trincheira de vedação, para tratamento de camada de solo permeável, sendo a mesma preenchida com solo compactado.

B) Cortinas de injeções

A cortina de injeção é constituída por uma ou mais linhas de furos, executados no maciço rochoso, por meio de equipamento rotativo ou roto-percussivo, que são preenchidos por injeção de calda de cimento (GAIOTO, 2003). Injeções de cimento têm sido utilizadas extensamente no Brasil, visando homogeneizar a permeabilidade dos maciços rochosos (CRUZ, 1996).

O método em questão também pode ser aplicado em solos permeáveis, consistindo na injeção de materiais como cimento, argila, bentonita ou substâncias químicas na fundação aluvionar permeável, com o objetivo de reduzir a permeabilidade (SILVA FILHO, 1991). Segundo o mesmo autor, o projeto de barragens sobre aluviões permeáveis com utilização de cortina de injeções é feito verificando-se as limitações quanto ao tipo de solo e realizando-se misturas de calda como teste, para obtenção da proporção ideal de injeção.

A Figura 2.8 (B) apresenta um exemplo de execução de cortinas de injeções abaixo da trincheira de vedação da barragem. No exemplo em questão, a trincheira de vedação foi construída de forma a interceptar o fluxo na camada mais permeável da fundação, enquanto que as cortinas de injeções foram executadas na camada permeável de rocha alterada.

C) Paredes diafragma

A impermeabilização de camadas aluvionares permeáveis também pode ser conseguida através da construção de paredes diafragma de concreto ou de diafragma plástico (solo-cimento), sob a zona do núcleo das barragens (GAIOTO, 2003). Trata-se de uma solução similar à usada para execução de estruturas de contenção em parede diafragma.

No caso do diafragma de concreto, por se tratar de um elemento rígido, os deslocamentos horizontais podem acarretar flexões indesejadas no diafragma, assim como os deslocamentos verticais, levando-o a ruptura (SILVA FILHO, 1991). Por esse motivo, a posição do mesmo em relação ao eixo da barragem deve ser definida de forma que os deslocamentos sejam mínimos.

A Figura 2.8 (C) apresenta um exemplo de utilização de parede diafragma plástico, com a finalidade de interceptar o fluxo pela camada de solo permeável da fundação. A construção da solução em questão pressupõe a utilização de lama bentonítica ou argilosa, e o preenchimento com argamassa plástica de solo cimento.

D) Tapetes impermeáveis a montante

As barreiras impermeabilizantes, também conhecidas como *liners*, têm como função proporcionar uma barreira ao fluxo de líquidos ou gases, tanto para fora quanto para dentro de um determinado sistema. Através do acréscimo do caminho de percolação sob a barragem, as barreiras impermeabilizantes são capazes de reduzir as vazões e as cargas de pressão atuantes na fundação.

Economicamente, a utilização de barreiras impermeabilizantes a montante de uma barragem é interessante quando o projeto requer o tratamento de camada permeável muito espessa da fundação, quando comparado com as alternativas de cortinas de injeção ou paredes diafragma profundas (GAIOTO, 2003). A eficiência dos mesmos depende do comprimento, espessura, permeabilidade na vertical e na estratificação e permeabilidade dos solos sobre os quais são instalados.

Os principais tipos de materiais utilizados na construção de barreiras impermeabilizantes são camadas compactadas de argila, concreto lançado, concreto asfáltico e geomembranas (*NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE*, 1988). Segundo a mesma fonte, outros materiais também podem ser empregados, como geocompostos argilosos e geotêxteis impregnados com substância impermeabilizante.

No caso de barreiras impermeabilizantes constituídas por solo, geralmente utiliza-se o mesmo material do núcleo da barragem, adotando-se as mesmas condições de compactação. A espessura e o comprimento do tapete dependem da sua permeabilidade, da estratificação e da espessura da camada permeável da fundação e da carga do reservatório (GAIOTO, 2003). Ainda segundo essa fonte, são frequentes espessuras variando entre 0,60 a 3,00 metros. A Figura 2.8 (D) apresenta um exemplo de utilização de tapete impermeável a montante da barragem, composto por solo compactado.

Segundo *US Army Corps of Engineers* (1986), tapetes impermeáveis de montante não devem ser utilizados em situações nas quais a carga de pressão exceda 200 pés (aproximadamente 61 m), devido ao elevado gradiente hidráulico que surge na camada de solo compactado, podendo resultar em erosão regressiva (*piping*) e vazamentos.

Cruz (1996) salienta que a utilização de tapetes de solo compactado tem se mostrado pouco eficiente nas obras onde foi adotada, em função do surgimento de fissuras causadas pelo ressecamento do tapete e por recalques diferenciais junto a o pé de montante da barragem. Em barragens onde o nível do reservatório possua grande variação, a superfície do tapete pode ficar exposta ao sol por um período suficiente para que ocorra retração da argila, fissurando o mesmo (SILVA FILHO, 1991). Pequenas falhas do tapete podem resultar em grande perda de eficiência da solução em questão (CEDERGREN, 1989).

Silva Filho (1991) salienta que deve-se tomar cuidado com as características geotécnicas do terreno onde pretende-se utilizar o tapete impermeável de solo compactado. Segundo o autor em questão, com o enchimento do reservatório, poderão ocorrer recalques diferenciais na fundação, resultando na ocorrência de fissuras no tapete.

Enquanto barreiras impermeabilizantes constituídas de solo ou de outros materiais são adequadas para algumas aplicações, geomembranas e outros geossintéticos possuem aplicações específicas (*NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE*, 1998). A adequação da geomembrana para determinado propósito deve ser definida em projeto, avaliando-se a disponibilidade de materiais, a performance a longo prazo e os custos envolvidos. Considerações acerca da utilização de geomembrana em barreiras impermeabilizantes estão apresentadas no tópico 2.5.4.

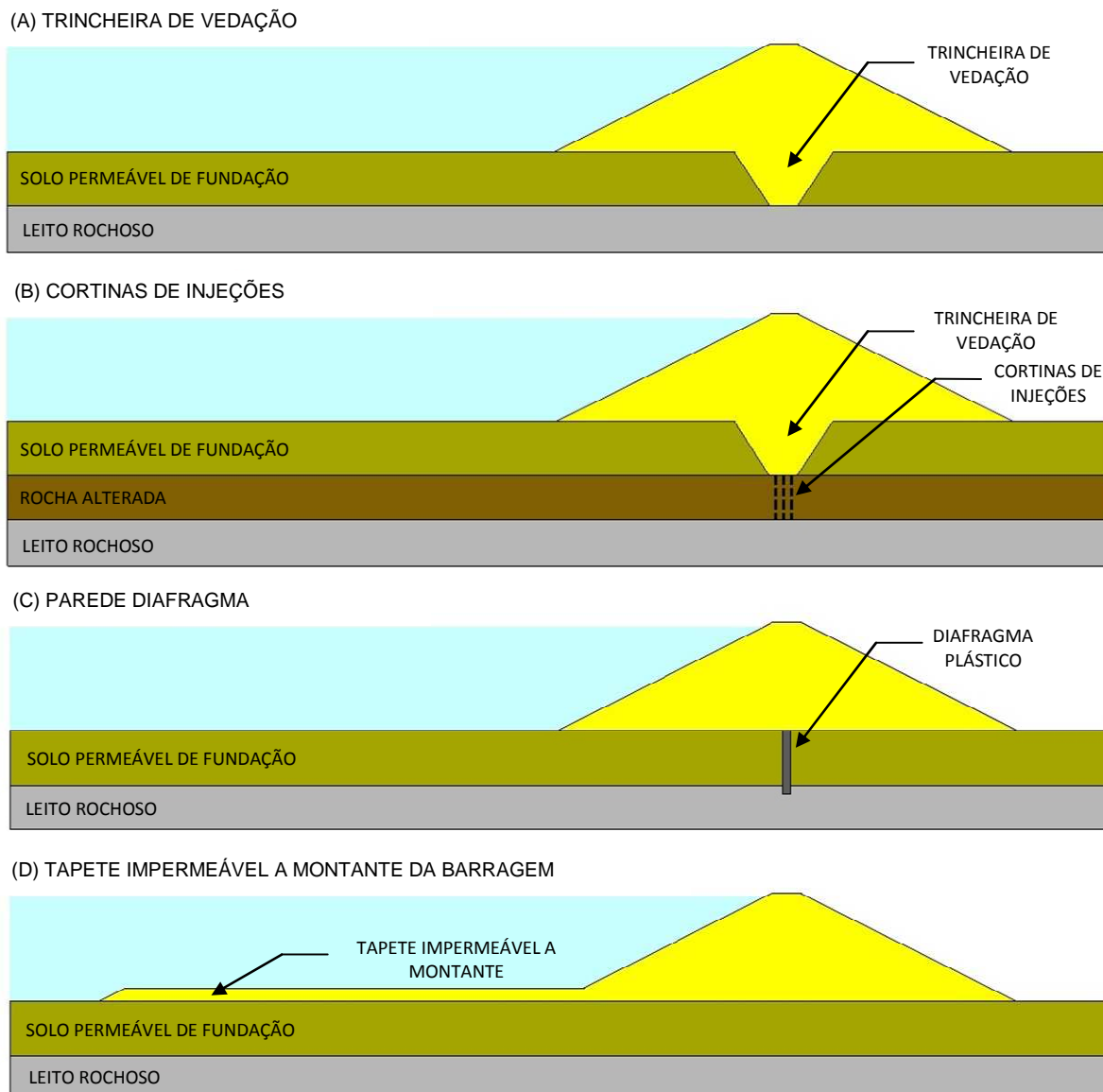


Figura 2.8 – Tratamento de fundação através de: (A) Trincheira de vedação (*Cut-off*); (B) Cortinas de injeção; (C) Parede diafragma, e; (D) Tapete impermeável a montante da barragem

2.5.4 Barreiras impermeabilizantes compostas por geomembrana

Geossintéticos são produtos poliméricos (sintéticos ou naturais), industrializados e desenvolvidos para utilização em obras geotécnicas (ABNT NBR 12.553/2003). O uso de geossintéticos vem sendo prática comum nas obras de engenharia geotécnica onde se necessita de melhoria das características do solo local, oferecendo vantagens em relação às alternativas convencionais, como, por exemplo, facilidade de instalação e menor tempo de execução das obras.

As funções que os geossintéticos desempenham em barragens são semelhantes às funções a que se destinam em outras aplicações geotécnicas. Os principais tipos de geossintéticos utilizados em barragens e suas respectivas finalidades estão apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Geossintéticos utilizados em barragens (adaptado de FEMA, 2008)

Função do geossintético	Geossintéticos usualmente empregados
Filtração de partículas sólidas	Geotêxtil não tecido (GTnw) Geotêxtil tecido (GTw)
Separação de materiais	Geotêxtil não tecido (GTnw) Geotêxtil tecido (GTw) Geocomposto (GC)
Drenagem Planar	Geotêxtil não tecido (GTnw) Georrede (GN) Geocomposto para drenagem (GCD) Geomanta (GA) Geomembrana estruturada (dreno)
Reforço	Geotêxtil não tecido (GTnw) Geotêxtil tecido (GTw) Geogrelha (GG) Geocomposto (GC)
Barreira de Fluidos	Geomembrana (GM) Geocomposto argiloso (GCL) Geocomposto com geomembrana
Proteção	Geotêxtil não tecido (GTnw) Geocomposto (GC)
Controle da erosão superficial	Geotêxtil não tecido (GTnw) Geocélula (GL) Geomanta (GA)

Conforme apresentado na Tabela 2.4, entre as funções para as quais os geossintéticos têm sido empregados em barragens, pode ser citada sua utilização como barreira à percolação da água. Entre os geossintéticos usualmente empregados com este propósito, podem ser citadas as geomembranas e os geocompostos argilosos.

Geocompostos argilosos são formados por uma camada de argila bentonítica, ligada através de meios mecânicos ou químicos a geotêxteis ou a geomembranas, com espessura de aproximadamente 5 mm (*NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE, 1998*). Possuem como características a flexibilidade (se adéquam bem ao substrato) e a autocatrização.

As geomembranas, por sua vez, são consideradas geossintéticos de baixa permeabilidade (ASTM D4439-14), sendo constituídas por mantas poliméricas flexíveis, com espessura usual entre 1,0 a 2,5 mm. Os principais polímeros utilizados são (VERTEMATTI, 2004): polietileno de alta densidade (PEAD); polietileno bastante flexível (PBF); polietileno linear de baixa densidade (PELBD), e; polivinil clorado (PVC). A permeabilidade das geomembranas (aproximadamente 10^{-14} m/s) é significativamente menor do que a das camadas compactadas de argila, por isso as mesmas são consideradas materiais relativamente impermeáveis (NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE, 1998).

Giroud e Bonaparte (1989) descrevem que geomembranas têm se tornado materiais comumente utilizados para revestimentos de reservatórios de contenção de água, de produtos químicos e de rejeitos da mineração. Outra utilização comum de geomembranas é a aplicação das mesmas em bases de aterros sanitários, evitando que o chorume, oriundo da decomposição da matéria orgânica, entre em contato com o solo, contaminando o lençol freático. Como exemplo, a Figura 2.9 apresenta casos de obra onde foram utilizadas geomembranas com a função de barreiras impermeabilizantes.

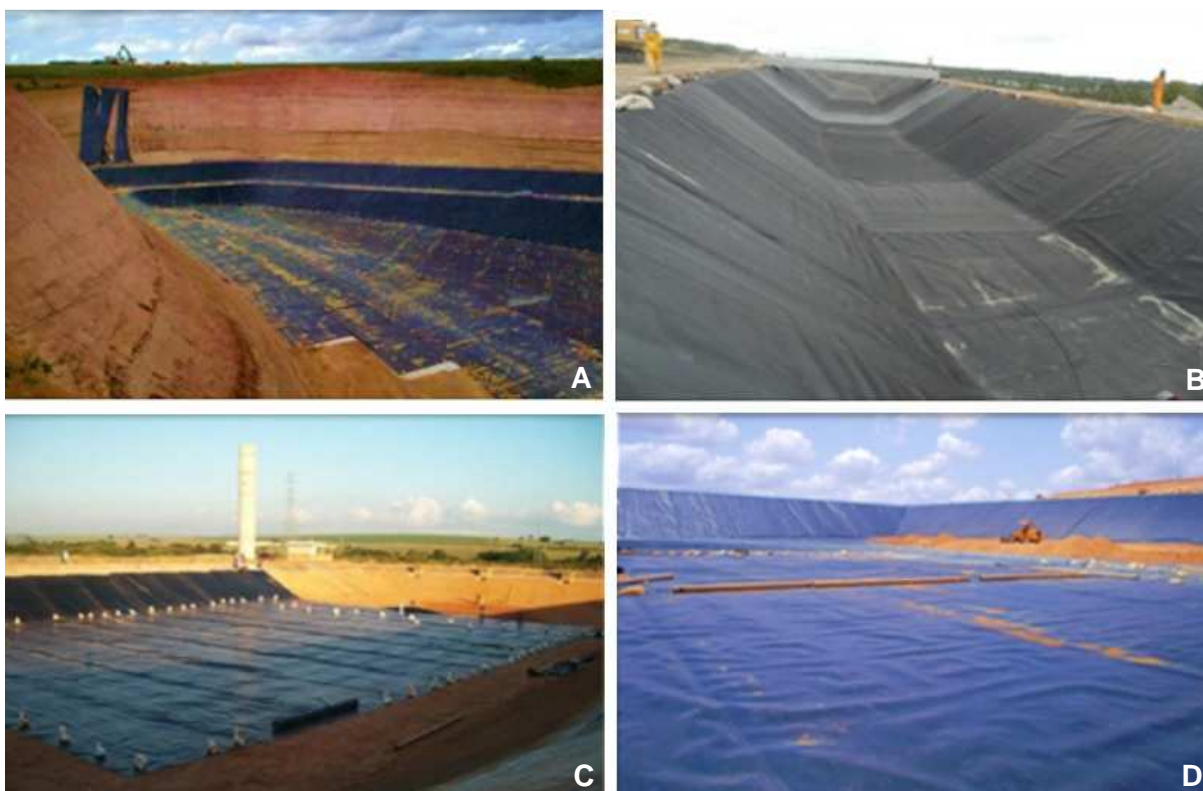


Figura 2.9 – Barreiras impermeabilizantes empregadas em (NEOPLASTIC, 2014): (A) Aterro sanitário; (B) Canal de adução; (C) Reservatório de mineração, e; (D) Aterro industrial

A eficiência da utilização de barreiras impermeabilizantes depende da integridade da membrana sintética. Giroud e Bonaparte (1989) apresentam uma descrição da utilização de geomembranas em barreiras impermeabilizantes, salientando as consequências de possíveis vazamentos. Considerações a respeito de falhas em reservatórios impermeabilizados através de geomembranas podem ser encontradas em Wu *et al.* (2008).

Os principais critérios de projeto e experiência acumulada através da prática, relativos à utilização de barreiras impermeabilizantes compostas por geomembranas, podem ser consultadas em CIGB/ICOLD (2010). O trabalho em questão também apresenta características técnicas das geomembranas e ensaios a serem executados.

Além das utilizações já descritas, geomembranas também podem ser aplicadas na construção de tapetes impermeáveis a montante de barragens. Neste caso, basicamente, a geomembrana é empregada com a finalidade de formar uma barreira contra o fluxo d'água, em substituição à camada única de solo compactado. Costuma-se utilizar camada de solo compactado sobre a geomembrana, com a finalidade de proteção mecânica e contra eventuais rasgos.

Cardoso *et al.* (2010) apresentam as condicionantes de projeto e análises numéricas que subsidiaram a escolha da solução de impermeabilização da fundação da Usina Hidrelétrica São Salvador (243 MW). Após análise de diversas alternativas de tratamento para impermeabilização da fundação, optou-se pela execução de um tapete impermeável a montante do barramento, com utilização de geomembrana de PEAD. Os resultados encontrados mostram que o comportamento observado da solução está de acordo com o previsto em projeto. A Figura 2.10 mostra fotografias obtidas em campo durante a execução da obra.



Figura 2.10 – Tapete impermeável a montante da barragem de São Salvador (CARDOSO *et al.*, 2010): (A) Instalação da geomembrana, e; (B) Execução de emendas

3 BARRAGEM EM ESTUDO - UHE SALTO (116 MW)

A Usina Hidrelétrica Salto, de propriedade da Rio Verde Energia, empresa controlada pela TPI (Triunfo Participações e Investimentos), encontra-se implantada no Rio Verde, pertencente à Bacia do Rio Paraná, na divisa dos municípios de Caçu (margem esquerda) e Itarumã (margem direita), estado de Goiás (Figura 3.1). A mesma entrou em operação em junho de 2010, com 2 unidades geradoras e garantia de potência instalada de 116 MW. Fotografias obtidas em campo estão apresentadas na Figura 3.2. O projeto da barragem em questão foi feito pela empresa Intertechne Consultores S.A.



Figura 3.1 – Localização geográfica da UHE Salto (GOOGLE MAPS, 2014)



Figura 3.2 – A) Vertedouro em operação (Fev/2011); B) Imagem aérea (Jan/2010)

O arranjo do empreendimento é composto por barragem homogênea de terra em ambas as margens, com as estruturas de concreto formadas pelo vertedouro, pela tomada d'água e pela casa de força, posicionadas na margem esquerda, nas proximidades da calha do rio. No encontro da barragem com as estruturas de concreto, ocorre uma transição composta por barragem de terra-enrocamento. O desvio do rio foi executado através de um túnel escavado em rocha, na margem direita. As Figuras 3.3 e 3.4 apresentam o arranjo das estruturas que compõem o empreendimento.

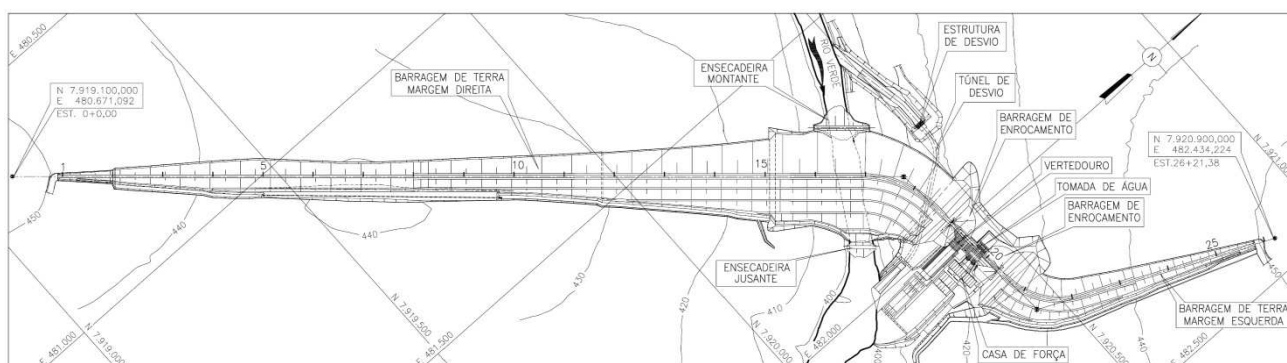


Figura 3.3 – Arranjo geral da UHE Salto



Figura 3.4 – Imagem aérea da UHE Salto (17/01/2010). Fonte: Google Earth (2014)

3.1 ASPECTOS GEOLÓGICOS

O local de implantação da UHE Salto está inteiramente inserido nos limites geológicos da Bacia Sedimentar do Paraná. A Bacia do Paraná é uma ampla região sedimentar do continente sul-americano que inclui porções territoriais do Brasil meridional,

Paraguai oriental, nordeste da Argentina e norte do Uruguai, totalizando uma área que se aproxima dos 1,5 milhão de quilômetros quadrados (MILANI *et al.*, 2007).

A Tabela 3.1 apresenta uma síntese dos principais aspectos geológicos e geotécnicos relacionados à UHE Salto. Os tópicos 3.1.1 e 3.1.2 descrevem, respectivamente, os aspectos geológicos regionais e os condicionantes geotécnicos encontradas no sítio da barragem.

Tabela 3.1 – Aspectos geológicos regionais e locais (UHE Salto)

ASPECTOS GEOLÓGICOS REGIONAIS
<p>BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ:</p> <ul style="list-style-type: none"> → GRUPO SÃO BENTO: <ul style="list-style-type: none"> • Formação Botucatu; • Formação Serra Geral. → GRUPO BAURU: <ul style="list-style-type: none"> • Formação Adamantina; • Formação Marília.
CONDICIONANTES GEOLÓGICOS NO SÍTIO DA BARRAGEM
<ul style="list-style-type: none"> — BASALTOS DA FORMAÇÃO SERRA GERAL; — DEPÓSITOS COLUVIONARES; — DEPÓSITOS CONGLOMERÁTICOS; — SEDIMENTOS ALUVIONARES.

3.1.1 Aspectos geológicos regionais

Entre as unidades geológicas que compõem a Bacia do Paraná, duas merecem destaque devido à sua influência direta no empreendimento, sendo elas: Grupo São Bento, e; Grupo Bauru. O Grupo São Bento é composto pelas Formações Botucatu e Serra Geral. O Grupo Bauru, por sua vez, é composto pelas Formações Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília, estando as duas últimas presentes na bacia hidrográfica do Rio Verde.

A Formação Botucatu, apesar de não ocorrer próxima ao local do barramento, possui ampla distribuição nas cabeceiras da bacia hidrográfica do Rio Verde, influenciando

diretamente nos sedimentos transportados fluvialmente até o local do aproveitamento. Constitui-se quase totalmente, em sua ampla área de ocorrência, por arenitos médios a finos de elevada esfericidade e aspecto fosco (MILANI *et al.*, 2007). Seu processo de sedimentação é tipicamente eólico, com contribuições fluviais na base do pacote.

A Formação Serra Geral desenvolve-se ao longo das calhas de quase todos os principais rios da bacia hidrográfica do Rio Verde, sendo composta por sucessões de derrames que se distribuem por grande extensão da Bacia Sedimentar do Paraná. Litologicamente a mesma é composta por rochas predominantemente vulcânicas, principalmente sob a forma de derrames basálticos.

A Formação Adamantina possui amplas áreas de exposição na bacia do Rio Verde, sendo representada por extensos tabuleiros que constituem os chapadões característicos da região Centro-Oeste. A formação é representada por um pacote sedimentar com espessura máxima estimada em 230 m, tendo na sua porção basal um conglomerado, seguido por uma alternância cíclica de camadas areníticas, lamíticas, conglomeráticas, sílticas, argílicas e carbonáticas.

A Formação Marília possui pouca expressão na bacia do Rio Verde, com ocorrências restritas a pequenas serras nos divisores de águas, como nas proximidades de Itarumã, Caçu e Cachoeira Alta. Constitui-se predominantemente de arenitos médios a finos, com pelotas de argila esparsas. Há ocorrência de arenitos conglomeráticos, contendo seixos de quartzo, basalto e quartzito.

3.1.2 Condicionantes geológicos no sítio da barragem

No local de implantação da UHE Salto, são encontradas quatro unidades geológicas distintas, com relevância para o empreendimento, a saber: basaltos da Formação Serra Geral e seus produtos de alteração; depósitos coluvionares Cenozóicos de distribuição ampla; depósitos conglomeráticos, de idade Cenozóica, com distribuição restrita, e; sedimentos aluvionares quaternários, encontrados no leito e margens do Rio Verde, e em planícies elevadas na margem esquerda. A Figura 3.5 apresenta o mapa geológico local, no qual estão destacadas as unidades aflorantes.

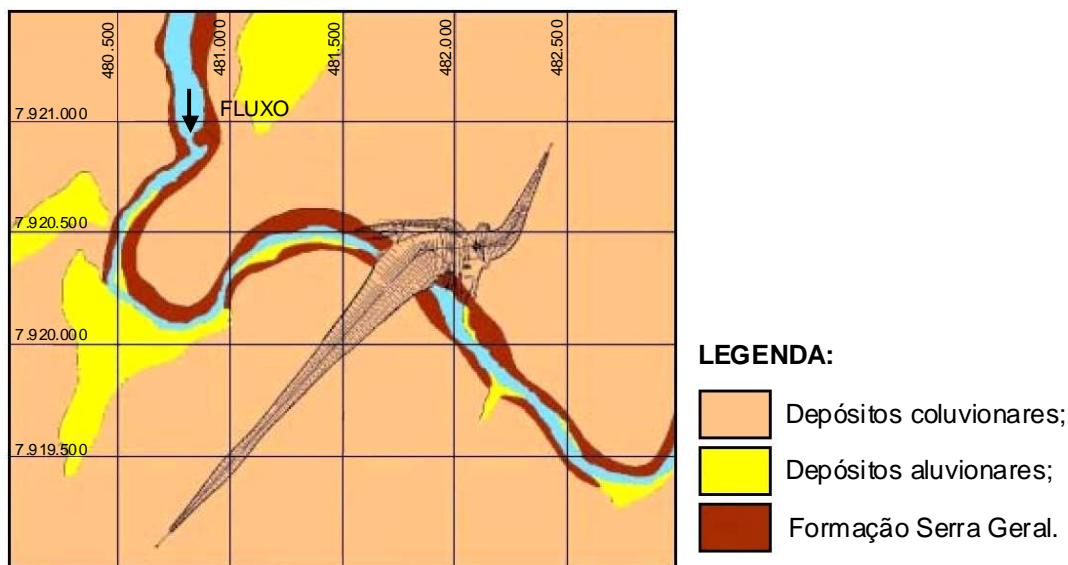


Figura 3.5 – Mapa geológico local (UHE Salto)

Conforme descrito anteriormente, a Formação Serra Geral apresenta ocorrência restrita às margens e leito do Rio Verde e pequenas áreas adjacentes às suas margens. Na região do eixo da barragem, essa unidade geológica foi identificada pela ocorrência de solos argilosos vermelho-escuros e pela ocorrência de blocos de basalto pouco alterado. Até as profundidades investigadas, ocorrem dois derrames basálticos, denominados superior e inferior, com o contato entre eles na elevação aproximada 390 m (LEYSER *et al.*, 2010).

Leyser *et al.* (2010) descrevem a utilização de basalto vesículo-amigdaloidal (BVA) como material de empréstimo para emprego na UHE Salto, sendo o mesmo proveniente das escavações para implantação da barragem. Os resultados da campanha de ensaios revelaram características adequadas do material para utilização em determinadas zonas da barragem.

Os depósitos coluvionares tiveram como processo pedogenético o retrabalhamento dos sedimentos das Formações Adamantina e Marília que, grosseiramente, caracterizam-se por sedimentos arenosos finos com níveis conglomeráticos com ou sem silificação. Sua textura varia entre uma areia fina argilosa nas cotas mais altas e uma argila arenosa nas porções mais próximas do leito do rio.

A ocorrência de sedimentos aluvionares, no local do barramento, se restringe ao leito e margens do rio Verde, tratando-se de depósitos não consolidados de areia fina limpa com muito pouca argila, originados a partir dos arenitos do Grupo Bauru. Os depósitos conglomeráticos, por sua vez, possuem origem coluvionar, sendo compostos por um

acúmulo de seixos arredondados de silexitos e arenitos alterados a pouco alterados. Apresentam ocorrência restrita, sendo identificados em pequenas áreas.

De forma geral, pode-se dizer que as estruturas de concreto da AHE Salto foram executadas sobre rochas basálticas formadas por camadas de basaltos densos, vesículo-amigdalóides e brechas basálticas. As barragens de terra foram assentadas sobre horizonte superior do solo, constituído de solos coluvionares predominantemente arenosos, estando os mesmos assentados sobre uma camada de solos residuais basálticos.

3.2 TRECHO AVALIADO DA UHE SALTO

A barragem de terra da margem esquerda, situada entre o muro lateral esquerdo do circuito gerador e a encosta esquerda, tem uma extensão de crista de aproximadamente 580 m e uma altura máxima da ordem de 25 m junto ao muro de abraço esquerdo, sendo que esta barragem passa a ser de enrocamento com núcleo argiloso junto a esse abraço.

Este trabalho utiliza a barragem de terra da margem esquerda como fonte de dados pois, em função das propriedades geotécnicas apresentadas pelo terreno de fundação, foi executado um tapete impermeável a montante da barragem, composto por geomembranas. Dessa forma, foi possível avaliar o tratamento de fundação em questão, cujos resultados serviram para calibração e validação do modelo de fluxo utilizado nas análises numéricas.

3.2.1 Características geométricas da barragem

A seção transversal da barragem é do tipo homogênea, com crista de 6 m de largura na elevação 449,50 m. Os taludes de montante apresentam inclinação de 1V:2H desde a fundação até a cota 447,50 m e de 1V:1,5H acima desta cota. Da mesma forma, os taludes de jusante possuem inclinação de 1V:2H desde a fundação até a cota 447,50 m, e de 1V:1,5H acima da mesma, tendo sido previstas bermas de 3 m de largura nas cotas 429,00 m e 439,50 m. A Figura 3.6 apresenta um detalhe da geometria da seção transversal, a qual é válida entre as estacas 21+30,00 e 23+30,00.

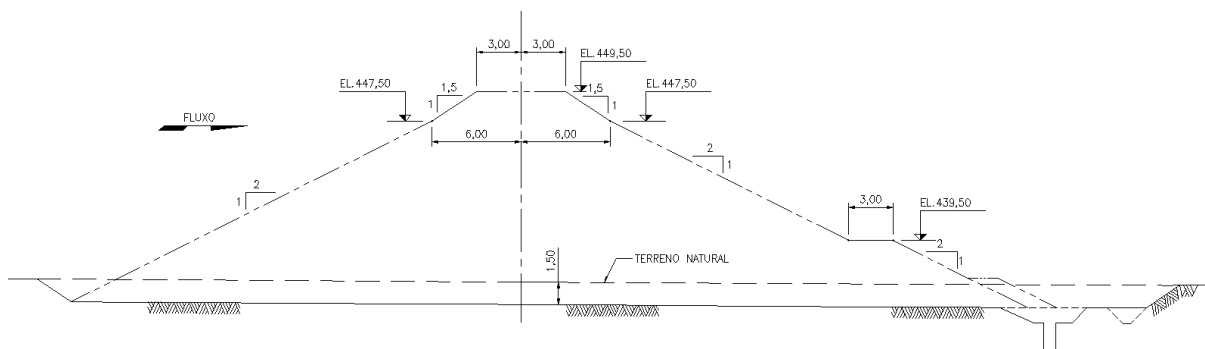


Figura 3.6 – Geometria da seção transversal

Na região de montante, foi prevista a execução de enrocamento para proteção do talude acima da cota 445,50 m, isto é, 1,00 m abaixo do nível de água máximo normal, definido na El. 446,50 m. Sob esta zona de enrocamento, com largura horizontal de 1,50 m, foi prevista uma transição, com largura horizontal de 2,00 m. A proteção do talude de jusante, por sua vez, foi feita através de revestimento vegetal.

Nas proximidades do muro de abraço, a seção transversal da barragem muda gradualmente para um maciço de enrocamento com núcleo argiloso, com inclinação dos taludes externos igual a 1V:1,2H. A montante do núcleo, foi prevista transição única de enrocamento fino bem graduados. A jusante deste núcleo, foram previstas zonas de areia limpa, de pedrisco e de brita, com largura horizontal de 1,50 m cada uma.

3.2.2 Características geotécnicas dos solos de aterro e de fundação

Durante o projeto executivo da UHE Salto, foi prevista uma campanha de investigação geotécnica composta por sondagens rotativas, sondagens mistas e sondagens à percussão, com a finalidade de determinar as propriedades dos solos de fundação. Na região da ombreira esquerda da barragem de terra, foram realizadas as sondagens à percussão indicadas na Figura 3.7. As sondagens em questão contaram com a determinação da permeabilidade *in situ* do terreno, a cada metro de profundidade. Os resultados das mesmas encontram-se apresentados no Anexo A.1.

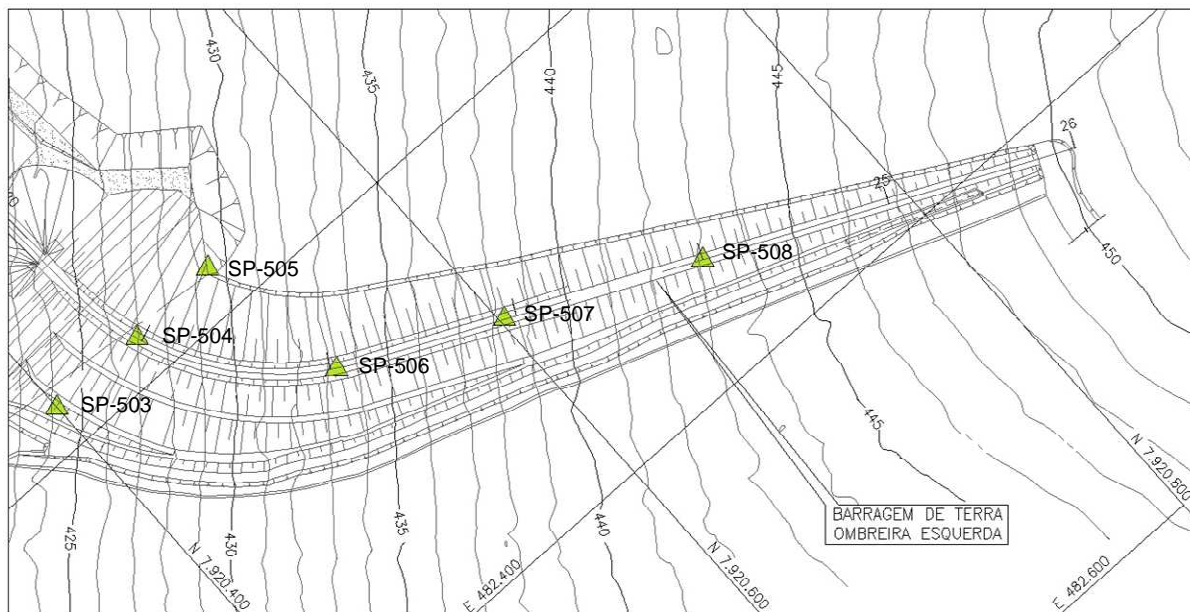


Figura 3.7 – Investigações geotécnicas na barragem de terra da ombreira esquerda

A partir dos resultados das campanhas de investigação nas margens direita e esquerda, foram agrupadas as seguintes informações acerca das características geotécnicas das camadas de solo presentes na fundação:

- Solo de alteração de basalto: este solo encontra-se assente diretamente sobre o maciço rochoso basáltico são ou, mais comumente, alterado. Apresenta espessuras variáveis entre 2,04 e 12,72 m, com média em torno de 8,21 m, com tendência ao espessamento a medida que se afasta do leito do rio para cotas superiores. Apresentam valores de SPT acima de 10 golpes, crescentes em profundidade;
- Solo coluvionar: os processos de desagregação, transporte e deposição dos sedimentos das Formações Adamantina e Marília formaram um depósito coluvionar, com ampla e contínua distribuição lateral e espessuras variáveis entre 5,00 e 17,15 m, com média em torno de 11,35 m. Os valores de SPT, para esse solo, variam entre 3 e 15 golpes, com a maioria abaixo de 9 golpes;
- Paleo-terraços: são depósitos conglomeráticos de origem coluvionar, compostos pelo acúmulo de seixos arredondados de silixitos e arenitos alterados, apresentando ocorrência restrita a pequenas áreas.

A partir das propriedades geológicas e geotécnicas dos solos, Piedade *et al.* (2010) expõem o procedimento adotado para determinação das espessuras de escavação da fundação da UHE Salto. Como a barragem está assentada sobre solo compressível, não saturado e com baixo potencial de colapso, quando sujeito à saturação, foi feita a remoção sistemática de uma camada com espessura de 1,50 m deste solo.

3.2.3 Tratamento de fundação

Durante a fase de projeto, os altos coeficientes de permeabilidade observados nos ensaios de infiltração, e confirmados pelos ensaios de permeabilidade realizados em amostras retidas dos poços de inspeção, localizados na ombreira esquerda da UHE Salto, resultaram em valores elevados de vazão, em função principalmente da percolação da água pelo terreno de fundação.

A fim de reduzir a intensidade do fluxo através da fundação da barragem da margem esquerda, foi necessária a definição de um tratamento com a finalidade de tornar a fundação menos permeável. Os tratamentos de fundação constituem um importante aspecto do projeto de barragens de terra, uma vez que fundações excessivamente permeáveis podem resultar em gradientes de saída elevados no talude de jusante e, eventualmente, iniciar processos de erosão regressiva (*piping*), podendo comprometer a segurança da estrutura.

Entre as alternativas existentes para tratamento da fundação da UHE Salto, com a finalidade em questão, podem ser citadas: trincheira de vedação (*cut-off*); cortina de injeções de calda de cimento; cortina de estacas prancha; diafragmas executados *in-situ* (plástico e rígido), e; tapetes impermeáveis de montante. Durante o projeto da barragem, as alternativas em questão foram estudadas através de análises técnicas e econômicas, com a finalidade de se definir o tratamento mais adequado para a mesma.

Entre as alternativas citadas, as análises mostraram que a solução mais viável para o tratamento da fundação da barragem de terra da margem esquerda da UHE Salto consistia em impermeabilizar a superfície do terreno à montante da mesma, aumentando o caminho de percolação através da fundação, com conseqüente redução dos gradientes hidráulicos e das vazões.

Além dos resultados satisfatórios obtidos com a simulação do uso de tapete impermeável a montante, pesaram na escolha da solução a grande profundidade da eventual trincheira *cut-off*, necessária para interceptar todas as camadas de material permeável da fundação, e as incertezas quanto à execução de injeção de calda de cimento sob pressão no material em questão, podendo apresentar efeito reduzido. As demais soluções mostraram-se inviáveis economicamente. As principais características do tratamento em questão estão descritas no tópico 3.2.3.1, onde também são descritos detalhes de projeto e procedimentos construtivos.

3.2.3.1 Tapete impermeável de montante

Os tapetes impermeáveis a montante de barragens são usualmente constituídos por solo argiloso compactado, contando eventualmente com uma proteção mecânica com camada de enrocamento. Com a finalidade de reduzir a espessura de solo compactado, e também evitar o risco de baixa eficiência do tapete impermeável, decorrente do surgimento de trincas durante a fase construtiva, optou-se pela utilização de uma geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD).

A extensão da impermeabilização foi definida de maneira a se otimizar as espessuras de tapete drenante de jusante, considerando-se a redução da carga hidráulica, conforme o avanço em direção à ombreira. Na sequência, são descritas as especificações do material da membrana, além dos procedimentos de instalação da mesma e de execução de emendas.

A) Especificações do material da membrana

O material de impermeabilização, aplicado sobre a fundação da margem esquerda, consistiu em uma membrana sintética flexível de PEAD, texturizada em ambos os lados, de cor negra, sem reforço, com 1,5 mm de espessura. A texturização da geomembrana foi considerada conveniente para evitar o risco da formação de um caminho preferencial de percolação, decorrente da aplicação de mantas lisas.

A membrana foi ensaiada de acordo com as especificações da ASTM, garantindo assim a adequabilidade do material às especificações adotadas em projeto. Os limites utilizados como referência para o material da membrana e para as emendas estão apresentados nas Tabelas 3.2 e 3.3, respectivamente.

Tabela 3.2 – Material da membrana sintética

Propriedade	Método de ensaio	Valor
Espessura	ASTM D5199-12	1,5 mm mín.
Densidade	ASTM D792-13	0,94 g/cm ³ mín.
Tensão de escoamento	ASTM D882-12	15 MPa mín.
Deformação de escoamento	ASTM D882-12	12% mín.
Resistência ao rasgamento	ASTM D1004-13	190 N mín.
Resistência ao puncionamento	ASTM D4833 - 07(2013)	490 N mín.

Tabela 3.3 – Especificações para emendas

Propriedade	Método de ensaio	Valor
Resistência ao cisalhamento	ASTM D6392-12	14 MPa
Resistência ao descolamento	ASTM D6392-12	9 MPa

Com relação à resistência a tração, a norma ASTM D6693 - 04(2010) salienta que os materiais plásticos contidos nas geomembranas apresentam grande sensibilidade à taxa de deformação e às condições ambientais, podendo invalidar os resultados obtidos através dos ensaios. Por esse motivo, durante o projeto, foi tomado o cuidado de não criar interface da geomembrana com materiais que apresentassem deformação diferencial, como por exemplo as estruturas de concreto do vertedouro e da tomada d'água.

B) Instalação da membrana e execução das emendas

Anteriormente à instalação da membrana, foi feita a remoção da camada superficial de solo contaminado por matéria orgânica, de espessura aproximada de 30 cm. Devido ao risco de ruptura da manta por efeito de puncionamento, foi prevista uma camada de solo compactado que serviu como substrato para a aplicação da membrana de PEAD, com espessura mínima, após a compactação, igual a 50 cm (Figura 3.8 – A).

Previamente à aplicação da geomembrana, as superfícies do fundo e dos taludes foram inspecionadas para verificação da regularidade de acabamento e ocorrência de depressões, protuberâncias, pedras, pontas de raízes ou outros materiais que pudessem causar danos à geomembrana. Como critério para verificação em questão, garantiu-se que as eventuais irregularidades na superfície possuíssem dimensão inferior a cerca de 5 cm e não apresentassem protuberâncias agudas ou cantos vivos.

A ancoragem da geomembrana no terreno foi feita através da escavação de uma vala com 0,80 m de profundidade e 0,50 m de largura, a qual foi preenchida com solo compactado (Figura 3.8 - B). A ancoragem da geomembrana, no espaldar de montante da barragem, foi executada após a execução do aterro, com escavação de 2,0 m de largura. O reaterro de fixação foi feito de forma mecânica/manual, tomando-se cuidado para não causar danos à manta.

O arraste das membranas para seu posicionamento ou acerto foi realizado de maneira cuidadosa, evitando-se danos à superfície acabada ou à geomembrana. Os painéis foram dispostos de modo a reduzir ao mínimo as emendas na direção montante-jusante, sendo instalados conforme mostra a Figura 3.8 – C. A largura dos painéis é de 5,90 m.

As emendas entre painéis foram executadas pelo processo de dupla solda, por termo-fusão (cunha quente), conformando um canal de ar estanque entre as linhas de solda, permitindo assim o controle de qualidade do procedimento. Adotou-se superposição mínima de 10 cm de largura entre as emendas dos painéis (Figura 3.8 – D).

