

ANTONIO GILBERTO SIMÕES DE OLIVEIRA

**Análise da Eficácia dos Dispositivos de Vedação e Drenagem
Utilizados em Fundações Permeáveis de Barragens de Terra**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Geotecnia.

Área de Concentração: Barragens de Terra
Orientador: Prof. Dr. Orencio Monje Vilar

São Carlos
2008

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ANTONIO GILBERTO SIMÕES DE OLIVEIRA**

Dissertação defendida e julgada em 07/11/2008 perante a Comissão Julgadora:



Prof. Titular **ORENCIO MONJE VILAR (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO




Prof. Titular **NÉLIO GAIOTO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado



Engenheiro **JOÃO FRANCISCO ALVES SILVEIRA**
(SBB Engenharia)

Aprovado



Prof. Associado **LAZARO VALENTIN ZUQUETTE**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Geotecnia



Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

*Dedico esse trabalho a todos que
contribuíram diretamente com a
sua elaboração, em especial a
Minha Família, a Marcela e a Tio
Paulo.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde de meus pais.

A minha família, pelo apoio e incentivo de sempre e pelo amor incondicional.

A Marcela, por todo amor e compreensão que contribuíram de forma decisiva no desenvolvimento desta pesquisa. 2008 é o nosso ano!

Ao meu tio Paulo, o maior culpado dessa história! Hoje entendo porque ele insistiu tanto para que eu fizesse o mestrado. Muito Obrigado.

Ao professor Orencio, pela orientação e apoio e, principalmente, pela sua compreensão, fundamental para conclusão do trabalho.

A todos os professores e funcionários da EESC, em especial aos professores Nélio Gaioto e Nelson Aoki e a Maristela, Álvaro e Zé Luis.

Aos grandes amigos do departamento de Geotecnia, em especial a Alexandre, Cleber, Jamal, Neto, Osvaldo e Regis. A nossa união e companheirismo ao longo desses dois anos deixarão saudades.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro a esta pesquisa.

Aos professores da UFBA, Luis Edmundo e Paulo Burgos pela formação acadêmica e pelo apoio técnico durante a elaboração do trabalho.

A todos que contribuíram de alguma forma com esta pesquisa, em especial ao Eng^o Jorge Amorim da EMBASA, por fornecer, sem restrições, os

dados da Barragem de Santa Helena, a Marcelo Castro, pelo apoio e amizade na república e a Francisco Sampaio pela ajuda na digitalização do projeto da Barragem de Santa Helena.

"Aprendi que um homem só tem o direito de olhar um outro de cima para baixo para ajudá-lo a levantar-se."

Gabriel Garcia Márquez

RESUMO

SIMÕES DE OLIVEIRA, A. G. **Análise da Eficácia dos Dispositivos de Vedação e Drenagem Utilizados em Fundações Permeáveis de Barragens de Terra.** 2008. 174 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

A construção de barragens de terra sobre formações geológicas permeáveis constitui um dos mais sérios desafios da engenharia de barragens. Neste tipo de projeto, as principais variáveis que devem ser analisadas são a vazão, o gradiente de saída e a subpressão, todas decorrentes da percolação de água pela fundação. Este trabalho apresenta um estudo acerca da eficácia dos dispositivos de controle da percolação a partir de análises paramétricas realizadas em uma barragem típica utilizando o Método dos Elementos Finitos através do programa SEEP/W. Nestas análises foram variadas as características dos dispositivos e a anisotropia hidráulica do maciço de fundação. Verificou-se que a trincheira de vedação parcial é extremamente ineficaz, que o tapete impermeável à montante apresenta cerca de 60% de eficácia para relações entre o comprimento do tapete e a largura da base da barragem da ordem de 1,70 e que a trincheira de vedação total associada aos dispositivos de drenagem constitui a solução mais eficaz no controle das variáveis vazão, gradiente de saída e subpressão.

Palavras Chave – Barragens, Eficácia, Fundações Permeáveis, Percolação, Dispositivos de Vedação e Drenagem.

ABSTRACT

SIMÕES DE OLIVEIRA, A. G. **Analysis of Effectiveness of Devices for Sealing and Drainage Used on Pervious Foundations of Earth Dams.** 2008. 174 P. Dissertation (Master) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

The construction of earth dams on pervious geologic formations constitutes one of the most serious problems of the engineering of dams. In this type of project, the main variables that must be analyzed are the discharge, the exit gradient and the uplift pressure, all decurrent ones of the water seepage for the foundation. This work presents a study on the effectiveness of devices of control of the seepage from parametric analyses carried through in a typical dam using the Method of the Finite Elements through program SEEP/W. In these analyses the characteristics of the devices and the hydraulic anisotropy of the foundation mass had been varied. It was verified that the cut-off trench of partial is extremely inefficacious, that the impermeable blanket to the sum presents about 60% of effectiveness for relations between the blanket length and the width of the base of the dam of the order of 1.70 and that the cut-off trench of associated to the drainage devices constitutes the solution most effective in the control of the variables discharge, exit gradient and the uplift pressure.

Keywords - Dams, Effectiveness, Pervious Foundations, Seepage, Sealing and Drainage Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Rede De Fluxo Para Barragem Com Fundação Permeável. (Cedergren, 1977)	23
Figura 2 – Exemplo Da Trincheira De Vedação Total	35
Figura 3 – Exemplo Da Trincheira De Vedação Parcial.....	35
Figura 4– Relação Entre A Vazão Percolada E A Profundidade Do Dispositivo (Creager Et Al., 1945)	36
Figura 5 – Exemplo Da Aplicação Da Parede Diafragma	38
Figura 6 – Exemplo Do Tapete Impermeável À Montante	42
Figura 7 - Exemplo Da Aplicação Das Trincheiras/Poços De Alívio.....	44
Figura 8 – Características Da Barragem Analisada Por Lefebvre (Lefebvre, 1981)	45
Figura 9 – Utilização Do Mef Na Análise Da Influência Da Anisotropia No Fs (Lefebvre, 1981)	46
Figura 10 – Influência Da Anisotropia Na Análise Da Eficácia Do Tapete Impermeável À Montante (Lefebvre Et Al., 1981)	47
Figura 11 – Influência Da Anisotropia Na Análise Da Eficácia Da Trincheira De Vedação Parcial (Lefebvre, 1981)	48
Figura 12 – Análise Da Eficácia Da Trincheira De Alívio (Lefebvre, 1981) ...	49
Figura 13 - Esquema De Piezômetro De Tubo Aberto (Cruz, 1996).....	53
Figura 14 - Esquema Do Piezômetro Pneumático	55
Figura 15 – Detalhe Dos Dispositivos De Controle Da Barragem Do Limoeiro (Vargas, 1971)	57
Figura 16 – Detalhe Dos Dispositivos De Controle Da Barragem De Euclides Da Cunha (Vargas, 1971).....	58
Figura 17 – Detalhe Dos Dispositivos De Controle Da Barragem De Graminha (Vargas, 1971)	58
Figura 18 – Eficácia Dos Dispositivos Em Função Da Perda De Carga (Marsal Et Al.,1971).....	60

Figura 19 - Determinação Da Vazão Percolada Através Da Fundação De Barragens Dotadas De Dispositivos De Controle (Marsal Et Al., 1971)..	65
Figura 20 - Relação Entre A Geometria Dos Dispositivos Para Uma Mesma Vazão Resultante (Marsal Et Al., 1971)	66
Figura 21 – Arranjo Geral Da Barragem De Santa Helena.....	72
Figura 22 – Vista Da Barragem De Santa Helena Com Detalhe Para Os Maciços De Terra E O Extravasor Em Concreto.....	72
Figura 23 – Locação Das Sondagens E Das Seções Transversais E Longitudinais	75
Figura 24 – Seção Transversal 06 Do Maciço De Fundação Da Barragem De Santa Helena	77
Figura 25 – Perfil 3d Do Sítio Da Barragem De Santa Helena.....	78
Figura 26 – Seção Típica Da Barragem De Santa Helena	79
Figura 27 – Seção Utilizada No Modelo Computacional.....	81
Figura 28 – Detalhe Da Malha Utilizada Na Validação Do Modelo Computacional.....	81
Figura 29 – Evolução Dos Piezômetros Pneumáticos E Casagrande Em 2005 (Embasa)	82
Figura 30 – Rede De Fluxo Obtida Para A Barragem De Santa Helena Através Do Seep/W	83
Figura 31 – Comparação Dos Resultados Obtidos Através Da Instrumentação Da Barragem De Santa Helena E Do Programa Seep/W.....	84
Figura 32 – Seção Típica Da Barragem Analisada	87
Figura 33 – Forma Dos Elementos Da Malha Do Seep E Seu Respectivo Desempenho	89
Figura 34 – Detalhe Da Malha Quadrada Utilizada Nas Análises Paramétricas	90
Figura 35 – Detalhe Da Condição De Contorno Aplicada À Montante Da Barragem.....	91

Figura 36 - Detalhe Da Condição De Contorno Aplicada À Jusante Da Barragem.....	91
Figura 37 – Detalhe Da Consideração Dos Elementos Infinitos Nas Extremidades Da Malha	92
Figura 38 – Características Da Trincheira De Vedação Utilizada Nas Análises	94
Figura 39 – Características Da Parede Diafragma Utilizada Nas Análises	96
Figura 40 – Características Do Tapete Impermeável Utilizado Nas Análises	97
Figura 41 – Características Do Tapete Drenante Horizontal Utilizado Nas Análises	98
Figura 42 – Características Da Trincheira De Alívio Utilizada Nas Análises ..	99
Figura 43 – Seção Típica Da Barragem Analisada	100
Figura 44 – Análise Da Vazão Para Seção Típica Sem Dispositivos De Controle.....	106
Figura 45 – Análise Do Gradiente Para Seção Típica Sem Dispositivos De Controle.....	106
Figura 46 – Análise Da Subpressão Para Seção Típica Sem Dispositivos De Controle.....	107
Figura 47 – Rede De Fluxo Para Barragem Sem Dispositivos De Controle E Com Anisotropia Hidráulica Do Maciço Da Fundação Igual A 0,1	108
Figura 48 – Análise Da Vazão Para Seção Típica Com Trincheira De Vedação	110
Figura 49 – Análise Do Gradiente Para Seção Típica Com Trincheira De Vedação.....	110
Figura 50 – Análise Da Subpressão Para Seção Típica Com Trincheira De Vedação.....	111
Figura 51 - Eficácia Da Seção Típica Com A Trincheira De Vedação – Análise Da Vazão	113
Figura 52 – Eficácia Da Seção Típica Com A Trincheira De Vedação – Análise Do Gradiente	113

Figura 53 - Eficácia Da Seção Típica Com A Trincheira De Vedação – Análise Da Subpressão	114
Figura 54 - Rede De Fluxo Para Barragem Com Trincheira De Vedação Que Penetra 50% Da Camada Permeável E Com Anisotropia Hidráulica Do Maciço Da Fundação Igual A 0,1.....	115
Figura 55 – Análise Da Vazão Para Seção Típica Com Parede Diafragma ..	117
Figura 56 – Análise Do Gradiente Para Seção Típica Com Parede Diafragma	118
Figura 57 – Análise Da Subpressão Para Seção Típica Com Parede Diafragma	118
Figura 58 – Correlação Entre O Parâmetro Adotado Nesta Pesquisa Para As Imperfeições Do Diafragma E O Parâmetro Adotado Por Marsal Et Al. (1971).....	120
Figura 59 - Eficácia Da Seção Típica Com A Parede Diafragma – Análise Da Vazão	121
Figura 60 - Eficácia Da Seção Típica Com A Parede Diafragma – Análise Do Gradiente.....	121
Figura 61 - Eficácia Da Seção Típica Com A Parede Diafragma– Análise Da Subpressão	122
Figura 62 - Rede De Fluxo Para Barragem Com Parede Diafragma Com $K = 1 \times 10^{-4}$ Cm/S E Com Anisotropia Hidráulica Do Maciço Da Fundação Igual A 0,1	123
Figura 63 – Identificação Dos Parâmetros B (Largura Da Base Da Barragem) E L (Comprimento Do Tapete).....	124
Figura 64 – Análise Da Vazão Para Seção Típica Com Tapete Impermeável À Montante	125
Figura 65 – Análise Do Gradiente Para Seção Típica Com Tapete Impermeável À Montante	126
Figura 66 – Análise Da Subpressão Para Seção Típica Com Tapete Impermeável À Montante	126