Como forma de amenizar os efeitos de uma eventual ruptura localizada da geomembrana por efeito mecânico, foi prevista uma camada adicional de 80 cm de solo compactado sobre a mesma (Figura 3.8 – E). O lançamento da primeira camada sobre a membrana foi realizado cuidadosamente, com tráfego de equipamentos de construção leves. Como proteção suplementar, sobre a camada de solo compactado superior, foi prevista uma camada de material granular de proteção, com espessura de 50 cm (Figura 3.8 – F).

C) Controle da qualidade da instalação

O controle da qualidade da instalação da geomembrana incluiu a execução de testes de campo e de laboratório sobre as membranas e as emendas, como forma de garantir que as mesmas atendam às especificações técnicas, estando íntegras e com emendas bem executadas.

A integridade das membranas foi verificada em campo através de inspeções visuais. Nos locais onde havia incertezas quanto a este aspecto, foi realizado o ensaio de faísca elétrica (*spark test*), o qual consiste em passar por um dos lados da geomembrana uma chapa de cobre e pelo outro um eletrodo de alta tensão. A passagem de faíscas de um lado para outro indica a existência de defeitos na mesma.

As emendas entre os painéis foram testadas por pressurização do canal entre as linhas duplas de solda, através do ensaio de pressurização. O mesmo consiste em vedar ambas as extremidades da emenda a ser testada, isolar o canal de ar entre as soldas e pressurizá-lo, sendo então possível avaliar se houve estabilização da pressão. Previamente ao início do teste de pressão, foi realizado o “teste da chave de fenda”, o qual consiste em passar uma chave de fenda com ponta não cortante no bordo da solda, sendo então possível verificar a existência de imperfeições.

Complementando os ensaios de campo já descritos, foram executados ensaios de laboratório com a finalidade garantir que o material da membrana e as emendas atendem às especificações apresentadas nas Tabelas 3.2 e 3.3. Para tanto, foram coletadas amostras em campo, as quais foram submetidas aos ensaios descritos nas tabelas em questão.

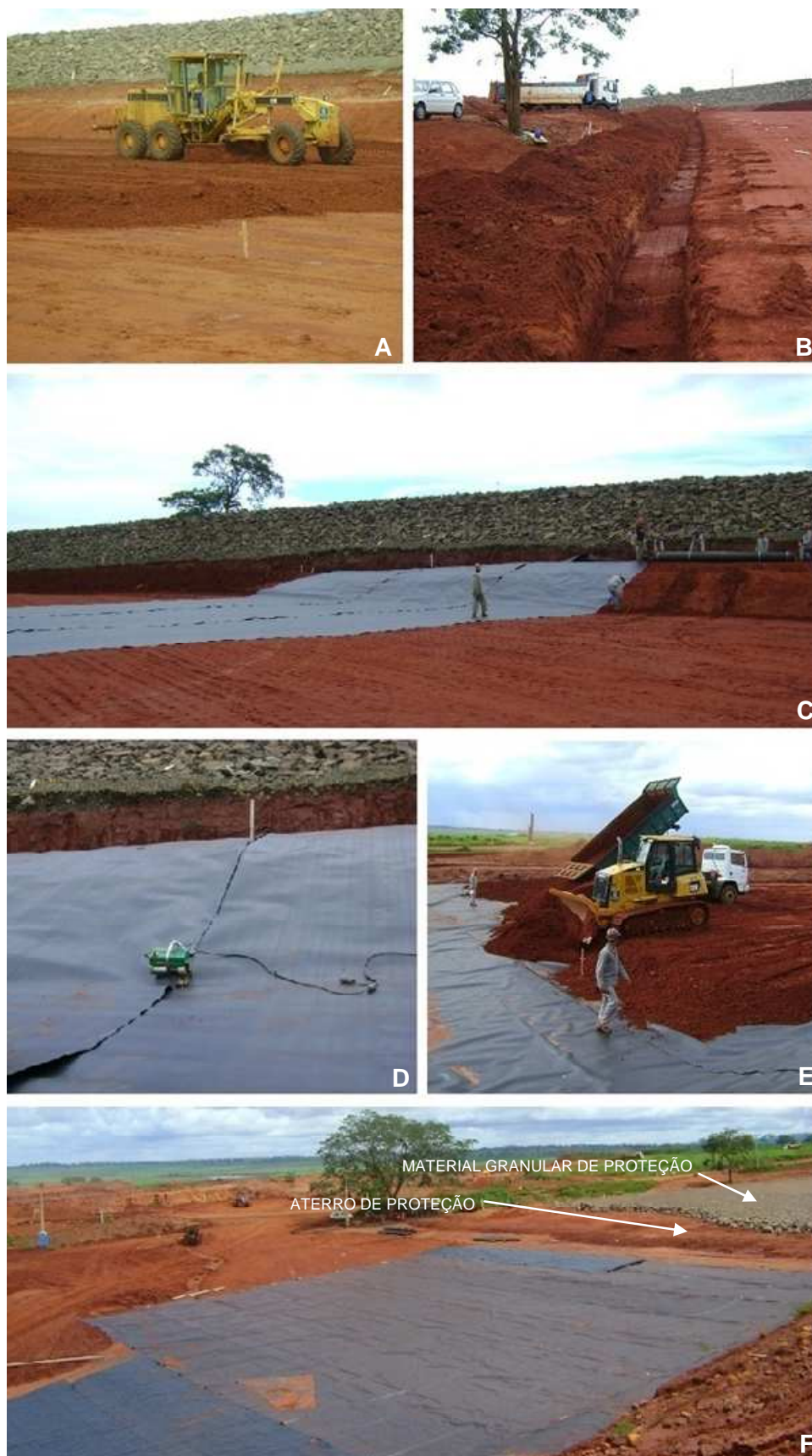


Figura 3.8 – (A) Preparação do substrato para instalação da geomembrana; (B) Vala para ancoragem em solo; (C) Colocação da geomembrana; (D) Execução das emendas; (E) Camada de aterro de proteção, e; (E) Aspecto geral da instalação da geomembrana mostrando as camadas de proteção

3.2.4 Sistema de drenagem interna

O sistema de drenagem interna, adotado para UHE Salto, consiste em um filtro vertical chaminé de areia limpa e de um tapete drenante tipo sanduíche simples, diretamente apoiado sobre a fundação. O filtro vertical possui largura horizontal de 0,80 m, sendo instalado até a elevação 448,50 m. O tapete drenante, por sua vez, é constituído por uma zona inferior de areia limpa de 0,30 m de espessura, uma zona superior de areia limpa de 0,20 m de espessura e um miolo drenante de espessura variável. Os materiais em questão atendem as disposições apresentadas no trabalho de Sherard *et al.* (1984).

A espessura do miolo variável foi dimensionada com base nas vazões oriundas do filtro vertical e da fundação, sendo considerada a influência do tapete impermeável na redução das vazões. Dessa forma, foram determinadas espessuras que variam entre 0,30 e 1,00 m para o mesmo, conforme mostra a Tabela 3.4. A Figura 3.9 apresenta um esquema das dimensões em questão.

Tabela 3.4 – Dimensões do tapete sanduíche

Região	Espessura (cm)			
	Zona inferior	Meio	Zona superior	Total
Muro de abraço esquerdo e Est. 22	30	100	20	150
Est. 22 - Est. 23	30	60	20	110
Est. 23 - Est. 24	30	40	20	90
Est. 24 - Est. 24+73	30	20	20	70

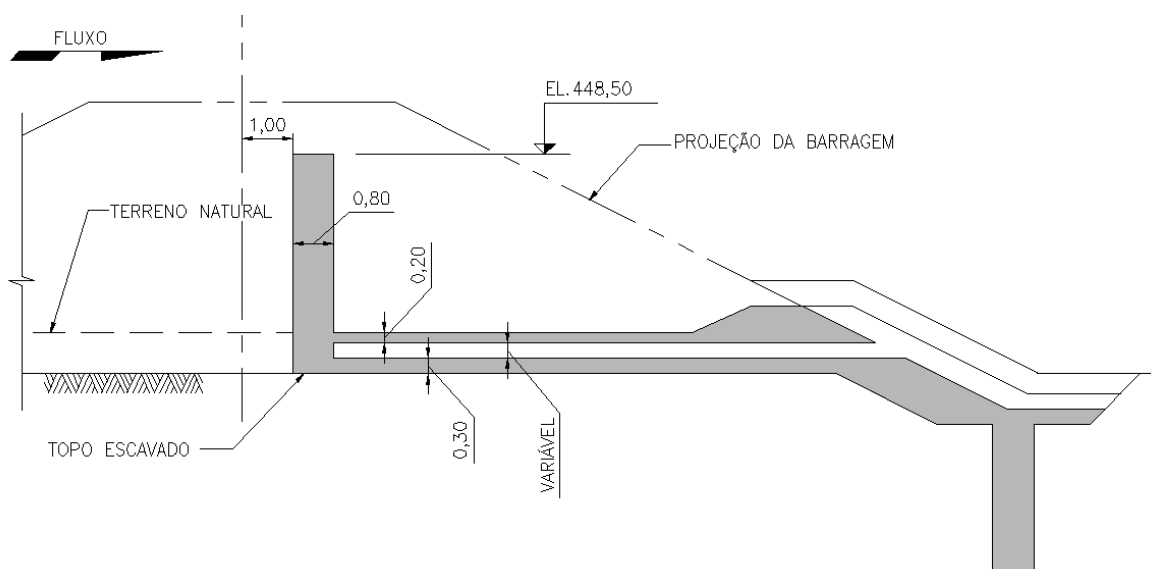


Figura 3.9 – Sistema de drenagem interna da margem esquerda (UHE Salto)

Foi adotado, para o dimensionamento do sistema de drenagem interna, um fator de majoração de 10 vezes para as vazões obtidas nas simulações numéricas. Esse fator foi adotado devido à heterogeneidade dos materiais de fundação, implicando na conseqüente alta variabilidade dos coeficientes de permeabilidade. A majoração das vazões estimadas com base em modelagens numéricas é recomendada por Cedergren (1989).

3.2.5 Instrumentação civil

O sistema de auscultação da UHE Salto tem por objetivo verificar as hipóteses, os critérios e os parâmetros adotados em projeto, bem como a adequação dos métodos construtivos empregados e as condições gerais de segurança da barragem. O mesmo é composto por piezômetros de tubo aberto, medidores de vazão, medidores de nível d'água e marcos superficiais, cujos dados são complementados pelas inspeções visuais.

As leituras dos instrumentos são comparadas aos valores de controle, definidos em função dos fatores de segurança esperados para a estrutura em cada situação: 1,50 para nível de atenção e 1,30 para nível de alerta. Os valores de controle viabilizam, em tempo hábil, a tomada de eventuais medidas corretivas ou mitigadoras, no caso de serem identificados comportamentos anômalos que comprometam a segurança da barragem.

Caso a leitura dos instrumentos resulte em valores abaixo aos dos níveis de atenção, há evidências de que o comportamento das estruturas está dentro da situação normal, atendendo aos critérios de projeto. No entanto, caso a mesma ultrapasse o nível de atenção definido em projeto, torna-se necessário acompanhamento mais frequente dos instrumentos, para que sejam verificadas as condições de segurança.

Os níveis de alerta, por sua vez, indicam os máximos valores aceitáveis para cada instrumento. Caso a leitura dos instrumentos resulte em valores acima aos definidos para os níveis de alerta, devem ser realizadas análises mais detalhadas de projeto, uma vez que as condições de segurança da barragem podem estar comprometidas.

Os instrumentos em questão encontram-se distribuídos em 23 seções transversais ao longo da barragem de terra nas margens direita e esquerda, além dos muros de abraço. Como o estudo aqui apresentado está fundamentado na análise do tratamento de fundação da UHE Salto da margem esquerda, são estudados os instrumentos instalados ao longo da mesma. Os tópicos 3.2.5.1 e 3.2.5.2 fornecem informações acerca dos piezômetros e medidores de vazão, cujos dados foram utilizados neste trabalho.

3.2.5.1 Piezômetros

Para um completo monitoramento da percolação através do aterro e do maciço de fundação da barragem, bem como o acompanhamento das poropressões e subpressões durante a construção e vida útil do empreendimento, a barragem de terra da margem esquerda da UHE Salto foi instrumentada com piezômetros em cinco seções transversais, conforme locação apresentada na Figura 3.11. A nomenclatura das seções e dos instrumentos foi mantida conforme o projeto.

A Tabela 3.5 apresenta os piezômetros instalados na margem esquerda da barragem, bem como os níveis de atenção e de alerta definidos para os mesmos em projeto. Na tabela em questão, as elevações correspondem aos valores verificados topograficamente, após a construção da barragem, podendo apresentar pequenas variações em relação ao que havia sido previsto em projeto.

Tabela 3.5 – Piezometria da barragem de terra da margem esquerda (UHE Salto)

Piezômetro	Seção	Local de instalação	Cota (m)		Nível (m)	
			Boca	Fundo	Atenção	Alerta
PSP-72	15 (Est. 21+15)	Tapete drenante	443,66	426,03	426,10	433,40
PSP-73		Fundação	443,50	417,90	426,10	433,40
PSP-74		Tapete drenante	439,68	425,91	426,10	430,20
PSP-75		Fundação	439,73	416,61	426,10	430,20
PSP-76		Tapete drenante	429,28	425,46	425,80	425,80
PSP-77		Fundação	429,30	416,73	422,90	425,60
PSP-78	17 (Est. 22+10)	Tapete drenante	450,20	434,12	433,80	437,40
PSP-79		Fundação	450,23	422,32	433,80	437,40
PSP-80		Tapete drenante	440,07	432,93	432,70	434,50
PSP-81		Fundação	440,07	427,23	431,30	434,50
PSP-82		Fundação	435,00	428,35	429,50	431,30
PSP-83		Fundação	433,13	427,84	428,50	428,50
PSP-84	19 (Est.23+10)	Tapete drenante	447,91	437,16	439,50	442,00
PSP-85		Fundação	447,92	430,66	439,50	442,00
PSP-86		Fundação	439,72	432,78	436,20	436,50
PSP-87		Fundação	438,98	434,75	433,70	433,70
PSP-88	21 (Est. 24+10)	Tapete drenante	448,24	442,24	445,10	445,70
PSP-89		Fundação	448,25	438,84	445,10	445,70
PSP-90		Fundação	444,24	433,09	443,20	443,20
PSP-91		Fundação	442,44	437,00	438,50	438,50
PSP-92	22 (Est. 24+60)	Tapete drenante	448,22	444,50	446,00	446,00
PSP-93		Fundação	444,50	438,02	446,00	446,00

3.2.5.2 Medidores de vazão

Foram instalados três medidores de vazão ao longo do pé da barragem da margem esquerda, conforme Figura 3.11, sendo que as áreas de influência dos mesmos e os valores de atenção e de alerta, definidos em projeto, estão apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Medidores de vazão da margem esquerda (UHE Salto)

Medidor de vazão	Posição (estaca)	Elevação do medidor (m)	Área de influência		Vazão (L/s)	
			Estacas	Extensão (m)	Atenção	Alerta
MV-03	21+1,40	423,37	22 a 21	100	10,90	16,40
MV-04	22+4,30	431,72	24 a 22	200	18,60	27,90 </td
MV-05	24+4,30	441,35	24+74 a 24	74	13,60	20,40

Ao longo do pé de jusante da barragem, o projeto de escavação previu um rebaixamento de 1,00 m de profundidade, o qual foi prolongado sob a forma de uma trincheira de 2,00 m de profundidade e 0,80 m de largura, de modo a criar uma trincheira drenante capaz de interceptar eventuais fluxos emergentes pela fundação da barragem. Paralelamente à trincheira de drenagem, foi construída uma canaleta de drenagem, com a finalidade de captar as águas de escoamento superficial.

A água percolada através do aterro da barragem é captada pelo filtro vertical, ao passo que a água percolada através da fundação pode ser captada pelo tapete horizontal ou pela trincheira drenante. A água captada através dos dispositivos citados é então conduzida aos medidores de vazão, conforme mostra a Figura 3.10.

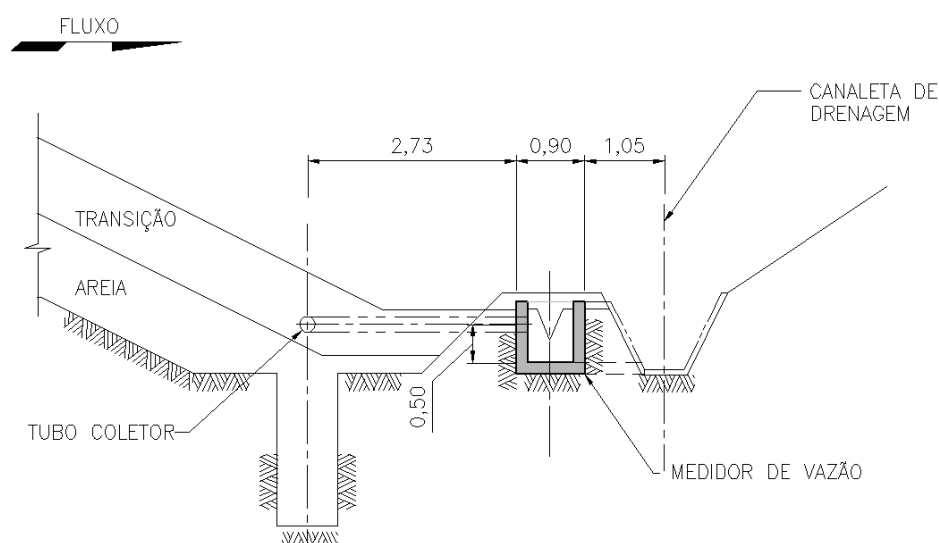


Figura 3.10 – Medidor de vazão (UHE Salto)

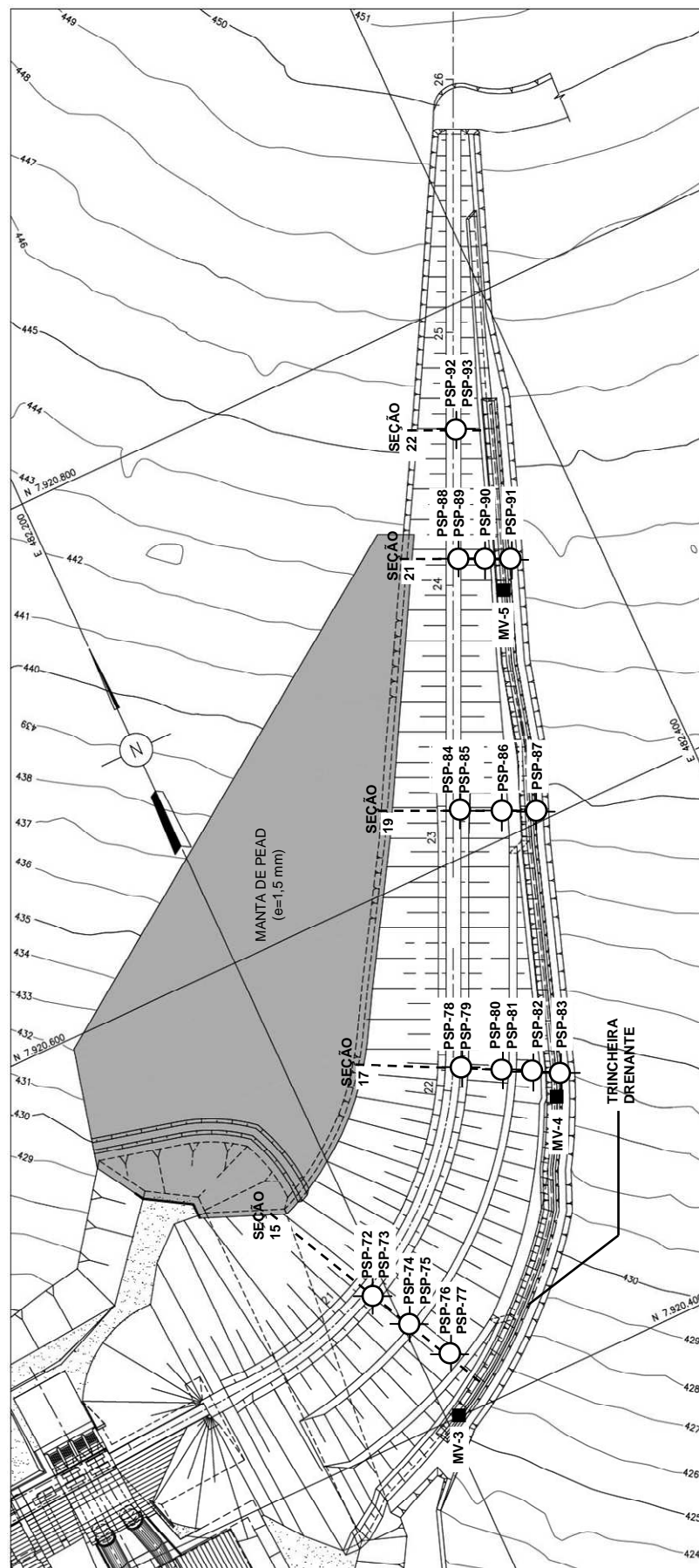


Figura 3.11 – Instrumentação civil da barragem de terra da margem esquerda (UHE Salto)

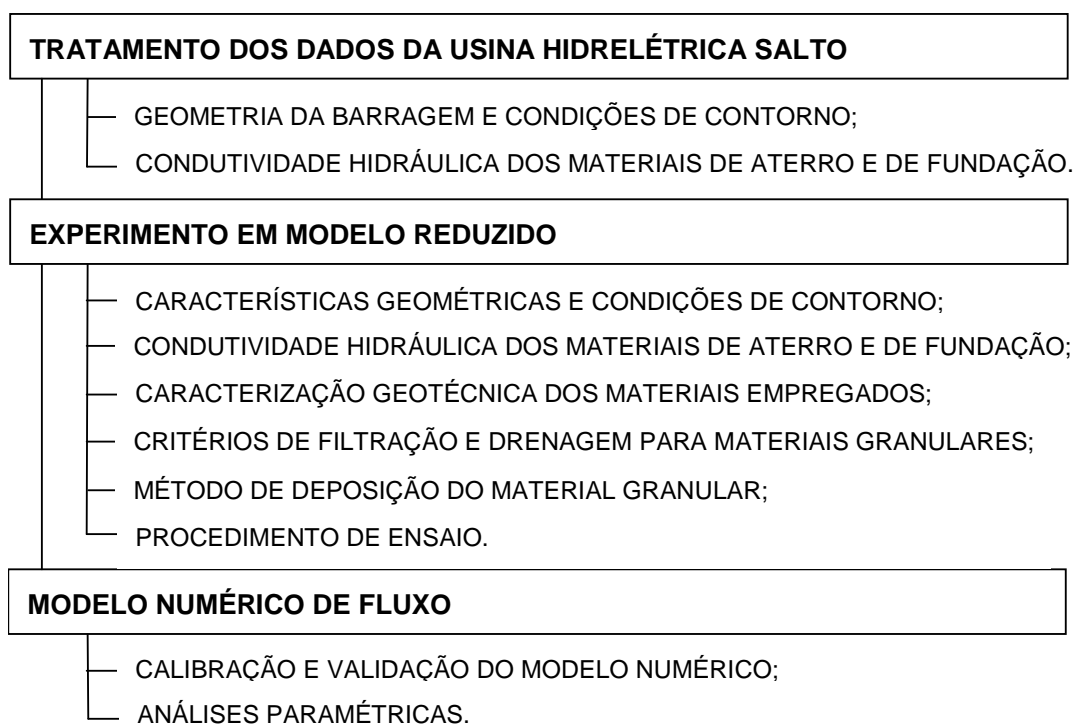
4 MÉTODO DA PESQUISA

A pesquisa aqui apresentada propõe-se a avaliar o tratamento de fundação de barragens de terra através da utilização de tapetes impermeáveis, compostos por geomembrana. Para tanto, a coleta de dados envolveu a execução de ensaios laboratoriais em modelo reduzido, reproduzindo aspectos construtivos e condições geotécnicas encontradas na Usina Hidrelétrica Salto.

Os resultados obtidos através do modelo reduzido e do tratamento dos dados da barragem da UHE Salto permitiram a calibração e a validação do modelo numérico de fluxo, a partir do qual foram feitas simulações com a finalidade de avaliar o desempenho do tratamento de fundação em questão. As simulações consistiram na alteração das condições de contorno impostas ao modelo de fluxo numérico, permitindo assim a avaliação de como os parâmetros pré-estabelecidos influenciam o comportamento do fluxo.

A Tabela 4.1 apresenta, de forma simplificada, os principais aspectos relativos ao método empregado no desenvolvimento da pesquisa, compreendendo o tratamento dos dados da UHE Salto (tópico 4.1), a análise experimental em modelo reduzido (tópico 4.2) e as simulações de fluxo em modelo numérico (tópico 4.3). As limitações do método encontram-se descritas no tópico 4.4.

Tabela 4.1 – Método da pesquisa



4.1 TRATAMENTO DOS DADOS DA USINA HIDRELÉTRICA SALTO

Conforme exposto no capítulo 3, a barragem de terra da margem esquerda da Usina Hidrelétrica Salto apresenta tratamento de fundação com a utilização de geomembrana. O mesmo capítulo descreve as principais características técnicas na barragem, salientando aspectos relativos à geologia e geotecnia encontradas no sítio do empreendimento, além de informações acerca do sistema de drenagem interna e da instrumentação.

No presente tópico, os dados levantados com relação à UHE Salto são trabalhados com a finalidade de determinar as características geométricas da barragem nas seções em estudo (tópico 4.1.1) e as condutividades hidráulicas dos materiais de aterro e de fundação (tópico 4.1.2), permitindo a posterior validação e calibração do modelo numérico, conforme expõe o tópico 4.3.2.

4.1.1 Geometria da barragem e espessura da fundação

De forma geral, as características geométricas da barragem estão descritas no tópico 3.2.1, o qual expõe a largura da crista, as inclinações dos taludes e as cotas nas quais foram construídas as bermas de equilíbrio. A partir destas definições, foi determinada a geometria da seção da barragem para as seções estudadas (seções 15, 17, 19, 21 e 22).

O levantamento planialtimétrico do sítio de implantação da barragem, presente no projeto, foi levado em consideração para determinação da cota do terreno de fundação nas seções em estudo. A partir da cota do terreno de fundação, foi prevista remoção de 1,50 m do terreno (PIEIDADE *et al.*, 2010). A diferença entre a cota da crista da barragem e a cota de escavação corresponde à altura da barragem.

A partir dos dados referentes à locação do eixo e da crista da barragem, foram lançados os taludes de montante e de jusante, respeitando-se as inclinações expostas no tópico 3.2.1. Nas elevações 429,00 e 439,50, foram previstas bermas de equilíbrio, com largura igual a 3 m. Na região do talude de montante, entre a El. 445,50 e a crista da barragem (El. 449,50), foi considerada a existência de camadas de enrocamento de proteção e brita, conforme o projeto da barragem.

As definições geométricas do sistema de drenagem interna da barragem encontram-se expostas no tópico 3.2.4. A partir da locação das seções em estudo e do

dimensionamento apresentado na Tabela 4.2, foram determinadas as dimensões do filtro vertical e do tapete horizontal.

A espessura da camada de solo permeável da fundação, por sua vez, foi definida em função das investigações geotécnicas realizadas ao longo da barragem de terra da margem esquerda, cuja locação encontra-se apresentada na Figura 3.7. A Tabela 4.2 apresenta a locação das seções estudadas e a sondagem considerada representativa das mesmas. Os *logs* das sondagens estão apresentados no Anexo A.1.

Tabela 4.2 – Seções da UHE Salto em estudo e sondagens representativas

Seção	Estaca da seção	Sondagens representativas
15	21+15	SP-503 / SP-504 / SP-505
17	22+10	SP-506
19	23+10	SP-507
21	24+10	SP-508
22	24+60	SP-508

4.1.2 Condutividade hidráulica dos materiais de aterro e de fundação

Considerando-se as seções de estudo da UHE Salto (seções 15, 17, 19, 21 e 22), foi feita a análise dos perfis de sondagens geotécnicas, com a finalidade de determinar os coeficientes de condutividade hidráulica encontrados na fundação. Dessa forma, para cada camada de solo identificada através das sondagens, foi determinado um coeficiente de permeabilidade médio.

Como forma de validar os coeficientes de permeabilidade determinados através da análise dos perfis de sondagens, foram feitas simulações numéricas através do *software* SEEP/W, a partir das quais foi possível verificar se os valores de poropressão e de vazão obtidos através do sistema de instrumentação, da barragem de terra esquerda da UHE Salto, condiziam com os valores previstos através da análise de perfis de sondagens.

O coeficiente de permeabilidade médio do aterro, por sua vez, foi determinado em função de ensaios realizados em blocos indeformados coletados no aterro da barragem, após a conclusão das operações de compactação. A partir dos ensaios em questão, foi determinada a relação de anisotropia entre a permeabilidade horizontal e a permeabilidade vertical encontrada no material compactado da UHE Salto.

4.2 EXPERIMENTO EM MODELO REDUZIDO

A execução do experimento consiste, basicamente, na simulação de fluxo em modelo reduzido, com a finalidade de avaliar a utilização de geomembrana no tratamento de fundações permeáveis. Os resultados obtidos através das análises experimentais permitem a calibração e validação do modelo numérico de fluxo, garantindo assim que o mesmo seja representativo das condições reais.

Anteriormente à execução dos ensaios em modelo reduzido, foram definidas as condições de contorno impostas ao mesmo, as características geométricas da barragem e a espessura da fundação a ser utilizada nas simulações, com base nos valores encontrados na UHE Salto. Os procedimentos adotados para definição dos parâmetros em questão encontram-se apresentados no tópico 4.2.1.

Ainda com base nos resultados encontrados na UHE Salto, trabalhou-se o material granular existente em laboratório com a finalidade de torná-lo representativo das condutividades hidráulicas dos materiais de aterro e de fundação, observadas em campo. Os procedimentos dos estudos envolvidos encontram-se apresentados no tópico 4.2.2.

Após a adequação dos materiais às permeabilidades encontradas na UHE Salto, foram feitos os ensaios de caracterização geotécnica, com a finalidade de determinar a granulometria, densidade real dos grãos e índices de vazios máximos e mínimos dos mesmos. Os ensaios em questão têm por finalidade atestar a adequabilidade dos materiais para aplicação no modelo reduzido. Os procedimentos dos ensaios encontram-se descritos no tópico 4.2.3.

Com base nos resultados obtidos através dos ensaios de caracterização dos materiais granulares, são verificados os critérios de filtração e drenagem (tópico 4.2.4). Na sequência, faz-se a calibração da altura de queda das partículas através do método de deposição conhecido como “chuva de areia”, conforme tópico 4.2.5. Os procedimentos de execução dos ensaios em modelo reduzido, com a finalidade de se obter as respostas desejadas, encontram-se descritos no tópico 4.2.6.

4.2.1 Características geométricas e condições de contorno

A definição da geometria da seção da barragem do modelo reduzido foi feita com base nas seguintes características geométricas da UHE Salto: inclinação dos taludes de montante e de jusante; espessura da crista, e; altura total da barragem. Para tanto, foram

reunidas as informações referentes às seções estudadas (seções 15, 17, 19, 21 e 22). No caso da definição da altura da barragem, foi necessário adotar uma altura média, representativa das alturas encontradas em campo.

Adotou-se escala geométrica para construção do modelo reduzido igual a 1:100. Por exemplo, uma dimensão de 1 m no protótipo corresponde a 1 cm no modelo reduzido. As dimensões da barragem foram adotadas com base nos tamanhos disponíveis para construção do modelo reduzido, no tanque de percolação.

O sistema de drenagem interna, adotado para a barragem, foi composto por filtro vertical e tapete horizontal, solução semelhante à encontrada na UHE Salto. As dimensões do mesmo foram definidas com base na barragem em questão, levando-se também em consideração que o mesmo deve ser facilmente executado no modelo reduzido.

Para definição da espessura da camada de solo permeável da fundação, tomou-se como base as espessuras encontradas na UHE Salto. Através dos dados de sondagens (tópico 3.2.2), foram definidas as espessuras de solo permeável para cada uma das seções transversais estudadas (seções 15, 17, 19, 21 e 22), fazendo-se então uma comparação entre a altura da barragem e a espessura de solo permeável. Adotaram-se dimensões compatíveis com o tanque de percolação.

Basicamente, as condições de contorno impostas ao modelo reduzido são as seguintes: nível d'água do reservatório; sistema de drenagem da barragem, e; existência de camada impermeável a montante da barragem. O nível de montante do reservatório foi definido com base nos dados da UHE Salto, considerando-se o nível de água máximo normal do reservatório na El. 446,50. O comprimento do tratamento de fundação através de membrana impermeável foi determinado com base nos comprimentos utilizados na UHE Salto.

4.2.2 Condutividade hidráulica dos materiais de aterro e de fundação

Os coeficientes de permeabilidade médios do solo de fundação da UHE Salto, foram definidos de acordo com os procedimentos expostos no tópico 4.1.2. Por sua vez, os coeficientes de condutividade hidráulica dos materiais de aterro e de fundação, a serem adotados no modelo reduzido, foram definidos em função dos valores encontrados em campo para a UHE Salto. Dessa forma, tornou-se possível a posterior validação dos resultados obtidos.

Como não foi possível utilizar na construção do modelo reduzido os mesmos materiais que haviam sido empregados na barragem de terra da UHE Salto, foram utilizados materiais em laboratório que obedecessem a razão entre a permeabilidade da fundação e a permeabilidade do aterro mostrada na Equação 4.1, garantindo assim a semelhança entre os resultados encontrados.

$$\frac{k_{fundação}}{k_{v,aterro}} = cte \quad (4.1)$$

Sendo: k_{aterro} : coeficiente de permeabilidade do aterro;
 $k_{v,fundação}$: coeficiente de permeabilidade da fundação, segundo a vertical.

Em laboratório, foi feita a aquisição de material arenoso em volume suficiente para a construção da barragem e da fundação do modelo reduzido. Entretanto, os materiais de aterro e de fundação, a serem empregados no modelo reduzido, necessitavam manter entre si a razão de permeabilidades encontrada através da Equação 4.1, não sendo possível a utilização de um único material para compor as regiões distintas.

Por esse motivo, separou-se volume de material suficiente para construção do aterro da barragem, sendo o mesmo trabalhado com a finalidade de obter-se permeabilidade compatível com a Equação 4.1. Dessa forma, sucessivamente, foram incorporadas frações equivalentes a 3% em massa de solo argiloso, passante na peneira nº 200, ao material destinado para compor o aterro. A cada nova adição de material, foi feito ensaio para determinação da condutividade hidráulica do mesmo. Após sucessivas tentativas, foi obtido material com permeabilidade adequada.

A permeabilidade dos materiais é dependente do estado de compactação do solo, estando a mesma associada à altura de queda livre adotada para as partículas, de acordo com o método de deposição do material granular. O método de deposição do material granular encontra-se descrito no tópico 4.2.5. Entretanto, a preparação dos solos para utilização no modelo reduzido foi executada anteriormente à caracterização geotécnica dos mesmos, inexistindo os valores de massa específica e de compactação necessários para calibração da altura de queda das partículas.

Por esse motivo, foi necessário adotar altura de queda das partículas anteriormente à calibração da mesma através de ensaios específicos. A altura de queda das partículas, adotada para construção do modelo reduzido, foi definida com base na praticidade de

execução. Também foram considerados os resultados obtidos por Araújo (2013), para material com propriedades similares.

A determinação dos coeficientes de permeabilidade dos solos granulares foi feita com base em ensaios à carga constante, conforme procedimentos expostos na ABNT NBR 13292. O ensaio consiste, basicamente, nas seguintes etapas: deposição da amostra no interior do permeâmetro, utilizando-se a altura de queda adotada; saturação do conjunto para eliminação de bolhas de ar; determinação da perda de carga ao longo do permeâmetro, e; medições de volumes percolados ao longo do tempo.

Para o material empregado nas camadas filtrantes e drenantes, foi suficiente que o mesmo apresentasse permeabilidade muito superior à do aterro e à da fundação. A Figura 4.1 apresenta as amostras dos materiais de fundação, aterro e filtro e tapete, respectivamente, durante os ensaios para determinação dos coeficientes de condutividade hidráulica.

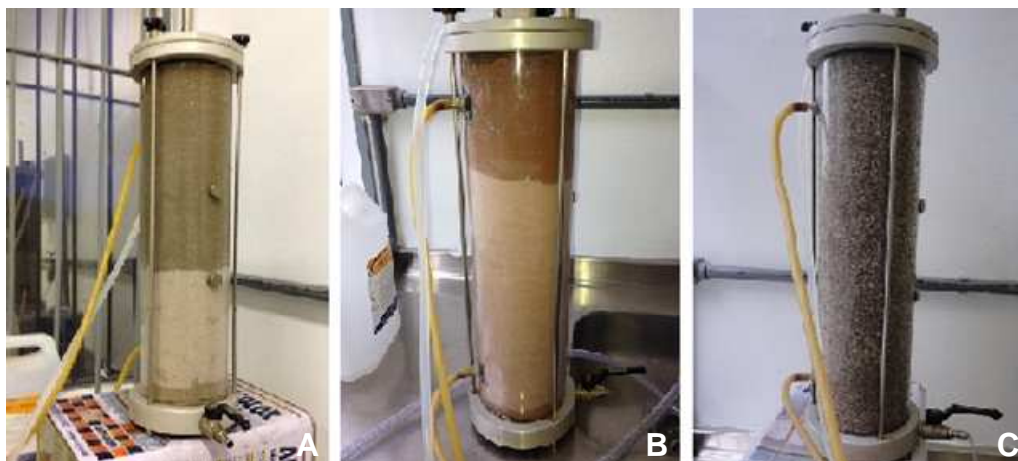


Figura 4.1 – Determinação dos coeficientes de permeabilidades dos seguintes materiais: (A) Fundação; (B) Aterro, e; C) Filtro vertical e tapete horizontal

4.2.3 Caracterização geotécnica dos materiais empregados

Os materiais a serem utilizados na construção do modelo reduzido foram submetidos a ensaios laboratoriais, nas dependências do CESEC/UFPR, com a finalidade de serem determinadas as principais propriedades geotécnicas dos mesmos. Os ensaios a que foram submetidos cada um dos materiais estão listados na Tabela 4.3. A Figura 4.2, por sua vez, apresenta as amostras de materiais ensaiados.

Tabela 4.3 – Ensaios laboratoriais realizados

Ensaio	Material 1 (fundação)	Material 2 (aterro)	Material 3 (filtro e tapete)
Análise granulométrica	x	x	x
Densidade real dos grãos	x	x	
Compacidade	x	x	



Figura 4.2 – (A) Material de fundação; (B) Material do aterro, e; (C) Material do sistema de drenagem

4.2.3.1 Preparação das amostras

A preparação das amostras, para os ensaios de caracterização, seguiu os procedimentos descritos pela ABNT NBR 6457. As amostras foram secas, até que fosse atingida a umidade higroscópica, sendo as mesmas então destorroadas e homogeneizadas. A quantidade de material foi reduzida por quarteamento, até se obter uma amostra representativa em quantidade suficiente para realização dos ensaios requeridos.

A mesma norma também estabelece o procedimento para determinação do teor de umidade dos solos. O ensaio consiste basicamente na determinação da massa do material úmido e do material após secagem em estufa. O teor de umidade da amostra é definido como a razão entre a massa de água contida em certo volume e a massa das partículas sólidas existente no mesmo, conforme a Equação 4.2.

$$w = \frac{M_w}{M_s} * 100 (\%) \quad (4.2)$$

Sendo: w : teor de umidade;
 M_w : massa de água;
 M_s : massa de partículas sólidas.

4.2.3.2 Densidade das partículas sólidas

O peso específico de uma partícula sólida é definido como o peso da mesma por unidade de volume que ocupa no espaço. A massa específica, por sua vez, é obtida pela razão entre sua massa e seu volume. A razão entre o peso específico da partícula e o peso específico da água destilada e isenta de ar a 4°C (ou entre massa específica da partícula e a massa específica da água a 4°C) é definido como a densidade da mesma, conforme Equação 4.3.

$$\delta = \frac{\gamma_G}{\gamma_A} = \frac{\rho_G}{\rho_A} \quad (4.3)$$

Sendo:

- δ : densidade da partícula sólida;
- γ_G : peso específico da partícula sólida;
- γ_A : peso específico da água;
- ρ_G : massa específica da partícula sólida;
- ρ_A : massa específica da água.

A ABNT adota o processo do picnômetro para determinação da massa específica das partículas de solo menores que 4,8 mm (ABNT NBR 6508), enquanto o DNIT (antigo DNER) o faz para a determinação da densidade das partículas menores que 2,0 mm (DNER-ME 093/94). Neste trabalho é adotado o procedimento exposto pelo DNIT-DNER, pois o objetivo da determinação da densidade é sua utilização nos cálculos da fase de sedimentação do ensaios de granulometria, sendo então considerada a fração fina do solo.

O procedimento do ensaio consiste em determinar a massa do picnômetro nas seguintes condições: vazio, seco e limpo; com a amostra de solo; com a amostra de solo mais água, e; apenas com água. A densidade real do solo à temperatura "t" é então calculada com base nos valores obtidos, sendo então necessário aplicar um fator de correção para obter a densidade real do solo a 20°C .

A precisão dos resultados do ensaio para determinação da densidade pode ser afetada pela presença de bolhas de ar aderente às partículas de solo, motivo pelo qual é necessário o aquecimento dos picnômetros (ou dos balões volumétricos) com a amostra e água. A Figura 4.3 mostra o processo de aquecimento das amostras com a finalidade em questão, anteriormente à pesagem.



Figura 4.3 – Ensaio de determinação da densidade real das partículas sólidas

4.2.3.3 Análise granulométrica

A análise granulométrica do solo foi feita conforme prescreve a norma ABNT NBR 7.181, consistindo basicamente nas seguintes etapas: peneiramento grosso; peneiramento fino, e; sedimentação. A análise por peneiramento tem como limitação a abertura das malha das peneiras, limitada usualmente na abertura 0,075 mm (peneira n° 200), sendo então necessária a complementação dos resultados através do ensaio de sedimentação.

A sedimentação se baseia na Lei de Stokes, segundo a qual a velocidade de queda de partículas esféricas num fluido atinge um valor limite que depende do peso específico do material da esfera, do peso específico do fluido, da viscosidade do fluido e do diâmetro da esfera, conforme a Equação 4.4.

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18 * \mu} \quad (4.4)$$

Sendo:

- v : velocidade de queda das partículas;
- γ_s : peso específico do material da esfera;
- γ_w : peso específico do fluido;
- D : diâmetro da esfera.

Ao colocar-se uma certa quantidade de solo em suspensão em água (Figura 4.4 – B), as partículas cairão com velocidades proporcionais ao quadrado de seus diâmetros. Numa profundidade qualquer, em um certo momento, a relação entre a densidade existente

e a densidade inicial indica a porcentagem de grãos com diâmetro inferior ao determinado pela Lei de Stokes (SOUZA PINTO, 2006). As densidades de suspensão são determinadas com um densímetro (Figura 4.4 – A). Dessa forma, obtêm-se a distribuição granulométrica das partículas com diâmetro inferior a 0,075 mm.