Figura 67 - Eficácia Da Seção Típica Com Tapete Impermeável À Montante – Análise Da Vazão	128
Figura 68 - Eficácia Da Seção Típica Com Tapete Impermeável À Montante – Análise Do Gradiente	128
Figura 69 - Eficácia Da Seção Típica Com Tapete Impermeável À Montante – Análise Da Subpressão.....	129
Figura 70 - Rede De Fluxo Para A Barragem Com Tapete Impermeável À Montante Com $L/B = 1,70$ E Com Anisotropia Hidráulica Do Maciço Da Fundação Igual A $0,1$	130
Figura 71 – Análise Da Vazão Para Seção Típica Com Tapete Drenante Horizontal	132
Figura 72 – Análise Do Gradiente Para Seção Típica Com Tapete Drenante Horizontal	132
Figura 73 – Análise Da Subpressão Para Seção Típica Com Tapete Drenante Horizontal	132
Figura 74 - Eficácia Da Seção Típica Com Tapete Drenante Horizontal – Análise Da Vazão	133
Figura 75 - Eficácia Da Seção Típica Com Tapete Drenante Horizontal – Análise Do Gradiente	134
Figura 76 - Eficácia Da Seção Típica Com Tapete Drenante Horizontal – Análise Da Subpressão.....	134
Figura 77 - Rede De Fluxo Para A Barragem Com Tapete Drenante Horizontal Com Anisotropia Hidráulica Do Maciço Da Fundação Igual A $0,1$	136
Figura 78 – Análise Da Vazão Para Seção Típica Com Trincheira De Alívio	137
Figura 79 – Análise Do Gradiente Para Seção Típica Com Trincheira De Alívio	138
Figura 80 – Análise Da Subpressão Para Seção Típica Com Trincheira De Alívio	138
Figura 81 - Eficácia Da Seção Típica Com Trincheira De Alívio – Análise Da Vazão	139

Figura 82 - Eficácia Da Seção Típica Com Trincheira De Alívio – Análise Do Gradiente	139
Figura 83 - Eficácia Da Seção Típica Com Trincheira De Alívio – Análise Da Subpressão	140
Figura 84 - Rede De Fluxo Para Barragem Com Trincheira De Alívio E Com Anisotropia Hidráulica Do Maciço Da Fundação Igual A 0,1	141
Figura 85 – Análise Da Vazão Para Seção Típica Com A Associação Da Trincheira De Vedação, Do Tapete Drenante Horizontal E Da Trincheira De Alívio	143
Figura 86 – Análise Do Gradiente Para Seção Típica Com A Associação Da Trincheira De Vedação, Do Tapete Drenante Horizontal E Da Trincheira De Alívio	143
Figura 87 – Análise Da Subpressão Para Seção Típica Com A Associação Da Trincheira De Vedação, Do Tapete Drenante Horizontal E Da Trincheira De Alívio	144
Figura 88 - Eficácia Da Seção Típica Com A Associação Da Trincheira De Vedação, Do Tapete Drenante Horizontal E Da Trincheira De Alívio – Análise Da Vazão	145
Figura 89 - Eficácia Da Seção Típica Com A Associação Da Trincheira De Vedação, Do Tapete Drenante Horizontal E Da Trincheira De Alívio – Análise Do Gradiente	145
Figura 90 - Eficácia Da Seção Típica Com A Associação Da Trincheira De Vedação, Do Tapete Drenante Horizontal E Da Trincheira De Alívio – Análise Da Subpressão.....	146
Figura 91 - Rede De Fluxo Para A Barragem Com A Associação Da Trincheira De Vedação, Do Tapete Drenante Horizontal E Da Trincheira De Alívio E Com Anisotropia Hidráulica Do Maciço Da Fundação Igual A 0,1	147
Figura 92 – Análises Da Vazão Para Seção Típica Com A Associação Da Parede Diafragma, Do Tapete Drenante Horizontal E Da Trincheira De Alívio	149

Figura 93 – Análise Do Gradiente Para Seção Típica Com A Associação Da Parede Diafragma, Do Tapete Drenante Horizontal E Da Trincheira De Alívio	149
Figura 94 – Análise Da Subpressão Para Seção Típica Com A Associação Da Parede Diafragma, Do Tapete Drenante Horizontal E Da Trincheira De Alívio	150
Figura 95 - Eficácia Da Seção Típica Com A Associação Da Parede Diafragma, Do Tapete Drenante Horizontal E Da Trincheira De Alívio; (A) – Análise Da Vazão	150
Figura 96 - Eficácia Da Seção Típica Com A Associação Da Parede Diafragma, Do Tapete Drenante Horizontal E Da Trincheira De Alívio – Análise Do Gradiente	151
Figura 97 - Eficácia Da Seção Típica Com A Associação Da Parede Diafragma, Do Tapete Drenante Horizontal E Da Trincheira De Alívio – Análise Da Subpressão	151
Figura 98 - Rede De Fluxo Para Barragem Com A Associação Da Parede Diafragma Com $K=1 \times 10^{-4}$ Cm/S, Do Tapete Drenante Horizontal E Da Trincheira De Alívio E Com Anisotropia Hidráulica Do Maciço Da Fundação Igual A 0,1	153
Figura 99 – Análise Da Vazão Para Seção Típica Com A Associação Do Tapete Impermeável À Montante, Do Tapete Drenante Horizontal E Da Trincheira De Alívio	155
Figura 100 – Análise Do Gradiente Para Seção Típica Com A Associação Do Tapete Impermeável À Montante, Do Tapete Drenante Horizontal E Da Trincheira De Alívio	155
Figura 101 – Análise Da Subpressão Para Seção Típica Com A Associação Do Tapete Impermeável À Montante, Do Tapete Drenante Horizontal E Da Trincheira De Alívio	156

Figura 102 - Eficácia Da Seção Típica Com A Associação Do Tapete Impermeável À Montante, Do Tapete Drenante Horizontal E Da Trincheira De Alívio – Análise Da Vazão	157
Figura 103 - Eficácia Da Seção Típica Com A Associação Do Tapete Impermeável À Montante, Do Tapete Drenante Horizontal E Da Trincheira De Alívio – Análise Do Gradiente	157
Figura 104 - Eficácia Da Seção Típica Com A Associação Do Tapete Impermeável À Montante, Do Tapete Drenante Horizontal E Da Trincheira De Alívio – Análise Da Subpressão.....	158
Figura 105 - Rede De Fluxo Para Barragem Com A Associação Do Tapete Impermeável À Montante, Do Tapete Drenante Horizontal E Da Trincheira De Alívio E Com Anisotropia Hidráulica Do Maciço Da Fundação Igual A 0,1	159

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Programas Que Empregam O Mef Para Solucionar Problemas De Fluxo	68
Tabela 2 – Cargas Piezométricas Máximas Em 2005	82
Tabela 3 – Cargas Totais Obtidas Com O Seep/W	83
Tabela 4 – Barragens Brasileiras Construídas Sobre Fundações Altamente Permeáveis	87
Tabela 5 – Principais Características Da Barragem Analisada	87
Tabela 6 - Resultados Obtidos Para A Barragem Sem Dispositivos De Controle.....	105
Tabela 7 – Resultados Obtidos Para A Barragem Com Trincheira De Vedação	109
Tabela 8 – Comparação Entre Os Resultados Obtidos Nesta Pesquisa E Os Calculados A Partir Da Equação De Marsal Et Al. (1971).....	112
Tabela 9 - Resultados Obtidos Para A Barragem Com Parede Diafragma ..	117
Tabela 10 - Comparação Entre Os Resultados Obtidos Nesta Pesquisa E Os Calculados A Partir Da Equação De Marsal Et Al. (1971).....	119
Tabela 11 - Resultados Obtidos Para A Barragem Com Tapete Impermeável À Montante	125
Tabela 12 - Comparação Entre Os Resultados Obtidos Nesta Pesquisa E Os Calculados A Partir Da Equação De Marsal Et Al. (1971).....	127
Tabela 13 - Resultados Obtidos Para A Barragem Com Tapete Drenante Horizontal	131
Tabela 14 - Resultados Obtidos Para A Barragem Com Trincheira De Alívio	137
Tabela 15 - Resultados Obtidos Para A Barragem Com A Associação Da Trincheira De Vedação, Do Tapete Drenante Horizontal E Da Trincheira De Alívio	142

Tabela 16 - Resultados Obtidos Para A Barragem Com A Associação Da Parede Diafragma, Do Tapete Drenante Horizontal E Da Trincheira De Alívio	148
Tabela 17 - Resultados Obtidos Para A Barragem Com A Associação Do Tapete Impermeável À Montante, Do Tapete Drenante Horizontal E Da Trincheira De Alívio	154
Tabela 18 - Equações Para Determinação Da Eficácia Dos Dispositivos De Controle Para Anisotropia Hidráulica Igual A 0,1.....	161
Tabela 19 - Equações Para Determinação Da Eficácia Dos Dispositivos De Controle Para Anisotropia Hidráulica Igual A 0,02	162
Tabela 20 - Equações Para Determinação Da Eficácia Dos Dispositivos De Controle Para Anisotropia Hidráulica Igual A 1	163
Tabela 21 - Equações Para Determinação Da Eficácia Dos Dispositivos De Controle Para Anisotropia Hidráulica Igual A 10.....	164

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	15
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 - FLUXO DE ÁGUA EM MEIOS POROSOS	19
2.2 - EQUAÇÃO DE FLUXO	20
2.2.1 - <i>Solução da Equação de Laplace</i>	22
2.3 - PERCOLAÇÃO EM BARRAGENS COM FUNDAÇÃO PERMEÁVEL.....	23
2.4 - CONTROLE DA PERCOLAÇÃO EM BARRAGENS	29
2.4.1 - <i>Trincheira de Vedação</i>	33
2.4.2 - <i>Parede Diafragma</i>	37
2.4.3 - <i>Cortina de Injeção</i>	39
2.4.4 - <i>Tapete Impermeável à Montante</i>	41
2.4.5 - <i>Trincheiras / Poços de Alívio</i>	43
2.5 - INFLUÊNCIA DA ANISOTROPIA NA PERCOLAÇÃO	44
2.6 - AÇÃO DA SUBPRESSÃO NO MACIÇO DA BARRAGEM.....	49
2.7 - INSTRUMENTAÇÃO EM BARRAGENS	51
2.7.1 - <i>Piezômetros</i>	52
2.7.1.1 - <i>Piezômetro de tubo aberto</i>	52
2.7.1.2 - <i>Piezômetro pneumático</i>	54
2.8 - METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA EFICÁCIA DOS DISPOSITIVOS DE VEDAÇÃO E DRENAGEM	56
2.8.1 - <i>Método dos Elementos Finitos (MEF)</i>	67

3 - VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL.....	71
4 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	85
4.1 - SEÇÃO TÍPICA DA BARRAGEM	86
4.2 - MODELO COMPUTACIONAL UTILIZADO	88
4.2.1 - <i>Condições de Contorno</i>	90
4.3 - DISPOSITIVOS ANALISADOS.....	93
4.3.1 - <i>Trincheira de Vedação</i>	93
4.3.2 - <i>Parede Diafragma</i>	94
4.3.3 - <i>Tapete Impermeável à Montante</i>	97
4.3.4 - <i>Tapete Drenante Horizontal</i>	98
4.3.5 - <i>Trincheira de Alívio</i>	99
4.4 - METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA EFICÁCIA DOS DISPOSITIVOS .	100
5 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	103
5.1 - SEÇÃO TÍPICA SEM DISPOSITIVOS DE CONTROLE	105
5.2 - SEÇÃO TÍPICA COM TRINCHEIRA DE VEDAÇÃO	109
5.3 - SEÇÃO TÍPICA COM PAREDE DIAFRAGMA	116
5.4 - SEÇÃO TÍPICA COM TAPETE IMPERMEÁVEL À MONTANTE.....	124
5.5 - SEÇÃO TÍPICA COM TAPETE DRENANTE HORIZONTAL	131
5.6 - SEÇÃO TÍPICA COM TRINCHEIRA DE ALÍVIO	137
5.7 - SEÇÃO TÍPICA COM TRINCHEIRA DE VEDAÇÃO, TAPETE DRENANTE HORIZONTAL E TRINCHEIRA DE ALÍVIO	142

5.8 - SEÇÃO TÍPICA COM PAREDE DIAFRAGMA, TAPETE DRENANTE HORIZONTAL E TRINCHEIRA DE ALÍVIO	148
5.9 - SEÇÃO TÍPICA COM TAPETE IMPERMEÁVEL À MONTANTE, TAPETE DRENANTE HORIZONTAL E TRINCHEIRA DE ALÍVIO	154
5.10 - ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS	160
6 - CONCLUSÕES.....	165
REFERÊNCIAS	169

1 - INTRODUÇÃO

A conscientização em relação à limitação dos recursos naturais, aliada à crescente demanda dos mesmos, tem conduzido a sociedade a uma exploração de modo mais racional e otimizada, de forma a reduzir o desperdício. Os estudos desenvolvidos para a implantação de barragens, avaliando os possíveis aproveitamentos da água e da bacia hidrográfica em que a mesma está inserida, é uma ferramenta fundamental neste contexto.

As barragens são estruturas necessariamente estanques e estáveis, construídas para armazenamento de água para diversas finalidades, como consumo humano, irrigação, aproveitamento hidrelétrico, regularização de rios, navegação, dentre outras. Tais estruturas são, na maioria das vezes, de concreto (convencional ou compactado com rolo) ou de aterro (terra ou enrocamento), podendo ser assentadas em diferentes tipos de fundações (solo ou rocha).

A construção de barragens sobre fundações que apresentam características geotécnicas desfavoráveis, como baixa resistência, alta permeabilidade e alta compressibilidade, constitui um dos mais sérios desafios da engenharia de barragens. O problema começa com a dificuldade de se formular um modelo geotécnico que corresponda à realidade e termina com a necessidade de se adotar soluções que sejam as mais econômicas possíveis, sem que haja o comprometimento da segurança da obra.

Neste contexto, foram analisadas as barragens de terra assentadas sobre fundações permeáveis, mais precisamente sobre formações geológicas constituídas de aluviões arenosos. O objetivo foi determinar a eficácia dos dispositivos de vedação e drenagem utilizados nestas obras de forma a identificar qual o dispositivo, ou qual a associação destes, é mais eficaz no controle da percolação. Para tanto foram realizadas análises paramétricas através de um modelo computacional elaborado com base no método dos elementos finitos, através do programa SEEP/W. O Método dos Elementos Finitos (MEF) permite analisar problemas com materiais heterogêneos e com condições de contorno bastante complexas. Este método é normalmente empregado para estudos das condições de fluxo em barragens de terra através de análises bidimensionais com base nas características de seções transversais representativas do problema.

A validação do modelo computacional utilizado foi realizada através da comparação dos resultados obtidos neste trabalho com os dados da instrumentação da Barragem de Santa Helena. Esta barragem foi construída ao longo do rio Jacuípe, no município de Camaçari, na Bahia, cujas principais características são apresentadas no capítulo 3 desta dissertação.

No projeto de uma grande barragem dificilmente a solução será o abandono do local de barramento por falta de condições adequadas de fundação, a menos que haja um local próximo, com condições nitidamente melhores e com indiscutível vantagem econômica. De uma forma geral, é

possível construir uma barragem de terra sobre quase todos os tipos de fundações, desde que o projeto se adapte convenientemente às condições oferecidas pelo sítio. Neste caso, é a análise econômica das diversas alternativas, concebidas com o intuito de contornar os problemas apresentados e garantir a funcionalidade e a segurança da barragem, que apontará a solução definitiva do projeto.

As análises paramétricas apresentadas neste trabalho, assim como as equações obtidas para determinação da eficácia dos dispositivos de controle, visaram fundamentar tecnicamente os estudos preliminares feitos durante a elaboração de projetos de barragens de terra assentadas sobre fundações permeáveis. Vale salientar que estas análises foram baseadas apenas nos fatores técnicos que envolvem o problema. Os condicionantes práticos, tais como profundidade do lençol freático, disponibilidade de recursos naturais, disponibilidade de equipamentos, dentre outros, deverão ser analisados para cada caso específico de forma a compatibilizar os condicionantes técnicos, práticos e econômicos.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Fluxo de Água em Meios Porosos

O estudo do fenômeno de percolação de fluidos em meios porosos é essencial em diversas aplicações geotécnicas, como na estabilidade de taludes, em projetos de barragens, no controle de águas subterrâneas, dentre outras.

Na quantificação da percolação de água através dos solos, deve-se observar que qualquer partícula de fluido, em repouso ou movimento, possui uma carga total resultante do somatório de três cargas distintas: carga de elevação (h_e), carga piezométrica (h_p) e carga cinética (h_c). A parcela da carga cinética é desprezível em relação às outras parcelas, pois as velocidades de percolação são muito baixas (Cedergren, 1977). Portanto, a carga total utilizada nos estudos da percolação em solos, desconsiderando a parcela cinética, é apresentada na Equação 1.

$$h = h_e + h_p$$

Equação 1

A carga de elevação (h_e) é a diferença de cota entre o ponto considerado e a cota definida como nível de referência. A carga de pressão (h_p) equivale à própria subpressão do ponto considerado, expressa em altura de coluna d'água. A diferença de carga total entre dois pontos é responsável por gerar e manter o escoamento de água através do solo.

2.2 - Equação de Fluxo

As análises de percolação de água através da fundação de barragens de terra foram feitas com base na Lei de Darcy, válida para fluxos em regime laminar, cuja equação é apresentada a seguir.

$$Q = k.i.A$$

Equação 2

Onde,

Q = vazão ($L^3.T^{-1}$);

k = coeficiente de permeabilidade ($L.T^{-1}$).

i = gradiente hidráulico ($L.L^{-1}$); e

A = área da seção transversal normal à direção do fluxo (L^2).

Nesta Lei o coeficiente de permeabilidade k pode ser interpretado como a velocidade de escoamento por área unitária sob um gradiente hidráulico unitário.

O fluxo de água através de um solo é expresso pela Equação de Laplace, resultado da aplicação da equação de conservação da massa, conjugada com a Lei de Darcy, observando-se as seguintes hipóteses básicas:

- o solo é homogêneo;
- os vazios estão saturados com água;
- durante o fluxo não ocorre adensamento ou expansão do solo; e
- as partículas do solo e a água são incompressíveis.

A expressão geral do fluxo laminar tridimensional em solos é apresentada na Equação 3.

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

Equação 3

Onde,

k_x, k_y, k_z = coeficientes de permeabilidade nas direções x, y e z , respectivamente;

h = carga total;

e = índice de vazios;

S = grau de saturação; e

t = tempo.

No caso de análises de barragens de terra, o fluxo através do maciço da barragem e da fundação ocorre em um único plano (fluxo bidimensional), sob regime permanente e na condição de solo saturado. Admitindo que a percolação nestes casos se dê sem variações volumétricas, a equação geral do fluxo reduz-se a:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Equação 4

Supondo ainda que o solo seja isotrópico em relação à permeabilidade, ou seja, o coeficiente de permeabilidade é o mesmo em todas as direções, chega-se à Equação de Laplace apresentada a seguir:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Equação 5

2.2.1 - Solução da Equação de Laplace

A solução da Equação de Laplace, estando os eixos orientados segundo as direções principais de permeabilidade, pode ser representada por duas famílias de curvas, linhas de fluxo e linhas equipotenciais, que se interceptam com ângulo reto formando a chamada rede de fluxo.

As linhas de fluxo representam os caminhos ao longo do qual a água pode escoar através da seção transversal e as linhas equipotenciais representam o lugar geométrico dos pontos de mesma quantidade de energia ou carga hidráulica. Redes de fluxos são normalmente utilizadas para análises em duas dimensões ou nos casos em que há simetria axial, mas esta não é uma limitação deste método, exceto em casos especiais. Segundo Lambe (1969), o método das redes de fluxo permite determinar parâmetros muito úteis para a engenharia de solos, tais como vazão, gradiente hidráulico e distribuição da subpressão.

Dependendo das condições de contorno, o fluxo pode ser classificado como confinado, quando todas as condições são previamente conhecidas, ou não confinado.

As técnicas de traçado das redes de fluxo permitem a consideração da anisotropia e das heterogeneidades. O traçado destas redes requer experiência, sendo úteis às recomendações propostas por Casagrande (1937) e Cedergren (1937).

A Figura 1 mostra um exemplo de rede de fluxo em que uma barragem de terra está fundada em um solo 10 vezes mais permeável que o aterro. Segundo Cedergren (1977), nos casos de barragens de terra sobre fundação permeável, a forma da rede de fluxo é controlada mais pela fundação do que pelo maciço da barragem. Para este autor, uma boa forma de traçar redes de fluxo nesta situação é considerar, inicialmente, o maciço da barragem como impermeável.

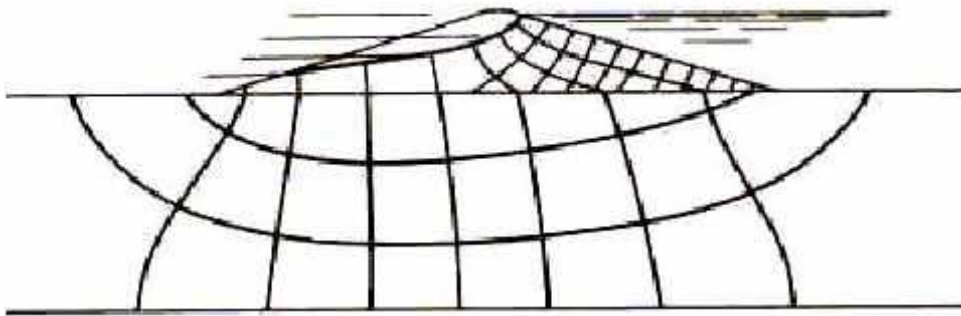


Figura 1 - Rede de fluxo para barragem com fundação permeável. (Cedergren, 1977)

2.3 - Percolação em Barragens com Fundação Permeável

Barragens com fundação constituída por materiais muito mais permeáveis que o maciço sofre efeitos consideráveis na percolação (Uginchus, 1960). Estes efeitos aumentam o número de fatores que

influenciam no processo, tais como a relação entre os coeficientes de permeabilidade da fundação e do maciço, a espessura da camada permeável da fundação, as condições geológicas e hidrogeológicas e a posição do nível d'água.

Para Gaioto (1992), o fenômeno da percolação de água é um dos principais agentes causadores de problemas para os profissionais envolvidos com projeto, construção e operação de barragens de terra em virtude dos efeitos das subpressões, das perdas de resistência do solo por acréscimo do grau de saturação e dos processos de erosão à jusante da barragem. Todavia, é praticamente impossível construir uma barragem 100% estanque, sendo necessário, portanto, definir e analisar métodos de controle desta percolação.

Neste sentido, os acidentes de barragens têm sido causados principalmente pela ação da água através dos efeitos nocivos provocados pelo seu fluxo não controlado (Cruz, 1996). Sowers (1962) ensina que a percolação não controlada resulta em dois tipos de problemas na estrutura hidráulica, quais sejam, o excesso de vazamento e o excesso de pressão ou gradiente. Para este autor, o controle da percolação consiste exatamente na correção das condições que geram estes problemas.

Conforme descrito anteriormente, esta pesquisa analisou a eficácia das barragens de terra assentadas sobre fundações constituídas por formações aluvionares arenosas que caracterizam-se pela alta permeabilidade. Segundo

Sherard (1967), as hipóteses adotadas nas análises de percolação apresentam resultados mais satisfatórios em maciços de areia ou pedregulho, pois a vazão é relativamente maior, os vazios não são preenchidos por ar e a influência da capilaridade é menor.

Segundo Medeiros (1986) apud Minter (1973) e Carvalho (1981 e 1982), na região do nordeste do Brasil, cerca de 45% da área total é ocupada por rochas sedimentares (mais permeáveis que as rochas cristalinas) e por aluviões, o que reafirma a necessidade do entendimento do mecanismo de percolação que atua nestas formações.

De acordo com Cruz (1996), em barragens com estas características o fluxo pela fundação é majoritário em relação ao fluxo pelo maciço da barragem. As maiores preocupações, nestes casos, estão relacionadas com a potencialidade de liquefação da areia e com o controle da percolação pela fundação.

A liquefação da areia ocorre quando a tensão efetiva decresce até anular-se em um ponto da camada de solo devido ao aumento progressivo da carga piezométrica. O gradiente hidráulico que provoca a liquefação da areia (gradiente crítico) pode ser calculado a partir da Lei de Darcy igualando-se a tensão efetiva a zero, obtendo-se a Equação 6 apresentada a seguir (Cedergren, 1977):

$$i_{crit} = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w}$$

Equação 6

O valor do gradiente crítico é, portanto, próximo da unidade, pois o peso específico submerso dos solos é da ordem de grandeza do peso específico da água.

Quanto ao fluxo pela fundação, Sowers (1962) ensina que a percolação da água no solo pode gerar quatro tipos de efeitos, a saber:

- a velocidade da água tende a desalojar as partículas da estrutura do solo e causar o rearranjo ou migração dos finos para os vazios;
- o fluxo associado à diferença de pressão pode elevar parcelas da massa de solo, criando uma condição de areia movediça;
- a pressão interna da água do solo pode reduzir a resistência desenvolvida pelo atrito interno e provocar o enfraquecimento do solo e até mesmo a ruptura por cisalhamento; e
- a elevação dos gradientes hidráulicos pode provocar a erosão interna da massa de solo e gerar o processo conhecido como *piping*.