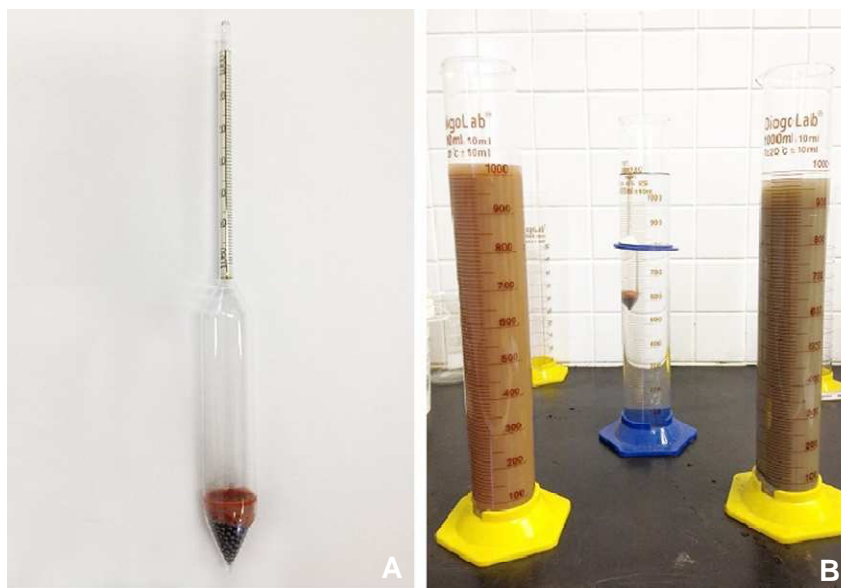


Figura 4.4 – (A) Densímetro, e; (B) Ensaio de sedimentação

4.2.3.4 Compacidade

O índice de vazios mínimo corresponde ao estado mais compacto que um solo não coesivo pode ser colocado, cuja determinação é feita conforme prescreve a norma ABNT NBR 12051. O ensaio consiste em submeter um molde preenchido com solo seco à vibração, de forma que se obtenha a massa específica aparente seca máxima da amostra.

O índice de vazios máximo corresponde ao estado mais fofo que em que um solo não coesivo pode ser colocado, cuja determinação é feita conforme prescreve a norma ABNT NBR 12004. O ensaio consiste em moldar de solo utilizando um funil, com altura de queda da ordem de 1 cm.

Uma forma de caracterizar o estado de compacidade de um solo granular é através da densidade relativa, a qual é determinada a partir dos índices de vazios mínimo e máximo em relação ao índice de vazios da amostra em questão, conforme a Equação 4.5. A densidade relativa também pode ser determinada em função da massa específica seca máxima e mínima, determinadas nos ensaios de compacidade. Lambe e Whitman (1979)

forneem uma classificação da densidade de solos granulares com base na densidade relativa, apresentada na Tabela 4.4.

$$D_r = \frac{e_{m\acute{a}x} - e}{e_{m\acute{a}x} - e_{min}} * 100 (\%) \quad (4.5)$$

Sendo: D_r : densidade relativa, em porcentagem;
 e_{min} : índice de vazios mínimo;
 $e_{m\acute{a}x}$: índice de vazios máximo;
 e : índice de vazios da amostra em questão.

Tabela 4.4 – Classificação da densidade de solos granulares (adaptado de Lambe e Whitman, 1979)

Densidade relativa (%)	Classificação do solo
0-15	Muito fofo
15-35	Fofo
35-65	Médio
65-85	Denso
85-100	Muito denso

4.2.4 Critérios de filtração e drenagem para materiais granulares

O projeto de uma camada filtrante consiste em definir as dimensões e os materiais do filtro, de forma que haja perda de carga hidráulica suficiente ao longo do mesmo e que não haja carreamento de partículas do solo envolvente (LAMBE E WHITMAN, 1979). Dessa forma, os vazios do material devem ser suficientemente grandes para propiciar a livre drenagem das águas e o controle das forças de percolação, sem, no entanto, permitir a passagem de partículas do material a ser protegido. Terzaghi formulou as relações apresentadas nas Equações 4.6 e 4.7, as quais são empregadas para a escolha dos materiais com as funções de filtração e drenagem.

$$D_{15,filtrro} \leq 4 \text{ a } 5 * D_{85,solo} \quad (4.6)$$

$$D_{15,filtrro} \geq 4 \text{ a } 5 * D_{15,solo} \quad (4.7)$$

Sendo: $D_{15,filtrro}$: diâmetro correspondente a 15% das partículas do filtro;

$D_{15,solo}$: diâmetro correspondente a 15% das partículas do solo;

$D_{85,solo}$: diâmetro correspondente a 85% das partículas do solo.

As relações em questão foram utilizadas para atestar a adequabilidade do material do filtro vertical e do tapete horizontal utilizados no modelo reduzido, com base nas curvas granulométricas obtidas para os mesmos, através dos ensaios de peneiramento e sedimentação.

4.2.5 Método de deposição do material granular

Foi adotada a técnica conhecida como “chuva de areia”, ou “chuva seca”, para deposição do material granular no modelo reduzido, conferindo ao mesmo um estado padrão de compactação e, conseqüentemente, de permeabilidade. Esse método consiste em promover a precipitação de areia através de condições pré estabelecidas, com a finalidade de obter um material homogêneo.

Rad e Tumay (1987) estudaram os fatores que afetam a densidade relativa de amostras depositadas através do método em questão, com a finalidade de fornecer orientações acerca da concepção de aparelhos de precipitação de areia. Entre os fatores ou variáveis que afetam a densidade aparente seca do solo depositado, estão a razão entre a área dos furos e área total do funil utilizado (o que influencia na taxa ou intensidade de deposição), e a altura de queda livre do material.

No presente estudo, adotou-se a deposição do material através de funis com abertura de aproximadamente 5 mm. Dessa forma, foi possível padronizar a taxa de deposição do material, a qual mostrou-se adequada de forma a evitar a segregação do material, mantendo a homogeneidade do solo.

Como forma de determinar a variação do estado de compactação e da massa específica seca do solo em função da altura de queda livre das partículas, foi necessário realizar a calibração do método de deposição do material. Para tanto, definiram-se alturas de queda padrão (5, 10, 12 e 20 cm), sendo moldadas amostras cilíndricas de volume conhecido, para as quais foram determinadas as propriedades em questão.

A partir dos resultados obtidos dos ensaios de massa específica aparente, traça-se uma curva que representa a variação da mesma em função das diferentes alturas de queda livre do material. Desta maneira, adota-se uma altura de queda que seja executada com facilidade no laboratório, padronizando-se assim a deposição do material.

4.2.6 Procedimento de ensaio

Anteriormente à execução dos ensaios em modelo reduzido, o tanque de percolação existente em laboratório precisou ser instrumentado, conforme expõe o tópico 4.2.6.1. Após a adequação do tanque para os ensaios em questão, foi feita a construção do modelo reduzido no interior do mesmo, segundo procedimentos apresentados no tópico 4.2.6.2. Os procedimentos adotados enchimento do reservatório e estabilização do fluxo e as simulações experimentais executadas no modelo encontram-se descritos nos tópicos 4.2.6.3 e 4.2.6.4, respectivamente.

4.2.6.1 Instrumentação do tanque de percolação

O tanque de percolação, equipamento laboratorial de caráter didático e experimental, permite o estudo da percolação em modelos reduzidos de escoamentos bidimensionais e a visualização de fenômenos relacionados à instabilidade hidráulica em obras de terra. Além disso, quando instrumentado, permite a medição de cotas piezométricas e a quantificação da vazão de percolação.

O dispositivo foi utilizado anteriormente por Araujo (2013), a qual apresenta um estudo de equivalência entre drenos franceses e tapetes drenantes em barragens de terra, através de modelagem física reduzida e modelagem numérica. Para este trabalho, o tanque foi modificado de forma a adequar a instrumentação existente aos requisitos desta pesquisa. A Figura 4.5 mostra o tanque de percolação e um esboço da barragem desenhado na face interna do mesmo.

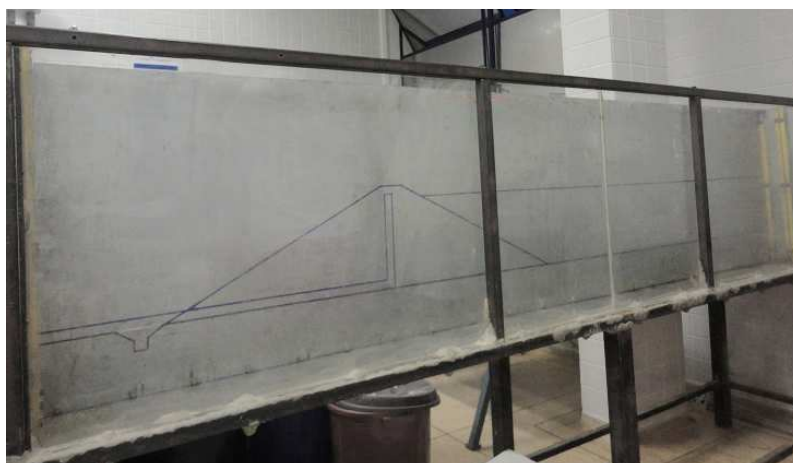


Figura 4.5 – Tanque de percolação utilizado para ensaios em modelo reduzido

Interiormente, o tanque possui 250 cm de comprimento, 60 cm de altura e 45cm de largura, resultando em um volume de $0,75 \text{ m}^3$. Uma das faces laterais do tanque conta com uma placa acrílica, a qual permite a visualização do fluxo, conforme mostra a Figura 4.5. O mesmo foi instrumentado de forma a permitir a medição das cargas piezométricas e das vazões de percolação, conforme descrito na sequência.

A) Medição de cargas piezométricas

Com a finalidade de determinar a carga de pressão em diferentes pontos do modelo reduzido, foi feita a instalação de piezômetros no tanque de percolação, conforme apresentado na Figura 4.6. Os piezômetros instalados no aterro da barragem são representados pela sigla PA (piezômetros do aterro), enquanto que os piezômetros instalados na fundação são representados pela sigla PF (piezômetros da fundação).

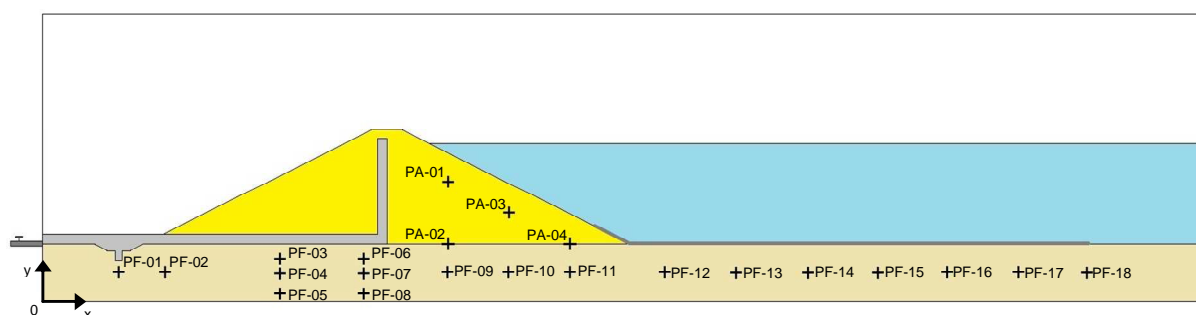


Figura 4.6 – Medição de cargas piezométricas no modelo reduzido

A Tabela 4.5 apresenta as coordenadas de instalação dos piezômetros, estando as coordenadas horizontais representadas pelo eixo “x” e as coordenadas verticais (altimétricas) representadas pelo eixo “y”. A origem do sistema de coordenadas se dá na extremidade inferior esquerda do tanque.

Os tubos piezométricos tiveram as extremidades no interior do tanque protegidas contra a entrada de finos e, como consequência, evitou-se a colmatagem dos mesmos. Para tanto, foi feita a fixação de papel filtro e geotêxtil não-tecido, conforme mostra a Figura 4.7 – A. A obtenção das cargas hidráulicas pôde ser realizada através do painel de leitura apresentado na Figura 4.7 – B.

Tabela 4.5 – Piezômetros instalados no aterro e fundação do modelo reduzido

		Coordenadas	
	Piezômetro	X (cm)	Y (cm)
Fundação	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
Aterro	PA-1	85,0	24,8
	PA-2	85,0	12,0
	PA-3	97,8	18,4
	PA-4	110,5	12,0

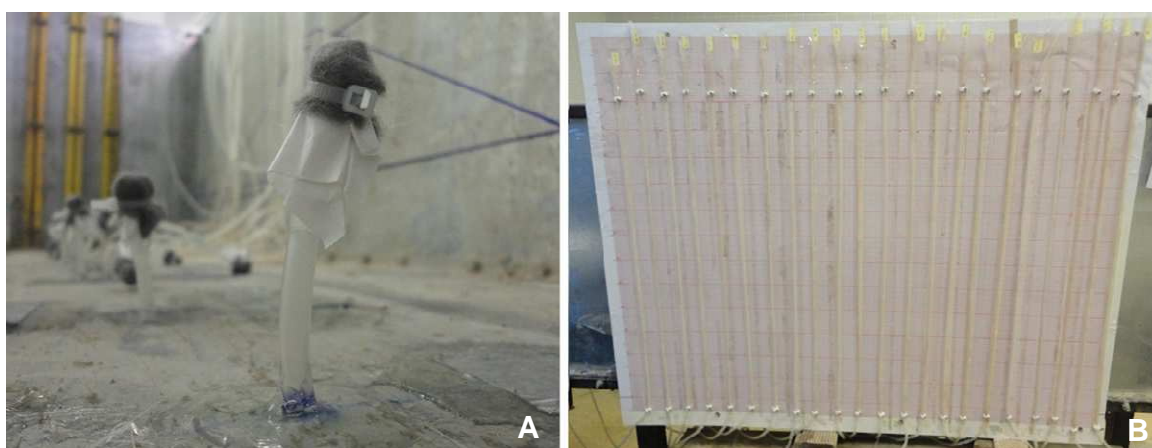


Figura 4.7 – (A) Instalação de piezômetro no tanque de percolação, e (B) Painel de leitura

B) Medição de vazão

O controle do nível d'água no interior do tanque é garantido através de 2 saídas d'água, sendo uma localizada no fundo do tanque e outra localizada na parede lateral.

Dessa forma, o equipamento permite que seja estabelecido o nível d'água nestas posições, conforme as finalidades do estudo.

Neste estudo, foi utilizada a saída d'água instalada na parede lateral do tanque, com altura aproximadamente igual a 10 cm, a qual está disposta de forma a permitir o escoamento da água captada através do sistema de drenagem da barragem. Essa saída d'água precisou ser protegida com geotêxtil não-tecido com a finalidade de evitar o entupimento por finos, conforme apresentado na Figura 4.8 – A.

O volume de água percolada captado a jusante da barragem foi medido através de uma proveta graduada, conforme Figura 4.8 – B. Associando-se o volume percolado ao tempo correspondente (cronômetro), foram obtidas as vazões de percolação. As vazões obtidas correspondem a vazão total de percolação através do aterro e fundação.



Figura 4.8 – (A) Esquema de medição de vazão, e (B) Saída d'água a jusante do modelo reduzido

4.2.6.2 Construção do modelo reduzido

A construção do modelo reduzido, internamente ao tanque de percolação, se deu através da técnica conhecida como chuva de areia, conforme descrito no tópico 4.2.5. Conforme exposto, foi necessária a adoção de uma altura de queda constante do material granular, definida através de calibração. Para deposição dos materiais, foram acoplados gabaritos aos funis, de tal forma que a altura de queda das partículas fosse mantida constante.

As dimensões da barragem foram desenhadas na face interna do tanque, de forma a orientar a construção do modelo. Inicialmente, foi depositado o material de fundação no tanque, tomando-se o cuidado de escavar a trincheira drenante a jusante da barragem. Na sequência, foi colocado geotêxtil sobre o material da fundação, com a finalidade de manter a separação do mesmo em relação ao material utilizado no tapete horizontal.

Sobre o geotêxtil, foi lançado o material do tapete horizontal, conforme mostra a Figura 4.9 (A). O filtro vertical, por sua vez, foi construído em camadas de aproximadamente 2 cm de altura, a medida que era feita a deposição do material de aterro. A Figura 4.9 (B) mostra o filtro vertical, salientando a utilização de pequenas hastes de madeira para manter a rigidez do mesmo durante a construção.

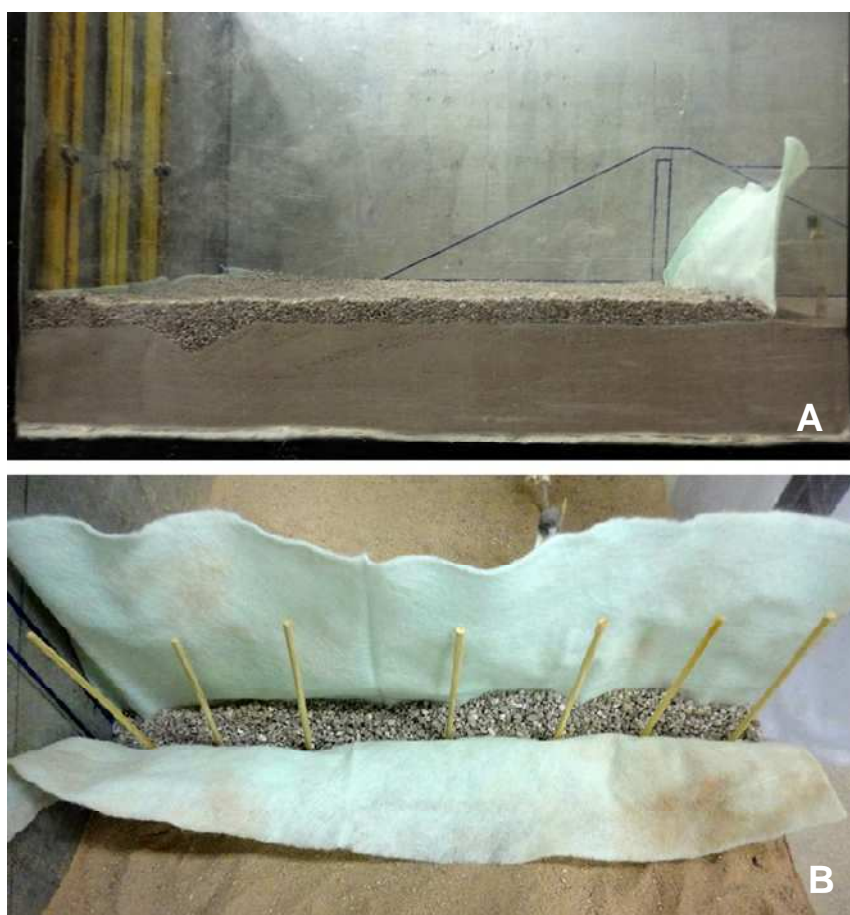


Figura 4.9 – (A) Construção do tapete horizontal, e; (B) Construção do filtro vertical

Após a construção da barragem, foi feita a instalação da membrana impermeável sobre a fundação. Para tanto, foram aplicadas camadas sucessivas de gaze e parafina com a finalidade de formar a membrana impermeável, como mostra a Figura 4.10 (A). Sobre a camada de parafina, foi aplicada uma fina camada de silicone líquido, objetivando conter

possíveis vazamentos e garantir a estanqueidade da solução. Traços auxiliares, conforme mostra a Figura 4.10 (B), foram feitos com a intenção de delimitar os rasgos a serem simulados.



Figura 4.10 – (A) Membrana impermeável de montante, e (B) Traços auxiliares

O modelo físico da barragem, após a conclusão de todas as etapas da montagem, adquiriu o aspecto apresentado na Figura 4.11.



Figura 4.11 – Modelo físico da barragem em estudo

4.2.6.3 Enchimento do reservatório e estabilização do fluxo

O enchimento do reservatório foi feito com o auxílio de uma mangueira, sendo a vazão d'água mantida constante e controlada para não ocasionar instabilidade nos taludes da barragem. Simultaneamente ao enchimento, foi aplicado vácuo aos piezômetros, de forma a forçar a saturação dos mesmos e eliminar eventuais bolhas de ar. Durante a estabilização do fluxo, o nível d'água do reservatório foi mantido constante. A Figura 4.12 mostra o modelo reduzido durante a estabilização do fluxo.



Figura 4.12 – Enchimento do reservatório e estabilização do fluxo

4.2.6.4 Simulações efetuadas

Foram efetuadas três simulações em modelo reduzido, a saber: ausência de tratamento de fundação; utilização de geomembrana a montante da barragem, e; existência de rasgos longitudinais na geomembrana. Para cada uma das simulações, após a estabilização do fluxo, foram obtidas as leituras de poropressão e as vazões de percolação. As simulações em questão estão descritas na sequência.

A) Simulação 1 - Ausência de tratamento de fundação

Nesta situação, foi estudado o comportamento da barragem sem a utilização de tratamento de fundação, conforme mostra a Figura 4.13.

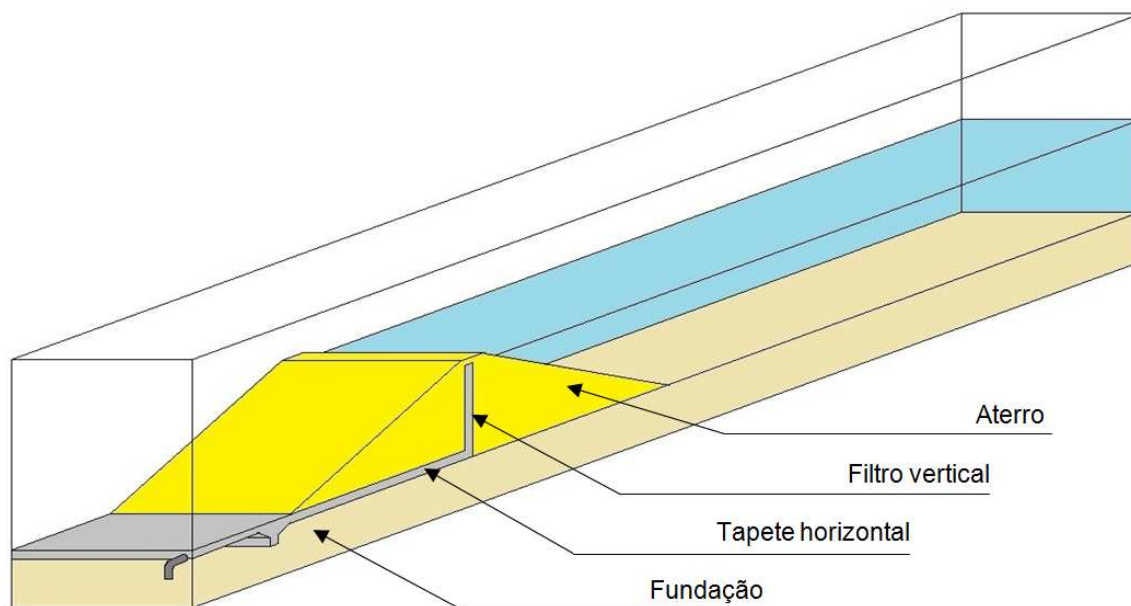


Figura 4.13 – Ausência de tratamento de fundação

B) Simulação 2 - Utilização de geomembrana sobre a fundação a montante da barragem

Nesta situação, foi estudado o comportamento da barragem com a utilização de tratamento de fundação, conforme mostra a Figura 4.14. Considerou-se que a membrana aderiu-se perfeitamente ao solo e que não houve rasgos ou discontinuidades que pudessem influenciar nos resultados obtidos através do ensaio.

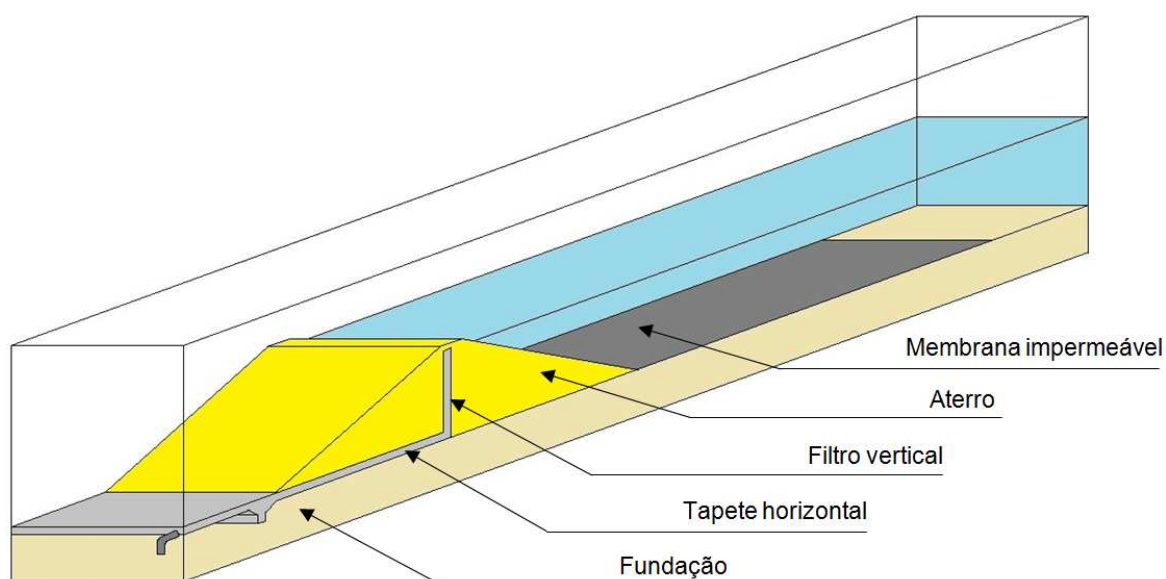


Figura 4.14 – Utilização de geomembrana sobre a fundação a montante da barragem

C) Simulação 3 – Existência de rasgos longitudinais na geomembrana

Nesta situação, foi investigada a influência de rasgos na membrana, sendo a mesma avaliada através das vazões de percolação, das poropressões e dos gradientes hidráulicos. Para definição dos rasgos, considerou-se 50% da área de emendas comprometida, considerando-se espaçamento igual a 5,90 m (no protótipo), o qual corresponde à largura das bobinas utilizadas na UHE Salto.

4.3 MODELO NUMÉRICO DE FLUXO

As análises numéricas pressupõem a adoção de um modelo de fluxo, o qual tem por finalidade reproduzir os resultados que seriam obtidos em barragens reais, constituindo assim uma simplificação dos fenômenos a que as mesmas estão sujeitas. Dessa forma, torna-se necessário definir quais são as variáveis representativas do fenômeno em questão, para então definir o modelo mais adequado. As variáveis consideradas neste trabalho encontram-se apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Variáveis representativas do modelo de fluxo

VARIÁVEIS INDEPENDENTES	
—	GEOMETRIA DA SEÇÃO DA BARRAGEM;
—	ESPESSURA DA FUNDAÇÃO;
—	CONDIÇÕES DE CONTORNO;
—	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DOS MATERIAIS DE ATERRO E FUNDAÇÃO.
VARIÁVEIS DEPENDENTES	
—	POROPRESSÃO;
—	VAZÃO DE PERCOLAÇÃO;
—	GRADIENTES HIDRÁULICOS.

Pode-se dizer que as variáveis dependentes são as respostas que estão sendo investigadas a partir das variáveis independentes definidas para o modelo de fluxo. Como forma de garantir que o modelo de numérico possui semelhança de comportamento com a barragem real (UHE Salto) e com o modelo reduzido, adotaram-se variáveis independentes condizentes com os estudos em questão, conforme descreve o tópico 4.3.1.

Os resultados obtidos através do modelo físico e da análise dos dados da barragem real (UHE Salto) são então utilizados para calibração e validação do modelo de fluxo. Para tanto, são feitas simulações numéricas com o objetivo de adequar o modelo numérico às condições encontradas em campo e em laboratório. Os procedimentos em questão estão expostos no tópico 4.3.2.

Com o modelo de fluxo calibrado e validado, são feitas simulações numéricas com a finalidade de avaliar como o tratamento de fundação em questão afeta as variáveis estudadas: vazões; pressões neutras, e; gradientes hidráulicos. A otimização da utilização de geomembrana de PEAD pode ser estudada através da variação dos parâmetros de entrada do modelo de fluxo, conforme descreve o tópico 4.3.3.

4.3.1 Variáveis independentes do modelo numérico

A geometria da barragem, a ser utilizada no modelo numérico, foi determinada com base na geometria utilizada no modelo físico, a qual, por sua vez, representa as condições encontradas na barragem da UHE Salto. Da mesma forma, a espessura da fundação a ser considerada no modelo numérico, foi definida com base na espessura encontrada no modelo físico.

Adotou-se condutividade hidráulica dos materiais de aterro e de fundação compatível com os valores encontrados no modelo reduzido, as quais mantém relação de proporcionalidade com os coeficientes observados na UHE Salto. Dessa forma, foi mantida a semelhança entre os dados reais, o modelo reduzido e o modelo numérico.

As condições de contorno aplicadas, por sua vez, representam duas situações distintas: utilização de geomembrana a montante da barragem, e; ausência de geomembrana. Sendo assim, foi possível comparar os resultados obtidos com os resultados encontrados através do experimento em modelo reduzido e com os valores de carga de pressão observados na barragem da UHE Salto, conforme expõe o tópico 4.3.2.

4.3.2 Calibração e validação do modelo numérico

A calibração e a validação do modelo de fluxo numérico são necessárias para assegurar que o mesmo é representativo do comportamento observado em campo e em laboratório, apresentando resultados confiáveis. Neste trabalho, os resultados obtidos

através da análise experimental em modelo reduzido e da análise de comportamento com base nos dados observados na UHE Salto, são utilizados com o propósito de calibrar e validar o modelo numérico de fluxo, conforme expõem os tópicos 4.3.2.1 e 4.3.2.2.

4.3.2.1 Simulações experimentais

As cargas de pressão do modelo reduzido, determinadas nos pontos onde houve a instalação dos piezômetros, foram comparadas com as cargas de pressão obtidas através do modelo numérico, sendo possível, dessa forma, validar os resultados obtidos através do mesmo. Os valores de vazão, por sua vez, também são comparados aos obtidos através do modelo numérico.

O método de deposição do material granular (tópico 4.2.5) pressupõe que haja isotropia de permeabilidade do material depositado, segundo as direções horizontal e vertical. Entretanto, em situações reais, aterros compactados costumam apresentar anisotropia de permeabilidade (CRUZ, 1996). Por esse motivo, foram feitas simulações no modelo numérico, com a finalidade de avaliar como as cargas de pressão se comportam com a variação da relação entre a permeabilidade vertical e a permeabilidade horizontal do material de aterro, conforme mostra a Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Simulações efetuadas no modelo numérico

Simulação	Relação de permeabilidade	Coeficientes de permeabilidade	
		k_h (m/s)	k_v (m/s)
1	$k_v/k_h=1$	0,000002	0,000002
2	$k_v/k_h=0,2$	0,00001	0,000002
3	$k_v/k_h=0,1$	0,00002	0,000002

Nas simulações em questão, o coeficiente de permeabilidade segundo a vertical foi mantido constante, ocorrendo variação apenas no coeficiente de permeabilidade segundo a horizontal. Essa consideração resulta do fato de que os coeficientes de permeabilidade dos materiais, determinados conforme o tópico 4.2.2, correspondem à permeabilidade segundo a direção vertical (k_v), pois o fluxo d'água no permeâmetro ocorre perpendicularmente às camadas de material depositado através da "chuva de areia".

4.3.2.2 Comportamento observado na UHE Salto

Entre as seções estudadas da UHE Salto, apenas as seções 15, 17, 19 e 21 apresentam tratamento de fundação através de geomembrana. A seção 22 foi estudada, em tópicos anteriores, apenas com a finalidade de determinação das propriedades geotécnicas dos materiais de fundação.

As seções em questão foram analisadas com a finalidade de se verificar como as cargas de pressão se comportam durante o fluxo pelo aterro e fundação da barragem, com a adoção da solução em questão. Dessa forma, os resultados encontrados nesta etapa são comparados com os resultados obtidos experimentalmente e, como consequência, é feita a calibração e validação do modelo de fluxo. Dessa forma, com o modelo numérico validado e calibrado, foi possível efetuar análises paramétricas dos modelos de fluxo, conforme procedimento apresentado no tópico 4.3.3.

4.3.3 Análises paramétricas

Tendo como base o modelo numérico de fluxo, adotado como representativo das condições encontradas em campo, foram feitas simulações com a finalidade de avaliar o comportamento do tratamento de fundação em questão, através da variação das condições de contorno. O comportamento da fundação e do aterro foi avaliado em função das cargas de pressão, das vazões de percolação e dos gradientes hidráulicos.

Primeiramente, avaliou-se como a utilização da membrana sintética foi capaz de reduzir as vazões de percolação e as cargas de pressão no aterro e na fundação, tendo sido também determinadas as influências da mesma sobre os gradientes hidráulicos. Os procedimentos adotados encontram-se expostos no tópico 4.3.3.1.

Na sequência, verificou-se o potencial de utilização de geomembrana também sobre o talude de montante da barragem, em complementação ao tratamento de fundação (tópico 4.3.3.2). O tópico 4.3.3.3, por sua vez, apresentou os efeitos da variação do comprimento da geomembrana aplicada sobre a fundação.

O tópico 4.3.3.4 apresenta um estudo da utilização de tapete impermeável a montante da barragem, composto por solo compactado, em complementação ou substituição da solução de membrana sintética. O tópico 4.3.3.5, por sua vez, avalia a ocorrência de rasgos na geomembrana, sendo também verificada a eficiência da construção de camada de proteção acima da mesma, com a finalidade de reduzir o fluxo.

Por fim, avaliam-se os efeitos da variação do comprimento da geomembrana sobre o talude de montante da barragem (tópico 4.3.3.6). Foram feitas considerações acerca da ancoragem e dos procedimentos necessários para reduzir os gradientes hidráulicos no material de aterro.

4.3.3.1 Tapete impermeável a montante da barragem com utilização de barreira simples de geomembrana

Neste tópico, avaliou-se a utilização do tratamento de fundação de barragens com a utilização de geomembrana. As simulações consideraram a mesma com comprimento igual a 96 m, equivalente a 4 vezes a altura da barragem. Foram feitas duas simulações, conforme mostra a Tabela 4.8. Os parâmetros estudados são as vazões de percolação, as cargas de pressão e os gradientes hidráulicos.

Tabela 4.8 – Simulações efetuadas para o tapete impermeável a montante da barragem

Simulação	Condições de contorno
1	Ausência de tratamento de fundação
2	Utilização de geomembrana sobre a fundação

4.3.3.2 Utilização de barreira simples de geomembrana na face de montante da barragem

Apresenta-se um estudo a respeito do potencial de utilização de geomembrana na face de montante da barragem, em complementação ou substituição ao tratamento da fundação, conforme mostra a Tabela 4.9. Os parâmetros estudados foram as vazões de percolação e as cargas de pressão hidráulica.

Tabela 4.9 – Simulações efetuadas para a utilização de geomembrana na face de montante da barragem

Simulação	Posição da geomembrana na barragem
1	Apenas na face de montante
2	Na face de montante e sobre a fundação

4.3.3.3 Efeitos da variação do comprimento da membrana sintética

Neste tópico, foram feitas simulações numéricas no modelo de fluxo, nas quais variou-se o comprimento da membrana sintética sobre a fundação. Os comprimentos estudados e a relação dos mesmos com a altura da barragem encontram-se apresentados na Tabela 4.10. Os parâmetros estudados são as vazões de percolação, as cargas de pressão no aterro e na fundação e os gradientes hidráulicos.

Tabela 4.10 – Simulações efetuadas variando-se o comprimento da membrana sintética

Simulação	Comprimento da membrana sintética	Relação com a altura da barragem
1	24	L=H
2	48	L=2.H
3	72	L=3.H
4	96	L=4.H

4.3.3.4 Utilização de barreira simples de solo compactado a montante da barragem

Tradicionalmente, os tapetes impermeáveis construídos a montante das barragens são constituídos por solo compactado. Como este trabalho introduz aspectos relativos à utilização de geomembrana com a finalidade em questão, neste tópico é feita a comparação entre as duas soluções. Os resultados são avaliados em função das vazões de percolação, das cargas de pressão e dos gradientes hidráulicos. A Tabela 4.11 apresenta as espessuras de solo compactado consideradas nas análises numéricas.

Tabela 4.11 – Simulações efetuadas variando-se a espessura do solo compactado

Simulação	Espessura do tapete impermeável composto por solo compactado (m)
1	0,8
2	3
3	6

4.3.3.5 Ocorrência de rasgos longitudinais na membrana sintética

Neste trabalho, verifica-se como a eventual ocorrência de rasgos na geomembrana, sendo os mesmos longitudinais ao fluxo, pode influenciar as vazões de percolação e as cargas de pressão na fundação da barragem. Também é apresentado estudo acerca da utilização de barreira composta de geomembrana e solo compactado.

A Tabela 4.12 apresenta as simulações efetuadas. Neste tópico também é feita a comparação com os resultados obtidos no ensaio em modelo reduzido, no qual foram feitos rasgos na geomembrana.

Tabela 4.12 – Simulações efetuadas a respeito da ocorrência de rasgos na geomembrana

Simulação	Comprimento da membrana sintética	Configuração do tratamento
1	1 rasgo com 4 m de comprimento	Sem proteção
2	1 rasgo com 4 m de comprimento	Camada de 0,8 m de espessura
3	3 rasgos com 4 m de comprimento	Sem proteção
4	3 rasgos com 4 m de comprimento	Camada de 0,8 m de espessura

4.3.3.6 Extensão da membrana sintética sobre o talude de montante da barragem e ancoragem

Apresenta-se um estudo a respeito dos efeitos da variação da extensão da membrana sintética sobre talude de montante da barragem, levando-se em consideração as vazões de percolação, as cargas de pressão e os gradientes hidráulicos. São apresentadas considerações a respeito da ancoragem da geomembrana no aterro da barragem. As simulações efetuadas encontram-se apresentadas na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Simulações efetuadas variando-se o comprimento da ancoragem no talude de montante

Simulação	Comprimento da ancoragem no talude (m)	Altura correspondente da barragem (m)
1	8	3,58
2	16	7,16
3	24	10,73
4	32	14,31
5	40	17,89

4.4 LIMITAÇÕES

Fatos científicos raramente se baseiam em experimentos únicos, mas sim em um conjunto múltiplo de experimentos, os quais repetem um mesmo fenômeno sob diferentes condições (YIN, 2001). A característica principal dos experimentos é que o pesquisador introduz algum tipo de mudança nas variáveis independentes, com o objetivo de produzir alguma mudança de comportamento nas variáveis dependentes (KERLINGER E TAYLOR, 1979).

Em geral, experimentos baseiam-se em generalizações analíticas, nas quais o pesquisador tem por objetivo generalizar um conjunto particular de resultados em uma teoria mais abrangente. Dessa forma, a validação de uma teoria elaborada com base em experimentos pode ser feita através da replicação das descobertas em um segundo ou terceiro local, nos quais pressupõe-se que ocorreriam resultados semelhantes.

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos utilizados na presente pesquisa, pode-se dizer que o trabalho aqui desenvolvido é experimental, possuindo a particularidade de utilizar dados de uma barragem real e modelo reduzido, com a finalidade de calibrar e validar os resultados obtidos através de modelo numérico. Entretanto, a generalização dos resultados aqui apresentados para situações distintas requer uma análise criteriosa, visto que os mesmos foram formulados com base em condições pré-definidas de fluxo.

Além dos procedimentos experimentais em laboratório, o trabalho em questão utiliza modelagem numérica como forma de simular o comportamento real do fluxo através de barragens de terra. Dessa forma, utiliza-se como ferramenta de análise numérica o *software* SEEP/W, pertencente ao pacote de programas *GEO-SLOPE International Ltd.* (consultar SEEP/W, 2007).

Softwares de modelagem numérica, entre os quais o *software* SEEP/W, possuem algumas limitações inerentes às formulações adotadas ou à capacidade de processamento dos *hardwares*. A formulação do programa não leva em conta as mudanças de temperatura e as variações de volume que ocorrem durante o fluxo, além de desconsiderar a parcela da umidade do solo que se desprende na forma de vapor.

Andrade (1984) expõe que a heterogeneidade natural dos maciços de fundação é muitas vezes responsável pela disparidade entre os valores observados e aqueles obtidos em modelos de análise do comportamento do fluxo. Segundo o mesmo autor, em maciços de características homogêneas, os fenômenos se aproximam mais dos modelos matemáticos adotados. No caso da análise dos dados da UHE Salto, o maciço de fundação é discretizado em função das características geotécnicas observadas nos ensaios de campo

e de laboratório. No caso das simulações em modelo reduzido, adotou-se uma permeabilidade única para os materiais de fundação, o que constitui uma simplificação da situação encontrada em campo.

Os modelos numéricos de percolação através dos maciços de fundação e de aterro, aplicados neste trabalho, não consideram a zona não saturada do fluxo, compreendida entre o nível d'água e a superfície. As simulações consideraram apenas o fluxo saturado, ou seja, abaixo do nível d'água. No entanto, em algumas situações, a zona não saturada desempenha um papel importante no fluxo.

Os modelos numéricos e experimentais, além das limitações já expostas, se baseiam em simplificações dos fenômenos que ocorrem na natureza. Neste trabalho, julgou-se suficiente a análise 2D do fenômeno da percolação. Entretanto, no caso real de barragens, a ocorrência de fluxo tangencial às seções transversais pode influenciar significativamente os parâmetros estudados, sendo então necessária uma análise tridimensional.

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos nas simulações numéricas e experimentais, além das análises envolvendo a Usina Hidrelétrica Salto, conforme procedimentos expostos no Capítulo 4. Os resultados são discutidos, salientando-se as principais informações obtidas através da análise dos dados.

5.1 TRATAMENTO DOS DADOS DA USINA HIDRELÉTRICA SALTO

Os dados levantados de projetos e de investigações geotécnicas, com relação à Usina Hidrelétrica Salto, foram trabalhados com a finalidade de determinar as características geométricas da barragem e a espessura da fundação nas seções em estudo, conforme resultados apresentados no tópico 5.1.1. A partir da geometria da barragem e das permeabilidades determinadas através das investigações geotécnicas, foram feitas simulações numéricas com o objetivo validar os coeficientes adotados, estando os resultados apresentados no tópico 5.1.2.

5.1.1 Geometria da barragem e condições de contorno

A barragem de terra da margem esquerda possui nível d'água normal máximo definido na El. 446,5 e crista na El. 449,5 m, resultando em 3 m de borda livre. A altura da barragem (H), nas seções em estudo, foi determinada em função da cota da crista (definida na El. 449,50 m) e das cotas do terreno de fundação, contidas no levantamento planialtimétrico do sítio da barragem. Foi considerada remoção de espessura equivalente a 1,50 m de camada superficial do terreno. Os resultados encontrados encontram-se apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Altura da barragem nas seções 15, 17, 19, 21 e 22 da UHE Salto

Seção	15	17	19	21	22
H (m)	23,72	17,00	11,50	7,50	6,00

Com base nas investigações geotécnicas realizadas no local de implantação da barragem, foram determinadas as espessuras de solo permeável (e), encontradas na

fundação das seções em estudo, conforme Tabela 5.2. A tabela em questão mostra que a camada de solo permeável da fundação vai se tornando mais espessa a medida que se afasta do leito do rio.

Tabela 5.2 – Altura da barragem e espessura do material permeável da fundação

Seção	H (m)	e (m)	H/e	Sondagens de referência
15	23,72	7,15	3,3	SP-503 / SP-504 / SP-505
17	17,00	10,30	1,7	SP-506
19	11,50	15,97	0,7	SP-507
21	7,50	17,04	0,4	SP-508
22	6,00	18,54	0,3	SP-508

A partir da locação das seções em estudo e das definições geométricas do sistema de drenagem interna, foram determinadas as dimensões do filtro vertical e do tapete horizontal nas seções em estudo, conforme mostra a Tabela 5.3. Nas fronteiras entre o aterro e o filtro vertical e entre a fundação e o tapete horizontal, foi aplicada condição de contorno que admite que o material drenante é capaz de remover todo fluxo que chega nas estruturas em questão, estando as mesmas sujeitas à pressão atmosférica.

Tabela 5.3 – Altura da barragem e espessura do material permeável da fundação

Seções	Localização	Espessura (cm)			
		Zona inferior	Miolo	Zona superior	Total
15	Entre muro de abraço esquerdo e Est. 22	30	100	20	150
17	Entre Est. 22 e Est. 23	30	60	20	110
19	Entre Est. 23 e Est. 24	30	40	20	90
21 e 22	Entre Est. 24 e Est. 24+73	30	20	20	70

O comprimento do tratamento de fundação aplicado em Salto também foi variável de acordo com a seção considerada. A Tabela 5.4 apresenta, para as diferentes seções, os comprimentos do tratamento a partir da base do talude de montante (L) e a altura da barragem (H). A seção 22 não possui o tratamento de fundação em questão.

A Figura 5.1 apresenta, esquematicamente, as seções estudadas da UHE Salto, de drenagem interna, trincheira drenante, enrocamento para proteção do talude de montante e bermas de equilíbrio).

Tabela 5.4 – Altura da barragem e comprimento da membrana impermeável

Seção	H (m)	L (m)	L/H
15	23,72	100	4,21
17	17,00	100	5,88
19	11,50	60	5,21
21	7,50	10	1,33
22	6,00	-	-

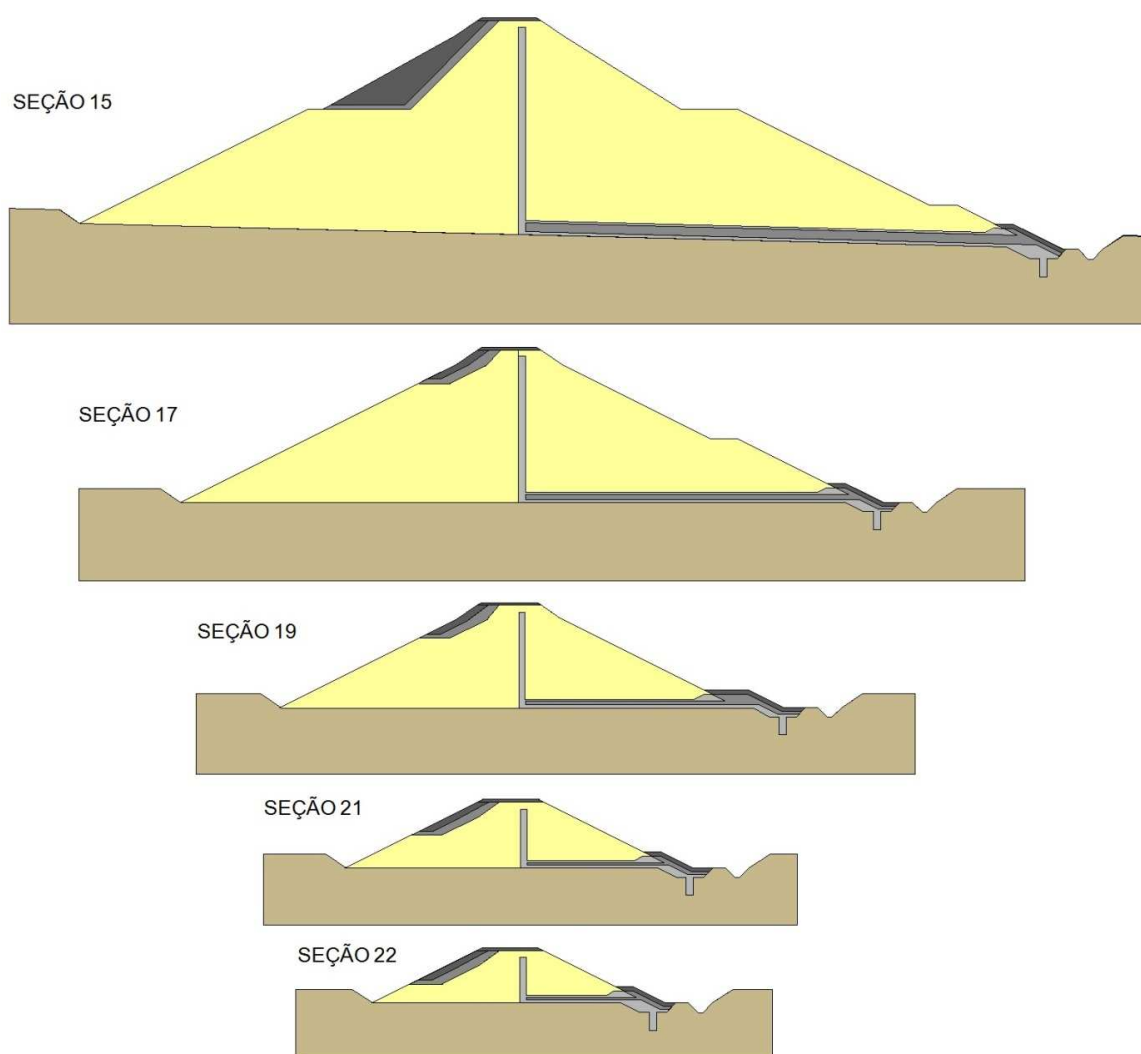


Figura 5.1 – Seções em estudo da Usina Hidrelétrica Salto

5.1.2 Condutividade hidráulica dos materiais de aterro e de fundação

Com a finalidade de determinar a condutividade hidráulica dos materiais de aterro e de fundação, foram analisadas as sondagens representativas das seções 15,17,19, 21 e 22

da UHE Salto, as quais contavam com ensaios de permeabilidade “in situ”. A partir das sondagens em questão, foram determinados coeficientes de permeabilidade médios, de acordo com a estratificação do solo. Os resultados encontram-se apresentados na Tabela 5.5, onde também são descritas as principais características geotécnicas dos solos em questão.

Tabela 5.5 – Coeficientes de permeabilidade da fundação da UHE Salto

Seção	Sondagem de ref.	Prof. (m)	$k_{\text{médio}}$ (m/s)	Características geotécnicas
15	SP-503 SP-504 SP-505	0-4	0,00002	Areia fina, medianamente compacta - Solo residual maduro
		4-6	0,000015	Silte arenoso, medianamente compacto - Solo residual jovem
		6-9	0,00001	Silte arenoso, com pedregulhos finos a médios de rocha decomposta, compacto a muito compacto - Saprólito (basalto)
17	SP-506	0-7	0,00001	Silte arenoso, pouco compacto a compacto - Solo residual maduro
		7-11	0,00000045	Silte arenoso, com pedregulhos (finos a grossos) de rocha decomposta, compacto a muito compacto - solo residual jovem
19	SP-507	0-6	0,000015	Silte arenoso, pouco compacto a compacto - Solo residual maduro
		6-14	0,000006	Silte arenoso, pouco compacto a compacto - Solo residual maduro
		14-16,5	0,00000045	Areia siltosa, com pedregulhos finos a grossos de rocha decomposta, compacta a muito compacta - rolo residual jovem
21	SP-508	0-7	0,000015	Silte arenoso, pouco compacto a compacto - Solo residual maduro
		7-14	0,000006	Silte arenoso, pouco compacto a compacto - Solo residual maduro
		14-18,5	0,00000045	Areia siltosa, com pedregulhos finos a médios de rocha decomposta, compacto a muito compacto - solo residual jovem
22	SP-508	0-7	0,000015	Silte arenoso, pouco compacto a compacto - Solo residual maduro
		7-14	0,000006	Silte arenoso, pouco compacto a compacto - Solo residual maduro
		14-18,5	0,00000045	Areia siltosa, com pedregulhos finos a médios de rocha decomposta, compacto a muito compacto - solo residual jovem

Com base nos ensaios realizados em blocos indeformados, coletados no solo compactado da barragem, determinou-se os coeficientes de permeabilidade do aterro segundo a direção horizontal e vertical, conforme apresentado na Tabela 5.6. É importante salientar que os resultados expostos tratam-se de uma generalização dos resultados obtidos através das amostras individualmente, em função da variabilidade encontrada nos mesmos. Segundo os valores em questão, pode-se considerar que a permeabilidade segundo a horizontal é aproximadamente 5 vezes superior à permeabilidade segundo a vertical.

Tabela 5.6 – Coeficientes de permeabilidade do aterro da UHE Salto

Direção	Coeficiente de permeabilidade a 20°C (m/s)
Horizontal	0,0000001
Vertical	0,00000002

A permeabilidade do substrato rochoso, composto basicamente por basalto e seus produtos de alteração, foi determinada a partir de ensaios realizados de perda d'água sob pressão. Através da análise dos dados disponíveis, determinou-se que o coeficiente de permeabilidade médio do substrato rochoso equivale a 1×10^{-8} m/s. Novamente, trata-se de uma simplificação das permeabilidades de fato encontradas em campo. Para os demais materiais empregados na construção de Salto, foram adotadas permeabilidades usuais, da seguinte forma: areia (0,0001 m/s); brita (0,005 m/s), e enrocamento (0,1 m/s).

5.1.2.1 Simulações numéricas e retroanálise

Com base nos coeficientes de permeabilidade apresentados na Tabela 5.5 e na geometria e condições de contorno da barragem (tópico 5.1.1), foram feitas simulações numéricas para comparação dos valores de carga de pressão e vazão com os efetivamente verificados através do sistema de instrumentação. Dessa forma, foi possível garantir que os modelos numéricos criados para as seções representam a realidade.

Os valores de carga de pressão esperados para os piezômetros foram determinados a partir da análise das leituras do sistema de instrumentação, considerando-se o nível d'água máximo normal na El. 446,50 m. Da mesma forma, foram determinadas as vazões esperadas para os medidores de vazão. Os resultados encontram-se apresentados na Tabela 5.7. Os resultados fornecidos pelo programa para as análises numéricas encontram-se apresentados no tópico 5.3.2.2.

Tabela 5.7 – Retroanálise com base nos resultados da instrumentação da UHE Salto

Seção	Instrumento	Unidade de medida	Leitura		Amplitude da variação (m)
			Instrumentação	Numérica	
15	PSP-73	m.c.a	12,00	7,80	4,20
	PSP-75	m.c.a	8,00	7,81	0,19
	PSP-77	m.c.a	5,50	5,46	0,04
	MV-3	m ³ /s/m	-	0,00000184	-
17	PSP-79	m.c.a	11,00	9,93	1,07
	PSP-81	m.c.a	4,32	2,95	1,37
	PSP-82	m.c.a	3,00	1,90	1,10
	PSP-83	m.c.a	3,00	1,50	1,50
	MV-4	m ³ /s/m	0,00000785	0,00000702	-
19	PSP-85	m.c.a	8,00	7,21	0,79
	PSP-86	m.c.a	3,20	2,89	0,31
	PSP-87	m.c.a	3,00	2,10	0,90
	MV-4	m ³ /s/m	0,00000300	0,00000247	-
21	PSP-89	m.c.a	4,70	4,10	0,60
	PSP-90	m.c.a	6,90	5,60	1,30
	PSP-91	m.c.a	3,00	2,10	0,90
	MV-5	m ³ /s/m	0,00001014	0,00001182	-
22	PSP-93	m.c.a	3,70	3,20	0,50
	MV-5	m ³ /s/m	0,00001014	0,00001075	-

Os resultados apresentados na Tabela 5.7 mostram que, através da retroanálise, foi possível prever os valores de vazão e de carga de pressão com relativa precisão, salvo pequenas variações oriundas da não homogeneidade do maciço e da posição do nível d'água da região de jusante da barragem. Os piezômetros instalados no tapete drenante, por não apresentarem leituras de carga de pressão, foram desconsiderados na análise.

Nos casos onde houve maior diferença entre a carga de pressão obtida pela instrumentação e a carga de pressão obtida pela análise numérica, considerou-se que existem condições do maciço de fundação que não puderam ser identificadas através das investigações geotécnicas existentes, como, por exemplo, anisotropia dos materiais e efeito da tridimensionalidade da barragem.

De forma geral, pode-se dizer que a resposta obtida através dos piezômetros se mostrou condicionada principalmente à existência do tapete horizontal, sob o espaldar de jusante da barragem. A variação dos coeficientes de permeabilidade na fundação resultou em pequenas diferenças nas cargas de pressão. As vazões observadas em campo, no entanto, apresentaram grande semelhança com as vazões calculadas através do modelo numérico. Por esse motivo, considerou-se que o ajuste da permeabilidade dos materiais através das investigações geotécnicas foi satisfatório.

5.2 EXPERIMENTO EM MODELO REDUZIDO

As características geométricas adotadas para a barragem e as condições de contorno impostas à mesma encontra-se expostas no tópico 5.2.1. Por sua vez, o procedimento para determinação das condutividades hidráulicas dos materiais empregados no modelo reduzido encontra-se apresentado no tópico 5.2.2.

Os ensaios laboratoriais realizados com a finalidade de caracterização geotécnica dos materiais empregados no modelo reduzido estão descritos no tópico 5.2.3. A partir dos resultados em questão, é feita a verificação dos critérios de filtração e de drenagem para materiais granulares (tópico 5.2.4) e a calibração do método de deposição do material (tópico 5.2.5). Através das simulações experimentais em modelo reduzido, foram obtidas as leituras de instrumentação apresentadas no tópico 5.2.6.

5.2.1 Características geométricas e condições de contorno

A definição da geometria da seção da barragem e das condições de contorno do modelo reduzido foram feitas com base nas características geométricas encontradas na UHE Salto, permitindo assim a posterior calibração e validação dos resultados. Foram adotadas dimensões compatíveis com as requeridas para a execução dos ensaios no interior do tanque de percolação.

Conforme exposto no tópico 3.2.1, a seção transversal da barragem da margem esquerda da UHE Salto possui crista de 6 m de largura, com taludes na inclinação de 1V:2H até a cota 447,50 m, e inclinação de 1V:1,5H a partir dessa cota até a El. 449,5 m. Baseando-se nestas informações, adotou-se crista com 6 m de largura e inclinação de 1V:2H dos taludes de montante e jusante. Não foi prevista a execução de bermas de equilíbrio no modelo de fluxo.

Considerando-se a altura da barragem nas seções estudadas da UHE Salto (Tabela 5.1) e as dimensões disponíveis para execução dos ensaios no tanque de percolação, adotou-se altura da barragem igual a 24 cm (no modelo), a qual corresponde aproximadamente à altura observada na Seção 15 da UHE Salto. Esta dimensão é compatível com a espessura da camada de solo permeável da fundação e com o comprimento adotado para a membrana impermeabilizante, a serem descritos na sequência. A Figura 5.2 apresenta, esquematicamente, as dimensões adotadas.

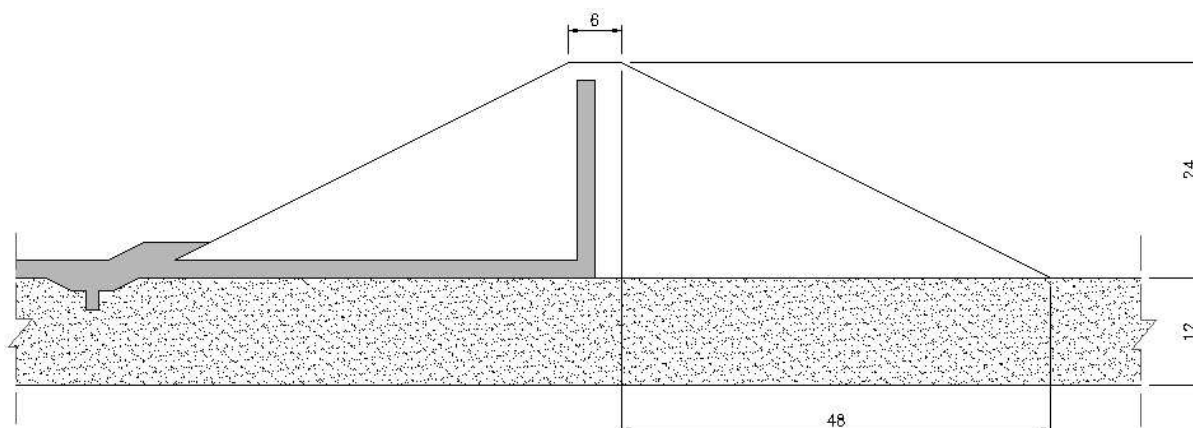


Figura 5.2 – Geometria da seção transversal do modelo de fluxo

Com relação à espessura da camada de solo permeável da fundação, cujos valores existentes UHE Salto encontram-se apresentados na Tabela 5.2, considerou-se que as seções 15 e 17 são mais representativas do problema estudado. Dessa forma, adotou-se a relação apresentada na Equação 5.1, resultando em espessura do material de fundação igual a 12 cm.

$$\frac{H}{e} = 2; \quad H = 24 \text{ cm}; \quad e = 12 \text{ cm} \quad (5.1)$$

Na UHE Salto, o sistema de drenagem é composto por um filtro vertical com espessura de 0,8 m, e um tapete horizontal com espessura variando entre 0,7 e 1,5 m. Devido à dificuldade de construção de tais estruturas com pequena espessura no modelo reduzido, adotou-se a utilização de filtro vertical e tapete horizontal com espessura igual a 2 m (em dimensões de protótipo).

Com nível d'água máximo normal definido na El. 446,5 m e crista na El. 449,5 m, a UHE Salto apresenta 3 metros de borda livre. Essa mesma borda livre foi adotada para o modelo de fluxo numérico e construção dos modelos em escala reduzida. Dessa forma, considerando-se o fundo do tanque de percolação como o nível de referência, o nível d'água do reservatório está na cota 33 m.

Com relação ao comprimento adotado para o tratamento da fundação, a Tabela 5.4 mostra que a relação L/H varia aproximadamente entre 1 e 6 para as seções consideradas. Neste trabalho adotou-se a relação apresentada na Equação 5.2, resultando no comprimento do tratamento igual a 96 m. A dimensão em questão é compatível com as dimensões do tanque de percolação.

$$\frac{L}{H} = 4; \quad H = 24 \text{ cm}; \quad L = 96 \text{ cm} \quad (5.2)$$

5.2.2 Condutividade hidráulica dos materiais de aterro e de fundação

Os coeficientes de permeabilidade dos materiais de fundação da UHE Salto apresentaram-se variáveis conforme a camada, com valores compreendidos entre 0,00001 e 0,00000045 m/s. Entretanto, como simplificação, para construção do modelo em escala reduzida, foi necessário considerar-se um coeficiente de permeabilidade único para o material de fundação.

Os resultados apresentados no tópico 5.1.2 mostram que o coeficiente de permeabilidade segundo a vertical, encontrado para o aterro da barragem da UHE Salto, equivale a 2×10^{-8} m/s. Dessa forma, adotando-se que o coeficiente de permeabilidade do material de fundação (isotrópico) equivale a 1×10^{-6} , tem-se a razão de permeabilidade apresentada na Equação 5.3.

$$\frac{k_{\text{fundação}}}{k_{v,\text{aterro}}} = \frac{0,000001}{0,00000002} = 50 \quad (5.3)$$

Sendo: $k_{\text{fundação}}$: coeficiente de permeabilidade médio da fundação;
 $k_{v,\text{aterro}}$: coeficiente de permeabilidade do aterro, segundo a vertical.

A permeabilidade dos materiais a serem empregados na construção do modelo reduzido é determinada em função da altura de queda do material granular, definida após calibração. Entretanto, conforme exposto no tópico 4.2.2, foi necessário adotar altura de queda das partículas anteriormente à calibração da mesma através de ensaios específicos. Adotou-se altura de queda das partículas equivalente a 12 cm, considerando-se a facilidade de execução e a utilização desta altura de queda em estudos anteriores com material similar (ARAUJO, 2013). Dessa forma, os coeficientes de permeabilidade foram determinados para a altura de queda em questão.

Inicialmente, foi feita a aquisição de material arenoso em volume suficiente para compor tanto o aterro quanto a fundação do modelo reduzido. Sendo a altura de queda adotada para deposição do material igual a 12 cm, moldou-se uma amostra, a qual foi submetida ao ensaio de permeabilidade a carga constante, obtendo-se coeficiente de permeabilidade igual a 0,0001 m/s. Assumiu-se que o material em questão seria utilizado

para compor a fundação do modelo reduzido. Dessa forma, para que a relação apresentada na Equação 5.3 fosse satisfeita, foi necessário obter um material para compor o aterro com permeabilidade igual a 0,000002 m/s.

O material de aterro foi produzido a partir do material arenoso disponível em laboratório, através da adição de frações de solo argiloso, com a finalidade de tornar o mesmo menos permeável. Sucessivamente, adicionou-se material argiloso passante na peneira nº 200 (0,075 mm), em porcentagens equivalentes a 3% em massa, até que fosse obtido material resultante com permeabilidade aproximada de 0,000002 m/s, para altura de queda igual a 12 cm. Por fim, foram introduzidos aproximadamente 6%, em massa, de solo argiloso no material de aterro.

Foi feito também o ensaio de permeabilidade do material utilizado na construção do filtro vertical e do tapete horizontal, para o qual encontrou-se coeficiente igual a 0,05 m/s. Como a permeabilidade do pedregulho resultou aproximadamente 500 vezes superior à da fundação, considerou-se adequada a utilização do material em questão para compor o modelo. Os coeficientes de permeabilidade encontrados para os materiais em questão estão apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Coeficientes de permeabilidade dos materiais utilizados no modelo reduzido

Material	Coeficiente de permeabilidade (m/s)
Filtro vertical / tapete horizontal	0,05
Fundação	0,0001
Aterro	0,000002

5.2.3 Caracterização geotécnica dos materiais empregados

Os ensaios de caracterização dos materiais de aterro e de fundação consistiram basicamente na determinação da umidade natural e da densidade das partículas sólidas, na análise granulométrica (peneiramento e sedimentação) e em ensaios de compactação. O material drenante utilizado no filtro vertical e no tapete horizontal, por sua vez, foi submetido apenas ao ensaio de análise granulométrica simples, permitindo a posterior verificação dos critérios de filtração e drenagem do mesmo.

Os resultados encontrados para densidade das partículas sólidas e compactação encontram-se apresentados no tópico 5.2.3.1, enquanto que a análise granulométrica encontra-se exposta no tópico 5.2.3.2.

5.2.3.1 Densidade das partículas sólidas e compactidade

A Tabela 5.9 apresenta os valores de umidade natural, densidade das partículas sólidas e índices de vazios mínimo e máximo dos solos, obtidos através dos ensaios.

Tabela 5.9 – Resumo dos resultados de ensaios de caracterização

Material	Umidade natural (%)	Densidade das partículas sólidas	Índice de vazios máximo	Índice de vazios mínimo
Aterro	0,56	2,643	0,762	0,535
Fundação	0,25	2,656	0,672	0,484
Filtro/tapete	0,11	-	-	-

Os resultados obtidos para a densidade real dos grãos estão compatíveis com os valores encontrados na literatura, para materiais compostos por quartzo. Segundo Lambe e Whitman (1979), a densidade específica do quartzo corresponde a aproximadamente 2,65, valor compatível com o encontrado para os materiais de aterro e de fundação. O material de aterro possui densidade levemente inferior ao material de fundação, pois apresenta maior porcentagem de argila em sua composição.

Quanto ao ensaio de compactidade, o material de fundação apresentou menores índices de vazios em relação ao material de aterro. Dessa forma, foi possível verificar que os índices de vazios do aterro são influenciados pela presença de materiais argilosos.

5.2.3.2 Análise granulométrica

Os materiais de aterro e de fundação da barragem foram submetidos aos ensaios de peneiramento grosso e fino, juntamente com a sedimentação. A grande quantidade de material fino presente nestes materiais justificou a necessidade do ensaio de sedimentação, uma vez que as partículas de menor diâmetro possuem grande influência no comportamento do fluxo.

As curvas granulométricas dos materiais de fundação e de aterro estão apresentadas nas Figuras 5.3 e 5.4, respectivamente.

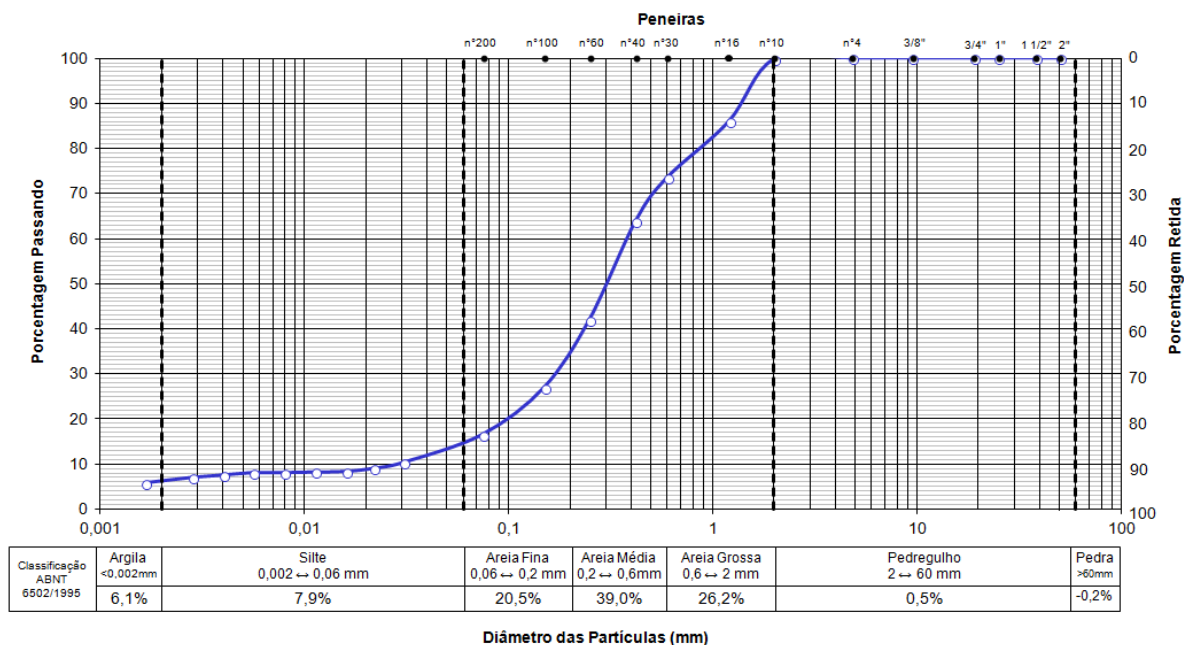


Figura 5.3 – Curva de distribuição granulométrica do material de fundação

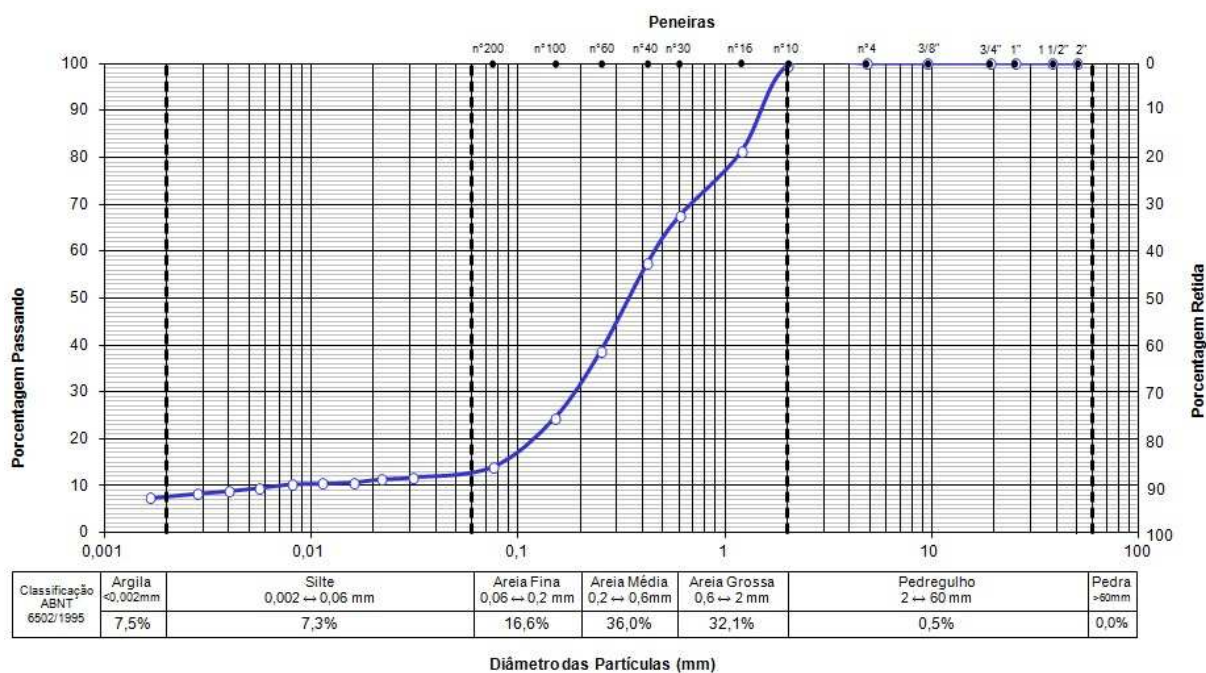


Figura 5.4 – Curva de distribuição granulométrica do material de aterro

O material utilizado no filtro vertical e no tapete horizontal foi submetido apenas aos ensaios de peneiramento, em virtude da quantidade de material passante na peneira n°200 ser desprezível. A curva granulométrica resultante está apresentada na Figura 5.5.

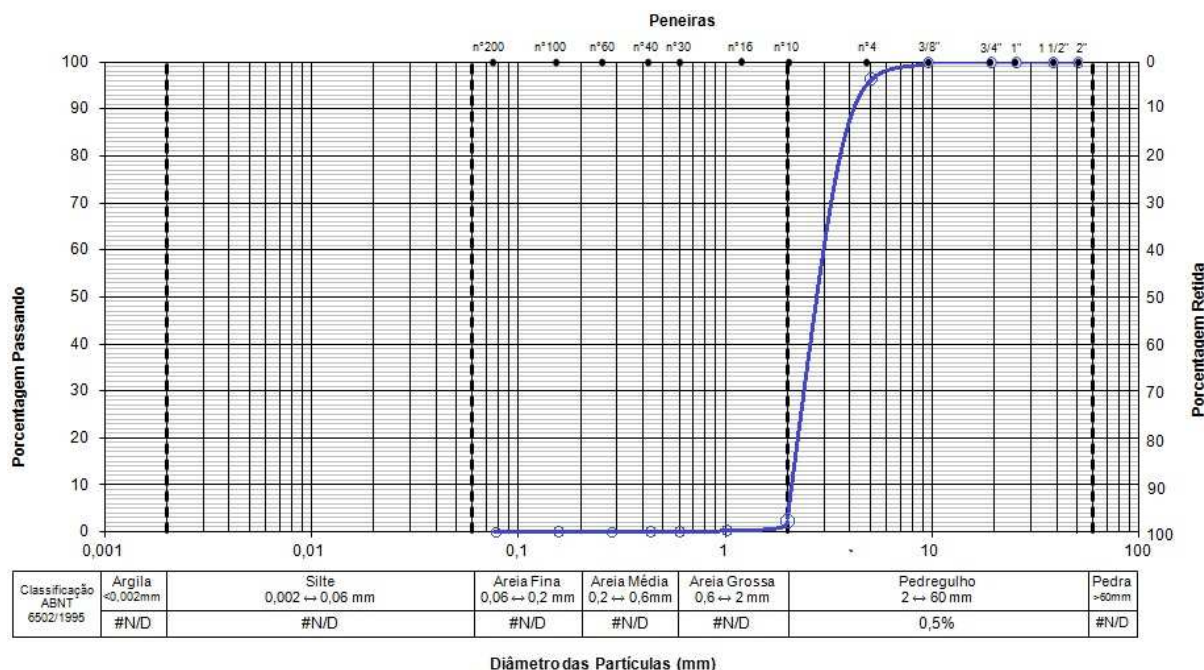


Figura 5.5 – Curva de distribuição granulométrica do material do filtro vertical e tapete horizontal

A curva granulométrica do material de aterro mostra que há uma maior porcentagem de materiais finos ($D_{10} = 0,0065\text{ mm}$), em relação ao material de fundação ($D_{10} = 0,025\text{ mm}$). A maior quantidade de materiais finos é oriunda do tratamento preliminar aplicado ao material de aterro, com a finalidade de reduzir a permeabilidade do mesmo.

O material utilizado no tapete vertical e no filtro horizontal, por sua vez, possui aproximadamente 98% de suas partículas com diâmetro entre 2 e 4,8 mm, sendo classificado como pedregulho. As dimensões deste material estão de acordo com as finalidades de drenagem e filtração, pretendidas para o mesmo.

5.2.4 Critérios de filtração e drenagem para materiais granulares

Como exposto no tópico 4.2.4, é necessário que o material utilizado no filtro vertical e no tapete horizontal da barragem propicie a drenagem das águas e o controle das forças de percolação, sem permitir a passagem do material envolvente. Dessa forma, torna-se necessária a verificação dos critérios de filtração e de drenagem do material em questão.

Com base nas curvas granulométricas dos materiais empregados no modelo reduzido (Figuras 5.3, 5.4 e 5.5), foram obtidos os diâmetros correspondentes a 15 e 85% das partículas dos solos, conforme a Tabela 5.10. O conhecimento dos diâmetros em questão é necessário para verificar se o pedregulho atende aos critérios de filtração e drenagem, em relação aos materiais de aterro e de fundação.

Tabela 5.10 – Diâmetros correspondentes a 15 e 85% das partículas de solo

	Aterro	Fundação	Filtro/tapete
D ₈₅ (mm)	1,400	1,400	4,000
D ₁₅ (mm)	0,080	0,065	2,200

Na sequência, as Equações 5.4 e 5.5 apresentam os resultados da verificação do critério de filtração, enquanto que as Equações 5.6 e 5.7 apresentam os resultados da verificação do critério de drenagem.

- Critério de filtração (Equação 4.6):

$$2,2 \leq \begin{cases} 4 * 1,4 = 5,6 \text{ mm} \\ 5 * 1,4 = 7 \text{ mm} \end{cases} \quad (\text{material de aterro}) \quad (5.4)$$

$$2,2 \leq \begin{cases} 4 * 1,4 = 5,6 \text{ mm} \\ 5 * 1,4 = 7 \text{ mm} \end{cases} \quad (\text{material de fundação}) \quad (5.5)$$

- Critério de drenagem (Equação 4.7):

$$2,2 \geq \begin{cases} 4 * 0,08 = 0,32 \text{ mm} \\ 5 * 0,08 = 0,4 \text{ mm} \end{cases} \quad (\text{material de aterro}) \quad (5.6)$$

$$2,2 \geq \begin{cases} 4 * 0,065 = 0,26 \text{ mm} \\ 5 * 0,065 = 0,325 \text{ mm} \end{cases} \quad (\text{material de fundação}) \quad (5.7)$$

Os resultados indicam que o pedregulho utilizado no tapete horizontal e no filtro vertical atende aos critérios de filtração e drenagem, considerando-se tanto o material de fundação quanto o material de aterro. Dessa forma, considerou-se o mesmo adequado para utilização com a finalidade em questão.

5.2.5 Método de deposição do material granular

O estudo da disposição do material granular consiste na determinação da altura de queda das partículas. Como havia sido utilizada altura de queda igual a 12 cm, nos ensaios de permeabilidade, utilizou-se a calibração para verificar se a altura em questão atendia aos requisitos da pesquisa. Dessa forma, foram moldadas amostras cilíndricas de volume

conhecido (aproximadamente 1.000 cm^3), variando-se a altura de queda livre das partículas. Os resultados obtidos para os materiais de fundação e de aterro estão apresentados nos tópicos 5.2.5.1 e 5.2.5.2, respectivamente.

5.2.5.1 Altura de queda do material de fundação

Os resultados obtidos para o material de fundação estão compilados na Tabela 5.11, a qual relaciona as alturas de queda livre (h) com os índices de vazios (e), as massas específicas aparente (γ_s) e as densidade relativas (D_r). A Figura 5.6 apresenta um gráfico relacionando as alturas de queda livre e as massas específicas aparente obtidas.

Tabela 5.11 – Calibração da altura de queda livre do material de fundação

FUNDAÇÃO			
h (cm)	e	γ_s (g/cm^3)	D_r (%)
5	0,664	1,596	4,24
10	0,646	1,614	13,86
12	0,641	1,618	16,23
20	0,634	1,625	20,21

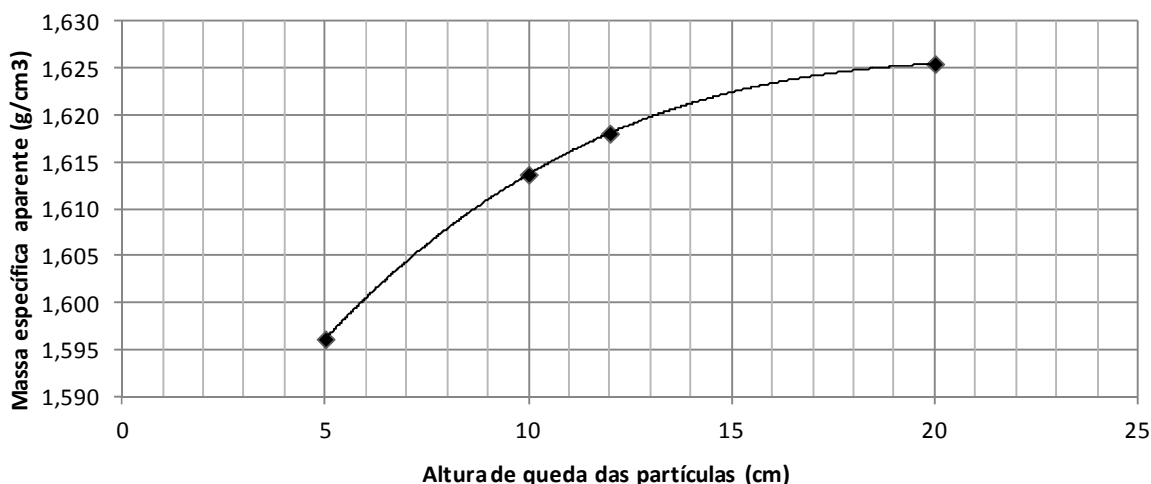


Figura 5.6 – Calibração da altura de queda das partículas – Material de fundação

Com base nos resultados obtidos e na análise da curva de calibração, considerou-se adequada a utilização de altura de queda igual a 12 cm, uma vez que alturas de quedas maiores apresentam pequena variação de massa específica aparente e, no entanto,

dificultam a deposição do material no modelo reduzido. A altura de queda igual a 12 cm corresponde a densidade relativa de 16,23 %.

5.2.5.2 Altura de queda do material de aterro

Os resultados obtidos para o material de aterro estão compilados na Tabela 5.12, a qual relaciona as alturas de queda livre (h) com os índices de vazios (e), as massas específicas aparente (γ_s) e as densidade relativas (D_r). A Figura 5.7 apresenta um gráfico relacionando as alturas de queda livre e as massas específicas aparente obtidas.

Tabela 5.12 – Calibração da altura de queda livre do material de aterro

ATERRO			
h (cm)	e	γ_s (g/cm ³)	D_r (%)
5	0,750	1,510	5,37
10	0,727	1,531	15,51
12	0,722	1,535	17,67
20	0,713	1,543	21,80

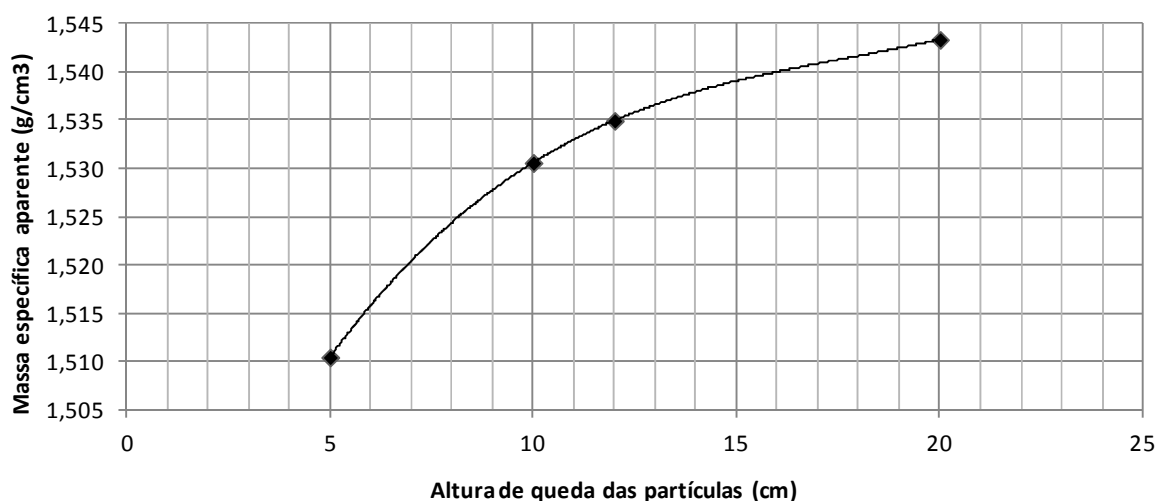


Figura 5.7 – Calibração da altura de queda das partículas – Material de aterro

Visando a padronização de procedimentos e com base na análise da curva de calibração, também adotou-se altura de queda igual a 12 cm para o material de aterro, sendo que a mesma corresponde a densidade relativa de 17,67%. Os ensaios de permeabilidade já haviam sido executados para a altura em questão.

5.2.6 Leituras de instrumentação

Após a construção do modelo reduzido, foi feito o enchimento do reservatório e a retirada das bolhas de ar dos piezômetros, através da aplicação de sucção. Considerou-se que a estabilização do fluxo ocorreu a partir do momento em que houve equivalência entre o volume de água colocado no reservatório e o volume recolhido pelo sistema de drenagem.

Por razões construtivas, primeiramente foi feita a simulação de fluxo com geomembrana a montante da barragem. Após o teste em questão, foram feitos rasgos na geomembrana, aguardando-se a estabilização do fluxo para obtenção das novas medidas. A terceira simulação foi feita sem a utilização da membrana impermeável. A Tabela 5.13 apresenta os resultados obtidos em laboratório.

Tabela 5.13 – Resultados obtidos nos ensaios em modelo reduzido

Piezômetro	Coordenadas		Carga de pressão (cm)		
	X (cm)	Y (cm)	Simulação sem geomembrana	Simulação com geomembrana	Simulação de rasgos
PF-1	16,00	6,00	4,0	4,0	4,0
PF-2	25,75	6,00	4,5	4,2	4,4
PF-3	49,75	9,00	3,2	3,0	3,2
PF-4	49,75	6,00	6,3	6,3	6,3
PF-5	49,75	1,00	11,3	11,2	11,3
PF-6	67,25	9,00	4,0	3,7	3,9
PF-7	67,25	6,00	7,0	6,7	6,8
PF-8	67,25	1,00	12,8	12,2	12,6
PF-9	85,00	6,00	12,7	10,5	12,4
PF-10	97,75	6,00	16,9	13,3	16,5
PF-11	110,50	6,00	21,2	15,1	20,6
PF-12	130,50	6,00	26,1	18,8	24,9
PF-13	145,50	6,00	26,7	20,3	25,3
PF-14	160,50	6,00	26,9	21,7	26,1
PF-15	175,19	6,00	27,0	23,6	26,3
PF-16	189,88	6,00	26,9	24,4	26,4
PF-17	204,56	6,00	27,0	26,1	26,9
PF-18	219,25	6,00	27,0	26,9	27,0
PA-1	85,00	24,75	4,0	3,2	3,9
PA-2	85,00	12,00	6,8	4,1	6,3
PA-3	97,75	18,38	10,5	8,1	10,0
PA-4	110,50	12,00	16,7	9,1	15,0
Vazão (m ³ /s/m)	Modelo reduzido		0,000003940	0,000002130	0,000003625
	Protótipo		0,000389029	0,000208574	0,000357907

Os valores de carga de pressão, apresentados na Tabela 5.13, foram obtidos através da transformação das leituras de carga total em carga de pressão. Ou seja, as leituras feitas no laboratório se referiam ao nível do fundo do aquário, sendo necessário subtrair a coordenada Y dos instrumentos para obter o valor de carga de pressão.

Na Figura 5.8 são apresentadas as cargas de pressão, medidas através dos piezômetros, em relação à seção transversal da barragem. Na figura são apresentadas três seções: cargas de pressão na fundação (Seção 1); cargas de pressão no aterro da barragem e na fundação, sob o espaldar de jusante (Seção 2), e; cargas de pressão no contato entre os materiais e na fundação, sob o espaldar de jusante da barragem (Seção 3).

Na Seção 1 mostra-se que a aplicação de geomembrana sobre a fundação resultou em menores cargas hidráulicas na mesma, em relação à solução sem tratamento de fundação. A redução ocorre principalmente sob o espaldar de montante de barragem e na região da fundação sob o tratamento. A simulação de rasgos mostrou que os mesmos fizeram com que houvesse aumento da carga da pressão, em relação à solução de geomembrana sem rasgos. Avaliando-se apenas as cargas de pressão, pode-se dizer que os rasgos resultaram em comportamento similar ao da seção sem tratamento.