O desenvolvimento do processo de erosão interna (*piping*) ocorre de jusante para montante, seguindo caminhos preferenciais, tais como,

contatos de solos diferentes e ao longo de tubulações enterradas e juntas de estratificação. Sendo assim, o pé do talude de jusante da barragem é o local mais crítico para a formação do *piping*, pois nesta região os gradientes hidráulicos são elevados e os níveis de tensão confinante são baixos (Saré, 2003). Este fenômeno pode ser evitado com a redução dos gradientes de saída através da utilização de dispositivos de drenagem

Sherard et al. (1963) apresentaram um estudo sobre a influência das propriedades do solo e do método de construção do aterro em relação à resistência ao *piping*, no qual demonstraram que a plasticidade do solo é o fator mais importante, superando o método de compactação do aterro.

Segundo Souza Pinto (2000), quando o fluxo é ascendente, como na saída da água junto ao pé do talude de jusante de uma barragem de terra apoiada sobre solos arenosos, pode acontecer também o fenômeno da areia movediça (*sand boil*). Para tanto, a condição teórica é que o gradiente atinja o valor crítico 1. Na prática, valores da ordem de 0,5 a 0,8 já são considerados elevados e prenunciadores da areia movediça.

Cruz (1996) defende que a arte de projetar barragens está associada à arte de controlar o fluxo de água através do corpo e da fundação do maciço, evitando, assim, qualquer chance do solo ser carregado pela água. Para este autor, a avaliação da quantidade de água de percolação que pode ser admitida pelo conjunto maciço-fundação é feita com base na finalidade da barragem. Barragens para controle de cheias ou para hidrelétricas não

devem ter vazão superior a 0,08 l/s por metro de barragem, e barragens para abastecimento de água e irrigação não devem ter vazão superior a 0,1% da média das vazões naturais. Estes valores são confirmados por Silveira (2006) que defende que vazões acima de 0,08 l/s/m são bastante elevadas e exigem a realização de tratamentos para redução das infiltrações.

Para Marsal et al. (1971), o volume de água admissível que poderá percolar através da fundação de uma barragem dependerá do valor da água no projeto em estudo. Este valor é função das características do projeto, como por exemplo, capacidade do reservatório e uso e disponibilidade da água. A análise deste volume admissível pode ser realizada em função de fatores econômicos, da estabilidade da barragem e dos problemas de erosão interna provocada pela percolação.

Sendo assim, os estudos da percolação pela fundação visam antecipar vazões e pressões na água intersticial que venham se estabelecer no enchimento do reservatório e, ao mesmo tempo, fornecer os dados necessários para o dimensionamento dos sistemas de vedação. Estes dados servem também para verificar o dimensionamento dos sistemas de drenagem e definir os gradientes de saída à jusante.

Porto (2002) ensina que a vazão é uma das grandezas de engenharia mais importante na avaliação da segurança de estruturas hidráulicas, isto porque infiltrações súbitas em fundações geram perguntas sem respostas

imediatas, como: qual a origem da água de infiltração? a vazão é compatível com as hipóteses de projeto? quais providências devem ser tomadas?

2.4 - Controle da Percolação em Barragens

As estatísticas de acidentes e rupturas de barragens demonstram que a causa majoritária está, em geral, atribuída à falta de um sistema eficiente de controle da percolação (Cruz, 1996).

O fluxo da água através de um meio poroso exerce forças devido ao atrito entre a água e as paredes dos vazios do solo, denominada de força de percolação. Esta força é apresentada na Equação 7:

$$j = \frac{\Delta h \cdot \gamma_w \cdot A}{A \cdot L} = \frac{\Delta h}{L} \cdot \gamma_w = i \cdot \gamma_w$$

Equação 7

Onde,

j = força de percolação;

Δh = diferença de carga;

γ_w = peso específico da água;

A = área da seção transversal; e

L = comprimento total que a água percorre.

A força de percolação possui uma unidade semelhante ao peso específico e atua da mesma forma que a força gravitacional.

De uma forma geral, a maioria das rupturas causadas pela percolação pode ser classificada em duas categorias; aquelas que ocorrem quando partículas de solo migram em direção a região externa do aterro, causando

piping ou rupturas geradas por erosões e aquelas causadas por padrões de percolação não controlados que conduzem à saturação do solo e à elevação da subpressão e da força de percolação (Cedergren, 1977).

As características geotécnicas ideais para a fundação de uma barragem são baixa permeabilidade, elevada resistência e baixa deformabilidade. Entretanto, na grande maioria dos casos, o que ocorre é justamente o contrário. Para Cruz (1996), maciços com “permeabilidade média” inferior a 5×10^{-4} cm/s não necessitam de tratamentos para redução da permeabilidade.

Segundo Cruz (1996), a vedação da fundação pode constituir um dos itens mais difíceis do projeto e da execução da obra, porque, em caso geral, as feições da fundação que necessitam vedação encontram-se saturadas e, quando exigem remoção, poderão envolver sistemas de rebaixamento do lençol freático. Para este autor, os condicionantes que podem determinar qual o dispositivo mais adequado no tratamento das fundações em aluvião arenoso são:

- materiais de construção disponíveis
- viabilidade econômica da execução de trincheiras de vedação efetivas, ou seja, apoiadas em camada inferior ao aluvião de baixa permeabilidade;
- eficácia de cortinas impermeabilizantes, delgadas e sem a necessária penetração nas camadas inferiores de solo ou rocha;

- dificuldades de acesso ao local da obra, que poderiam onerar as soluções adotadas que envolvessem equipamentos sofisticados para execução de pequenos serviços (diafragmas plásticos, por exemplo);
- desvio do rio; e
- necessidade de reduzir o fluxo pela camada arenosa.

Segundo Creager et al. (1945), a preparação de uma fundação em solo precisa atingir cinco objetivos:

- fornecer ampla capacidade de suporte;
- prevenir contra deslizamentos;
- prevenir contra o excesso de percolação sob a barragem;
- prevenir contra *piping*; e
- prevenir contra a erosão hidráulica.

Os projetos de dispositivos para o controle da percolação através da fundação têm como objetivos principais a redução da quantidade de percolação, a minimização ou controle dos gradientes de saída e a redução das subpressões. Sherard et al. (1963) e Assis et al. (2003) classificam os dispositivos para o controle da percolação através das fundações de uma barragem pelo próprio efeito que têm sobre a percolação:

- dispositivos que eliminam ou reduzem à percolação a valores desprezíveis através da construção de “barreiras impermeáveis completas” até o horizonte impermeável; (ex.: Trincheira de Vedação Total, Parede Diafragma e Cortina de Injeção);
- dispositivos que reduzem a percolação mediante a construção de uma “barreira impermeável incompleta” que aumenta o comprimento das linhas de fluxo, proporcionando o aumento da perda de carga e a redução das subpressões, do gradiente hidráulico e da vazão; (ex.: Trincheira de Vedação Parcial e Tapete Impermeável à Montante); e
- dispositivos que apenas controlam a percolação mediante a construção de drenos. Este método é praticamente imprescindível e pode ser associado aos dois anteriores. (ex.: Trincheiras ou Poços de Alívio).

Estes métodos serão analisados isoladamente e de forma associada, que é a mais utilizada na prática.

Segundo Cedergren (1977), dois ou mais dispositivos para controle da percolação são empregados em grandes barragens, principalmente quando estas são construídas sobre formações aluvionares profundas ou sobre formações rochosas extremamente fraturadas.

Estes dispositivos podem apresentar imperfeições decorrentes de danos na instalação, utilização de material inadequado, corrosão, dentre outros. Quando se analisa problemas de percolação de água através de dispositivos imperfeitos, é preciso avaliar quais os efeitos que estas imperfeições geram neste processo. Para Ambraseys (1963), o grau de imperfeição é definido como a percentagem de área por unidade de comprimento que, por alguma razão, não está estanque. Em paredes diafragmas de concreto moldado "in situ", por exemplo, estas imperfeições podem ocorrer em razão das juntas existentes entre os elementos individuais de concreto.

Os principais dispositivos utilizados no controle da percolação através da fundação de barragens de terra são:

- trincheira de vedação;
- parede diafragma;
- cortina de injeção;
- tapete impermeável à montante;e
- trincheira / poços de alívio.

2.4.1 - Trincheira de Vedação

Nesta técnica, o solo de baixa permeabilidade é compactado em trincheiras escavadas na fundação permeável da barragem, normalmente sob o núcleo do maciço. O material escavado é substituído por um aterro

compactado nas mesmas condições do núcleo. O Bureau of Reclamation (2003) explica que este tipo de solução é aplicado em fundações permeáveis de pequena profundidade.

A trincheira de vedação pode ser total ou parcial, ou seja, ela pode atravessar todo o estrato permeável ou penetrar apenas em uma percentagem do mesmo, respectivamente. Segundo Cruz (1996), a posição ideal da trincheira é a central.

Cruz (1996) ensina que a trincheira de vedação total é a única solução que pode ser considerada eficaz, pois intercepta integralmente a feição permeável onde se deseja interromper o fluxo.

Esta solução apresenta as seguintes vantagens:

- permite a inspeção visual tanto das paredes como do fundo da escavação;
- permite um bom preparo superficial da base da trincheira;
- permite o uso dos equipamentos convencionais de escavação e terraplenagem; e
- possibilita o preenchimento da trincheira com materiais selecionados, compactados sob controle tecnológico.

A Figura 2 apresenta um exemplo da utilização da trincheira de vedação total na fundação de uma barragem de terra.

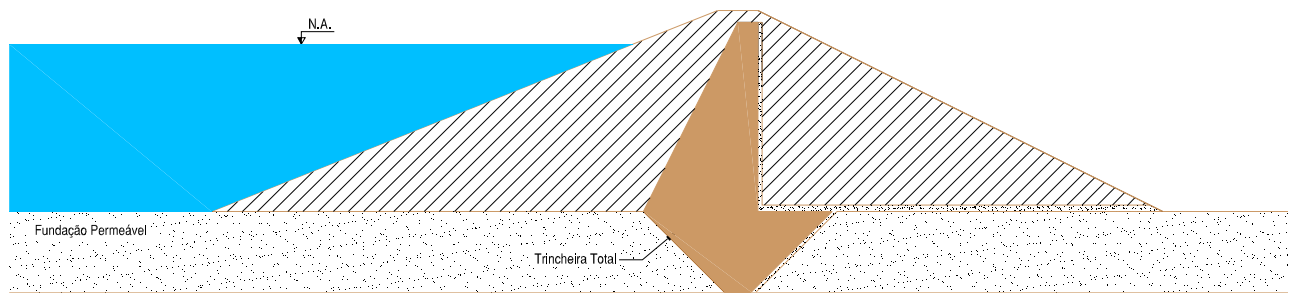


Figura 2 – Exemplo da trincheira de vedação total

A trincheira de vedação parcial aumenta o caminho de percolação e, conseqüentemente, aumenta a perda de carga e diminui a subpressão. Um exemplo da sua utilização é apresentado na Figura 3.

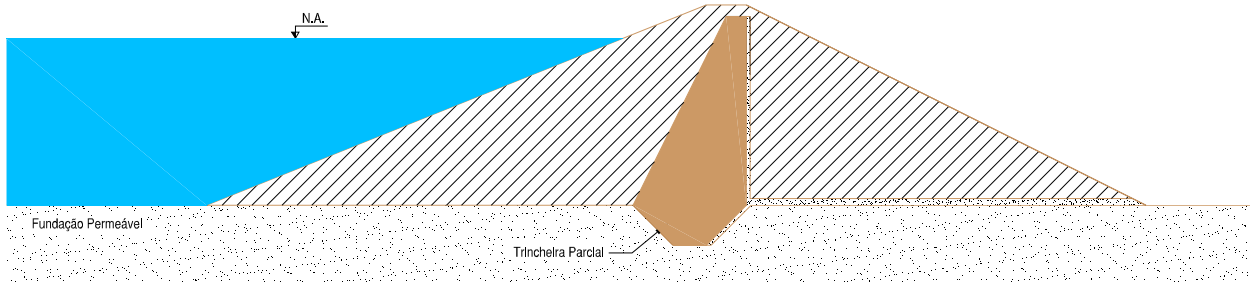


Figura 3 – Exemplo da trincheira de vedação parcial

Quando a permeabilidade dos solos de fundação for praticamente a mesma em todas as direções, sem decrescer com a profundidade, a trincheira parcial (Figura 3) será pouco eficaz na redução das vazões ou subpressões (Creager et al., 1945; Sowers, 1962; Cruz, 1996). A teoria e a prática mostram que seria necessário penetrar 95% da espessura total da camada de solos homogêneos permeáveis para se ter um resultado apreciável. Nos casos em que o coeficiente de permeabilidade do solo de

fundação decrescer com a profundidade, a trincheira parcial poderá ser muito útil (Assis et al., 2003).