Na Seção 2, assim como a Seção 1, mostra-se que a existência de tratamento de fundação possui pequena influência sobre as cargas de pressão medidas sob o espaldar de jusante da barragem. Os piezômetros instalados no aterro da barragem apresentaram pequena variação de leituras, para as simulações considerando ausência de tratamento e existência de rasgos. Houve diminuição das cargas de pressão para simulação que considerou a geomembrana sem rasgos.

A Seção 3, por sua vez, mostrou que os piezômetros instalados na interface entre o aterro da barragem e o material de fundação estão sujeitos à variações de carga de pressão, em decorrência da existência de tratamento de fundação. A seção em questão também mostra que os piezômetros instalados sob o espaldar de jusante da barragem apresentam pequena variação de cargas de pressão em decorrência da instalação da geomembrana.

A instalação de geomembrana resultou na redução de aproximadamente 46% da vazão, através do aterro e da fundação. A ocorrência de rasgos, por sua vez, fez com que a vazão através do aterro e da fundação reduzisse apenas 8% em relação à simulação sem tratamento de fundação.

De forma geral, a existência de tratamento de fundação resultou em cargas de pressão menores e na redução da vazão através da fundação. A ocorrência de rasgos longitudinais resultou em baixa eficiência do tratamento de fundação.

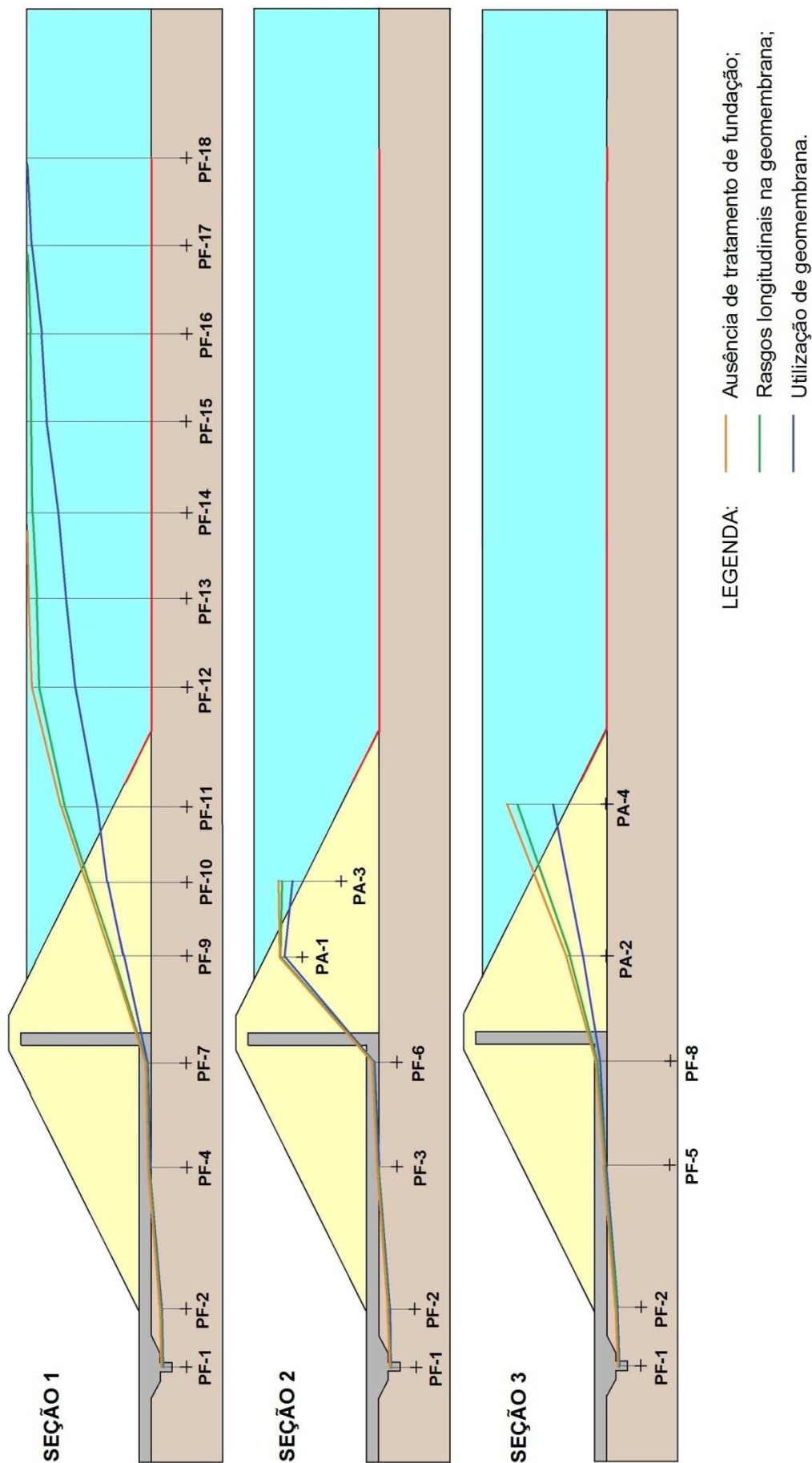


Figura 5.8 – Cargas de pressão – Modelo reduzido

5.3 MODELO NUMÉRICO DE FLUXO

As variáveis independentes do modelo numérico de fluxo encontram-se descritas no tópico 5.3.1, enquanto que os resultados da calibração e da validação, com base nas simulações experimentais e no tratamento dos dados da UHE Salto, encontram-se descritos no tópico 5.3.2. Os resultados encontrados através das análises paramétricas, por sua vez, encontram-se descritos no tópico 5.3.3.

5.3.1 Variáveis independentes do modelo numérico

O modelo numérico de fluxo adotado, com a finalidade de reproduzir o comportamento que ocorreria em barragens reais, corresponde basicamente à seção que foi simulada experimentalmente, em dimensões do protótipo. As seções da UHE Salto também foram modeladas e simuladas numericamente, entretanto serviram apenas como forma de validação do modelo de fluxo utilizado nas análises paramétricas.

A geometria da barragem, a ser utilizada no modelo numérico, foi determinada com base na geometria utilizada no modelo físico, a qual, por sua vez, representa as condições encontradas na barragem da UHE Salto. Da mesma forma, a espessura da fundação a ser considerada no modelo numérico, foi definida com base na espessura encontrada no modelo físico. Os valores em questão encontram-se apresentados na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Características geométricas e espessura da fundação

Parâmetro	Dimensão
Inclinação do talude de montante (V:H)	1:2
Inclinação do talude de jusante (V:H)	1:2
Altura da barragem (m)	24
Largura da crista (m)	6
Espessura da fundação (m)	12

Adotou-se condutividade hidráulica dos materiais de aterro e de fundação compatível com os valores encontrados no modelo reduzido, as quais mantêm relação de proporcionalidade com os coeficientes observados na UHE Salto. A anisotropia de permeabilidade do material de aterro equivale $k_x/k_y=5$, conforme dados da Tabela 5.15.

Tabela 5.15 – Coeficientes de permeabilidade dos materiais de aterro e de fundação

Material	Coeficiente de permeabilidade (m/s)	
	k_h	k_v
Fundação	0,0001	0,0001
Aterro	0,00001	0,000002

As condições de contorno aplicadas, por sua vez, representam duas situações distintas: utilização de geomembrana a montante da barragem, e; ausência de geomembrana. O nível do reservatório foi definido na cota 33 m, restando 3 m de borda livre. Na interface com o sistema de drenagem interna, definiu-se que estaria atuando a pressão atmosférica.

5.3.2 Calibração e validação do modelo numérico

A calibração e a validação do modelo numérico de fluxo foi feita a partir dos resultados obtidos através do experimento em modelo reduzido e da análise numérica, conduzida com base nos dados da barragem da UHE Salto. A partir do experimento em modelo reduzido, foi possível verificar como ocorre a redução das cargas de pressão e das vazões com a instalação da membrana impermeável. Também com base nos resultados experimentais, foi feita uma análise numérica mostrando a influência da alteração da anisotropia do aterro nas medidas de carga de pressão, conforme exposto no tópico 5.3.2.1. A partir da análise dos dados da UHE Salto, foi possível validar o modelo de fluxo, conforme tópico 5.3.2.2.

5.3.2.1 Simulações experimentais

Nas Tabelas 5.16 e 5.17 apresenta-se a comparação entre os resultados obtidos nos modelos reduzidos com os resultados obtidos através de simulações numéricas, nas quais variam-se as condições de anisotropia dos materiais de aterro e de fundação. Nas Figuras 5.9 e 5.10 mostram-se os valores de carga de pressão obtidos através das simulações numéricas. Os resultados em questão encontram-se descritos nos tópicos A e B, apresentados na sequência.

Tabela 5.16 – Resultados obtidos nos ensaios e simulações sem a utilização de geomembrana

Piezômetro	Coordenadas		Modelo reduzido	Modelo numérico		
	X (cm)	Y (cm)		$K_h/K_v=1$	$K_h/K_v=5$	$K_h/K_v=10$
PF-1	16,00	6,00	4,0	2,79 -30%	2,79 -30%	2,79 -30%
PF-2	25,75	6,00	4,5	3,55 3%	3,55 -21%	3,55 -21%
PF-3	49,75	9,00	3,2	2,36 -26%	2,37 -26%	2,36 -26%
PF-4	49,75	6,00	6,3	5,37 -15%	5,37 -15%	5,37 -15%
PF-5	49,75	1,00	11,3	10,38 -8%	10,38 -8%	10,38 -8%
PF-6	67,25	9,00	4,0	3,56 -11%	3,56 -11%	3,55 -11%
PF-7	67,25	6,00	7,0	6,96 -1%	6,95 -1%	6,95 -1%
PF-8	67,25	1,00	12,8	12,25 -4%	12,24 -4%	12,22 -5%
PF-9	85,00	6,00	12,7	12,54 -1%	12,51 -1%	12,49 -2%
PF-10	97,75	6,00	16,9	17,08 1%	17,07 1%	17,06 1%
PF-11	110,50	6,00	21,2	21,38 1%	21,38 1%	21,38 1%
PF-12	130,50	6,00	26,1	26,36 1%	26,36 1%	26,37 1%
PF-13	145,50	6,00	26,7	26,91 1%	26,91 1%	26,91 1%
PF-14	160,50	6,00	26,9	26,99 0%	26,99 0%	26,99 0%
PF-15	175,19	6,00	27,0	27,00 0%	27,00 0%	27,00 0%
PF-16	189,88	6,00	26,9	27,00 0%	27,00 0%	27,00 0%
PF-17	204,56	6,00	27,0	27,00 0%	27,00 0%	27,00 0%
PF-18	219,25	6,00	27,0	27,00 0%	27,00 0%	27,00 0%
PA-1	85,00	24,75	4,0	3,55 -11%	3,85 -4%	3,95 -1%
PA-2	85,00	12,00	6,8	6,58 -3%	6,55 -4%	6,51 -4%
PA-3	97,75	18,38	10,5	9,73 -7%	9,77 -7%	9,77 -7%
PA-4	110,50	12,00	16,7	15,48 -7%	15,49 -7%	15,49 -7%
Vazão (m ³ /s/m)	Modelo reduzido		0,000003940	4,04E-06 2%	4,57E-06 16%	5,23E-06 33%
	Protótipo		0,000389029	3,99E-04 2%	4,52E-04 16%	5,19E-04 33%

Tabela 5.17 – Resultados obtidos nos ensaios e simulações com a utilização de geomembrana

Piezômetro	Coordenadas		Modelo reduzido	Modelo numérico		
	X (cm)	Y (cm)		$K_h/K_v=1$	$K_h/K_v=5$	$K_h/K_v=10$
PF-1	16,00	6,00	4,0	2,76 -31%	2,77 -31%	2,77 -31%
PF-2	25,75	6,00	4,2	3,47 -17%	3,47 -17%	3,47 -17%
PF-3	49,75	9,00	3,0	2,15 -28%	2,16 -28%	2,16 -28%
PF-4	49,75	6,00	6,3	5,16 -18%	5,16 -18%	5,16 -18%
PF-5	49,75	1,00	11,2	10,16 -9%	10,16 -9%	10,16 -9%
PF-6	67,25	9,00	3,7	3,27 -12%	3,27 -12%	3,27 -12%
PF-7	67,25	6,00	6,7	6,46 -4%	6,47 -3%	6,47 -3%
PF-8	67,25	1,00	12,2	11,59 -5%	11,61 -5%	11,61 -5%
PF-9	85,00	6,00	10,5	9,64 -8%	9,71 -8%	9,72 -7%
PF-10	97,75	6,00	13,3	12,04 -9%	12,17 -8%	12,19 -8%
PF-11	110,50	6,00	15,1	14,09 -7%	14,22 -6%	14,25 -6%
PF-12	130,50	6,00	18,8	16,48 -12%	16,61 -12%	16,63 -12%
PF-13	145,50	6,00	20,3	18,16 -10%	18,27 -10%	18,29 -10%
PF-14	160,50	6,00	21,7	19,84 -9%	19,93 -8%	19,95 -8%
PF-15	175,19	6,00	23,6	21,49 -9%	21,56 -9%	21,57 -9%
PF-16	189,88	6,00	24,4	23,14 -5%	23,19 -5%	21,2 -13%
PF-17	204,56	6,00	26,1	24,79 -5%	24,82 -5%	24,82 -5%
PF-18	219,25	6,00	26,9	26,37 -2%	26,38 -2%	26,38 -2%
PA-1	85,00	24,75	3,2	2,88 -10%	3,60 13%	3,84 20%
PA-2	85,00	12,00	4,1	3,71 -10%	3,78 -8%	3,79 -8%
PA-3	97,75	18,38	8,1	7,50 -7%	8,24 2%	8,65 7%
PA-4	110,50	12,00	9,1	8,26 -9%	8,40 -8%	8,42 -7%
Vazão (m ³ /s/m)	Modelo reduzido		0,00000213	2,35E-06 10%	2,83E-06 33%	3,44E-06 61%
	Protótipo		0,00020857	2,30E-04 10%	2,78E-04 33%	3,38E-04 61%

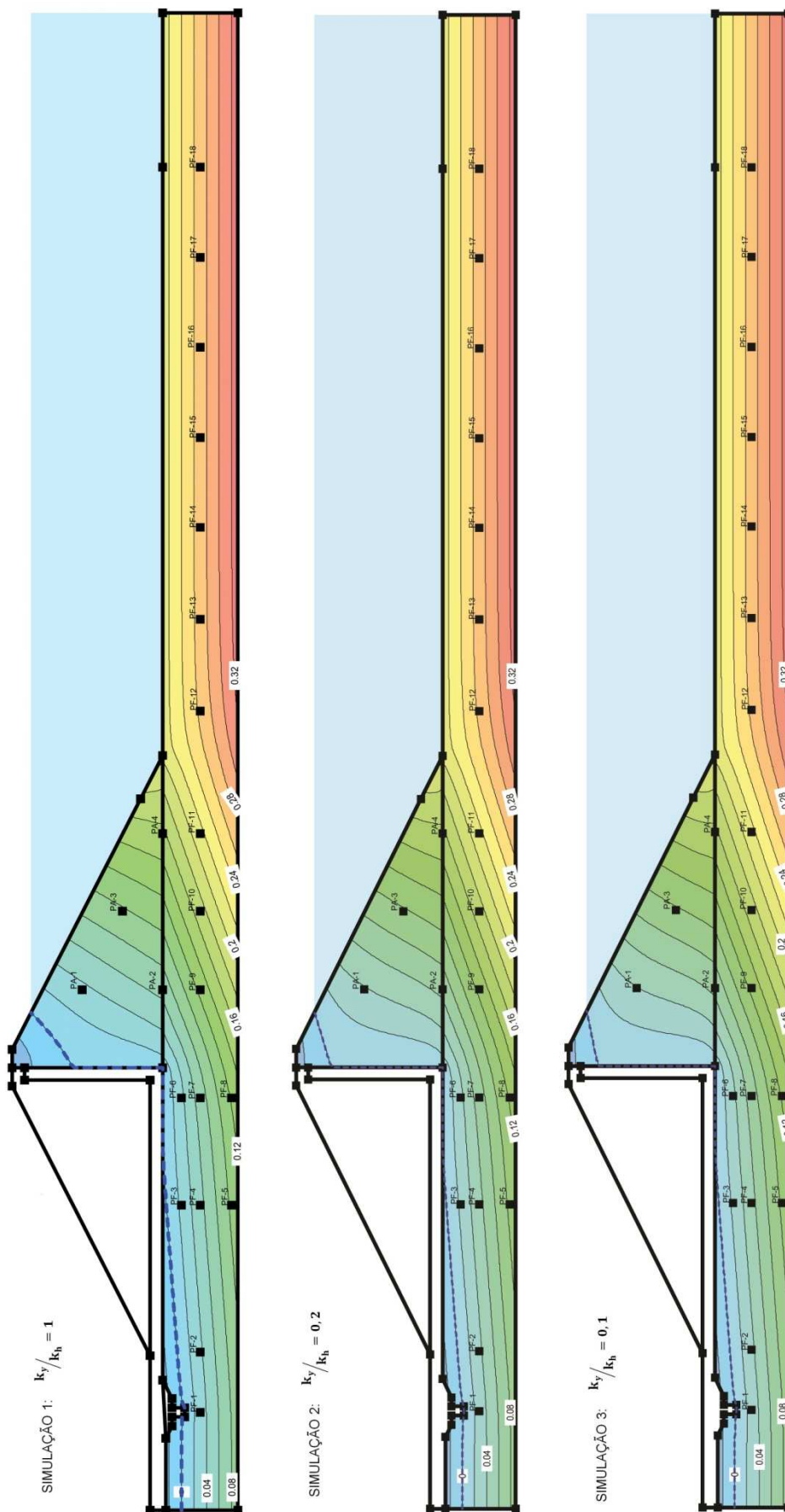


Figura 5.9 – Carga de pressão (m.c.a.) – Ausência de tratamento de fundação

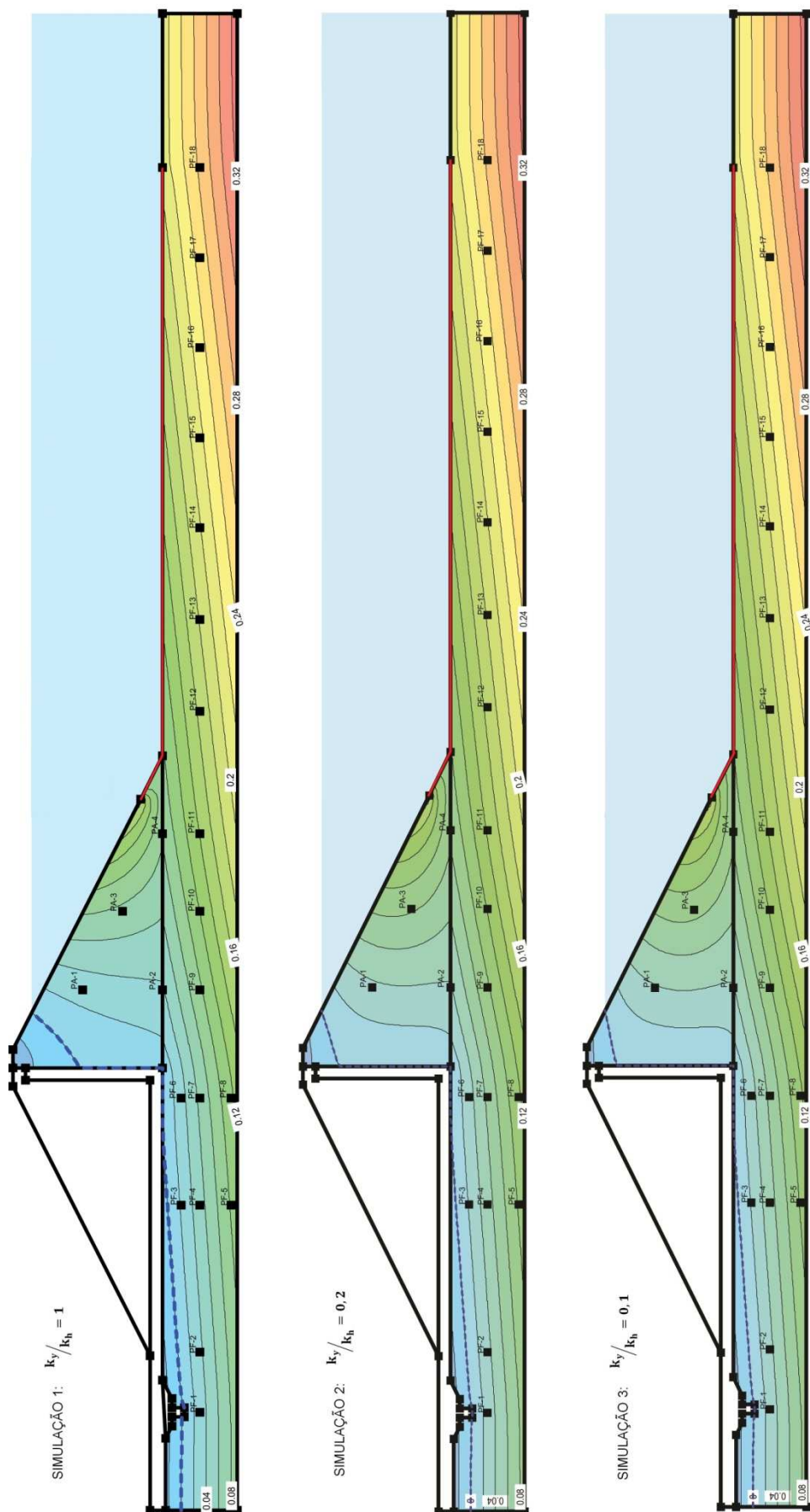


Figura 5.10 – Carga de pressão (m.c.a.) – Tratamento de fundação através de geomembrana

A) Ausência de tratamento de fundação a montante da barragem

No modelo reduzido sem aplicação do tratamento com geomembrana, os piezômetros PF-12, PF-13, PF-14, PF-15, PF-16, PF-17 e PF-18, localizados na fundação a montante da barragem, apresentaram leituras aproximadamente constantes, indicando que sofrem pouca influência do fluxo. Da mesma forma que no modelo reduzido, as análises numéricas indicaram valores aproximadamente constantes, com baixa sensibilidade relacionada à variação da anisotropia.

Os piezômetros instalados no maciço do aterro, nomeados PA-1, PA-2, PA-3 e PA-4, apresentaram comportamento semelhante em modelo reduzido e nas análises numéricas. O piezômetro PA-1 apresenta maior sensibilidade à variação das condições de anisotropia do material de fundação, em virtude do fato de estar localizado mais próximo do nível d'água. As leituras dos demais piezômetros apresentaram-se aproximadamente constantes com a variação da anisotropia.

Os piezômetros localizados abaixo do espaldar de montante da barragem (PF-9, PF-10 e PF-11) apresentaram resultados semelhantes entre o modelo reduzido e as análises numéricas, possuindo baixa sensibilidade em relação à variação das condições de anisotropia do maciço de fundação.

Os piezômetros localizados abaixo do espaldar de jusante da barragem (PF-1, PF-2, PF-3, PF-4, PF-5, PF-6, PF-7 e PF-8) apresentaram resultados semelhantes entre o modelo reduzido e as análises numéricas, possuindo baixa sensibilidade decorrente da alteração das condições de anisotropia do maciço de aterro.

A variação das condições de anisotropia do aterro influenciou os valores de vazão de percolação, captadas pelo sistema de drenagem. Houve aumento de 13,1 e 29,5% da vazão total quando considerando-se os coeficientes de anisotropia entre a horizontal e a vertical iguais a 5 e 10, respectivamente.

B) Simulações com tratamento de fundação através de geomembrana a montante da barragem

Nesta simulação, os piezômetros PF-12, PF-13, PF-14, PF-15, PF-16, PF-17 e PF-18 apresentaram redução da carga de pressão, como consequência da instalação da membrana impermeável sobre os mesmos. Os resultados encontrados através do modelo reduzido estão análogos aos obtidos através das análises numéricas. Os piezômetros em questão possuem baixa sensibilidade relativa à variação da anisotropia do aterro.

Para os piezômetros locados no interior do maciço de aterro (PA-1, PA-2, PA-3, PA-4), os resultados encontrados em modelo reduzido e nas simulações numéricas apresentaram-se semelhantes. Em relação aos resultados obtidos em laboratório sem a utilização de geomembrana, houve redução de 20 a 45% nos valores de carga de pressão. Os piezômetros em questão apresentaram sensibilidade em relação à variação da anisotropia do aterro.

Os piezômetros locados abaixo do espaldar de montante (PF-9, PF-10 e PF-11) apresentaram reduções de 17,3 a 28,7% das cargas de pressão, com a utilização da geomembrana. Os mesmos também se mostraram mais sensíveis à variações das cargas de pressão em fundação da variação das condições de anisotropia do aterro.

Os piezômetros locados abaixo do espaldar de jusante da barragem (PF-1, PF-2, PF-3, PF-4, PF-5, PF-6, PF-7 e PF-8) apresentaram baixa sensibilidade em virtude da alteração das condições de anisotropia do maciço de aterro. Os piezômetros PF-6, PF-7 e PF-8 apresentaram reduções da carga de pressão de, respectivamente, 8%, 4% e 4%, com a aplicação da geomembrana. Os demais permaneceram com as cargas de pressão aproximadamente constantes, com exceção dos piezômetros PF-2 e PF-3.

Com a aplicação da geomembrana, a vazão recolhida pelo sistema de drenagem reduziu aproximadamente 53%. As vazões mostram-se sensíveis à variação das condições de anisotropia do aterro, podendo ocorrer o aumento da vazão em até 62% quando considerando-se a permeabilidade na horizontal 10 vezes superior à permeabilidade na vertical.

5.3.2.2 Comportamento observado na UHE Salto

Neste tópico, foi feita a validação dos resultados do modelo numérico com base nos resultados encontrados na UHE Salto, em função das cargas de pressão e das vazões de percolação. Para tanto, são feitas simulações numéricas com as seções em estudo da UHE Salto, sendo aplicadas as condições de contorno, a geometria e os coeficientes de permeabilidade determinados no tópico 5.1. Dessa forma, é possível verificar como a utilização de tapete impermeável a montante da barragem influenciou nos parâmetros em questão.

São estudadas apenas as seções que apresentam a membrana impermeável instalada a montante da barragem (seções 15, 17, 19 e 21), conforme tópicos apresentados na sequência. Por fim, são feitas considerações gerais acerca das simulações numéricas

com base na UHE Salto, e a comparação com os resultados encontrados no modelo numérico.

A) Seção 15

A seção 15 possui altura de 23,7 m, tendo sido aplicada membrana impermeável a montante da barragem, com comprimento igual a 100 m. Dessa forma, a relação encontrada entre o comprimento do tratamento e a altura da barragem pode ser escrita da seguinte forma: $L/H = 4,2$. A membrana impermeável se estende 5,9 m sobre o aterro da barragem, onde é feita a ancoragem da mesma. A Figura 5.11 mostra a configuração das cargas totais e de pressão nas simulações efetuadas, sendo também apresentado o comportamento dos parâmetros em questão caso não fosse aplicado o tratamento de fundação. A Tabela 5.18 apresenta as vazões de percolação encontradas para a seção em questão através de análise numérica.

Tabela 5.18 – Vazões de percolação – Seção 15

Vazão	Solução sem geomembrana	Solução com geomembrana
Aterro (m ³ /s/m)	0,0000086850	0,0000036338 -58,2
Fundação (m ³ /s/m)	0,0000356320	0,0000147740 -58,5
Total (m ³ /s/m)	0,0000443170	0,0000184078 -58,5

Os resultados mostram que a utilização do tratamento em questão resultou na redução de aproximadamente 58,5% da vazão total. A redução da vazão através do aterro foi de aproximadamente 58,2%, enquanto que a redução da vazão através da fundação foi de aproximadamente 58,5%.

As cargas de pressão também apresentaram redução com a utilização da geomembrana, principalmente na região da fundação a montante do eixo da barragem e sob o tratamento em questão, indicando que o tratamento em questão aumentou os caminhos de percolação, resultando em maior perda de carga na fundação. Na região da fundação abaixo do espaldar de jusante, a redução das cargas de pressão foi muito pequena.

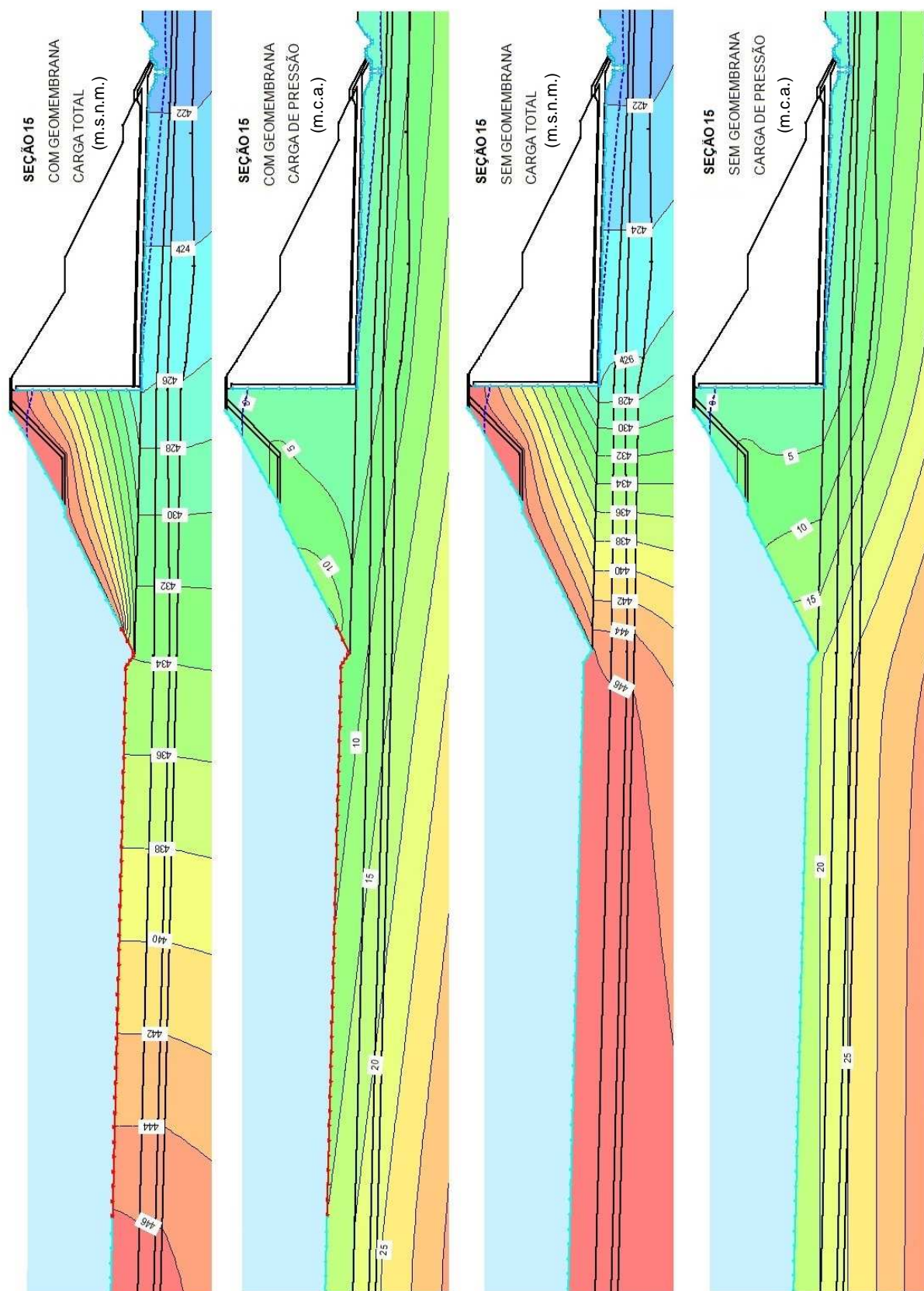


Figura 5.11 – Seção 15 – Carga total e de pressão com e sem a utilização de geomembrana

B) Seção 17

A seção 17 possui altura de 17,0 m, tendo sido aplicada membrana impermeável a montante da barragem, com comprimento igual a 100 m. Dessa forma, a relação encontrada entre o comprimento do tratamento e a altura da barragem pode ser escrita da seguinte forma: $L/H = 5,9$. A membrana impermeável se estende 5,9 m sobre o aterro da barragem, onde é feita a ancoragem da mesma.

A Figura 5.12 mostra a configuração das cargas totais e de pressão nas simulações efetuadas, sendo também apresentado o comportamento dos parâmetros em questão caso não fosse aplicado o tratamento de fundação. A Tabela 5.19 apresenta as vazões de percolação encontradas para a seção em questão através de análise numérica.

Tabela 5.19 – Vazões de percolação – Seção 17

Vazão	Solução sem geomembrana	Solução com geomembrana
Aterro (m ³ /s/m)	0,0000003864	0,0000002334 -39,6
Fundação (m ³ /s/m)	0,0000185810	0,0000067844 -63,5
Total (m ³ /s/m)	0,0000189674	0,0000070178 -63,0

Os resultados mostram que a utilização do tratamento em questão resultou na redução de aproximadamente 63,0% da vazão total. A redução da vazão através do aterro foi de aproximadamente 39,6%, enquanto que a redução da vazão através da fundação foi de aproximadamente 58,5%. A vazão através da fundação apresenta volume muito superior à vazão através do aterro.

As cargas de pressão também apresentaram redução com a utilização da geomembrana, principalmente na região da fundação a montante do eixo da barragem e sob o tratamento em questão, indicando que o tratamento aumentou os caminhos de percolação, resultando em maior perda de carga na fundação. No aterro, as cargas de pressão reduziram, em decorrência da instalação da membrana com a extensão de 5,9 m sobre o talude.

Na região da fundação abaixo do espaldar de jusante, a redução das cargas de pressão foi muito pequena, estando condicionada basicamente à existência do sistema de drenagem nesta região.

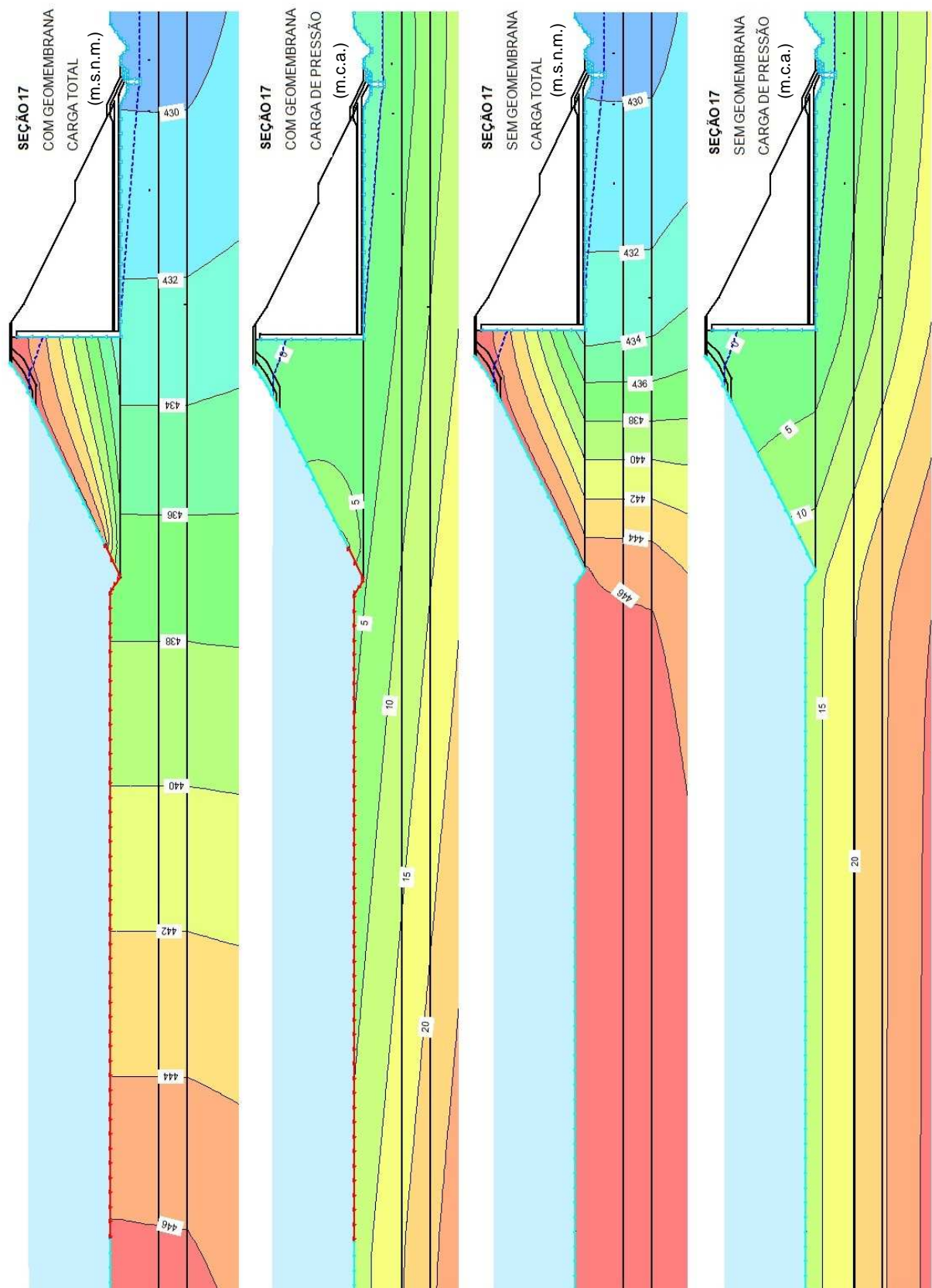


Figura 5.12 – Seção 17 – Carga total e de pressão com e sem a utilização de geomembrana

C) Seção 19

A seção 19 possui altura de 11,5 m, tendo sido aplicada membrana impermeável a montante da barragem, com comprimento igual a 60 m. Sendo assim, a relação encontrada entre o comprimento do tratamento e a altura da barragem pode ser escrita da seguinte forma: $L/H = 5,2$. A membrana impermeável se estende 5,9 m sobre o aterro da barragem, onde é feita a ancoragem da mesma.

A Figura 5.13 mostra a configuração das cargas totais e de pressão nas simulações efetuadas, sendo também apresentado o comportamento dos parâmetros em questão caso não fosse aplicado o tratamento de fundação. A Tabela 5.20 apresenta as vazões de percolação encontradas para a seção em questão através de análise numérica.

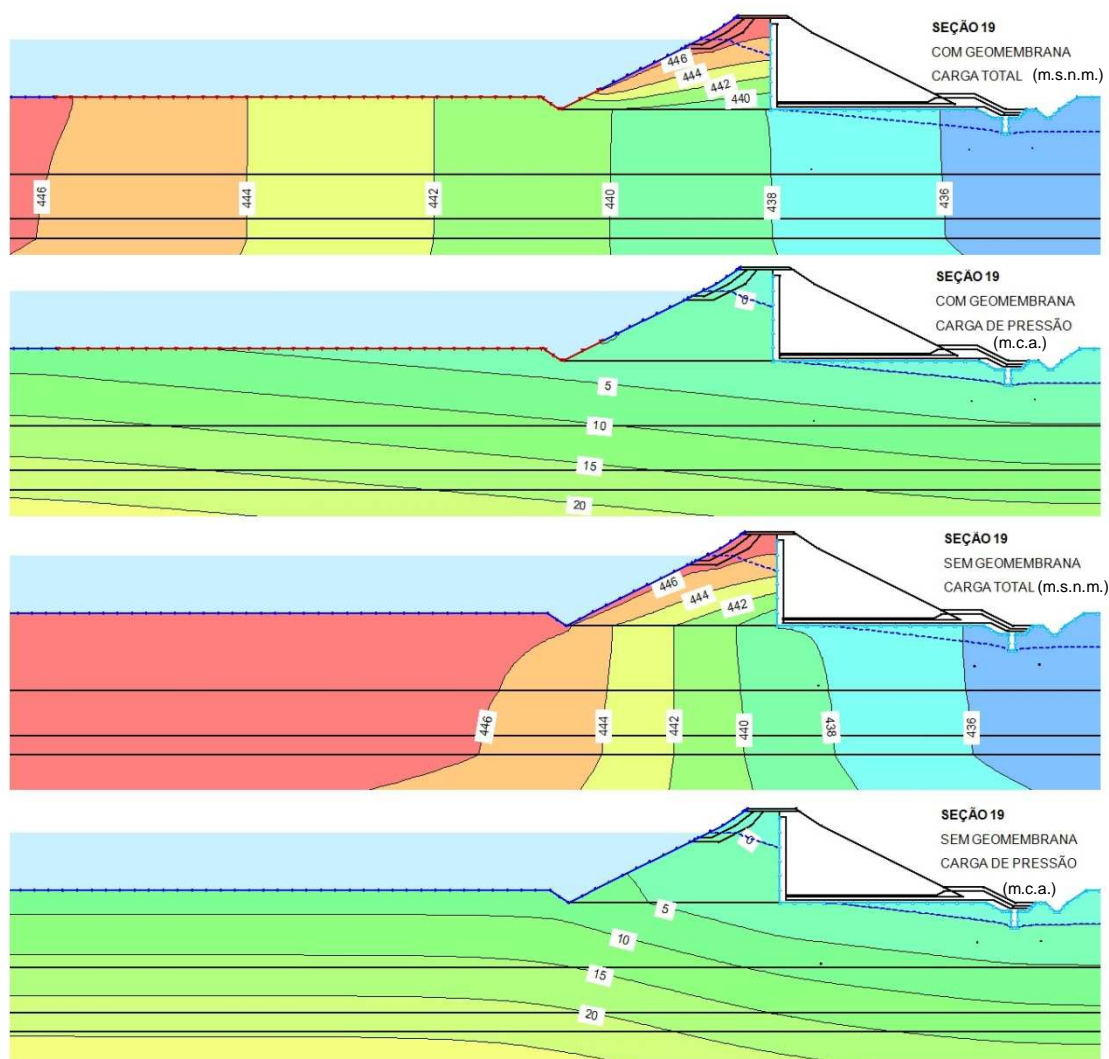


Figura 5.13 – Seção 19 – Carga total e de pressão com e sem a utilização de geomembrana

Tabela 5.20 – Vazões de percolação – Seção 19

Vazão	Solução sem geomembrana	Solução com geomembrana
Aterro (m ³ /s/m)	0,0000001709	0,0000000890 -47,9
Fundação (m ³ /s/m)	0,0000179230	0,0000023822 -86,7
Total (m ³ /s/m)	0,0000180939	0,0000024712 -86,3

Os resultados mostram que a utilização do tratamento em questão resultou na redução de aproximadamente 86,3% da vazão total. A redução da vazão através do aterro foi de aproximadamente 47,9%, enquanto que a redução da vazão através da fundação foi de aproximadamente 86,7%. A grande porcentagem de redução deve-se ao fato de que a seção possui pequena altura, quando comparada às outras, e proporcionalmente grande relação L/H do tratamento.

As cargas de pressão também apresentaram redução com a utilização da geomembrana, principalmente na região da fundação a montante do eixo da barragem e sob o tratamento em questão, indicando que o tratamento aumentou os caminhos de percolação, resultando em maior perda de carga na fundação. Na região da fundação abaixo do espaldar de jusante, a redução das cargas de pressão foi muito pequena, estando condicionada basicamente à existência do sistema de drenagem nesta região.

D) Seção 21

A seção 21 possui altura de 7,5 m, tendo sido aplicada membrana impermeável a montante da barragem, com comprimento igual a 10 m. Dessa forma, a relação encontrada entre o comprimento do tratamento e a altura da barragem pode ser escrita da seguinte forma: $L/H = 1,3$. A membrana impermeável se estende 5,9 m sobre o aterro da barragem, onde é feita a ancoragem da mesma.

A Figura 5.14 mostra a configuração das cargas totais e de pressão nas simulações efetuadas, sendo também apresentado o comportamento dos parâmetros em questão caso não fosse aplicado o tratamento de fundação. A Tabela 5.21 apresenta as vazões de percolação encontradas para a seção em questão, através de análise numérica.