Sowers (1962) mostra que a trincheira que se estender até 50% da espessura da camada permeável da fundação reduzirá a vazão em somente 15%; para 80% de penetração na camada permeável, a redução da vazão será de aproximadamente 50%.

Creager et al. (1945) apresentaram uma curva que relaciona a vazão percolada com a profundidade da trincheira, conforme Figura 4 apresentada a seguir. Esta curva foi obtida com base nos resultados de pesquisas realizadas por Creager e por ensaios realizados para a Barragem de Kingsley, em Nebraska, nos EUA.

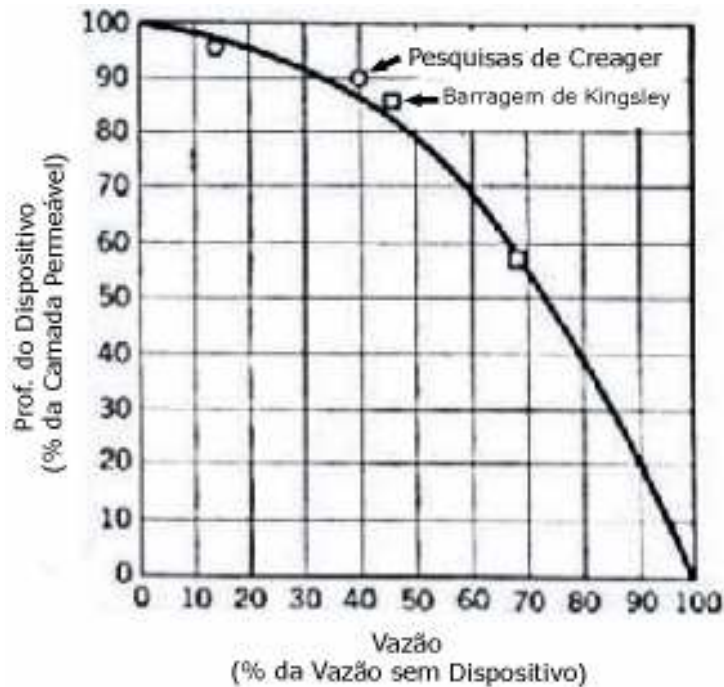


Figura 4– Relação entre a vazão percolada e a profundidade do dispositivo (Creager et al., 1945)

A Figura 4 mostra a baixa eficácia da trincheira parcial, pois pequenas variações na profundidade do dispositivo geram um acréscimo significativo na vazão.

Para Marsal et al. (1971), nas trincheiras de vedação total ou parcial, os principais fatores que determinam o custo da solução são a estabilidade dos taludes escavados e a forma de controle do fluxo de água.

2.4.2 - Parede Diafragma

Segundo Cruz (1996) e Gaioto (2003), a parede diafragma pode ser rígida, plástica, em colunas injetadas ou em colunas secantes de concreto, e devem ser construídas sob a zona do núcleo das barragens.

A parede diafragma possui normalmente 1 a 3 m de espessura e a profundidade é limitada pelo tipo de equipamento de escavação, pela compacidade do material de fundação e pela presença de matacões. A estabilidade das paredes da trincheira escavada é normalmente mantida com o uso de lama bentonítica e o preenchimento da escavação pode ser feito com concreto (diafragma rígido), ou solo-cimento (diafragma plástico), dentre outros.

Os diafragmas plásticos devem ser utilizados no tratamento de fundações em areias e aluviões areno-argilosos submersos, quando o custo do rebaixamento da água para execução da trincheira de vedação for excessivo. A execução destes diafragmas só será efetiva se a rocha

subjacente for impermeável ou se o tratamento penetrar 1 a 2 m em uma camada de baixa permeabilidade, ou seja, com coeficiente de permeabilidade pelo menos 10 a 100 vezes menor do que o coeficiente de permeabilidade da areia (Cruz, 1996).

Dentre os tipos de paredes diafragma destacam-se os diafragmas plásticos, pois se adequam melhor às deformações do maciço da barragem, tornando-os menos susceptível ao trincamento. A Figura 5 ilustra a utilização deste tipo de solução.

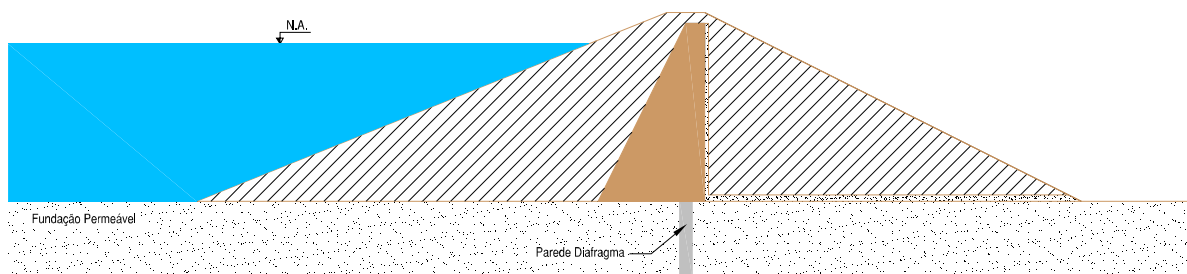


Figura 5 – Exemplo da aplicação da parede diafragma

Para Cruz (1996), diafragmas rígidos, diafragmas plásticos, colunas injetadas, colunas secantes de concreto, entre outras soluções, têm sido consideradas eficientes no controle do fluxo em formações arenosas e em cascalho. Entretanto, a experiência brasileira é pobre nesse caso e essas soluções devem ser avaliadas com muita atenção.

Casagrande (1961) explica que o sucesso das paredes diafragmas depende da obtenção de um alto grau de perfeição do dispositivo, de um bom engaste na base do diafragma com o estrato impermeável e uma

conexão firme e permanente com a zona impermeável no topo do diafragma. Pequenas aberturas nestes dispositivos, na base ou no topo, podem acarretar em um grande fluxo de água, reduzindo substancialmente a sua eficácia.

2.4.3 - Cortina de Injeção

Para Cruz (1996) e Gaioto (2003), a cortina de injeção pode ser utilizada em maciços rochosos através da implantação de uma ou mais linhas de furos executados por meio de equipamento rotativo ou roto-percussivo, preenchidos por injeção de calda, geralmente de cimento. Neste processo, busca-se dotar o maciço injetado de coeficiente de permeabilidade médio inferior a 10^{-4} cm/s.

A eficácia da cortina depende ainda de um adequado engaste na rocha. Qualquer pequena deficiência na ligação reduz drasticamente sua eficácia.

Segundo Cedergren (1977), as cortinas de injeção não são totalmente simples e seguras, pois a calda de cimento não pode ser injetada em poros menores do que 1,0 mm. Para superar essa dificuldade, tem sido usada a injeção química que possui uma fluidez aproximadamente igual a da água.

A cortina de injeção requer furos espaçados de 2 a 3 metros, e geralmente a injeção é feita com a técnica do "tube a manchettes", que permite a injeção em diferentes profundidades.

Segundo Casagrande (1961), a utilização da cortina de injeção com apenas uma linha de furos, sem drenagem, pode consistir em uma solução bastante insegura. Em um sistema de controle da percolação composto de uma cortina de injeção e de uma linha de poços de drenagem, é comum separar as funções destes dois elementos, ou seja, a cortina fica responsável por controlar a vazão e a drenagem fica responsável por aliviar a subpressão. Todavia Casagrande (1961) explica que não há como separar estes dois efeitos desta maneira. Para este autor, a redução da vazão obtida com a implantação da cortina de injeção também reduz a subpressão à jusante da barragem.

Dessa forma, o objetivo da cortina de injeção não é criar uma barreira que impeça o fluxo de água, mas propiciar uma redução substancial da permeabilidade na zona injetada de modo a reduzir o fluxo a valores considerados admissíveis para um determinado projeto (Marsal et al., 1971).

As injeções se processam através de numerosas rupturas hidráulicas que permitem a penetração da calda, dificultando a passagem das águas de percolação. Se a camada for homogênea, essas rupturas ocorrem segundo planos verticais, ou seja, em planos onde atuam as menores tensões de compressão. A penetração da calda nessas fendas verticais provoca uma compressão dos materiais adjacentes, tornando-os mais compactos e menos permeáveis.

As injeções têm, portanto, um duplo efeito: aumentar o caminho de percolação, forçando a água a contornar esses inúmeros planos injetados e diminuir a própria permeabilidade do meio entre esses planos. É usual que a primeira injeção seja feita com uma mistura mais viscosa e aplicada nos furos das extremidades da cortina. Nos furos intermediários e centrais, a mistura tende a ficar cada vez menos viscosa.

O volume da mistura que será injetada é estimado com base na porosidade do material da fundação, no tempo de pega da mistura e em experiências anteriores. Esta mistura, em geral, é formada por argila, cimento, bentonita e aditivos, como silicato de sódio e areia fina. O controle da injeção é feito com base no consumo da mistura, na pressão de injeção, em observações piezométricas, na amostragem do material e etc (Marsal et al., 1971).

O fato das injeções tornarem mais rígido o trecho de fundação tratado é uma questão que deve ser considerada no projeto de forma a compatibilizar as deformações do conjunto maciço-fundação para que não ocorram trincas indesejáveis.

2.4.4 - Tapete Impermeável à Montante

A técnica do tapete impermeável à montante, assim como da trincheira de vedação parcial, visa aumentar o caminho de percolação, conforme apresentado na Figura 6.

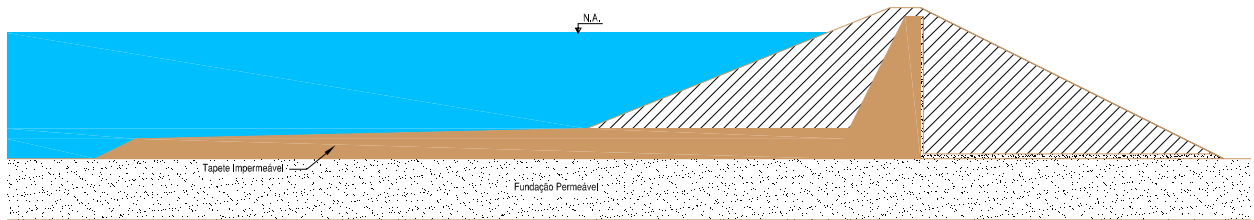


Figura 6 – Exemplo do tapete impermeável à montante

Esta solução é adotada quando o estrato permeável da fundação possui grande profundidade e a sua permeabilidade é relativamente baixa. O tapete impermeável consiste em um aterro compactado constituído de solo de baixa permeabilidade executado à montante da barragem, e que deve ser combinado com um sistema de drenagem à jusante.

O comprimento do tapete depende da carga hidráulica do reservatório e da permeabilidade da fundação (Marsal et al., 1971). Segundo Sherard (1967), a espessura e comprimento necessários do tapete impermeável dependem do coeficiente de permeabilidade do material do tapete, da estratificação e da espessura da camada permeável da fundação e da carga hidráulica. Valores freqüentes para a espessura dos tapetes impermeáveis de montante variam de 0,60 a 3,0 m (Sherard, 1967 e Gaioto, 2003).

Esta solução é considerada econômica para o controle do fluxo pela fundação da barragem, no entanto, pode perder sua eficácia se não for executado com cuidados especiais, o que pode acarretar em fissuramento do tapete por ressecamento e por recalques diferenciais junto ao pé de montante da barragem. Para Cruz (1996), o controle do fissuramento por

ressecamento do tapete é um dos mais difíceis e, por isso, sempre que possível, os tapetes devem ser mantidos inundados com a finalidade de reduzir este efeito.

Para obtenção de uma maior eficácia deste dispositivo, é necessário que o mesmo seja muito menos permeável que a fundação e se estenda suficientemente para montante para reduzir as pressões à jusante. Estas pressões são inversamente proporcionais ao comprimento do caminho de percolação. Segundo Cruz (1996), a permeabilidade do material para construção do tapete não deve ser superior a 10^{-5} cm/s.

2.4.5 - Trincheiras / Poços de Alívio

As trincheiras/poços de alívio são dispostas logo à jusante do dispositivo de vedação profundo e seu objetivo é drenar as águas que fluem através do maciço e aliviar as subpressões impostas pela carga hidráulica do reservatório.

De acordo com Cruz (1996), o sistema de drenagem das fundações é de fundamental importância no controle do fluxo e a vedação deve ser considerada como “uma segunda linha de defesa”, e em nenhum caso como a única linha de defesa.

Portanto, a execução de drenos na fundação de uma barragem constitui uma medida importantíssima para sua segurança, pois possibilita a redução tanto da subpressão à jusante como do gradiente hidráulico de saída. A Figura 7 apresenta um exemplo deste tipo de dispositivo.

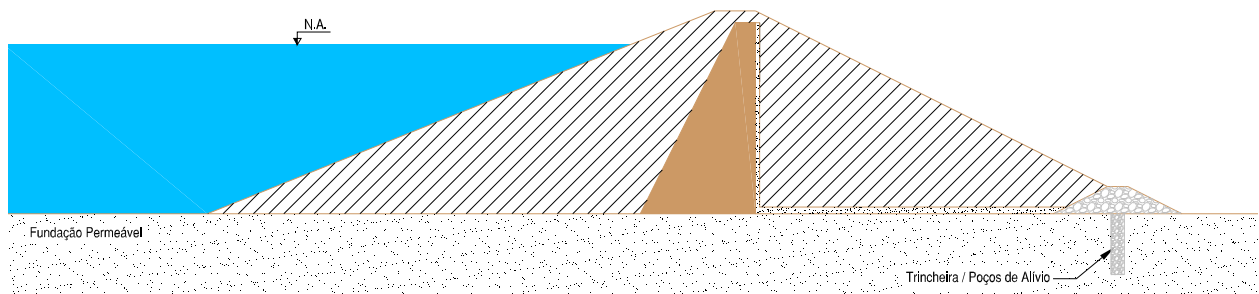


Figura 7 - Exemplo da aplicação das trincheiras/poços de alívio

Uma das vantagens das trincheiras / poços de alívio é a facilidade com a qual eles podem ser adicionados se o projeto inicial for insuficiente para controlar o fluxo (Cedergren, 1977). Segundo Cruz (1996), as trincheiras / poços de alívio só serão eficazes se a permeabilidade do material de preenchimento for, pelo menos, dez vezes maior do que a permeabilidade do material da fundação.

2.5 - Influência da Anisotropia na Percolação

Em análises de fluxo, é comum a hipótese de que o coeficiente de permeabilidade do meio seja constante, embora as observações de comportamento em ensaios de laboratório indiquem que o coeficiente de permeabilidade de um determinado tipo de solo pode variar em função de diversos fatores, como, por exemplo, da anisotropia.

Solos compactados são usualmente anisotrópicos com relação à permeabilidade, apresentando maior coeficiente de permeabilidade na direção horizontal do que na vertical. O mesmo aspecto pode ser observado para solos sedimentares, como é o caso das formações aluvionares.

Segundo Souza Pinto (2000), a relação entre os coeficientes de permeabilidade na direção horizontal e vertical pode atingir valores da ordem de 15 vezes, enquanto Cruz (1996) afirma que o mais comum é encontrar relações da ordem de 5 vezes.

Lefebvre et al. (1981) apresentaram algumas análises para uma barragem no Canadá que possui as seguintes características principais (Figura 8).

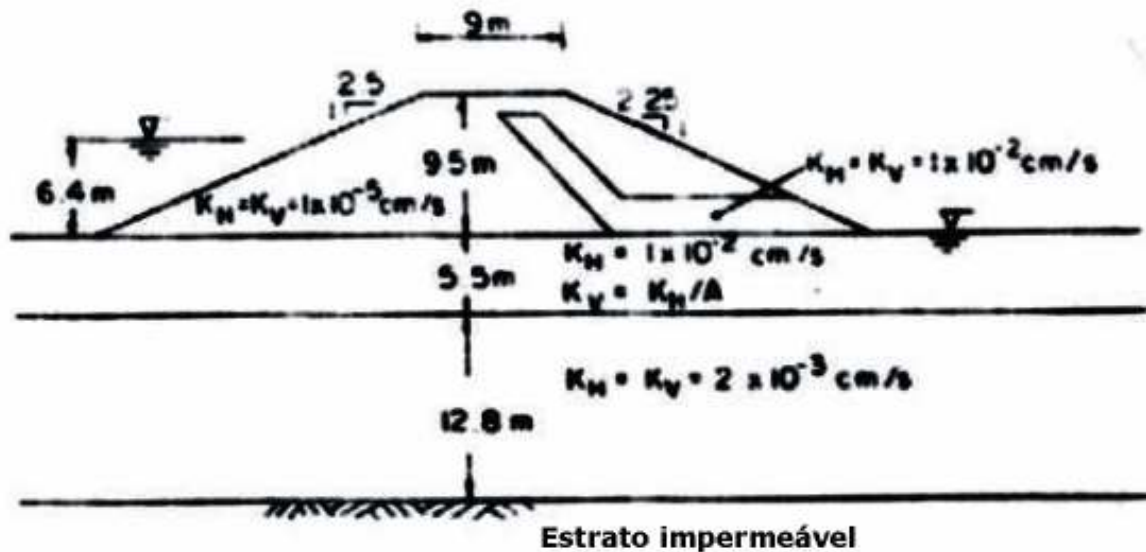


Figura 8 – Características da barragem analisada por Lefebvre (Lefebvre, 1981)

Como pode ser observado nesta figura, na camada superior da fundação foi considerada uma anisotropia (A) na permeabilidade, definida pela relação entre o coeficiente de permeabilidade horizontal e o vertical (K_H/K_V). A primeira análise apresentada pelos autores consistiu na verificação do efeito desta anisotropia no fator de segurança no pé de jusante da

barragem, sem utilizar os dispositivos de controle. O valor deste fator de segurança (FS) foi determinado a partir da Equação 8.

$$FS = \frac{i_0}{i}$$

Equação 8

Onde,

i_0 = gradiente crítico (considerado como unitário); e

i = componente vertical do gradiente de saída.

Foram feitas quatro análises variando a anisotropia de 1 a 100. Os valores obtidos para os fatores de segurança mínimo para cada análise são apresentados na Figura 9.

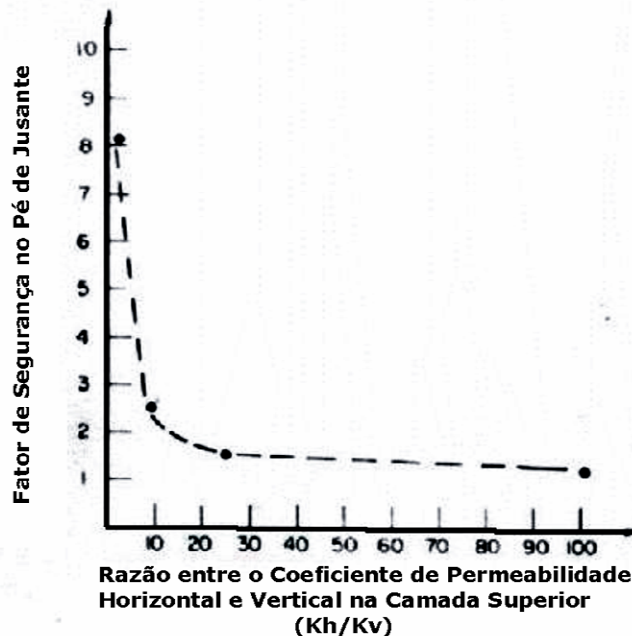


Figura 9 – Utilização do MEF na análise da influência da anisotropia no FS (Lefebvre, 1981)

Verifica-se a grande queda do fator de segurança quando é considerada a anisotropia da fundação refletida na variação do coeficiente de permeabilidade.

Lefebvre et al. (1981) também analisaram a eficácia dos seguintes sistemas de controle de percolação: tapete impermeável à montante, trincheira de vedação parcial e trincheira de alívio à jusante. Para o tapete impermeável à montante foram consideradas as condições isotrópica e anisotrópica, variando o comprimento do tapete. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 10 e, mais uma vez, é possível constatar a grande influência da anisotropia.

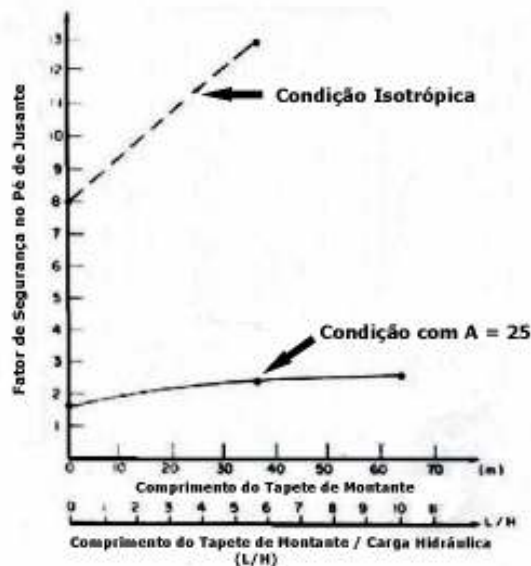


Figura 10 – Influência da Anisotropia na Análise da Eficácia do Tapete Impermeável à Montante (Lefebvre et al., 1981)

A análise com a trincheira parcial considerou a fundação como isotrópica e com anisotropia de 25. A profundidade da trincheira variou até que a espessura máxima fosse igual à espessura da camada permeável superior. A Figura 11 apresenta os resultados obtidos por Lefebvre et al. (1981).

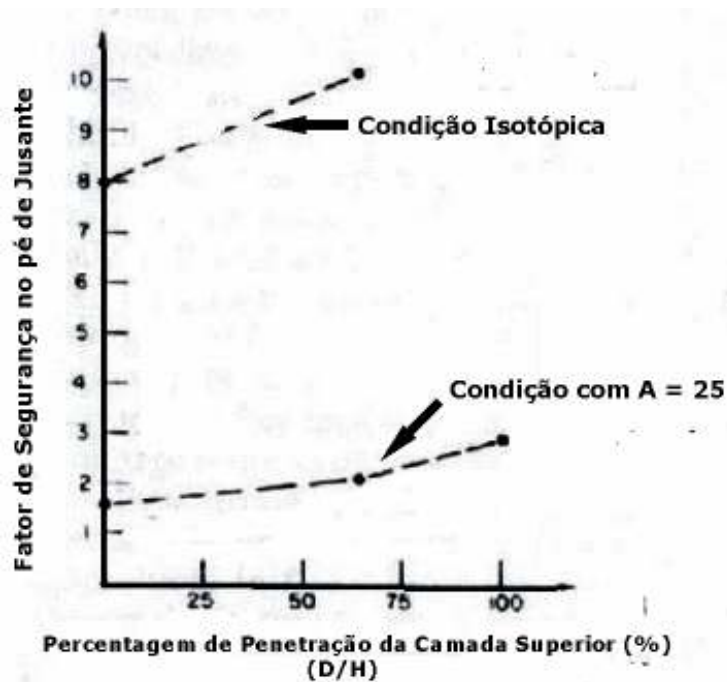


Figura 11 – Influência da Anisotropia na Análise da Eficácia da Trincheira de Vedação Parcial (Lefebvre, 1981)

As curvas apresentadas demonstram que o aumento da profundidade da trincheira acarreta em um aumento do fator de segurança, ao passo que a consideração da anisotropia reduz substancialmente o fator de segurança da barragem.

Por fim, Lefebvre et al. (1981) apresentaram a análise referente à trincheira de alívio locada à jusante da barragem. A profundidade desta

trincheira variou até que a profundidade máxima fosse igual a metade da camada superior, ou seja, 2,75 m. Nesta camada foi considerada uma anisotropia de 25. A Figura 12 apresenta os resultados obtidos pelos autores, sendo possível verificar que o fator de segurança cresce quase que linearmente com o aumento da profundidade da trincheira.



Figura 12 – Análise da Eficácia da Trincheira de Alívio (Lefebvre, 1981)

Os resultados apresentados por Lefebvre et al. (1981) confirmam a extrema importância da consideração da anisotropia na análise da eficácia dos dispositivos de controle da percolação.

2.6 - Ação da Subpressão no Maciço da Barragem

A subpressão pode ser entendida como o esforço ascendente, exercido na base de obras hidráulicas, provocado pela água que percola através de seu maciço de fundação (Levis, 2006). Ela atua no alívio do peso da estrutura, de forma a reduzir sua resistência ao deslizamento e levar a estrutura a uma condição menos segura.

Segundo Guimarães (1988), a experiência tem mostrado que a forma do diagrama de subpressão que se estabelece sob o maciço da barragem é função direta da geometria da obra e do esquema de tratamento adotado. Contudo, este tratamento é influenciado pela geologia local, ou seja, a distribuição da subpressão é função dos condicionantes geológicos.

Para Sherard et al. (1963), a subpressão na fundação, próximo ao pé de jusante da barragem, depende primeiramente da configuração e da permeabilidade das várias camadas do subsolo.

Sendo assim, a dificuldade de avaliar corretamente o valor desta solicitação está atrelada à dificuldade de obtenção dos dados geológicos e geotécnicos característicos da fundação e ao tratamento matemático adequado que traduza de maneira apropriada as leis de fluxo do meio em estudo.