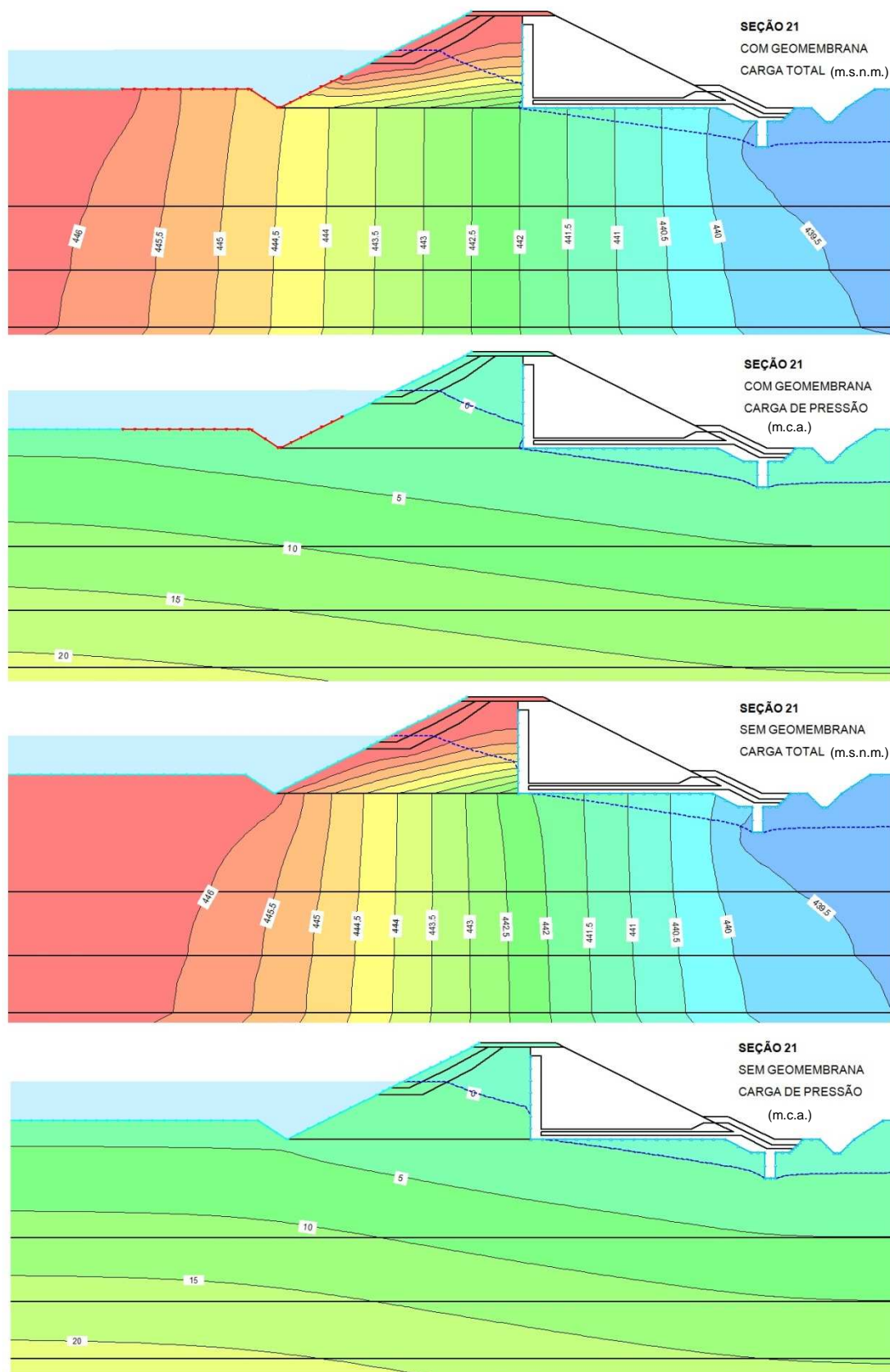


Figura 5.14 – Seção 21 – Carga total e de pressão com e sem a utilização de geomembrana

Tabela 5.21 – Vazões de percolação – Seção 21

Vazão	Solução sem geomembrana	Solução com geomembrana
Aterro (m ³ /s/m)	0,0000000550	0,0000000283 -48,6
Fundação (m ³ /s/m)	0,0000160230	0,0000117920 -26,4
Total (m ³ /s/m)	0,0000160780	0,0000118203 -26,5

Os resultados mostram que a utilização do tratamento em questão resultou na redução de aproximadamente 26,5% da vazão total. A redução da vazão através do aterro foi de aproximadamente 48,6%, enquanto que a redução da vazão através da fundação foi de aproximadamente 26,4%. A grande porcentagem de redução da vazão total deve-se ao fato de que a seção possui pequena altura, quando comparada às outras, e proporcionalmente baixa relação L/H do tratamento.

As cargas de pressão também apresentaram redução com a utilização da geomembrana, entretanto com menor magnitude em relação às outras seções estudadas, como consequência do menor comprimento de tratamento aplicado. Na região da fundação abaixo do espaldar de jusante, a redução das cargas de pressão foi muito pequena, estando condicionada basicamente à existência do sistema de drenagem nesta região.

E) Considerações gerais

De forma geral, os resultados mostraram que a utilização do tratamento de fundação através de geomembrana foi capaz de reduzir as cargas de pressão na fundação, principalmente abaixo do tratamento e na região da fundação sob o espaldar de montante da barragem. As vazões de percolação também sofreram redução, sendo as mesmas, assim como as cargas de pressão, dependente da relação entre o comprimento da membrana sintética e a altura da barragem.

Dessa forma, considerou-se que os resultados obtidos através da análise dos dados da UHE Salto está de acordo com os resultados obtidos através do modelo de fluxo, confirmando a validade do mesmo. Para o modelo de fluxo, ficou mantida a anisotropia da permeabilidade no aterro ($k_v/k_h = 0,2$), em virtude da mesma retratar as condições usualmente encontradas em barragens (CRUZ, 1996), além de estar de acordo com os coeficientes de permeabilidade encontrados na UHE Salto.

5.3.3 Análises paramétricas

Neste tópico, são descritos os resultados obtidos através das simulações efetuadas no modelo de fluxo, apresentando-se uma discussão acerca dos mesmos. Nas análises, permanecem constantes as seguintes variáveis independentes do modelo de fluxo: geometria da seção da barragem; espessura de solo permeável da fundação, e; condutividade hidráulica dos materiais de aterro e de fundação.

Conforme resultados apresentados no tópico 5.3.2, adotou-se que o material de aterro possui coeficiente de permeabilidade segundo a horizontal 5 vezes superior ao coeficiente de permeabilidade segundo a vertical. O material de fundação, por sua vez, apresenta coeficiente de permeabilidade isotrópico e aproximadamente 50 vezes superior ao coeficiente de permeabilidade do aterro, segundo a vertical. Os valores considerados estão apresentados na Tabela 5.22. As vazões através da fundação correspondem às vazões de percolação sob a barragem, sendo coletadas pelo sistema de drenagem interna.

Tabela 5.22 – Coeficientes de permeabilidade considerados no modelo numérico

Material	Coeficiente de permeabilidade (m/s)	
Aterro	Vertical (k_v)	0,000002
	Horizontal (k_h)	0,00001
Fundação	Isotrópico (k)	0,0001

Como condição de contorno para definição do fluxo na região de montante da barragem, considerou-se que a pressão atmosférica está atuando sobre o filtro vertical e sobre o tapete horizontal. Dessa forma, foi possível simplificar a análise, desconsiderando-se o fluxo não saturado que poderia ocorrer no talude de jusante.

Os resultados da avaliação da utilização de tapete impermeável a montante da barragem encontram-se expostos no tópico 5.3.3.1, enquanto que os resultados da avaliação da utilização de geomembrana na face de montante da barragem encontram-se expostos no tópico 5.3.3.2.

Os efeitos da variação do comprimento da geomembrana estão expostos no tópico 5.3.3.3, enquanto que a avaliação da utilização de tapete impermeável a montante da barragem, composto por solo compactado, é apresentada no tópico 5.3.3.4. Os estudos relativos à ocorrência de rasgos e à ancoragem no maciço de aterro estão apresentados nos tópicos 5.3.3.5 e 5.3.3.6, respectivamente. As conclusões obtidas através dos estudos estão apresentadas no Capítulo 6.

5.3.3.1 Tapete impermeável a montante da barragem com utilização de barreira simples de geomembrana

Para avaliação da utilização de tapete impermeável a montante da barragem, foram feitas duas simulações: ausência de tratamento de fundação (simulação 1), e; utilização de geomembrana sobre a fundação (simulação 2). As Figuras 5.15 e 5.16 apresentam a configuração das cargas totais, das cargas de pressão e dos gradientes hidráulicas, obtidas nas simulações. A Tabela 5.23 apresenta as vazões determinadas para o aterro e para a fundação, e a amplitude de variação das mesmas, em porcentagem.

Tabela 5.23 – Vazões de percolação no aterro e na fundação

Vazão	Simulação 1	Simulação 2
Aterro (m ³ /s/m)	0,000070853	0,000053633 -24,3%
Fundação (m ³ /s/m)	0,00038087	0,00022452 -41,1%
Total (m ³ /s/m)	0,000451723	0,000278153 -38,4%

Conforme resultados apresentados na Tabela 5.23, a utilização de geomembrana como tratamento da fundação foi capaz de reduzir em 38,4% a vazão total captada pelo sistema de drenagem. Como o tratamento foi aplicado apenas sobre a fundação, a redução da vazão percolada através da mesma é ainda maior (41,1%). O tratamento em questão mostrou-se capaz de reduzir a vazão através do aterro em 24,3%.

Os gradientes hidráulicos observados no maciço de aterro, sem a utilização de geomembrana, ficaram compreendidos entre 0,2 e 1,2, estando a maior parte do maciço com gradientes entre 0,8 e 1. Com a utilização da geomembrana, ocorreu aumento dos gradientes hidráulicos no aterro, principalmente na região da ancoragem. A maior parte do maciço apresentou gradientes entre 1 e 1,5. Na fundação, no entanto, os gradientes não apresentaram grande variação, estando inferiores a 0,5 para ambas as simulações.

As cargas de pressão, sem a utilização de geomembrana, ficaram compreendidas entre 0 e 18 m na região do aterro. Na fundação, na região a montante da barragem, as cargas de pressão observadas sofrem pequena influencia do fluxo, basicamente indicando o nível d'água do reservatório. Por outro lado, a fundação sob o talude de montante concentra a maior porcentagem da variação de carga de pressão, indicando que nesta região se concentra o fluxo e, como consequência, a maior parte da vazão. Sob o talude de jusante ocorre pequena variação de cargas de pressão.

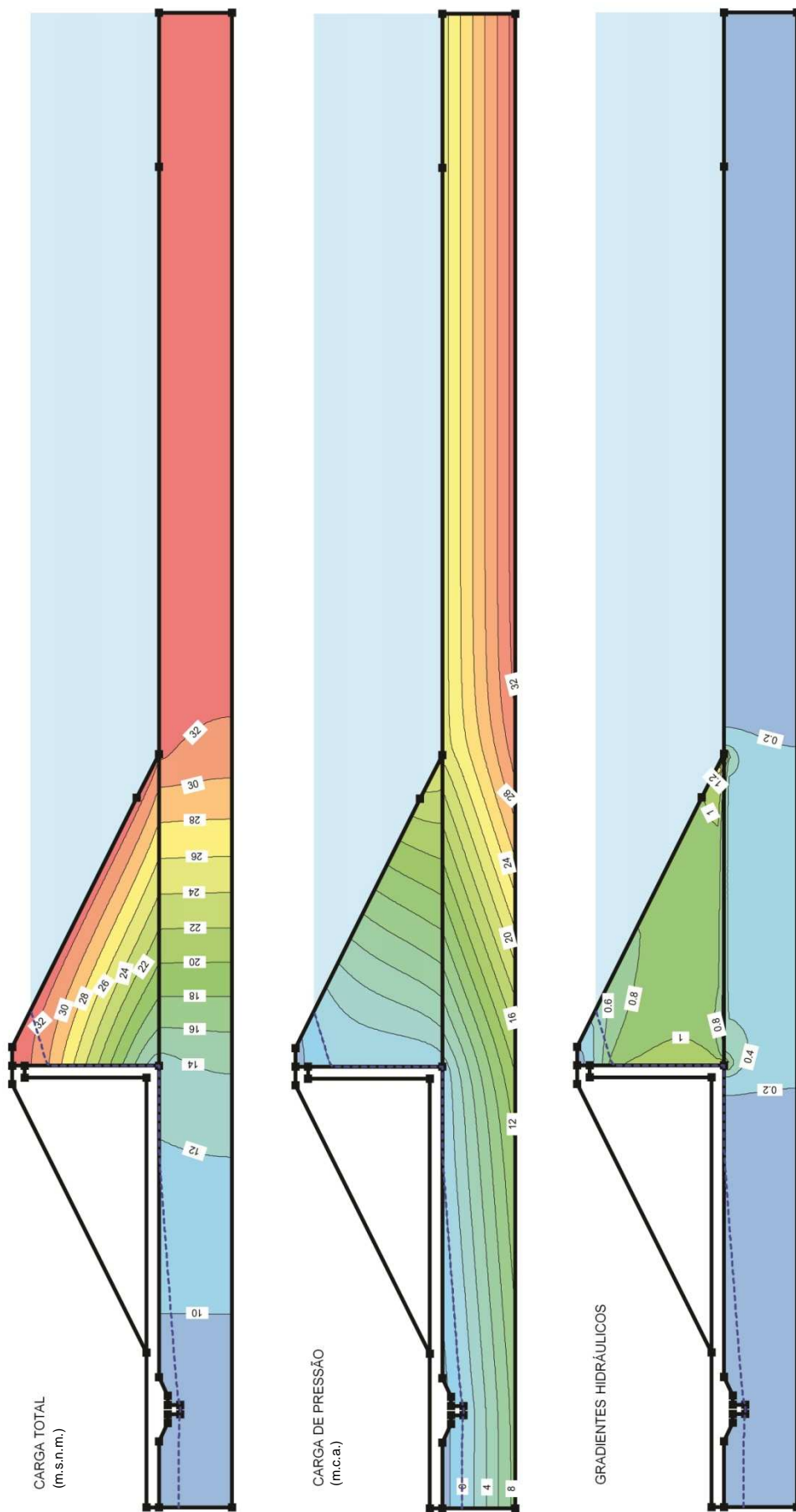


Figura 5.15 – Ausência de tratamento de fundação

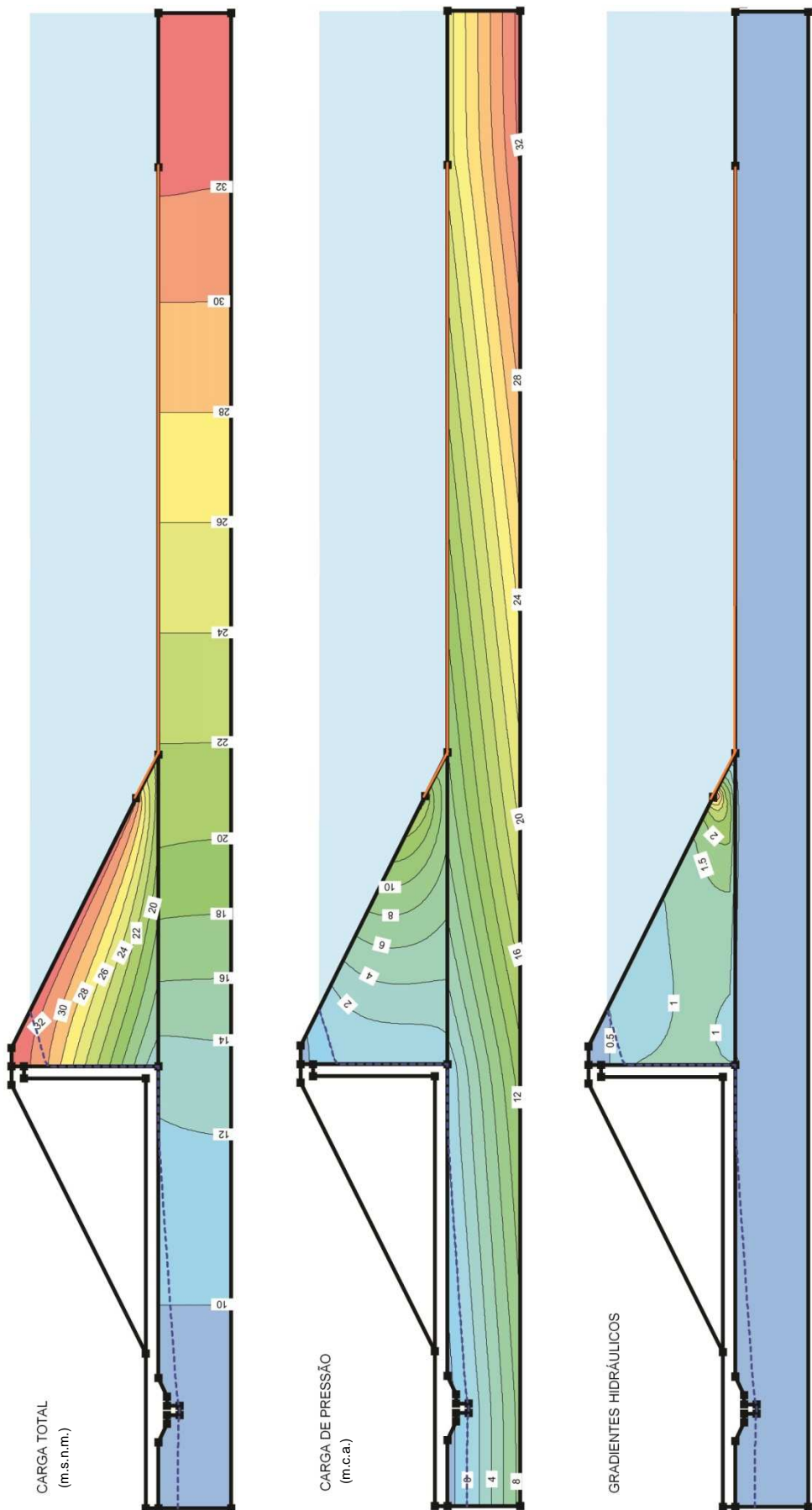


Figura 5.16 – Tratamento de fundação através de geomembrana

Com a utilização de geomembrana sobre a fundação, as cargas de pressão no aterro passaram a variar entre 0 e 14 m, em função da menor área disponível para percolação. Na fundação, a instalação da geomembrana resultou na perda de carga de pressão a montante da barragem, como consequência do aumento do caminho de percolação. Dessa forma, a região da fundação abaixo do talude de montante apresentou cargas de pressão mais baixas em relação à simulação sem tratamento de fundação. Na região do talude de jusante, ocorre pequena variação das cargas de pressão.

Os resultados mostram que a membrana impermeável atua principalmente aumentando o caminho de percolação do fluxo na fundação da barragem, resultando, dessa forma, em menores cargas de pressão sob a mesma. Como consequência, reduz-se a vazão d'água de percolação através da barragem e da fundação. Em situações onde seja adotada a solução em questão, fazem-se necessários estudos com a finalidade de controlar os gradientes hidráulicos na região do aterro, principalmente na ancoragem entre a membrana impermeável e o solo compactado.

5.3.3.2 Utilização de barreira simples de geomembrana na face de montante da barragem

Para avaliação da utilização de geomembrana na face de montante da barragem, foram feitas duas simulações: aplicação da geomembrana apenas na face de montante, e; aplicação da geomembrana sobre a face de montante e sobre a fundação da barragem. A Tabela 5.24 apresenta os valores de vazão observados na fundação e no aterro, para a utilização de geomembrana em várias posições. As Figuras 5.17 e 5.18 apresentam a configuração das cargas totais, das cargas de pressão e dos gradientes hidráulicos para as simulações efetuadas.

Tabela 5.24 – Vazões de percolação no aterro e na fundação

Vazão	Apenas sobre a fundação	Apenas sobre a face de montante	Sobre a face de montante e a fundação
Aterro (m ³ /s/m)	0,000053633	0,000020744 -61,3	0,0000025652 -95,2
Fundação (m ³ /s/m)	0,00022452	0,00035144 56,5	0,00013951 -37,9
Total (m ³ /s/m)	0,000278153	0,000372184 33,8	0,000142075 -48,9

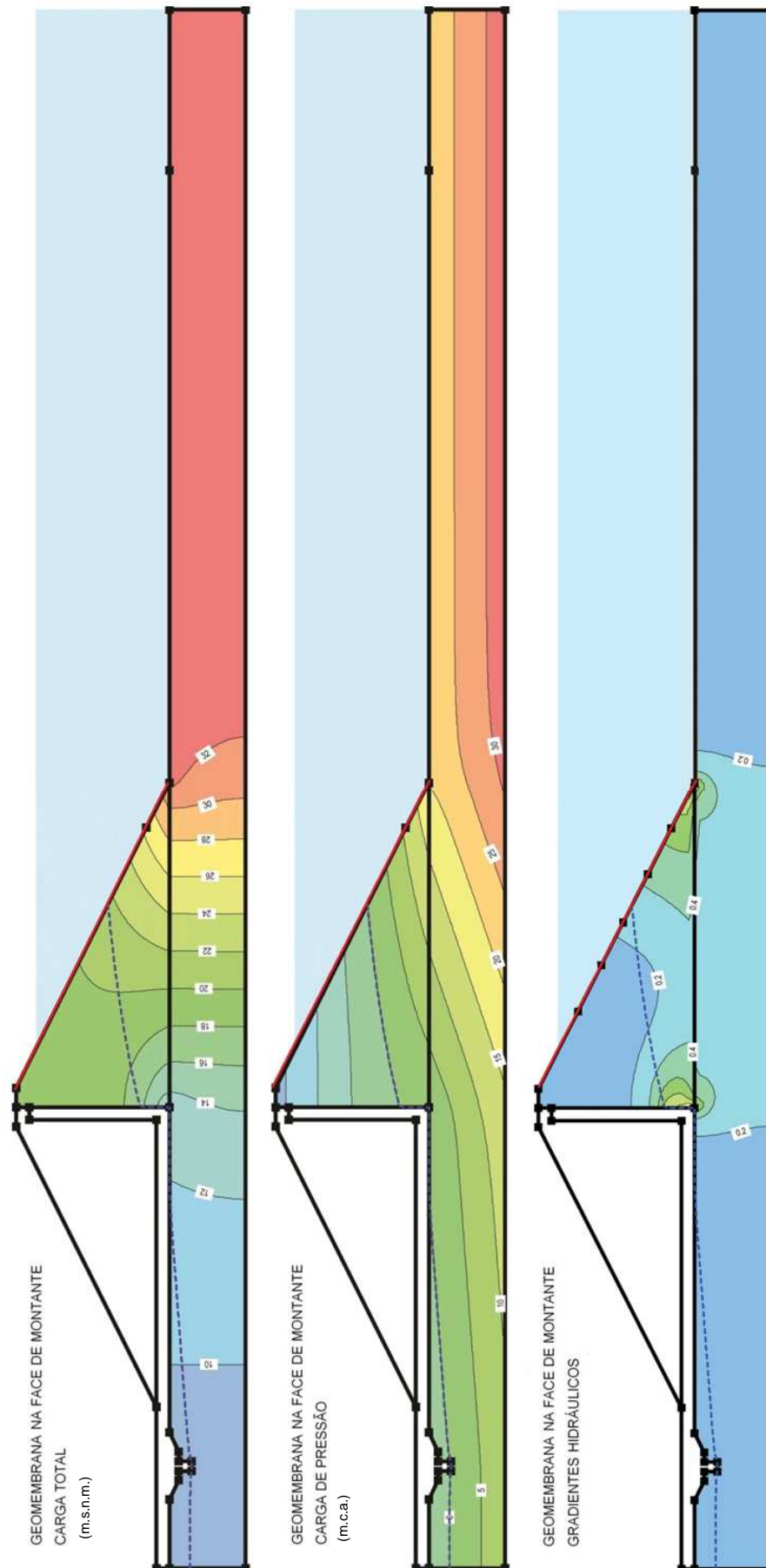


Figura 5.17 – Utilização de geomembrana apenas na face de montante da barragem

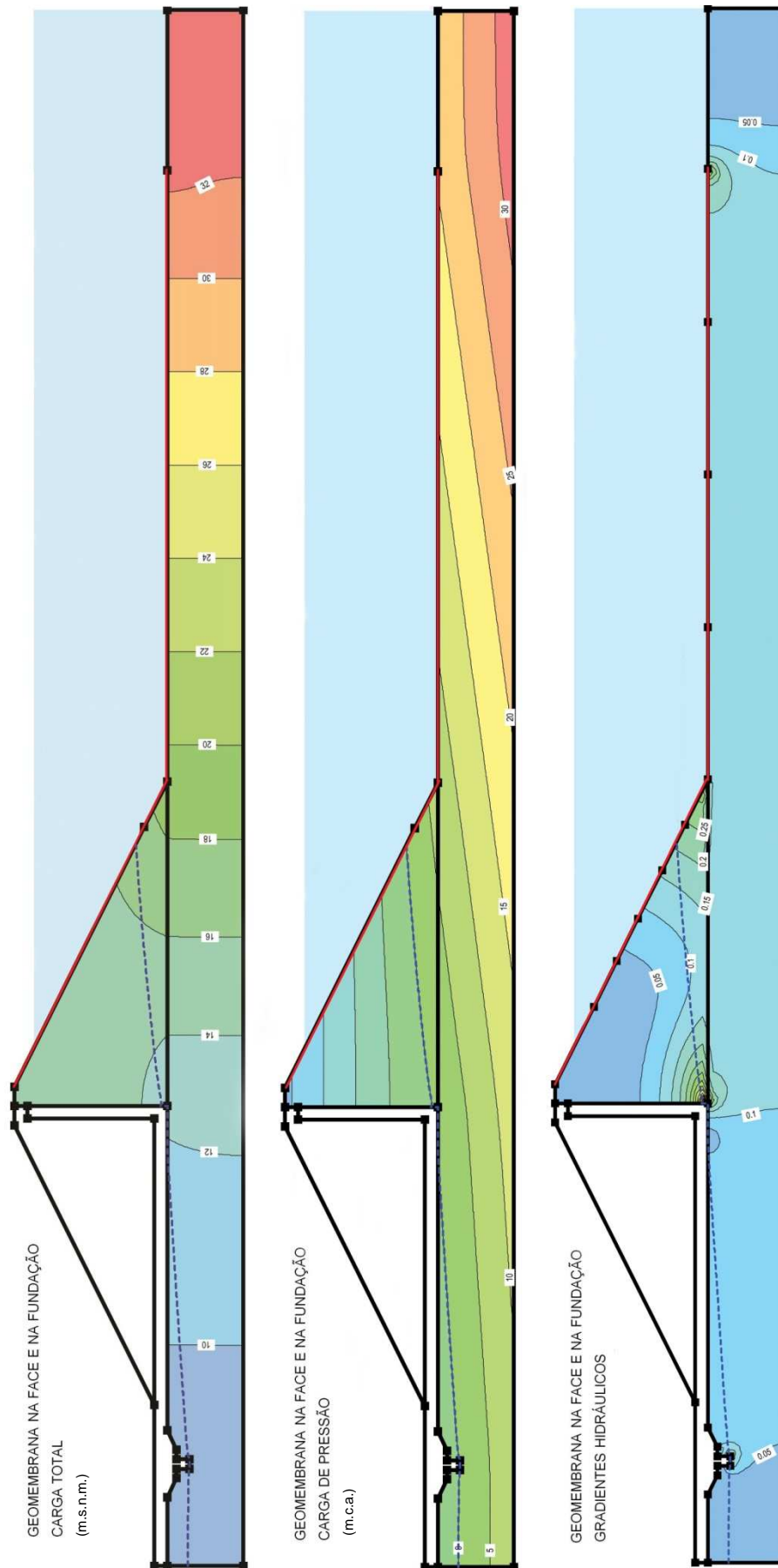


Figura 5.18 – Utilização de geomembrana na face de montante da barragem e sobre a fundação

Através da utilização de geomembrana apenas sobre a face de montante da barragem, foi possível reduzir a vazão de percolação através do aterro em 61,3%, em relação à solução onde se utiliza geomembrana apenas sobre a fundação. Entretanto, apesar da redução da vazão de percolação pelo aterro, ocorre um aumento de 56,5% na vazão pela fundação, resultando em um aumento de 33,8% da vazão total. A instalação de geomembrana sobre o talude de montante e sobre a fundação, no entanto, foi capaz de reduzir a vazão total em 48,9% em relação à aplicação da mesma apenas sobre a fundação.

A maior parte da perda de carga de pressão ocorre sob o talude de montante da barragem, na simulação de utilização de geomembrana apenas sobre a face de montante. Por outro lado, ao se utilizar a geomembrana sobre a face a fundação, a perda de carga de pressão ocorre principalmente sob a membrana, na região da fundação a montante da barragem. Nesta situação, foram observadas cargas de pressão mais baixas sob o talude de montante da barragem, e praticamente estabilizadas sob o talude de jusante.

Ao ser aplicada geomembrana apenas sobre o talude de montante, houve redução dos gradientes hidráulicos no aterro. Nesta simulação, os gradientes hidráulicos na fundação ficaram compreendidos entre 0,2 e 0,4. Por outro lado, ao ser aplicada geomembrana sobre o talude de montante e a fundação, ocorreu grande redução dos gradientes, estando os mesmos compreendidos entre 0,5 e 0,15 na fundação e 0,05 e 0,3 no aterro.

Os resultados mostram que a utilização de geomembrana sobre a face de montante da barragem é interessante quando utilizada em conjunto com geomembrana acima da fundação, principalmente em casos onde a permeabilidade do material de aterro seja muito grande. A utilização de geomembrana apenas sobre o talude de montante não apresentou bons resultados para o material considerado nas simulações.

5.3.3.3 Efeitos da variação do comprimento da membrana sintética

Para avaliação do efeito da variação do comprimento da membrana sintética sobre a fundação, foram feitas quatro simulações: membrana sintética com comprimento equivalente à altura da barragem (H); membrana sintética com comprimento equivalente ao dobro da altura da barragem (2.H); membrana sintética com comprimento equivalente ao triplo da altura da barragem (3.H), e; membrana sintética com comprimento equivalente ao quádruplo da altura da barragem (4.H). As Figuras 5.19, 5.20 e 5.21 mostram o comportamento das cargas totais, das cargas de pressão e dos gradientes hidráulicos com a variação em questão. As Tabelas 5.25 e 5.26 apresentam os vazões de percolação através dos materiais de aterro e de fundação.

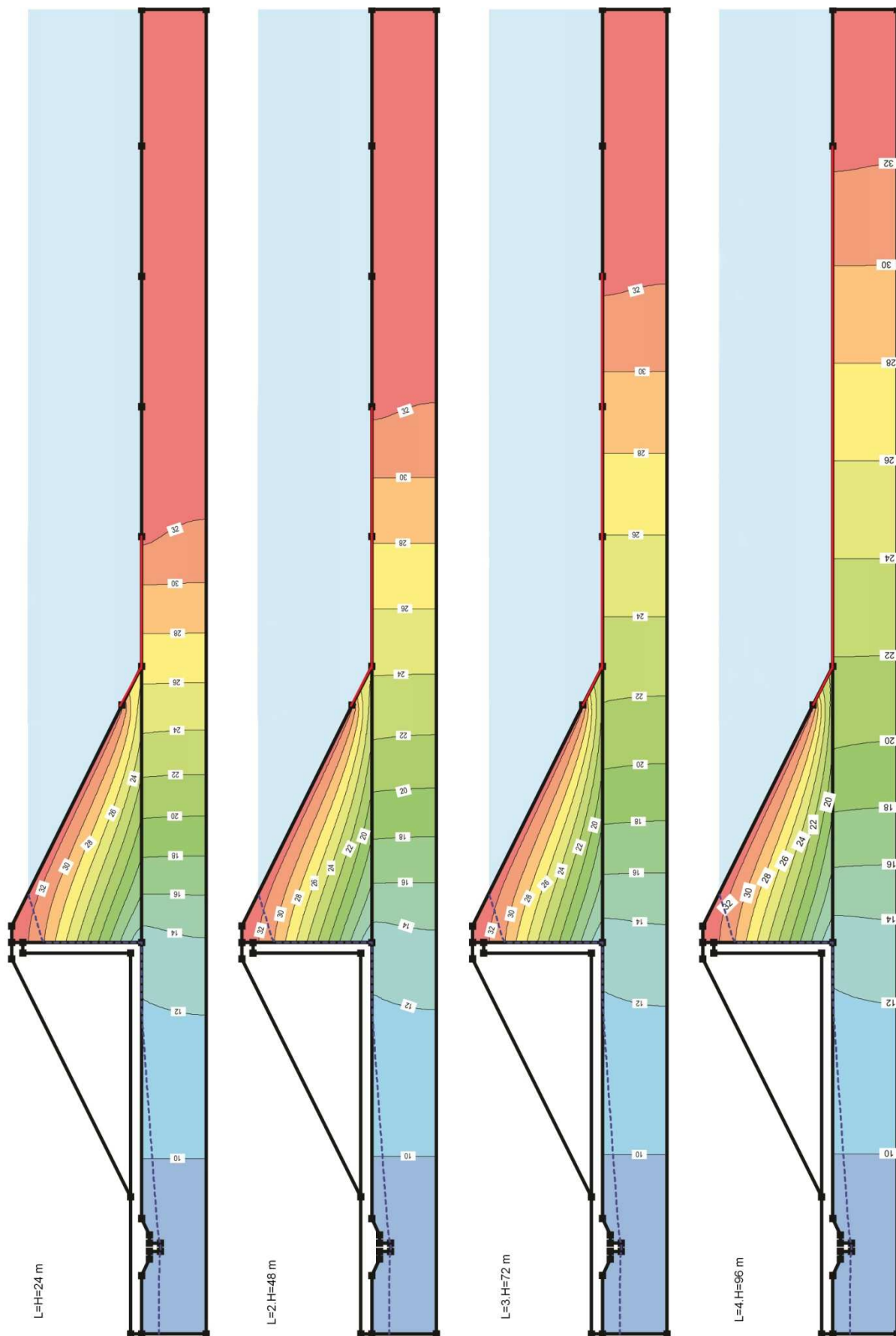


Figura 5.19 – Variação do comprimento da membrana impermeabilizante – Cargas totais (m.s.n.m.)

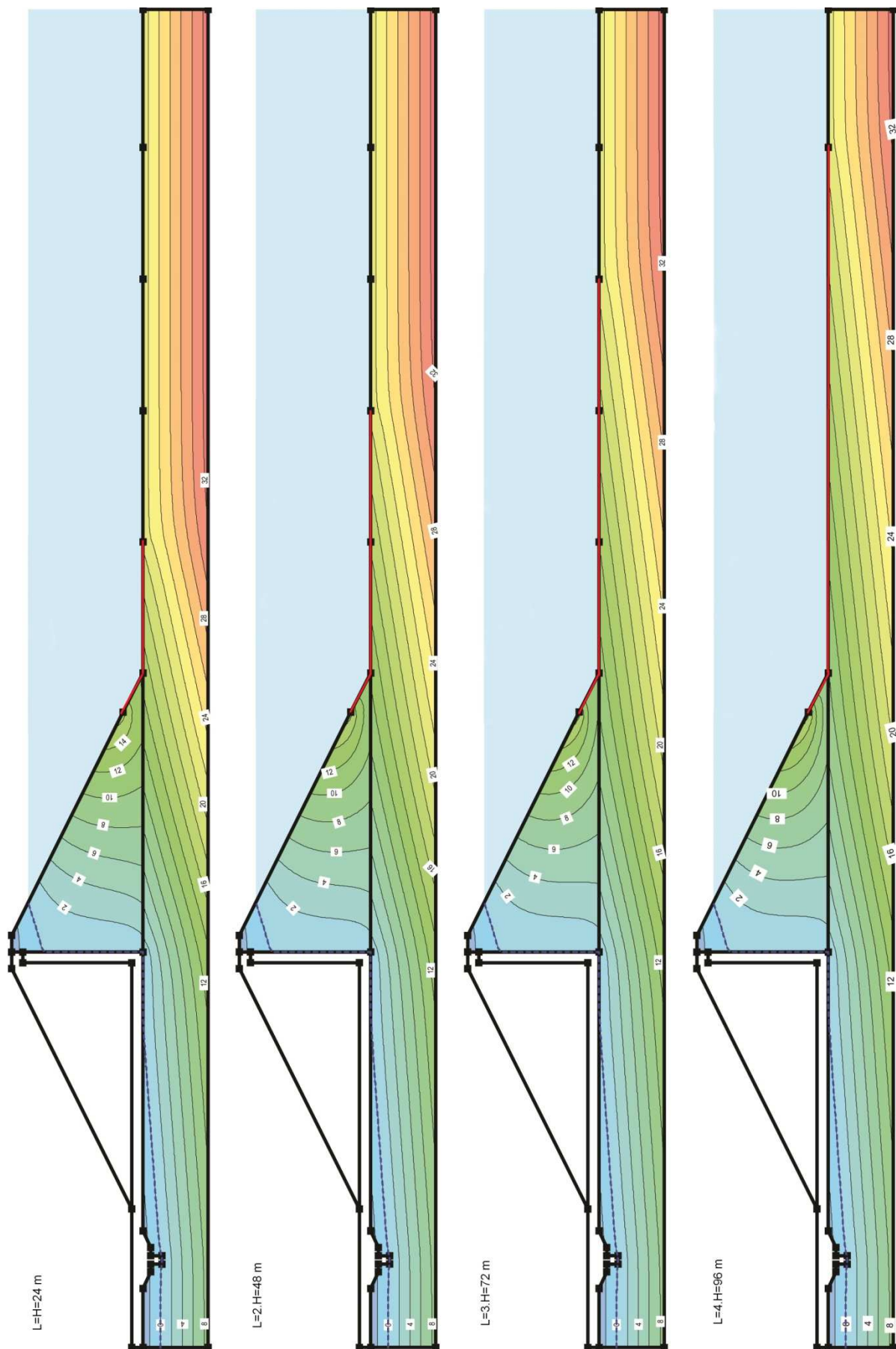


Figura 5.20 – Variação do comprimento da membrana impermeabilizante – Cargas de pressão (m.c.a.)

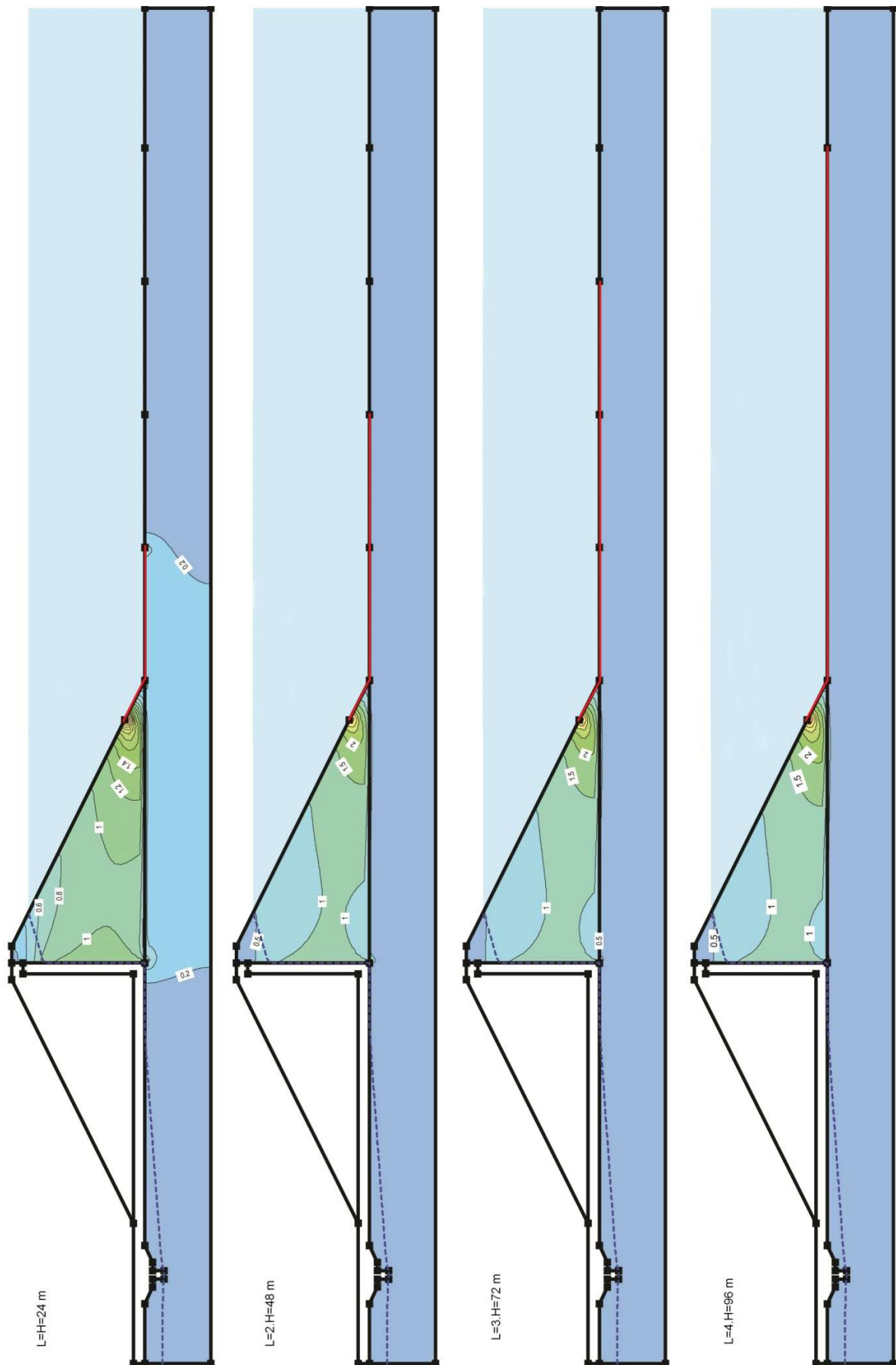


Figura 5.21 – Variação do comprimento da membrana impermeabilizante – Gradientes hidráulicos

Tabela 5.25 – Vazões de percolação – Comprimento da membrana sintética igual a 24 e 48 m

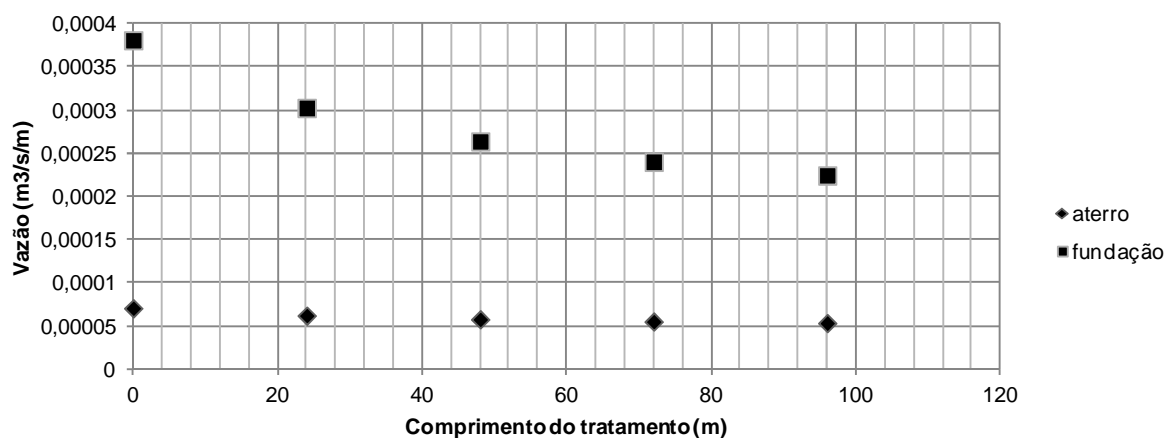
Vazão	Solução sem geomembrana	L = H = 24 m	L = 2.H = 48 m
Aterro (m ³ /s/m)	0,000070853	0,000062262 -12,1	0,0000579930 -18,2
Fundação (m ³ /s/m)	0,00038087	0,00030262 -20,5	0,00026385 -30,7
Total (m ³ /s/m)	0,000451723	0,000364882 -19,2	0,000321843 -28,8

Tabela 5.26 – Vazões de percolação – Comprimento da membrana sintética igual a 72 e 96 m

Vazão	Solução sem geomembrana	L = 3.H = 72 m	L = 2.H = 96 m
Aterro (m ³ /s/m)	0,000070853	0,000055392 -21,8	0,0000536330 -24,3
Fundação (m ³ /s/m)	0,00038087	0,00024031 -36,9	0,00022452 -41,1
Total (m ³ /s/m)	0,000451723	0,000295702 -34,5	0,000278153 -38,4

A variação do comprimento da membrana sintética resultou na redução da vazão do aterro e da fundação, conforme mostram as Tabelas 5.25 e 5.26. A diminuição da vazão pelo aterro foi de 24,3 %, enquanto que a vazão pela fundação reduziu aproximadamente 35,4%, para comprimento da membrana igual a 4 vezes a altura da barragem. A Figura 5.22 apresenta uma comparação entre as magnitudes de vazão através do aterro e da fundação, com a variação do comprimento da membrana sintética.

Figura 5.22 – Vazões pelo aterro e fundação com a variação do comprimento da membrana sintética



Conforme dados apresentados na Figura 5.22, apesar de haver redução na vazão d'água percolada através do aterro, a mesma possui magnitude pequena quando comparada às vazões através da fundação. Esse resultado é dependente da relação de coeficientes de permeabilidade, estabelecida entre o aterro e a fundação nas simulações efetuadas.

Quanto aos gradientes hidráulicos, os mesmos ficaram compreendidos entre 0,8 e 1,0 na maior parte do aterro, quando utilizada a geomembrana com comprimento $L=H=24$ m. Para comprimentos maiores, os gradientes hidráulicos sofreram uma elevação, estando compreendidos entre 1 e 1,5 na maior parte do aterro. Na região da ancoragem, em todas as simulações, foram verificados gradientes hidráulicos elevados, compreendidos entre 1,5 e 3,0.

Na região da fundação a montante da barragem, a redução da carga de pressão ocorre a partir do início do trecho sob o tratamento com utilização de geomembrana. As simulações mostraram que as cargas de pressão permanecem aproximadamente constantes no trecho sob o talude de jusante da barragem. A redução de carga de pressão é significativa principalmente sob o talude de montante de barragem e sob o tratamento em questão.

Os resultados mostraram que, a medida que se aumenta o comprimento do tratamento de fundação, são obtidas vazões menores de percolação. Por outro lado, aumentam-se os gradientes hidráulicos no aterro. As cargas de pressão sofrem redução a partir do ponto onde inicia-se o tratamento da fundação.

5.3.3.4 Utilização de barreira simples de solo compactado a montante da barragem

Para avaliação da utilização da solução em questão, foram feitas quatro simulações, nas quais varia-se a espessura da camada de solo compactado: espessura de 0,8 m; espessura de 3,0 m, e; espessura de 6m. O comprimento total da solução foi mantido constante e igual a 96 m ($L = 4.H = 96$ m). As Figuras 5.23, 5.24 e 5.25 apresentam a configuração das cargas totais, das cargas de pressão e dos gradientes hidráulicos, obtidas através das simulações numéricas. A Tabela 5.27 apresenta as vazões de percolação obtidas através das simulações, e a comparação com as vazões obtidas através da solução de geomembrana.

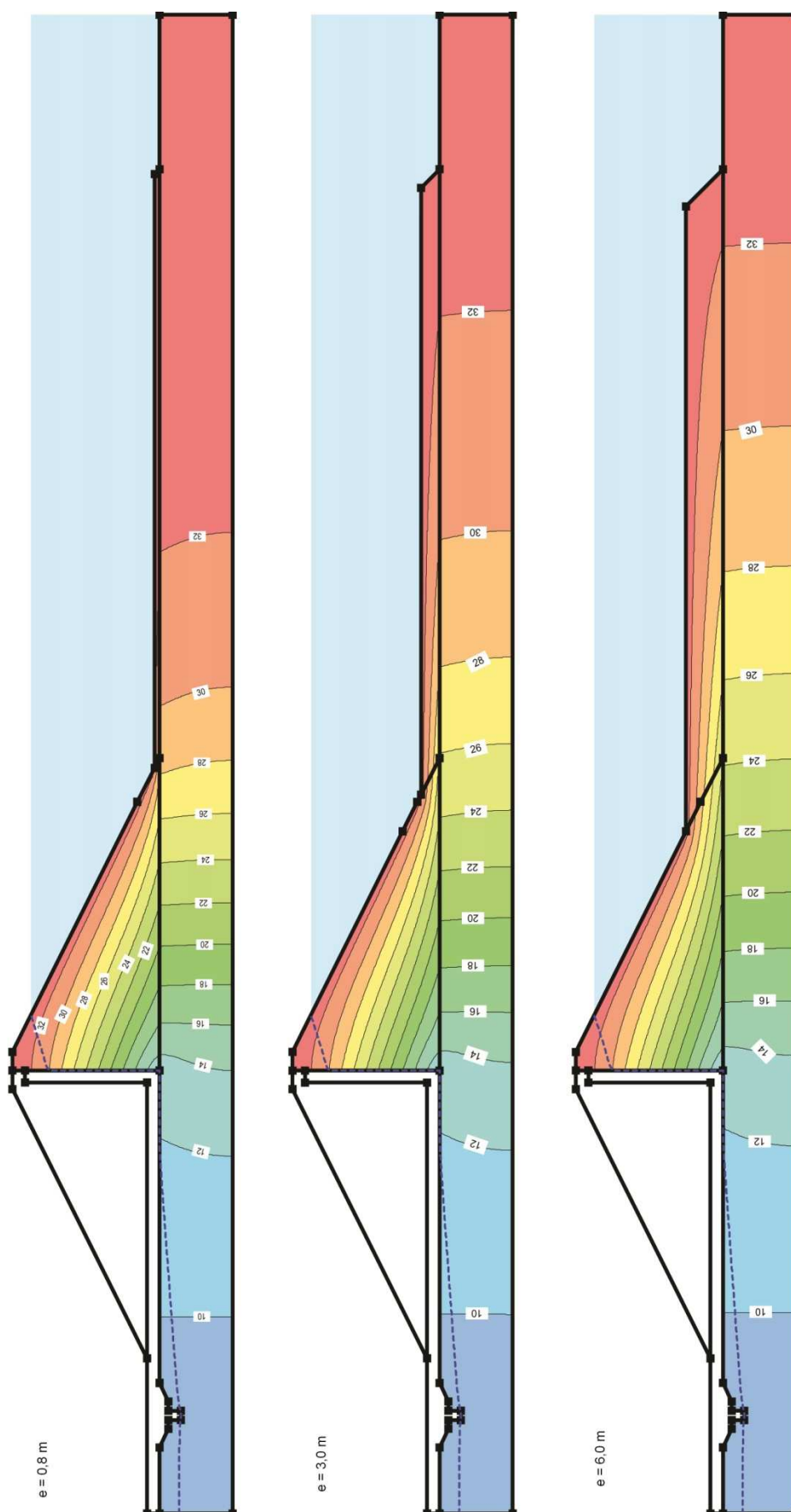


Figura 5.23 – Tapete de solo compactado a montante da barragem – Cargas totais (m.s.n.m.)

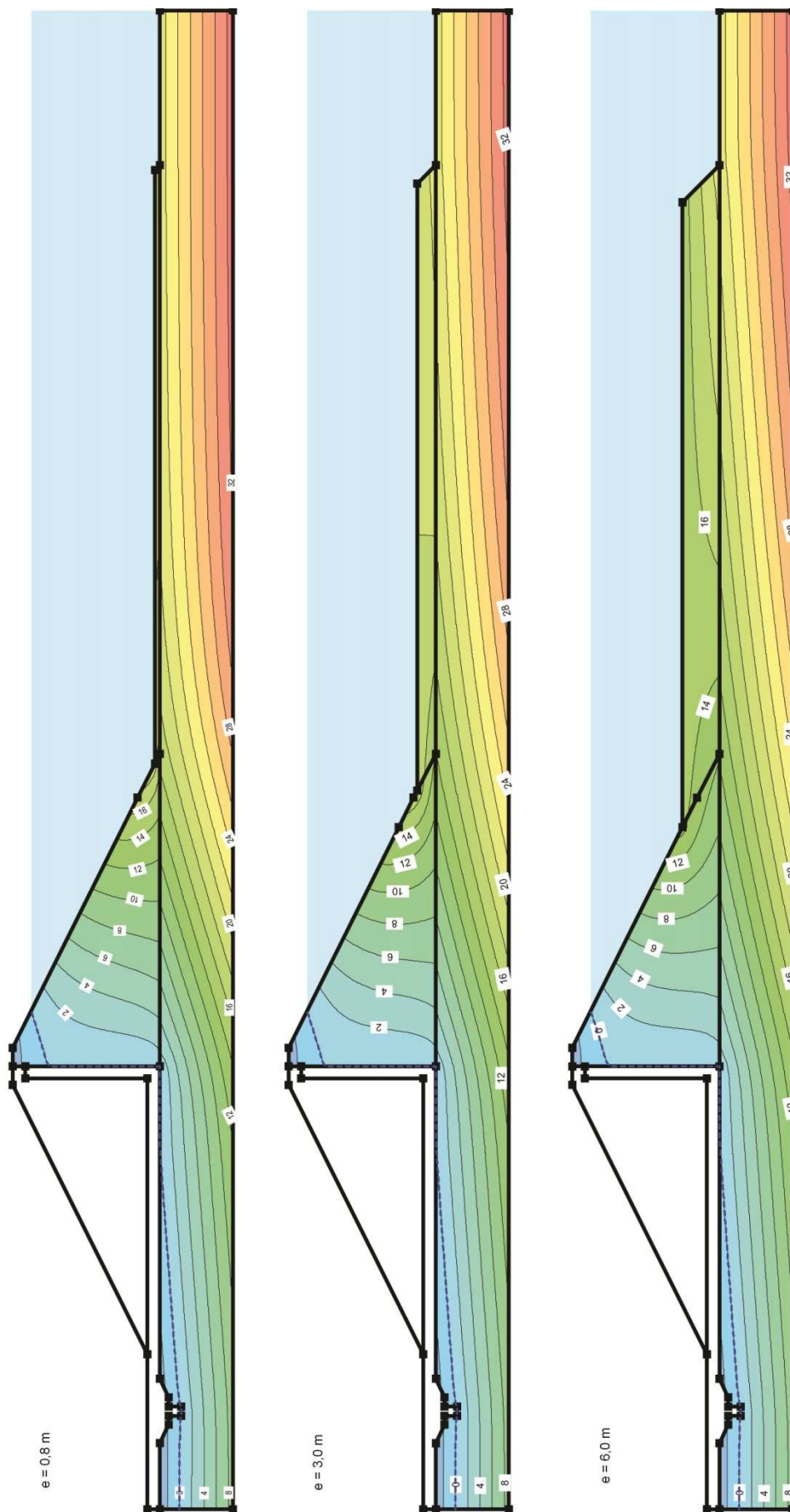


Figura 5.24 – Tapete de solo compactado a montante da barragem – Cargas de pressão (m.c.a.)

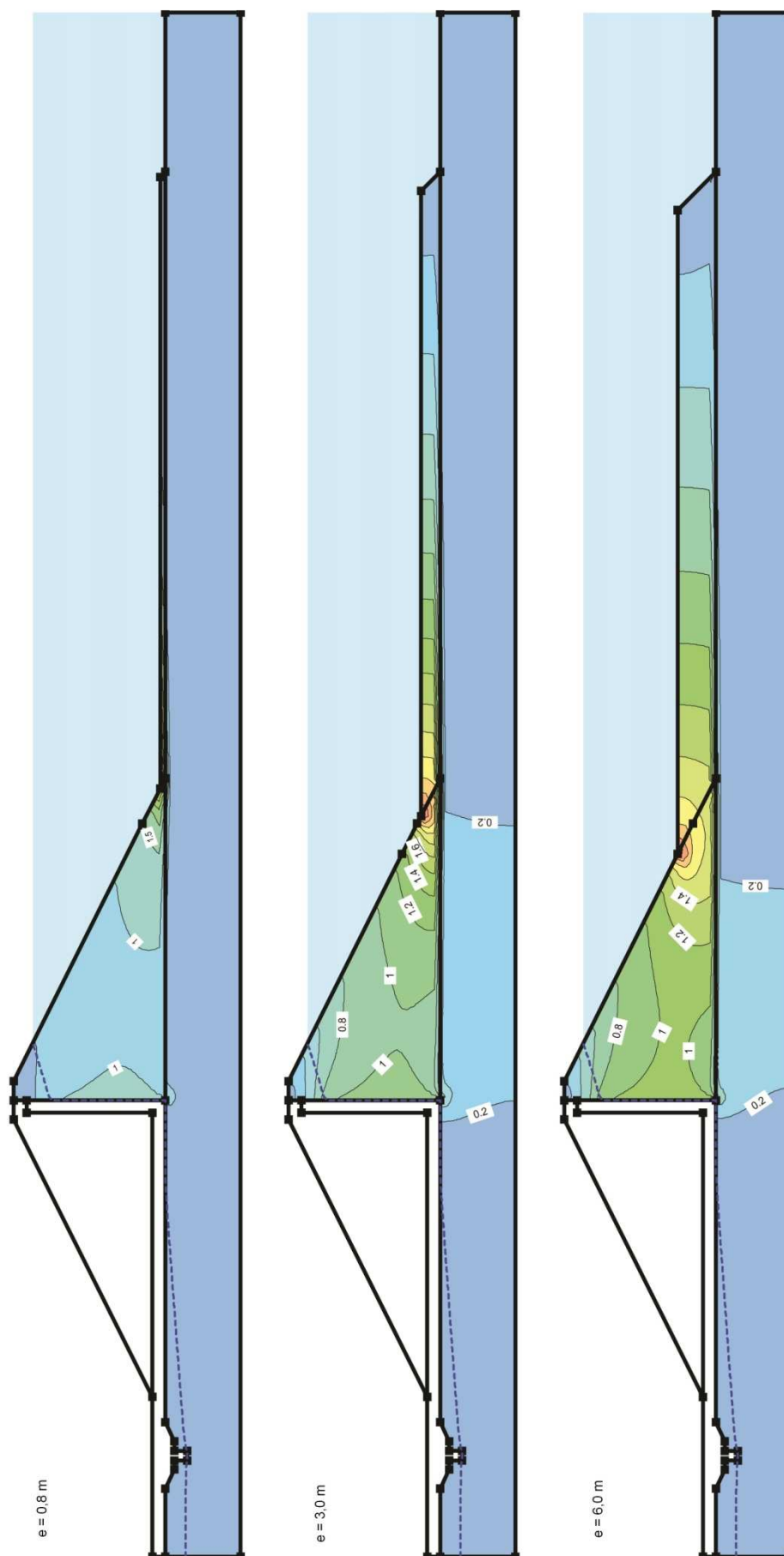


Figura 5.25 – Tapete de solo compactado a montante da barragem – Gradientes hidráulicos

Tabela 5.27 – Vazões de percolação – Tapetes de solo compactado

Vazão	Solução com geomembrana	e = 0,8 m	e = 3 m	e = 6 m
Aterro (m ³ /s/m)	0,000053633	0,000065405 21,9	0,0000607990 13,4	0,0000574120 7,0
Fundação (m ³ /s/m)	0,00022452	0,00033088 47,4	0,00028896 28,7	0,00025996 15,8
Total (m ³ /s/m)	0,000278153	0,000396285 42,5	0,000349759 25,7	0,000317372 14,1

São frequentes espessuras de tapete impermeável variando entre 0,60 e 3,00 metros, podendo alcançar valores maiores na região logo a montante do núcleo (GAIOTO, 2003). Entretanto, neste trabalho simula-se a espessura de 6 m (equivalente a 25% da altura total da barragem), como forma de comparação com os resultados obtidos através de espessuras menores e com o uso de geomembrana.

As simulações mostraram que as vazões de percolação aumentaram com a utilização do tapete composto por solo compactado, em relação à utilização de geomembrana. Para tapete com espessura de 0,8 m, houve acréscimo de 42,5% na vazão total, enquanto que para os tapetes com 3 e 6 m de espessura, o acréscimo foi igual a 25,7 e 14,1%, respectivamente.

Na simulação do tapete com espessura de 0,8 m, os gradientes hidráulicos se situam entre 0,5 e 1 na maior parte do aterro, enquanto que nas simulações com 3 e 6 m os gradientes ficaram compreendidos entre 0,8 e 1,2 na maior parte do aterro. Gradientes hidráulicos elevados foram observados na região de encontro do tapete com o aterro da barragem (entre 1,4 e 1,8).

As cargas de pressão no aterro sofrem pequena oscilação com a variação das espessuras do tapete. Por outro lado, os resultados mostram que a variação da espessura resultou na variação das cargas de pressão, principalmente sob o tapete e o talude de montante da barragem. As cargas de pressão na fundação, sob o talude de jusante da barragem, sofreram pequena oscilação com as simulações efetuadas.

Os resultados mostram que, mesmo considerando-se o tapete sem fissuras e com grande espessura (6 m), a redução nas vazões não foi tão significativa quando comparada à solução com membrana sintética. A redução das cargas de pressão indica que, com o emprego da solução em questão, ocorre um aumento da perda de carga durante a percolação da água, em relação à ausência de tratamento. As maiores espessuras de aterro compactado corresponderam à maior redução nas cargas de pressão.

5.3.3.5 Ocorrência de rasgos longitudinais na membrana sintética

Para avaliação da ocorrência de rasgos longitudinais na membrana sintética, são feitas quatro simulações: 1 rasgo com 4 m de comprimento, sem proteção (simulação 1); 1 rasgo com 4 m de comprimento, possuindo camada de proteção com espessura de 0,8 m (simulação 2); 3 rasgos com 4 m de comprimento cada, sem proteção (simulação 3), e; 3 rasgos com 4 m de comprimento cada, com camada de proteção com espessura de 0,8 m (simulação 4). Os parâmetros analisados são as vazões e as cargas de pressão.

No caso da ocorrência de 1 rasgo, simula-se que o mesmo esteja locado a 48 m do pé do talude de montante, enquanto que no caso da ocorrência de 3 rasgos, os mesmos estão locados a 24, 48 e 72 m do pé do talude de montante. Nas Tabelas 5.28 e 5.29 apresentam-se as vazões de percolação obtidas através das simulações numéricas. Na Tabela 5.30 apresenta-se as vazões de percolação obtidas através dos ensaios laboratoriais. As Figuras 5.26, 5.27 e 5.28 apresentam o comportamento das cargas totais, das cargas de pressão e dos gradientes hidráulicos.

Tabela 5.28 – Vazões de percolação – Ocorrência de 1 rasgo longitudinal

Vazão	Solução com geomembrana	1 rasgo, sem proteção	1 rasgo, com proteção
Aterro (m ³ /s/m)	0,000053633	0,00008146 <i>51,9</i>	0,0000551890 <i>2,9</i>
Fundação (m ³ /s/m)	0,00022452	0,0002652 <i>18,1</i>	0,00023845 <i>6,2</i>
Total (m ³ /s/m)	0,000278153	0,00034666 <i>24,6</i>	0,000293639 <i>5,6</i>

Tabela 5.29 – Vazões de percolação – Ocorrência de 3 rasgos longitudinais

Vazão	Solução com geomembrana	3 rasgos, sem proteção	3 rasgos, com proteção
Aterro (m ³ /s/m)	0,000053633	0,000062592 <i>16,7</i>	0,0000576470 <i>7,5</i>
Fundação (m ³ /s/m)	0,00022452	0,00030558 <i>36,1</i>	0,00026069 <i>16,1</i>
Total (m ³ /s/m)	0,000278153	0,000368172 <i>32,4</i>	0,000318337 <i>14,4</i>

Tabela 5.30 – Vazões de percolação (valores de protótipo) – Ensaio de laboratório

Vazão	Seção sem geomembrana	Seção com geomembrana	Geomembrana com rasgos
Total (m ³ /s/m)	0,000389029	0,000208574 <i>-46,4</i>	0,0003579070 <i>-8,0</i>

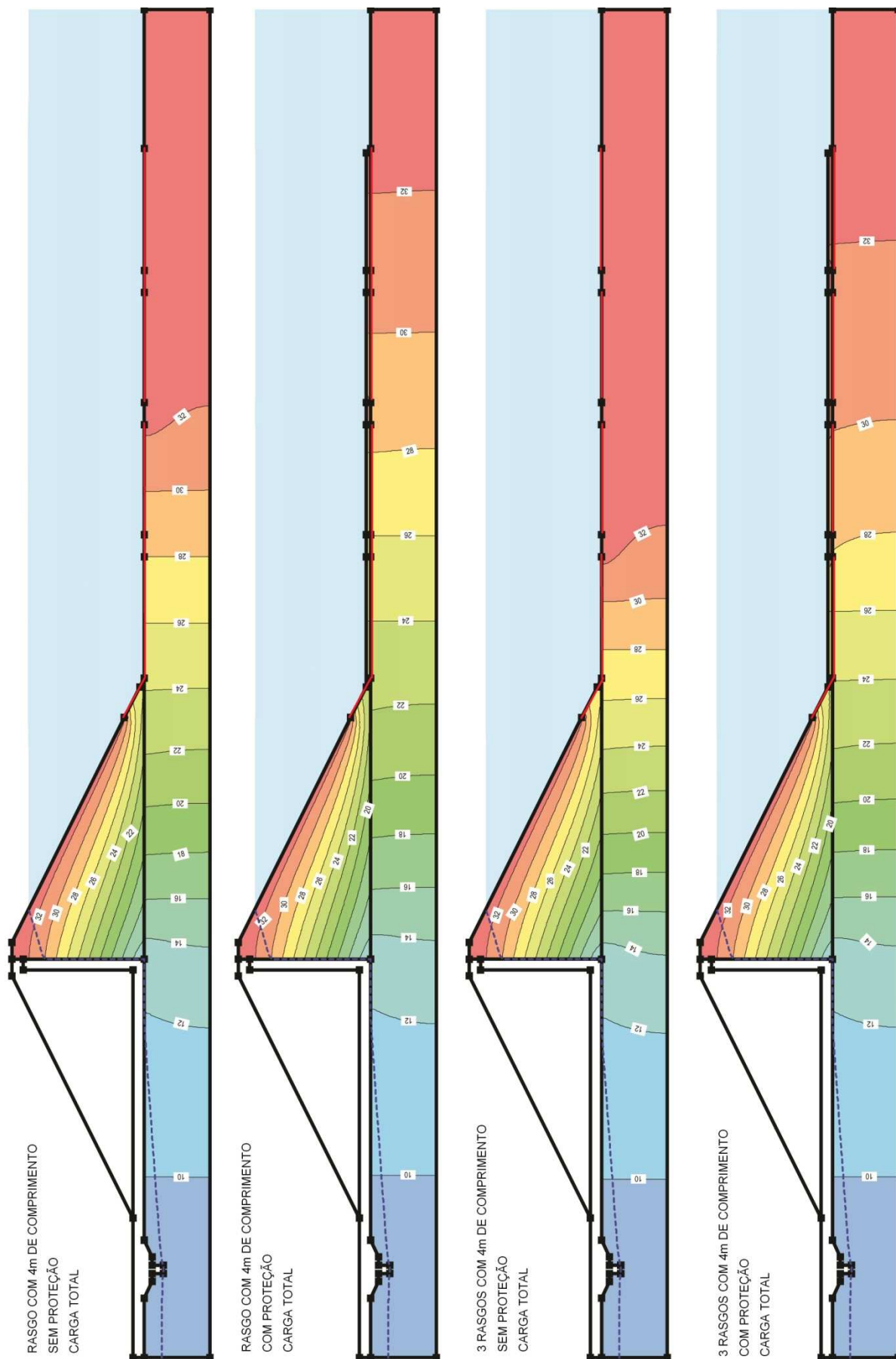


Figura 5.26 – Simulação de rasgos longitudinais na membrana sintética – Carga total (m.s.n.m.)

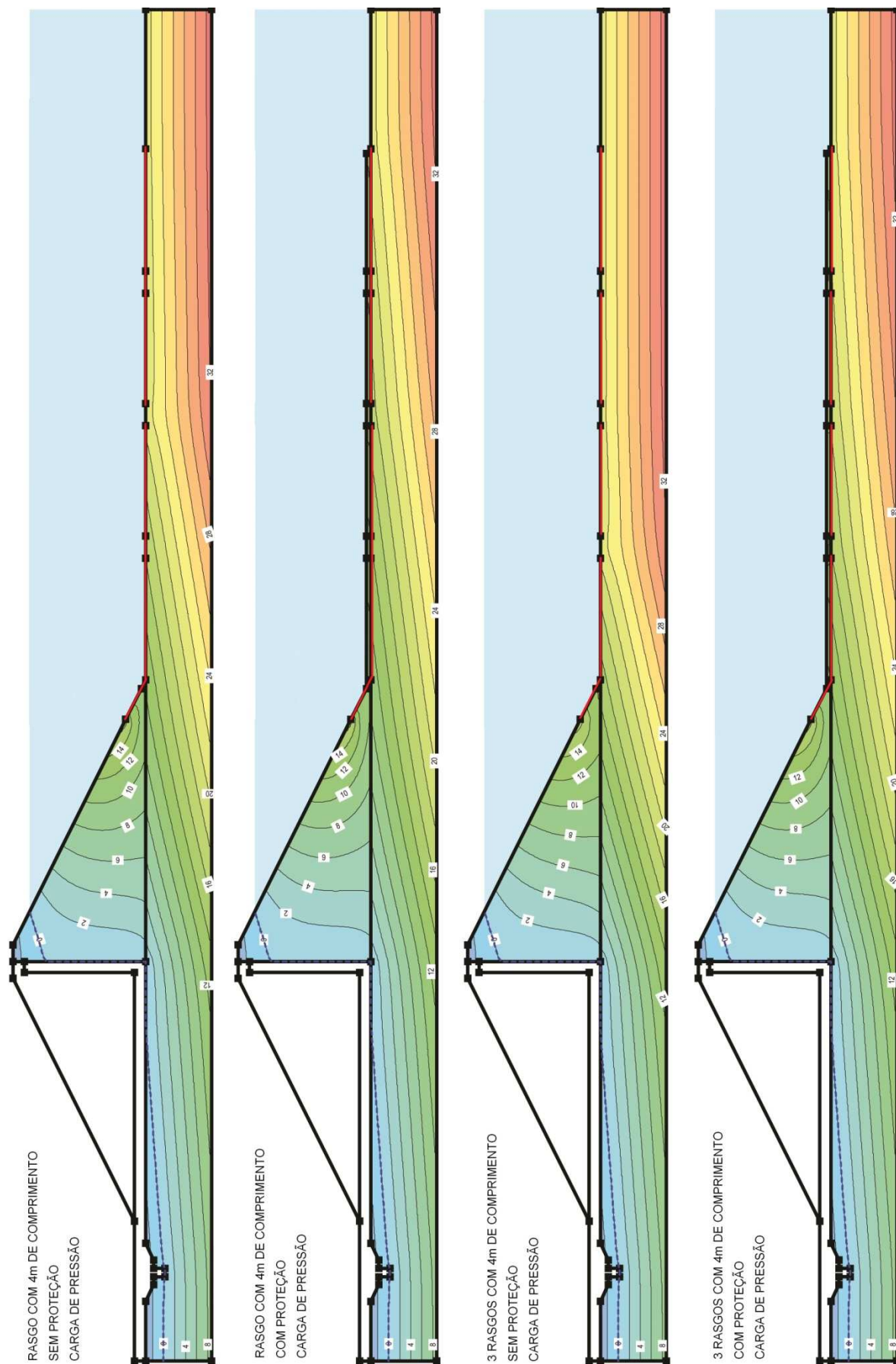


Figura 5.27 – Simulação de rasgos longitudinais na membrana sintética – Carga de pressão (m.c.a.)

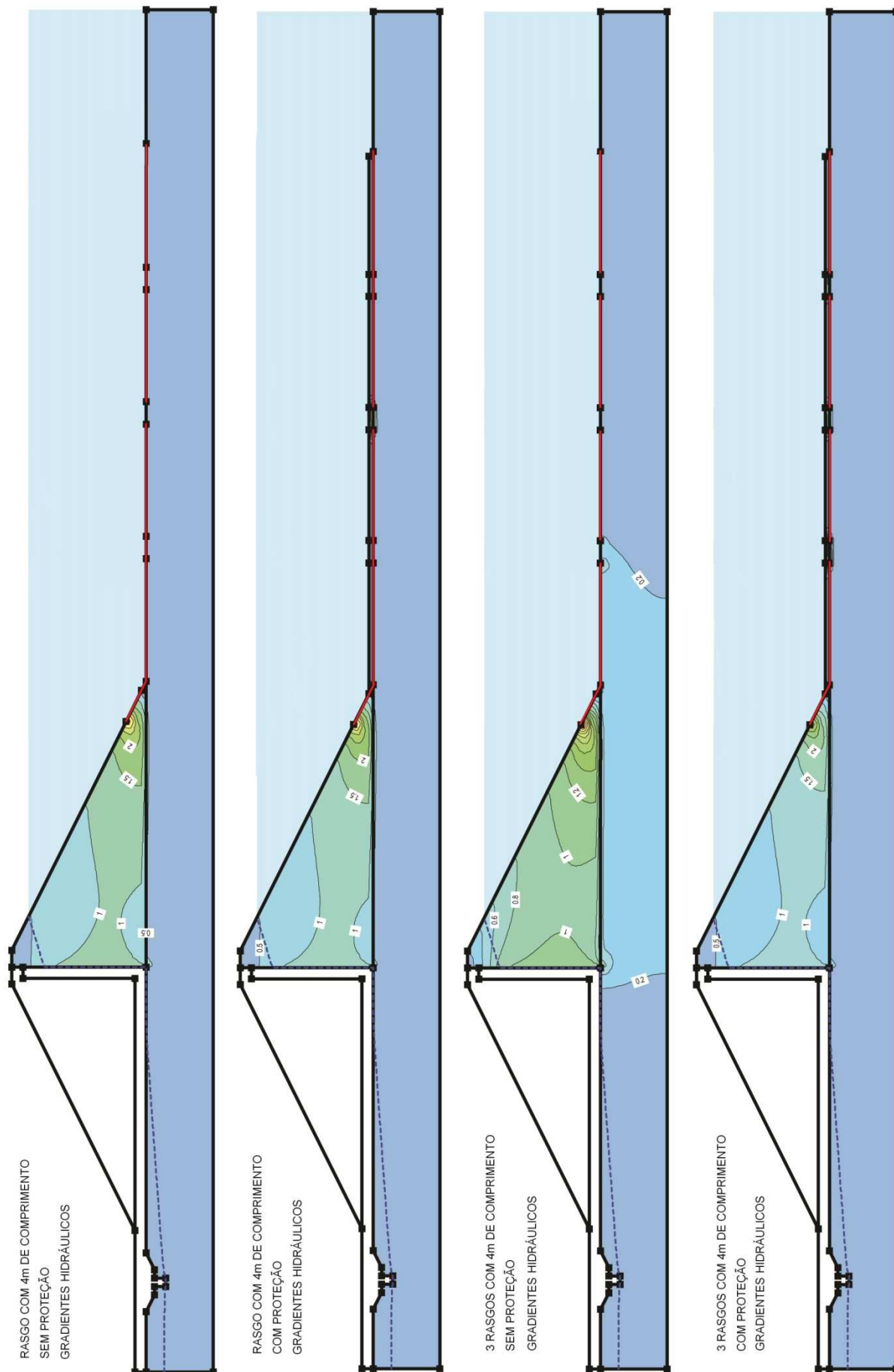


Figura 5.28 – Simulação de rasgos longitudinais na membrana sintética – Gradientes hidráulicos

No caso do ensaio em modelo reduzido, a ocorrência de rasgos resultou no aumento de 71,6% de vazão, em relação à utilização de geomembrana em perfeito estado de funcionamento. Em relação à seção sem utilização de geomembrana, no entanto, a vazão total percolada foi 8% menor. Os resultados obtidos no ensaio em modelo reduzido refletem a ocorrência generalizada de rasgos (50% das emendas dos perfis comprometidas por rasgos).

As vazões de percolação obtidas através das simulações numéricas mostram que, no caso da ocorrência de rasgo, sem que haja camada de solo compactado sobre o mesmo, a vazão aumenta aproximadamente 24,6%. No entanto, caso tenha sido construída camada de proteção sobre a geomembrana, com espessura de 0,8 m, a vazão aumenta apenas 5,6%.

No caso da simulação de 3 rasgos, o aumento de vazão foi de aproximadamente 32,4% em relação à solução com geomembrana sem defeitos, considerando-se a inexistência de camada de aterro sobre a geomembrana. Com a utilização de camada de 0,8 m sobre a geomembrana, o aumento foi de 14,4%.

Nas simulações que consideraram a inexistência de camada de aterro sobre a geomembrana, a ocorrência de rasgos resultou em grande elevação das cargas de pressão, na região a montante dos rasgos. O mesmo resultado foi observado no ensaio em modelo reduzido, onde os rasgos existentes foram responsáveis pelo aumento das cargas piezométricas. Nas simulações que consideraram a existência de camada de solo compactado de 0,8 m de espessura, acima da geomembrana, a ocorrência de rasgos resultou em pequeno aumento de carga de pressão.

A ocorrência de rasgos resultou na elevação dos gradientes hidráulicos na fundação, em relação a simulação de geomembrana sem rasgos, como consequência da diminuição dos caminhos de percolação. Nas simulações que consideraram barreira impermeabilizante composta, por sua vez, os gradientes sofreram pequena redução em relação à utilização de barreira simples de geomembrana. Na região dos rasgos, ocorreram elevados gradientes hidráulicos nas simulações que consideraram a existência de camada de solo de proteção, podendo resultar em mecanismos erosivos.

Os resultados mostram que a utilização de geomembrana em conjunto com uma camada de aterro compactado, acima da mesma, é uma solução interessante para reduzir os riscos de perda de eficiência do sistema, no caso da ocorrência de rasgos. A camada de solo aplicada sobre a geomembrana também ajuda na proteção da membrana sintética, reduzindo a possibilidade de eventuais danos.

5.3.3.6 Extensão da membrana sintética sobre o talude de montante da barragem e ancoragem

Para avaliação da influência da extensão da manta sintética sobre o talude de montante da barragem, são feitas as seguintes simulações: comprimento de 8 m sobre o talude (simulação 1); comprimento de 16 m sobre o talude (simulação 2); comprimento de 24 m sobre o talude (simulação 3); comprimento de 32 m sobre o talude (simulação 4), e; comprimento de 40 m sobre o talude (simulação 5). Nas Figuras 5.29, 5.30 e 5.31 apresentam-se as cargas totais e as cargas de pressão obtidas através das simulações numéricas. Os resultados da Simulação 1 foram omitidos das figuras em questão, pois os resultados já estão apresentados no tópico 5.3.3.1. Nas Tabelas 5.31 e 5.32 apresentam-se as vazões obtidas através das simulações numéricas, comparando-as com a solução padrão de ancoragem com 8 m sobre o talude de montante.

Tabela 5.31 – Vazões de percolação – Extensão da manta sobre o talude de montante

Vazão	C = 8 m (simulação 1)	C = 16 m (simulação 2)	C = 24 m (simulação 3)
Aterro (m ³ /s/m)	0,000053633	0,000049927 -6,9	0,0000432080 -19,4
Fundação (m ³ /s/m)	0,00022452	0,00019988 -11,0	0,00018141 -19,2
Total (m ³ /s/m)	0,000278153	0,000249807 -10,2	0,000224618 -19,2

Tabela 5.32 – Vazões de percolação – Extensão da manta sobre o talude de montante

Vazão	C = 8 m (simulação 1)	C = 32 m (simulação 4)	C = 40 m (simulação 5)
Aterro (m ³ /s/m)	0,000053633	0,000032203 -40,0	0,0000138840 -74,1
Fundação (m ³ /s/m)	0,00022452	0,00017045 -24,1	0,00016357 -27,1
Total (m ³ /s/m)	0,000278153	0,000202653 -27,1	0,000177454 -36,2

De forma geral, a medida que se aumenta a extensão da manta sobre o talude de montante da barragem, ocorre a diminuição da vazão. Caso toda a extensão do talude de montante seja tratada com geomembrana, tem-se a situação apresentada no tópico 5.3.3.2. Para comprimentos de 16, 24 e 32 m, a redução de vazão é de 10,2, 19,2 e 27,1%, respectivamente.

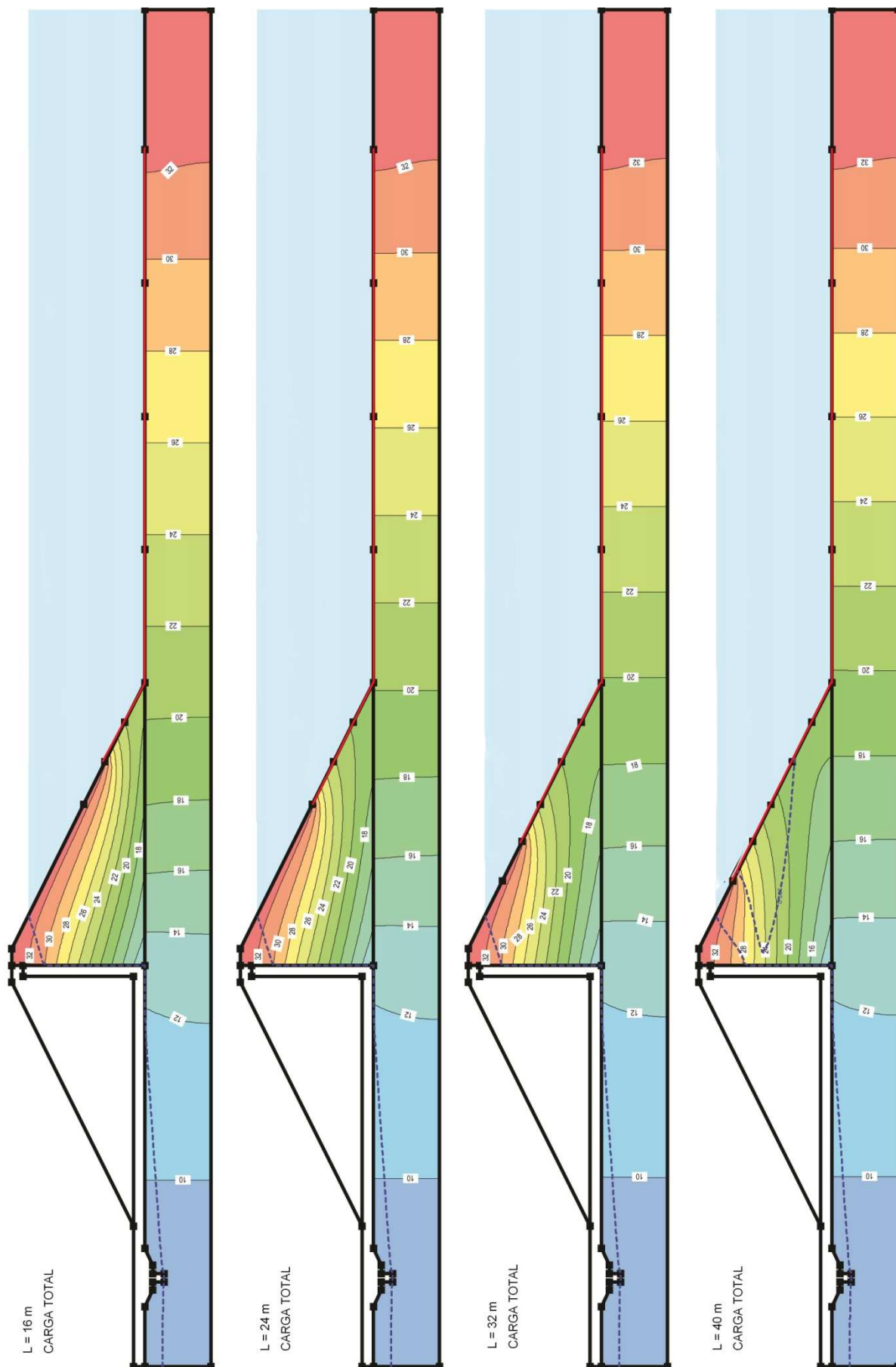


Figura 5.29 – Ancoragem da membrana sintética no talude de montante – Cargas totais (m.s.n.m.)

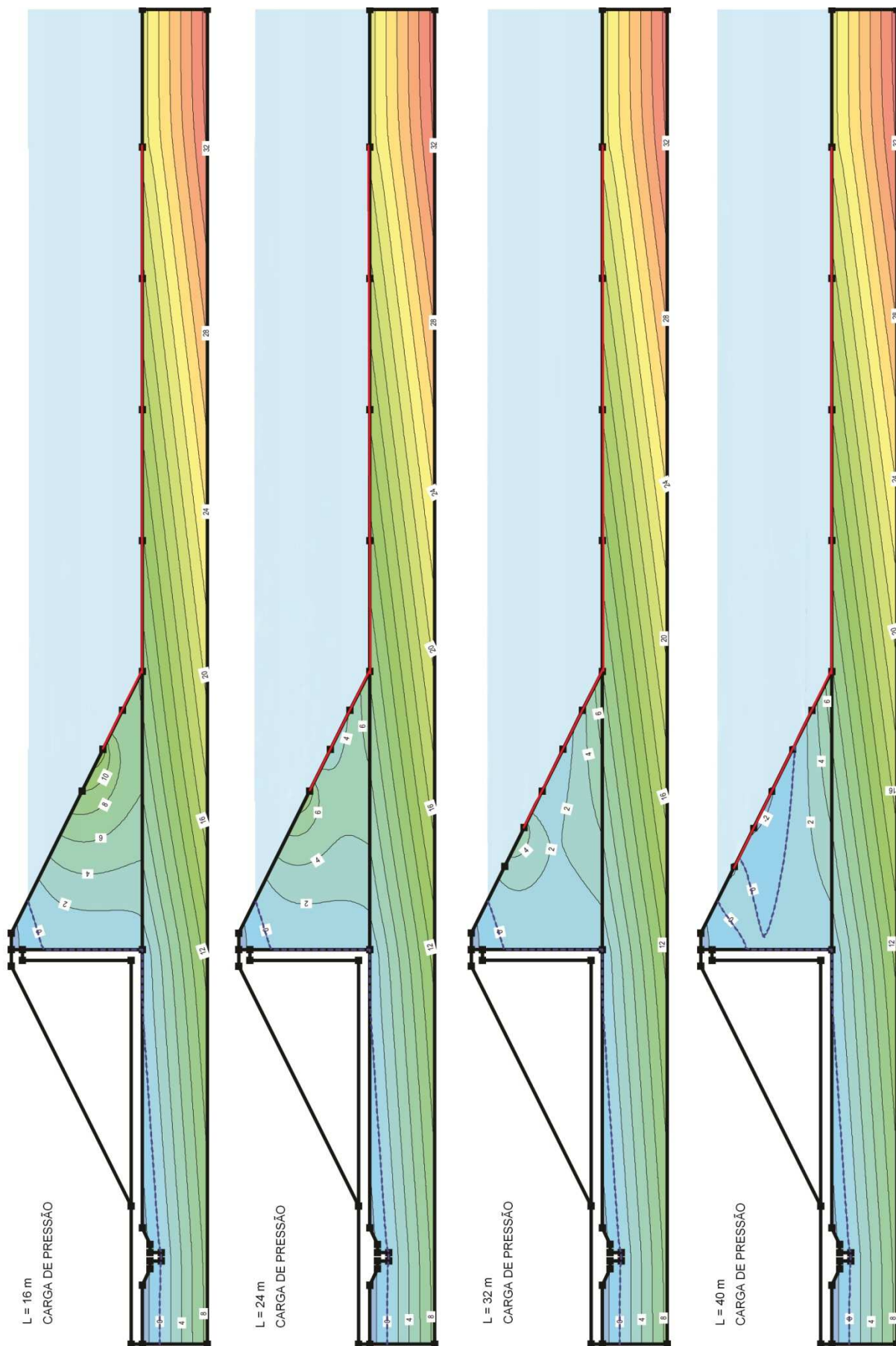


Figura 5.30 – Ancoragem da membrana sintética no talude de montante – Cargas de pressão (m.c.a.)