De acordo com Sherard et al. (1963), a subpressão pode causar dois tipos de ameaça para a segurança da barragem:

- a pressão da água ao longo da fundação pode se aproximar ou igualar ao peso do maciço da barragem. Altos valores de subpressão reduzem a estabilidade contra o deslizamento e, em uma situação extrema, poderia, teoricamente, levantar as camadas superiores da fundação; e
- a vazão percolada pode causar uma ruptura por *piping*.

2.7 - Instrumentação em Barragens

A instrumentação de barragens assume diferentes características e finalidades dependendo da etapa da obra. Costuma-se dividir em 3 fases principais os estudos do comportamento de uma barragem: período de construção, primeiro enchimento do reservatório e regime permanente (operação). Além disso, a instrumentação pode investigar comportamentos anômalos das principais estruturas.

Segundo Saré (2003), os principais objetivos da instrumentação de barragens são: verificação das hipóteses e parâmetros adotados em projeto; verificação da adequação dos métodos construtivos; e verificação das condições de segurança. A instrumentação pode, ainda, viabilizar o aprimoramento de um determinado projeto, visando obter condições mais econômicas e seguras.

As grandezas medidas por instrumentação em barragens são basicamente: nível d'água, subpressão, deslocamentos, tensão total, vazão e sismos. Os sistemas de aquisição de dados podem ser: mecânicos, hidráulicos, pneumáticos ou elétricos.

Neste trabalho serão apresentados apenas os instrumentos destinados a medições de parâmetros relativos à subpressão em barragens, seja pela fundação ou pelo maciço da mesma.

2.7.1 - Piezômetros

Os piezômetros têm sido amplamente utilizados na medida das pressões de água no interior dos maciços de barragens. A variação dos registros piezométricos pode ocorrer quando se verifica uma das seguintes condições: aumento da vazão de percolação; elevação do nível d'água de montante ou jusante; aumento da permeabilidade de materiais a montante do piezômetro; redução da permeabilidade de materiais a jusante do piezômetro.

Os piezômetros têm como finalidade a medição de subpressões e podem ser instalados em diversas posições na barragem (maciço, sistema de drenagem e fundação).

Existem diversos tipos de piezômetros com características peculiares. A seguir será feito um breve resumo dos dois principais tipos de piezômetros.

2.7.1.1 - Piezômetro de tubo aberto

É o mais simples e o mais utilizado de todos os piezômetros, provavelmente devido à facilidade de execução, baixo custo e bons resultados. O equipamento consiste basicamente em um tubo, geralmente de PVC, instalado no interior de um furo de sondagem ou poço, conforme apresentado na Figura 13. Na zona do bulbo, o tubo é perfurado e envolto por um material filtrante e outro drenante. No restante do tubo, no espaço entre o furo e o tubo, é executado um selo com material de baixa permeabilidade para evitar a contribuição de águas superficiais.

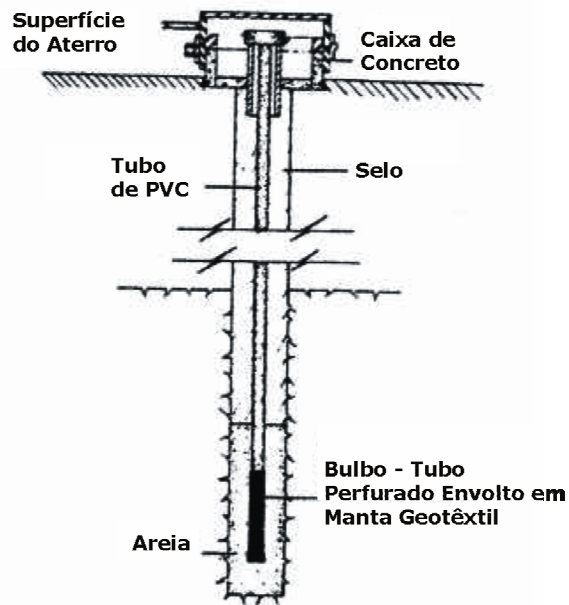


Figura 13 - Esquema de piezômetro de tubo aberto (Cruz, 1996)

O piezômetro de tubo aberto mais utilizado é o piezômetro Casagrande, constituído por uma tubulação de aproximadamente 1" de diâmetro interno, conectada a um elemento poroso cilíndrico feito de material cerâmico.

Dentre as principais vantagens do piezômetro de tubo aberto, pode-se citar a confiabilidade, durabilidade, sensibilidade e possibilidade de verificação de seu funcionamento através de ensaio de recuperação do nível d'água. Suas limitações são: interferência no canteiro de obras, não ser adequado para determinar subpressões no período construtivo e dificuldade de instalação a montante de barragens (devido à dificuldade de acesso para leituras).

Um outro problema que este tipo de piezômetro pode apresentar é o tempo de resposta. Segundo Cruz (1996), dependendo do tipo de solo, o tempo de resposta pode variar de alguns minutos até semanas. Para barragens de terra, um tempo de resposta de até uma semana não apresenta maiores conseqüências de ordem prática.

2.7.1.2 - Piezômetro pneumático

O funcionamento deste piezômetro baseia-se no equilíbrio de pressões atuantes em um diafragma flexível. De um lado atua a pressão da água que se deseja medir e do outro lado atua um gás sob pressão (geralmente nitrogênio).

A pressão deste gás é variável e controlada por um manômetro situado em um painel de controle. A conexão pneumática entre o piezômetro e o painel é feita com dois tubos flexíveis, denominados de "alimentação" e "retorno". Esta tubulação é conectada em um diafragma flexível por dois orifícios. Existe uma cavidade, preenchida por água, responsável por transmitir a pressão da água ao diafragma. Esta cavidade está em contato com o solo através de uma pedra porosa cerâmica ou de bronze sintetizado, conforme mostrado na Figura 14.

Quando a pressão da água supera a do gás, o diafragma veda os dois orifícios e não há fluxo (retorno) do gás. Quando a pressão do gás supera a da água, a membrana deforma ligeiramente, permitindo a passagem livre do gás.

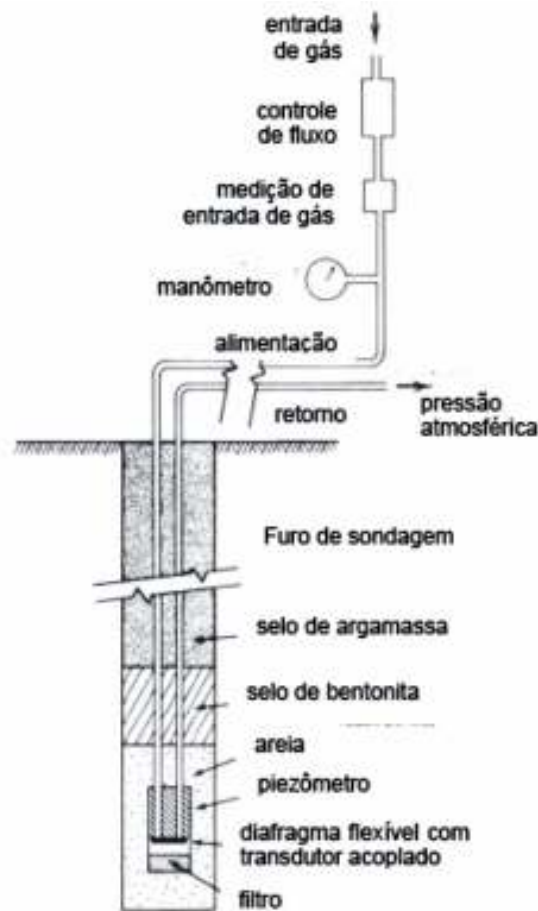


Figura 14 - Esquema do piezômetro pneumático

O procedimento de leitura consiste basicamente em aumentar gradativamente a pressão do gás comprimido e observar a indicação de retorno no painel de controle. Deve-se, então, fechar as válvulas de pressão de gás e aguardar a estabilização.

Cruz (1996) afirma que as principais vantagens deste instrumento são: leitura centralizada; menor interferência no canteiro de obra (exceto durante a fase de abertura das trincheiras); não há interferência dos recalques sofridos pelos instrumentos sobre as medidas; inexistência de limitações quanto à localização do instrumento; leitura simples e rápida; não há

necessidade de circulação de água deaerada pelas tubulações; não há interferência de pressão atmosférica; tempo de resposta relativamente pequeno; e tecnologia de fabricação não complexa.

As principais limitações dos piezômetros pneumáticos são: menor confiabilidade para medida de subpressões negativas (existem piezômetros pneumáticos especiais para medir subpressão negativa); necessidade de calibração periódica dos manômetros; e problemas relacionados com as deformações do diafragma flexível.

2.8 - Metodologia para Determinação da Eficácia dos Dispositivos de Vedação e Drenagem

Segundo Marsal et al. (1971), a eficácia dos sistemas de controle pode ser avaliada em função do volume de água percolado, do valor da água, da suscetibilidade ao *piping*, da estabilidade das estruturas, do mecanismo de interação entre o sistema de controle e a barragem e do custo das diversas soluções possíveis.

A eficácia dos dispositivos está relacionada com a sua capacidade de resistir, sem danos, às tensões e deformações impostas pelo solo durante a construção e operação da barragem.

Vargas (1971) ensina que a falta de conhecimento da eficácia dos sistemas de controle de percolação gera projetos inadequados, caros e até mesmo inseguros. Exemplos de análises da eficácia destes sistemas foram

apresentados por este autor para as barragens de Limoeiro, Euclides da Cunha e Graminha, construídas ao longo do rio Pardo, no estado de São Paulo.

Na barragem de Limoeiro, o projeto para controle da percolação pela fundação contemplou uma trincheira de vedação total com aproximadamente 25 metros de profundidade e taludes com inclinação de 2:3 (H:V), uma parede diafragma de concreto com 2 metros de largura e aproximadamente 6 metros de profundidade construída abaixo da trincheira de vedação e uma cortina de injeção, conforme Figura 15. A instrumentação foi feita através de piezômetros do tipo stand-pipes e Casagrande (Vargas, 1971).

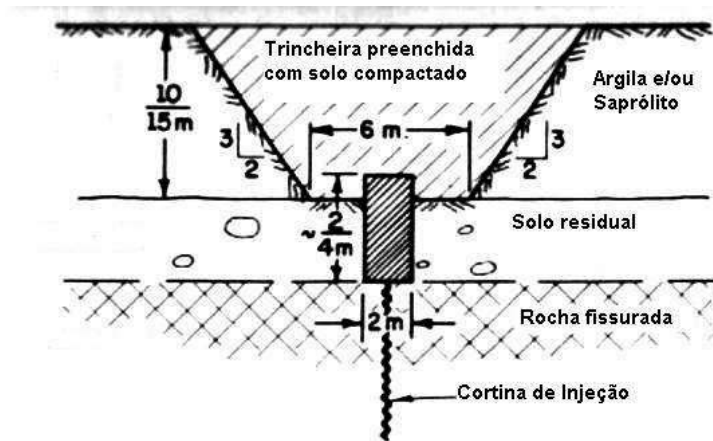


Figura 15 – Detalhe dos dispositivos de controle da Barragem do Limoeiro (Vargas, 1971)

Para Vargas (1971), a cortina de injeção era desnecessária neste caso, pois os resultados obtidos com a instrumentação foram muitos semelhantes aos obtidos através da rede de fluxo traçada desconsiderando a cortina de injeção. Na barragem de Euclides da Cunha, o sistema de controle da

percolação foi semelhante ao da barragem de Limoeiro, com o incremento de uma galeria de drenagem e injeção e de poços de alívio instalados conforme apresentado na Figura 16. Para a barragem de Graminha, foi adotado apenas uma trincheira de vedação total e poços de alívio, conforme consta na Figura 17.