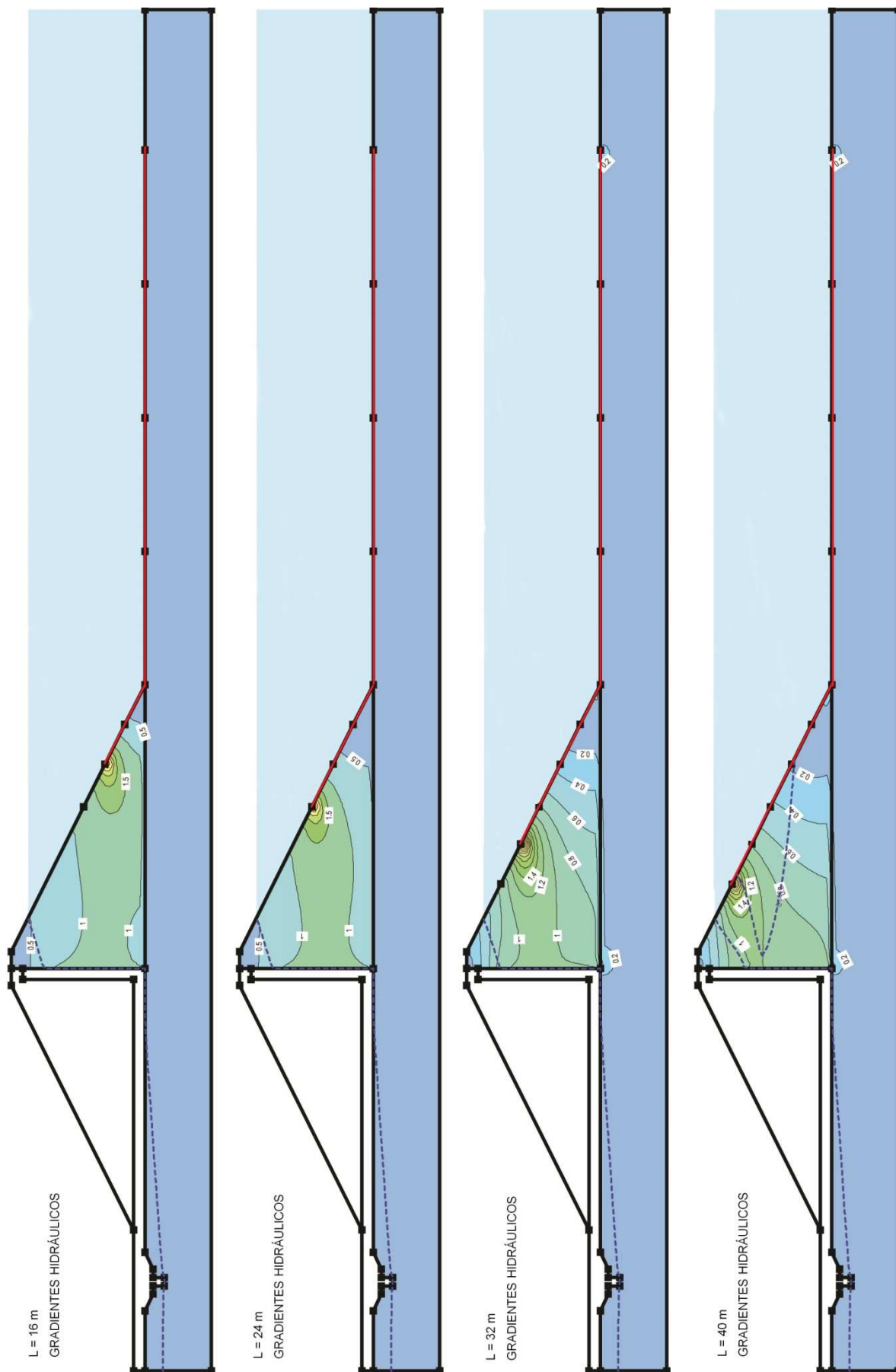


Figura 5.31 – Ancoragem da membrana sintética no talude de montante – Gradientes hidráulicos

Considerando-se que a barragem possui 24 m de altura, e que o nível do reservatório encontra-se na cota 21 m (3 m de borda livre), a extensão de 40 m corresponde ao tratamento de aproximadamente 85% da superfície do talude de montante na região submersa. Nesta situação, a redução da vazão do aterro pode chegar a 74,1%, enquanto que a vazão total reduz 36,2%.

As cargas de pressão na fundação sofrem pequena influência com a variação da extensão da membrana sintética sobre o talude de montante. As cargas de pressão no interior do aterro, no entanto, sofrem redução. Na simulação com extensão de 40 m, o nível d'água se desprende do talude de montante, surgindo uma zona de fluxo não saturado no interior do maciço.

Nas simulações que consideraram a manta com extensão de 16 e 24 m sobre o talude de montante, os gradientes hidráulicos no interior do aterro oscilaram entre 1,0 e 1,5. Quando utilizou-se a manta com extensão de 32 m, ocorreu redução dos gradientes hidráulicos em grande parte do maciço, passando os mesmos a oscilar entre 0,6 e 1,4. Na simulação de extensão 40 m, a redução dos gradientes hidráulicos foi ainda maior, estando os mesmos compreendidos entre 0,4 e 1,2 em grande parte do aterro.

Os resultados mostraram que através da variação da extensão da membrana impermeável sobre o talude de montante é possível reduzir os gradientes hidráulicos que ocorrem no mesmo, além das vazões e cargas de pressão. Essa consideração é importante nos casos em que ocorrem gradientes hidráulicos muito elevados no aterro, sendo esta uma alternativa para redução dos mesmos.

Os resultados aqui apresentados são complementados no tópico abaixo, onde apresenta-se uma discussão acerca da ancoragem da membrana impermeabilizante no material de aterro, com a finalidade de garantir a ligação entre o a mesma e a vedação da barragem.

A) Ancoragem da membrana no material de aterro

As simulações mostraram que ocorrem elevados gradientes hidráulicos na região de ancoragem da membrana sintética no talude de montante. O bom funcionamento da solução está intimamente condicionado à ligação entre o tapete impermeável e a vedação do aterro da barragem.

Cardoso *et al.* (2010) salientam que a instalação da manta no aterro da barragem, instituindo o transpasse com a vedação da mesma com a ancoragem da membrana, constitui um contratempo à execução das camadas de aterro. Por esse motivo, costuma-se

utilizar um sistema de ancoragem no talude de montante da barragem, o qual pode ser realizado independentemente da compactação do solo do barramento.

O procedimento de escavar o espaldar de montante da barragem, após a construção do aterro, para que seja feita a ancoragem da geomembrana, foi o procedimento construtivo adotado UHE Salto, conforme exposto no tópico 3.2.3. Nesta solução, após a adequada colocação da geomembrana, faz-se o reaterro de sobre a mesma, tomando-se o cuidado de não causar danos à manta. A Figura 5.32 apresenta um detalhe de ancoragem da membrana sintética no espaldar de montante da barragem.

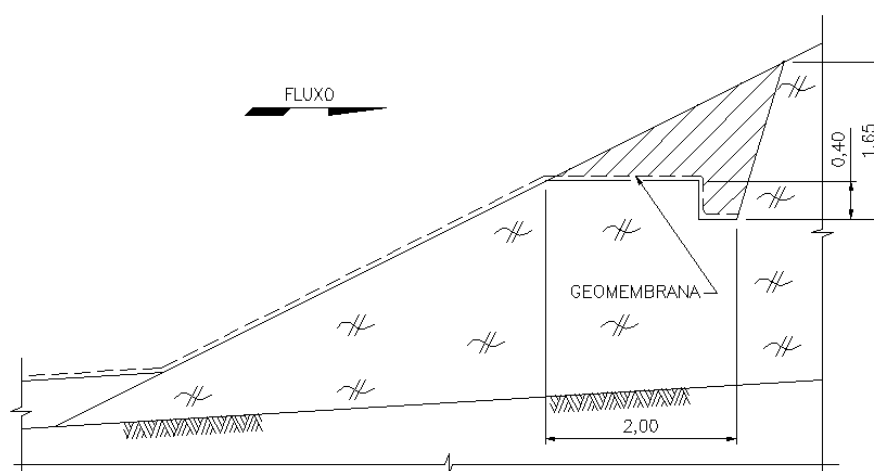


Figura 5.32 – Ancoragem da membrana sintética no espaldar de montante

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma avaliação do desempenho do tratamento de fundações de barragens de terra com o emprego de geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD). As mesmas podem ser descritas como membranas poliméricas flexíveis, com espessura de poucos milímetros, praticamente impermeáveis, sendo geralmente utilizadas com a finalidade de impermeabilização.

O comportamento dos maciços de aterro e de fundação, com a utilização da solução em questão, foi avaliado em termos de redução de vazões e de pressões neutras, avaliando-se também como se comportam os gradientes hidráulicos no interior do maciço. Para tanto, foram feitas simulações numéricas e experimentais, em modelo reduzido, com a finalidade de avaliar o tratamento de fundação.

O modelo reduzido mostrou que a instalação de geomembrana resultou na redução de aproximadamente 46% da vazão, através do aterro e da fundação. A ocorrência de rasgos, por sua vez, fez com que a vazão através do aterro e da fundação reduzisse apenas 8% em relação à simulação sem tratamento de fundação, mostrando que a eficiência do tratamento foi prejudicada com a ocorrência dos mesmos. De forma geral, a existência de tratamento de fundação resultou em cargas de pressão menores e na redução da vazão através da fundação.

O modelo numérico de fluxo foi validado e calibrado com base nos resultados encontrados na UHE Salto e em ensaios laboratoriais em modelo reduzido. De forma geral, pode-se dizer que o modelo reduzido foi capaz de fornecer as respostas desejadas adequadamente, em concordância com os resultados obtidos através da modelagem numérica, sendo ambas as modelagens representativas do protótipo.

Os ensaios em modelo reduzido confirmaram que ocorre redução de vazões e de cargas de pressão no interior do maciço, com amplitude de variação semelhante às observadas nas simulações numéricas. Os resultados encontrados na UHE Salto, por sua vez, confirmaram a validade dos resultados obtidos através do modelo de fluxo. As simulações numéricas mostraram que a relação de anisotropia de permeabilidade $k_h/k_v=5$ conduz a resultados mais representativos da realidade.

A membrana impermeável atua principalmente aumentando o caminho de percolação do fluxo na fundação da barragem, resultando, dessa forma, em menores cargas de pressão e gradientes hidráulicos sob a mesma. Como consequência, reduz-se a vazão d'água de percolação através da barragem e da fundação.

As maiores variações de carga de pressão ocorrem na fundação, sob a membrana impermeável e sob o espaldar de montante da barragem. Sob o espaldar de jusante, em decorrência da instalação de tapete horizontal compondo o sistema de drenagem interna, ocorre pequena variação nas cargas de pressão. Por esse motivo, durante a fase de projeto da barragem que utilize o sistema de drenagem em questão, recomenda-se que seja prevista a instalação de sistema de instrumentação também sob o espaldar de montante, para que sejam acompanhadas as cargas de pressão nesta região.

Através da alteração do comprimento do tratamento de fundação, observou-se variação nos valores medidos de cargas de pressão, de gradientes hidráulicos e de vazões. Conforme esperado, a medida que se aumenta o comprimento do tratamento de fundação, são obtidas vazões menores de percolação e menores cargas de pressão na fundação. Por outro lado, aumentam-se os gradientes hidráulicos no aterro.

A utilização de barreira impermeabilizante simples de solo compactado é uma solução que pode ser empregada no tratamento de fundação, assim como a barreira impermeabilizante simples composta de geomembrana. Quanto à utilização de tapete de solo compactado, os resultados mostraram que, mesmo considerando-se que não ocorram fissuras no mesmo, a redução das vazões não foi tão significativa quando comparada à solução com membrana sintética. A redução das cargas de pressão, assim como as vazões de percolação, mostraram-se dependentes da espessura da camada de solo compactado.

Ao ser considerado o modelo numérico, as vazões de percolação obtidas através das simulações numéricas mostram que, no caso da ocorrência de rasgo, sem que haja camada de solo compactado sobre a geomembrana, a vazão aumenta aproximadamente 24,6%. No entanto, caso tenha sido construída camada de proteção sobre a geomembrana, com espessura de 0,8 m, a vazão aumenta apenas 5,6%. No caso da simulação de 3 rasgos, o aumento de vazão foi de aproximadamente 32,4% em relação à solução com geomembrana sem defeitos, considerando-se a inexistência de camada de aterro sobre a geomembrana. Com a utilização de camada de 0,8 m sobre a geomembrana, o aumento foi de 14,4%.

Nas simulações que consideraram a inexistência de camada de aterro sobre a geomembrana, a ocorrência de rasgos resultou em grande elevação das cargas de pressão, na região a montante dos rasgos. O mesmo resultado foi observado no ensaio em modelo reduzido, onde os rasgos existentes foram responsáveis pelo aumento das cargas piezométricas. Nas simulações que consideraram a existência de camada de solo compactado de 0,8 m de espessura, acima da geomembrana, a ocorrência de rasgos resultou em pequeno aumento de carga de pressão. Dessa forma, a utilização de barreira

impermeabilizante composta de geomembrana e solo compactado mostrou-se uma solução interessante para reduzir os riscos de perda de eficiência do sistema, no caso da ocorrência de rasgos.

A ocorrência de rasgos resultou na elevação dos gradientes hidráulicos na fundação, em relação a simulação de geomembrana sem rasgos, como consequência da diminuição dos caminhos de percolação. Nas simulações que consideraram barreira impermeabilizante composta, por sua vez, os gradientes sofreram pequena redução em relação à utilização de barreira simples de geomembrana. Na região dos rasgos, ocorreram elevados gradientes hidráulicos nas simulações que consideraram a existência de camada de solo de proteção, podendo resultar em mecanismos erosivos.

As simulações mostraram que, em muitos casos, ocorrem elevados gradientes hidráulicos na região da ancoragem da membrana sintética no talude de montante. Em situações onde seja adotada a solução em questão, fazem-se necessários estudos com a finalidade de controlar os gradientes hidráulicos na região do aterro, principalmente na ancoragem entre a membrana impermeável e o solo compactado. Os resultados mostraram que através da variação da extensão da membrana impermeável sobre o talude de montante é possível reduzir os gradientes hidráulicos que ocorrem no aterro, além das vazões e cargas de pressão. O bom funcionamento da solução está intimamente condicionado à ligação entre o tapete impermeável e a vedação do aterro da barragem. Por esse motivo, recomenda-se utilizar um sistema de ancoragem no talude de montante da barragem.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA UTILIZAÇÃO DE GEOMEMBRANA EM TAPETES IMPERMEÁVEIS

A utilização de geomembrana sobre a face de montante da barragem mostrou-se interessante quando utilizada em conjunto com a solução de tratamento de fundação, principalmente em situações onde a permeabilidade do aterro seja muito elevada. No caso de aterro de baixa permeabilidade, como é o caso da barragem simulada no modelo de fluxo, é suficiente a utilização de membrana sintética apenas sobre a fundação permeável.

Sugere-se que seja previsto o uso de camada de solo compactado como substrato para a aplicação da membrana de PEAD. As superfícies do substrato aplicado e dos taludes devem ser inspecionadas anteriormente à instalação da geomembrana, para verificação da sua regularidade de acabamento e ocorrência de depressões, protuberâncias, pedras, pontas de raízes ou outros materiais que possam causar danos à geomembrana.

No caso da utilização de barreira impermeabilizante composta, a camada de solo aplicada sobre a geomembrana ajuda na proteção da mesma, reduzindo a possibilidade de eventuais danos. Como proteção suplementar, sobre a camada de solo compactado superior, pode ser prevista a utilização de uma camada de enrocamento.

De forma geral, a utilização de geomembrana de PEAD para tratamento de fundações permeáveis mostrou-se uma boa solução para redução das vazões e das cargas de pressão sob a barragem. Em vista das perspectivas de continuidade das pesquisas relacionadas ao tema, o tópico 6.2 apresenta recomendações para pesquisas futuras.

6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Os modelos numéricos e experimentais, se baseiam em simplificações dos fenômenos que ocorrem natureza. Neste trabalho, julgou-se suficiente a análise 2D do fenômeno da percolação. Entretanto, a ocorrência de fluxo lateral pode influenciar significativamente os parâmetros estudados, sendo então necessária uma análise tridimensional. Por esse motivo, pesquisas futuras podem levar em consideração as influências da tridimensionalidade do maciço no fenômeno da percolação.

Além disso, os modelos numéricos de percolação através dos maciços de fundação e de aterro, aplicados neste trabalho, não consideraram a zona não saturada do fluxo, compreendida entre o nível d'água e a superfície. As simulações consideraram apenas o fluxo saturado, ou seja, abaixo do nível d'água. No entanto, em algumas situações, a zona não saturada desempenha um papel importante para a resposta do sistema. Pesquisas futuras podem levar em consideração o fluxo que ocorre na zona não saturada do maciço, verificando a influência do mesmo nos parâmetros estudados.

As análises considerando a existência de rasgos longitudinais na geomembrana partiram do pressuposto que os mesmos possuem grandes dimensões (4 metros). Em campo, as condições encontradas podem levar ao surgimento de rasgos de dimensões distintas. Pesquisas futuras poderão explorar os efeitos de rasgos na geomembrana, variando a geometria dos mesmos com base em geometrias usualmente encontradas em campo.

As conclusões obtidas nesta pesquisa podem ser verificadas em outras obras, nas quais sejam encontradas condições semelhantes. Sendo assim, sugere-se que sejam estudadas outras barragens que tenham utilizado o tratamento em questão, verificando-se

se as vazões, as cargas de pressão e os gradientes hidráulicos se comportam da mesma forma que aqui apresentado.

Outra contribuição interessante seria o estudo da utilização de membrana impermeável, em barragens, em conjunto com outras formas de tratamento de fundação, como, por exemplo: trincheiras de vedação (*cut-off's*); cortinas de injeção, e; paredes diafragma. A análise da variação dos coeficientes de permeabilidade do aterro e da fundação também poderia enriquecer a pesquisa.

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 12.004 – **Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos** – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1990.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12.051 – **Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos**. Rio de Janeiro, 1991.

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.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12.553 – **Geossintéticos** – Terminologia. Rio de Janeiro, 2003.

ANA – Agência Nacional de Águas. **Resolução nº 91**, de 02 de abril de 2012. Diário Oficial da União, 11 abr. 2012.

ANA – Agência Nacional de Águas. **Segurança de Barragens** – ANA. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/cadastros/cnbarragens.aspx>>. Acessado em: 24/08/2013.

ANCOLD – Australian National Committee on Large Dams. **Guidelines on Risk Assessment**. Australia, Sydney, 2001.

ANDRADE, R. M. de. **Hidrogeotecnia nas barragens** – Métodos de Análise. Grupo de Informações Técnicas da ENGEVIX S. A., Rio de Janeiro, 1984.

ARAUJO, M. C. N. de. **Estudo de equivalência entre drenos franceses e tapetes drenantes em barragens de terra**. PPGECC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil, Dissertação de Mestrado, 2013.

ASCE/USCOLD. **Lessons from Dam Incidents**. USA, American Society of Civil Engineers, 1975.

ASCE/USCOLD. **Lessons from Dam Incidents**. USA-II, American Society of Civil Engineers, 1988.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **Standart Test Method for Determing Tensile Properties of Nonreinforced Polyethylene and Nonreinforced Flexible Polypropylene Geomembranes**, Active Standart ASTM D6693, 2004 (2010).

ASTM – American Society for Testing and Materials. **Standart Test Method for Index Puncture Resistance of Geomembranes and Related Products**, Active Standart ASTM D4833, 2007 (2013).

ASTM – American Society for Testing and Materials. **Standart Test Method for Measung the Nominal Thickness of Geosynthetics**, Active Standart ASTM D5199, 2012.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **Standart Test Method for Determining the Integrity of Nonreinforced Geomembrane Seams Procedure Using Thermo-Fusion Methods**, Active Standart ASTM D6392, 2012.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **Standart Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting**, Active Standart ASTM D882, 2012.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **Standart Test Method for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement**, Active Standart ASTM D792, 2013.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **Standart Test Method for Tear Resistance (Graves Tear) of Plastic Film and Sheeting**, Active Standart ASTM D1004, 2013.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **Standard Terminology for Geosynthetics**, Active Standart ASTM D4439, 2014.

BOWLES, D. S. **ALARP Evaluation: Using Cost Effectiveness and Disproportionality To Justify Risk Reduction**. ANCOLD Conference on Dams, 2003.

BRASIL. **Lei nº 8.876**, de 02 de maio de 1994. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 03 maio 1994.

BRASIL. **Lei nº 9.427**, de 26 de dezembro de 1996. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 27 dez. 1996.

BRASIL. **Lei nº 12.334**, de 20 de setembro de 2010. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 21 set. 2010.

BRASIL. **Presidência da República Federativa do Brasil**. Disponível em: <<http://www2.planalto.gov.br>>. Acessado em: 24/08/2013.

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**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Gramado. Anais. Gramado: ABMS, 2010.

CARGIL, K. W.; KO, H-Y. **Centrifugal Modeling of Transient Water Flow**. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 109, nº4, 1983.

CBDB, **Guia básico de segurança de barragens**, Núcleo Regional de São Paulo, Comissão de segurança de barragens, São Paulo, 2001.

CEDERGREN, H. R. **Seepage, Drainage, and Flow Nets**. John Wiley & Sons, Canada, 3 ed., 1989.

CHARLES, J. A., TEDD, P., WARREN, A. **Evidence Report** – Lessons from historical dam incidents. Environment Agency, 2011.

CHO, S. E. **Probabilistic analysis of seepage that considers the spatial variability of permeability for an embankment on soil foundation**. Engineering Geology, Volumes 133-134, 2012.

CIGB – COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES/ ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Dam Safety** - Guidelines. Bulletin 59. Paris, 1987.

CIGB – COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES/ ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Dam Monitoring** – General Considerations. Bulletin 60. Paris, 1988.

CIGB – COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES/ ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Conventional Methods in Dam Construction** – Review. Bulletin 76. Paris, 1990.

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.

CIGB – COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES/ ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Cutoffs for Dams**. Bulletin 150. Paris, 2013.

COPEL – Companhia Paranaense de Energia. **Balanco Energético do Paraná: 2010**. Ano base 2009.

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

DAM SAFETY. **Association of State Dam Safety Officials**. Disponível em: <<http://www.damsafety.org/>>. Acesso em: 09/01/2014.

DELL'AVANZI, E.; ZORNBERG, J. G.; CABRAL, A. R. **Suction profiles and scale factors for unsaturated flow under increased gravitational field**. Soil and Foundations, Vol. 44, n°3, 2004.

DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES AND MINES. **Queensland Dam Safety Management Guidelines**, 2002. Disponível em: <<http://www.dews.qld.gov.au/water-supply-regulations/dams/guidelines-for-referable-dams>>. Acessado em: 14/08/2013.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNER-ME 093/94 – **Solos – Determinação da Densidade Real**. Método de ensaio, 1994.

DUNNICLIFF, J. **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**. John Wiley & Sons, 1988.

FEMA – Federal Emergency Management Agency. **Geotextiles in Embankment Dams – Status Report on the Use of Geotextiles in Embankment Dams – Construction and Rehabilitation**. Estados Unidos, 2008.

FERC – FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION. **Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects**. Disponível em: <<http://www.ferc.gov/industries/hydropower/safety/guidelines/eng-guide.asp>>. 2010.

FURNAS. **Empresa Eletrobras**. Disponível em: <<http://www.furnas.com.br>>. Acessado em: 12/02/2014.

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.

GOOGLE EARTH. **Software**. Disponível em: <<http://www.earth.google.com.br>>. Acessado em: 02/03/2014.

GOOGLE MAPS. **Software**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps>>. Acessado em: 05/01/2014.

GRAHAN, W. J. **A Procedure For Estimating Loss of Life Caused by Dam Failure**. U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, 1999.

HARRALD, J. R.; RENDA-TANALI, I.; SHAW, G.L.; RUBIN, C.B.; YELETAYSI, S. **Review Of Risk Based Prioritization/Decision Making Methodologies For Dams**. The George Washington University. Institute for Crisis, Disaster, and Risk Management. Estados Unidos, Washington, 2006.

HAZEN, A. **Some physical properties of sands and gravels, with special reference to their use in filtration**. 24th Annual Rep. Massachusetts State Board of Health, Vol. 34, 1892.

HE, X. Y., WANG, Z. Y., HUANG, J. C. **Temporal and spatial distribution of dam failure events in China**. International Journal of Sediment Research, Vol. 23, 2008.

ICOLD – International Commission on Large Dams. **Deterioration of dams and reservoirs: examples and their analysis**. A. A. Balkema Publishers, Rotterdam, 1984.

ITAIPU BINACIONAL. **Barragem de Itaipu Binacional**. Disponível em: <<http://www.itaipu.gov.br/energia/auscultacao>>. Acessado em: 05/02/2014.

JEON, J.; LEE, J.; SHIN, D; PARK, H. **Development of Dam Safety Management System**, Advances in Engineering Software, Vol. 40, 2009.

KERLINGER, T. C.; TAYLOR, J. R. **Marketing research: an applied approach**. McGraw-Hil Kogakusha, Tóquio, 1979.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics, SI Version**. Series in soil engineering. Massachusetts Institute of Technology, 1979.

LEYSER, S. D. L.; MIQUELETTTO, M.; MARANESI, D. A.; FILLOY, J. E.; FREITAS, F. A. E. de. **Emprego do Basalto Vesículo-Amigdaloidal em Obras Definitivas da UHE Salto (GO)**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Gramado. Anais. Gramado: ABMS, 2010.

MARQUES, J. C.; UNAS, M. **Estudos em modelo reduzido de percolação em barragens de aterro**. 5^{as} Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, Portugal, 2010.

MENESCAL, R. de A. **Gestão da segurança de barragens no Brasil** - Proposta de um sistema integrado, descentralizado, transparente e participativo. Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza, 2009.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G. de; SOUZA, P. A. de; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. **Bacia do Paraná**. Petrobras, Vol. 15, n. 2, Rio de Janeiro, 2007.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Energia 2030**. Geração Hidrelétrica. Brasília: v. 12, 2007.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Secretaria de Infraestrutura Hídrica. Brasil, Distrito Federal – DF, 2002.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior**. John Wiley & Sons, 3^o ed., Canada, 2005.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Energia 2030**. Geração Hidrelétrica. Brasília: v. 12, 2007.

MUSKAT, M. **The flow of homogeneous fluids through porous media**. Mc-Graw-Hill Book Company, Michigan, 1937.

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: 22/03/2014.

PERINI, D.S. **Estudo dos Processos Envolvidos na Análise de Riscos de Barragens de Terra**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2009.

PIEIDADE, C. R. C. Jr.; CALCINA, A. M.; FILLOY, J. E.; FREITAS, F. A. E. de. **Determinação as Espessuras de Escavação da Fundação em Solo Compressível da UHE Salto - Goiás**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Gramado. Anais. Gramado: ABMS, 2010.

RAD, N. S., TUMAY, M. T. **Factor Affecting Sand Specimen Preparation by Raining**, Geotechnical Testing Journal, 10(1): 31-37, 1987.

RICO, M., BENITO, G., SALGUEIRO, A. R., DÍEZ-HERRERO, A., PEREIRA, H. G. **Reported tailings dam failures**, A review of the European incidents in the worldwide context, Journal of Hazardous Materials, Vol. 152, 2008.

SEEP/W 2007. **Seepage Modeling with SEEP/W 2007**. An Engineering Methodology. GEO-SLOPE International Ltd. 2 ed, Canadá, 2007.

SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, L. P.; TALBOT, J. R. **Basic Properties of sand and gravel filters**. Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 110, 1984.

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.

SORTIS, A. D.; PAOLIANI, P. **Statistical analysis and structural identification in concrete dam monitoring**. Engineering Structures, Vol. 29, 2007.

SOUZA PINTO, C. de. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. Oficina de Textos, 3ed., São Paulo-Brasil, 2006.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of Soil Mechanics**, John Wiley and Sons, New York, 1948.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams**. Department of the Army, Washington – DC, 2004.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Seepage Analysis and Control for Dams** – Engineering and Design. Engineer Manual N° 1110-2-1901. Department of the Army, Washington – DC, 1986.

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.

YIADOM, A.; BIALEK, E. **Bolstering Lifeline Resilience through a Comprehensive Dam Safety Program**. Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment, ASCE, 2009.

YIN, R. K. **Estudo de caso: Planejamento e Métodos**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

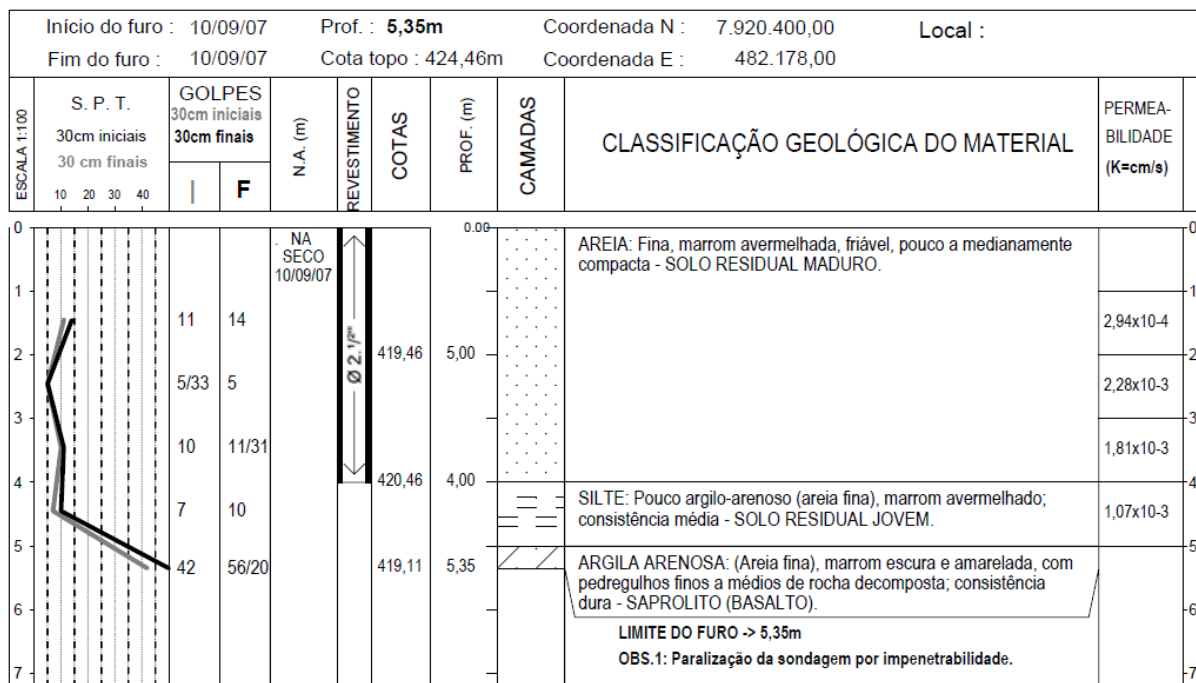
WU, W.; WANG, X. T.; ASCHAUER, F. **Investigation on failure of a geosynthetic lined reservoir**. Geotextiles and Geomembranes, Vol. 26, 2008.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.; ZHU, J. Z. **The Finit Element Method: Its Basis and Fundamentals**. Butterworth-Heinemann, 7 ed., Estados Unidos, 2013.

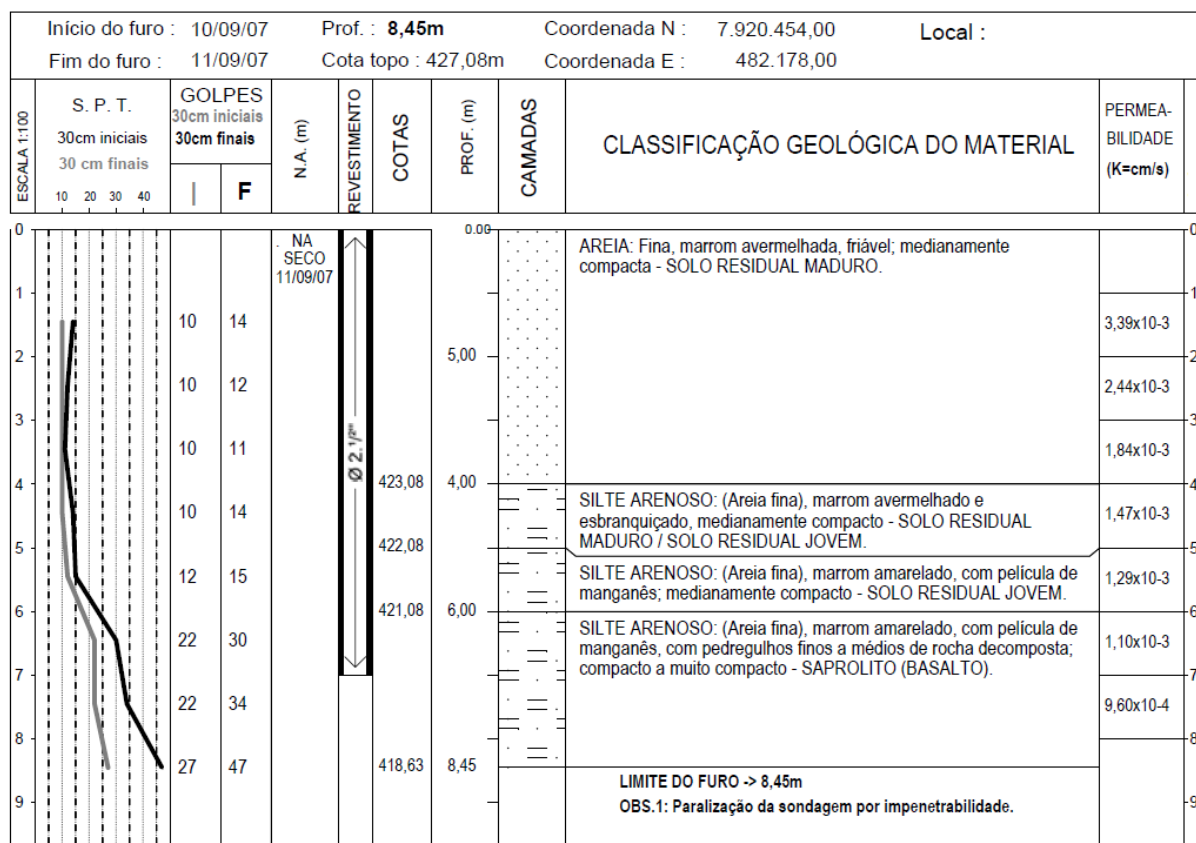
ANEXOS

A.1 – INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS – UHE SALTO

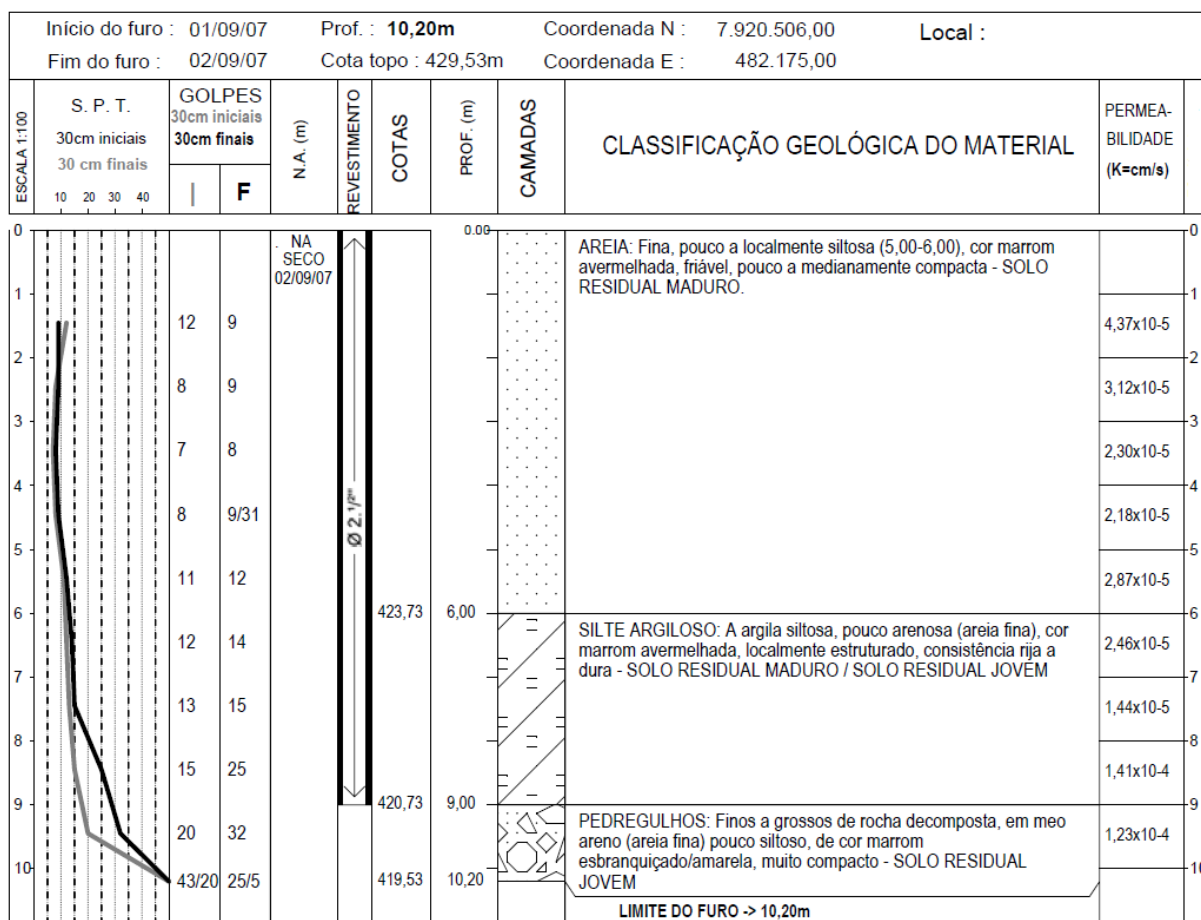
A.1.1 – FURO SP-503



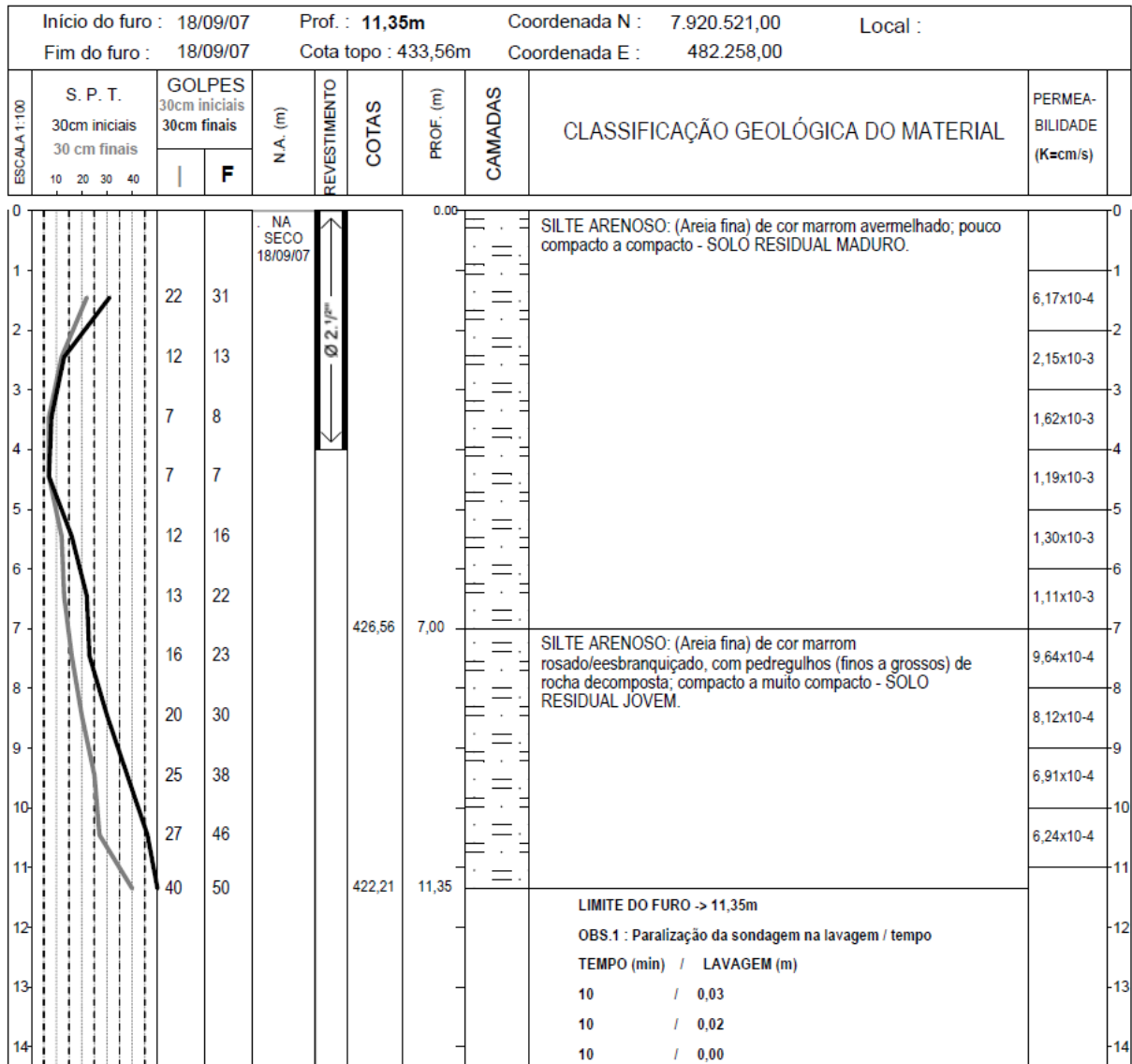
A.1.2 – FURO SP-504



A.1.3 – FURO SP-505



A.1.4 – FURO SP-506



A.1.5 – FURO SP-507

Início do furo : 19/09/07		Prof. : 16,45m		Coordenada N : 7.920.602,00		Local :				
Fim do furo : 20/09/07		Cota topo : 438,48m		Coordenada E : 482.296,00						
ESCALA 1:100	S. P. T.	GOLPES		N.A. (m)	REVESTIMENTO	COTAS	PROF. (m)	CAMADAS	CLASSIFICAÇÃO GEOLÓGICA DO MATERIAL	PERMEABILIDADE (K _{cm} /s)
	30cm iniciais 30 cm finais	30cm iniciais 30cm finais	I							
10	20	30	40							
0					NA SECO 20/09/07		0,00		SILTE ARENOSO: A areno-siltoso (areia fina), marrom avermelhado, friável, pouco compacto a compacto - SOLO RESIDUAL MADURO.	0
1			20	16						2,68x10 ⁻³
2			6	7/32						2,09x10 ⁻³
3			5	5/29						1,70x10 ⁻³
4			6	8						1,45x10 ⁻³
5			7	8/31						1,23x10 ⁻³
6			10	13						9,52x10 ⁻⁴
7			7	10/33						7,82x10 ⁻⁴
8			14	18						7,25x10 ⁻⁴
9			16	19						6,94x10 ⁻⁴
10			18	26						7,32x10 ⁻⁴
11			16	19						6,19x10 ⁻⁴
12			16	22						5,71x10 ⁻⁴
13			21	30						5,05x10 ⁻⁴
14			20	31		424,48	14,00		AREIA SILTOSA: (Areia fina), marrom rosada e esbranquiçada, com pedregulhos finos a grossos de rocha decomposta; compacta a muito compacta - SOLO RESIDUAL JOVEM.	4,66x10 ⁻⁴
15			27	38						4,43x10 ⁻⁴
16			37	58		422,03	16,45		LIMITE DO FURO -> 16,45m OBS.1 : Paralisação da sondagem na lavagem / tempo	
17									TEMPO (min) / LAVAGEM (m)	
18									10 / 0,26	
									10 / 0,01	
									10 / 0,00	