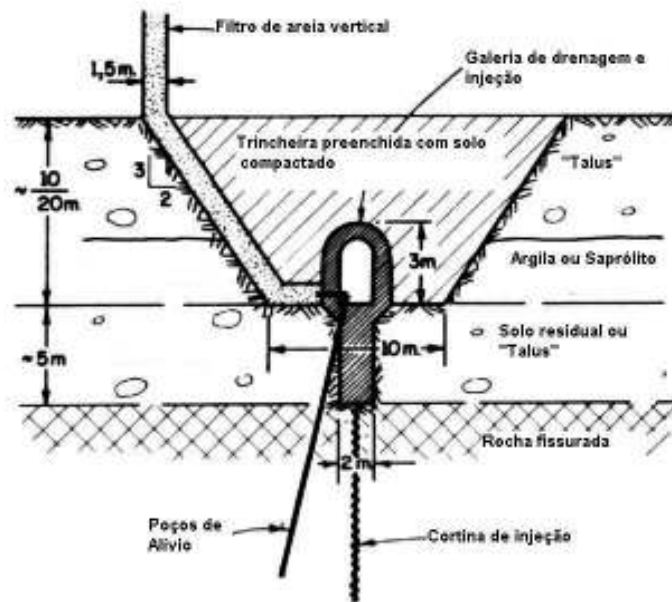


Figura 16 – Detalhe dos dispositivos de controle da Barragem de Euclides da Cunha (Vargas, 1971)

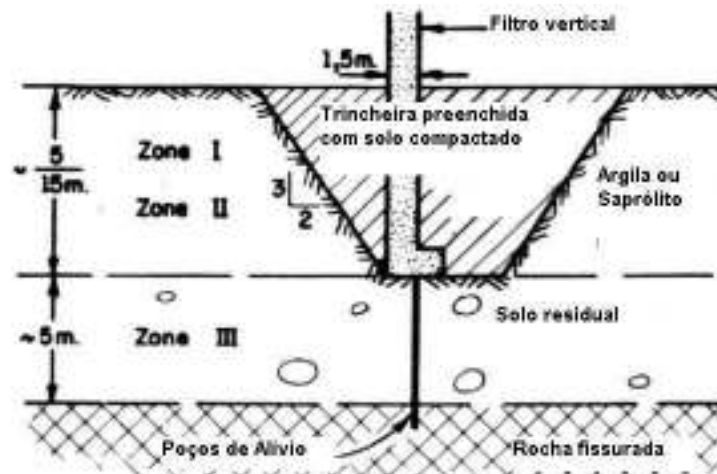


Figura 17 – Detalhe dos dispositivos de controle da Barragem de Graminha (Vargas, 1971)

Nestas barragens, os resultados apresentados pela instrumentação indicaram que o comportamento das subpressões é governado apenas pelos dispositivos de drenagem, sendo a eficácia da cortina de injeção considerada nula.

A utilização de piezômetros na instrumentação a montante e a jusante dos sistemas de controle de percolação tem sido a solução mais satisfatória na avaliação da eficácia dos dispositivos de controle. As medidas dos níveis piezométricos devem ser feitas no início da construção e ao longo do enchimento e da vida útil da barragem (Marsal et al., 1971).

É preciso conhecer a eficácia de todos os possíveis elementos de um sistema de controle da percolação para que seja adotada uma solução equilibrada do ponto de vista técnico e econômico. O primeiro passo deste processo é a determinação dos parâmetros iniciais do projeto considerando a barragem sem dispositivos de controle. Para Ambraseys (1963), a vazão que percola através da fundação de uma barragem, sem dispositivos, é determinada através da Equação 9. Nesta equação foi considerado que o coeficiente de permeabilidade do estrato da fundação é constante em todas as direções, ou seja, o maciço da fundação é isotrópico com relação à permeabilidade.

$$Q_0 = \frac{\Delta H_0 \cdot k_0}{(0,88 + B/D)}$$

Equação 9

Onde,

Q_0 = vazão inicial, sem dispositivos de controle ($L^3.T^{-1}$);

ΔH_0 = perda de carga inicial, sem dispositivos de controle (L);

K_0 = permeabilidade do estrato permeável da fundação ($L.T^{-1}$);

B = Largura da base do maciço da barragem (L); e

D = Espessura do estrato permeável (L).

Marsal et al. (1971) e Ambraseys (1963), apresentaram duas definições de eficácia aplicadas a dispositivos de controle de percolação de água em barragens. A primeira foi retirada de Terzaghi e Peck (1968) e define eficácia (E) como sendo a relação entre a perda de carga hidráulica causada pelo sistema de controle e a perda de carga hidráulica total através da barragem, conforme apresentado na Figura 18 e na Equação 10. Para tanto, é necessário instrumentar os dois lados do dispositivo de controle.

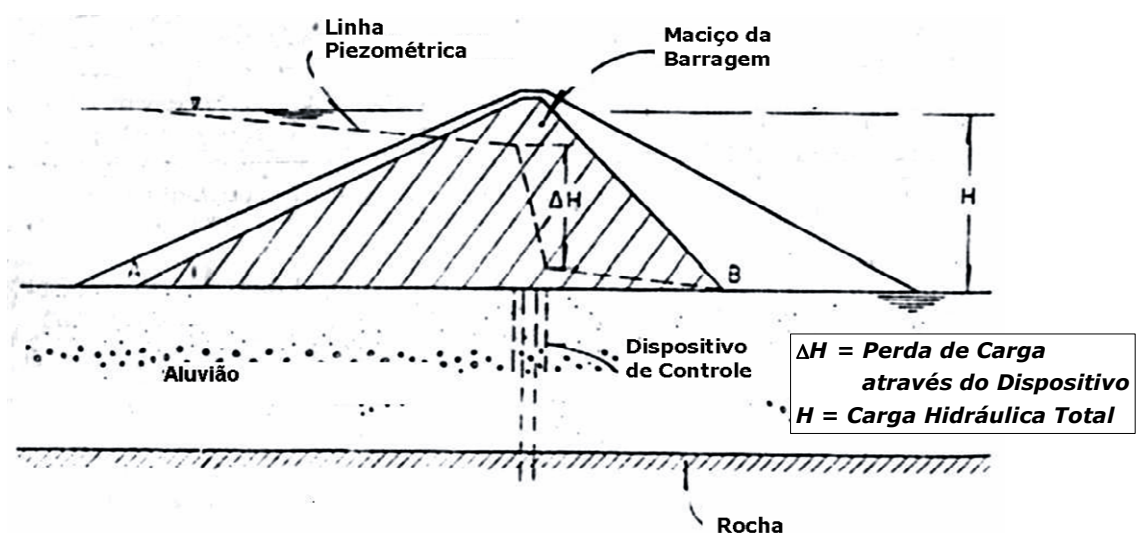


Figura 18 – Eficácia dos dispositivos em função da perda de carga (Marsal et al.,1971)

$$E(\%) = \frac{\Delta H}{H} \cdot 100$$

Equação 10

A segunda definição foi de Casagrande (1961), na qual a eficácia é determinada através da Equação 11.

$$E(\%) = \left(1 - \frac{Q}{Q_0}\right) \cdot 100$$

Equação 11

Onde

E = eficácia do sistema (%);

Q = vazão através de uma seção transversal COM dispositivo de controle ($L^3.T^{-1}$); e

Q_0 = vazão através de uma seção transversal SEM dispositivo de controle, considerando que o reservatório está completamente cheio ($L^3.T^{-1}$).

Silveira et al. (1981) apresentaram outra forma de analisar a eficácia dos dispositivos de vedação em função dos gradientes hidráulicos. Para os autores, esta forma de analisar facilita sua aplicação prática, uma vez que é mais fácil determinar os gradientes hidráulicos a partir dos níveis piezométricos, do que as vazões de drenagem. A Equação 12, apresentada por estes autores, é mostrada a seguir:

$$E(\%) = \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) \cdot 100$$

Equação 12

Onde

I = gradiente hidráulico total obtido a partir da carga total e da largura da base da barragem ($L.L^{-1}$); e

I_0 = gradiente hidráulico obtido a partir da perda de carga gerada pelo dispositivo e da largura da base do dispositivo ($L.L^{-1}$).

Ambraseys (1963) apresentou uma forma de calcular a eficácia de uma parede diafragma preenchida com solo argiloso, a partir da determinação da largura da base do maciço da barragem (B), da largura do diafragma (L) da espessura do estrato permeável da fundação (D) e dos coeficientes de permeabilidade do maciço da fundação (K) e do material de preenchimento do diafragma (K_1). A eficácia é determinada a partir da Equação 13.

$$E(\%) = \frac{100 \left[\frac{L \times \left(\frac{K}{K_1} - 1 \right)}{D} \right]}{0,88 + \frac{B}{D} + L \times \left(\frac{K}{K_1} - 1 \right)}$$

Equação 13

Marsal et al. (1971) apresentaram equações e gráficos para estimativa das vazões que percolam através da fundação de barragens na presença do tapete impermeável à montante, da trincheira de vedação, da cortina de injeção e da parede diafragma. Para todos estes casos, não foi considerado sistema de drenagem à jusante.

Para barragens dotadas de tapete impermeável à montante, foi apresentada a Equação 14 apresentada a seguir para determinação da vazão percolada.

$$\frac{Q}{k_0 \cdot H} = \frac{1}{0,88 + \frac{B + B'}{D}}$$

Equação 14

Onde,

Q = vazão percolada através da fundação ($L^3.T^{-1}$);

k_0 = permeabilidade do estrato permeável da fundação ($L.T^{-1}$);

H = carga hidráulica total do reservatório (L);

B = largura da base do maciço da barragem (L);

B' = comprimento do tapete de montante (L); e

D = espessura da camada permeável da fundação (L).

Para o caso de barragens com trincheiras de vedação ou cortinas de injeção, Marsal et al. (1971) apresentaram a Equação 15 derivada de Ambraseys (1963).

$$\frac{Q}{k_0 \cdot H} = \frac{1}{0,88 + \frac{B}{D} + \left(\frac{k_0}{k} - 1 \right) \cdot \frac{E}{D}}$$

Equação 15

Onde

k = permeabilidade da cortina de injeção ou do solo compactado da trincheira de vedação ($L.T^{-1}$); e

E = espessura da cortina ou da trincheira.

As variáveis comuns à Equação 14 têm os mesmos significados.

Por fim, Marsal et al. (1971) apresentaram a equação para barragens com sistema para controle da percolação pela fundação composto pela parede diafragma. Para esta equação, foi considerada a existência de falhas no diafragma, acarretando em aberturas ao longo do mesmo.

$$\frac{Q}{k_0 \cdot H} = \frac{1}{0,88 + \frac{B}{D} + \left(\frac{D}{W} - 1\right) \cdot \frac{E}{D}}$$

Equação 16

Onde,

W = área total das aberturas por unidade de comprimento da parede diafragma (L);

As variáveis comuns às Equações 14 e 15 têm os mesmos significados.

A Figura 19 representa graficamente os dados apresentados nas Equações 14, 15 e 16.

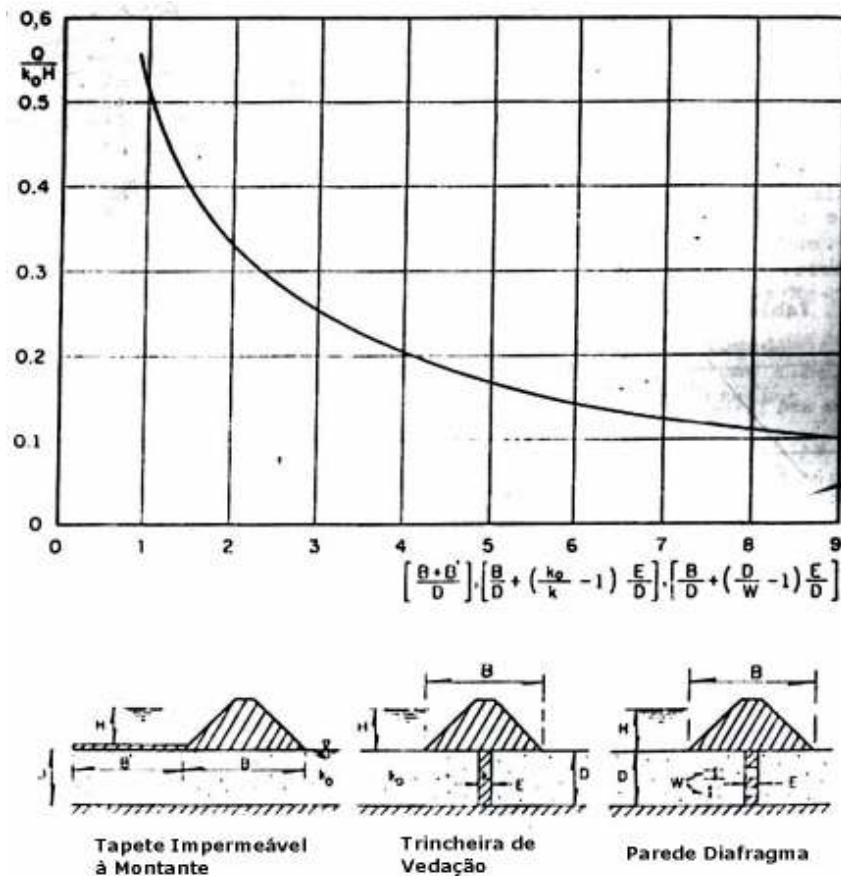


Figura 19 - Determinação da vazão percolada através da fundação de barragens dotadas de dispositivos de controle (Marsal et al., 1971)

Marsal et al. (1971) apresentaram também em seu trabalho algumas curvas que estimam o comprimento do tapete impermeável à montante (B'), a espessura da trincheira de vedação (E) e o somatório das imperfeições da parede diafragma (W) para uma mesma vazão resultante. Estas curvas são apresentadas na Figura 20.

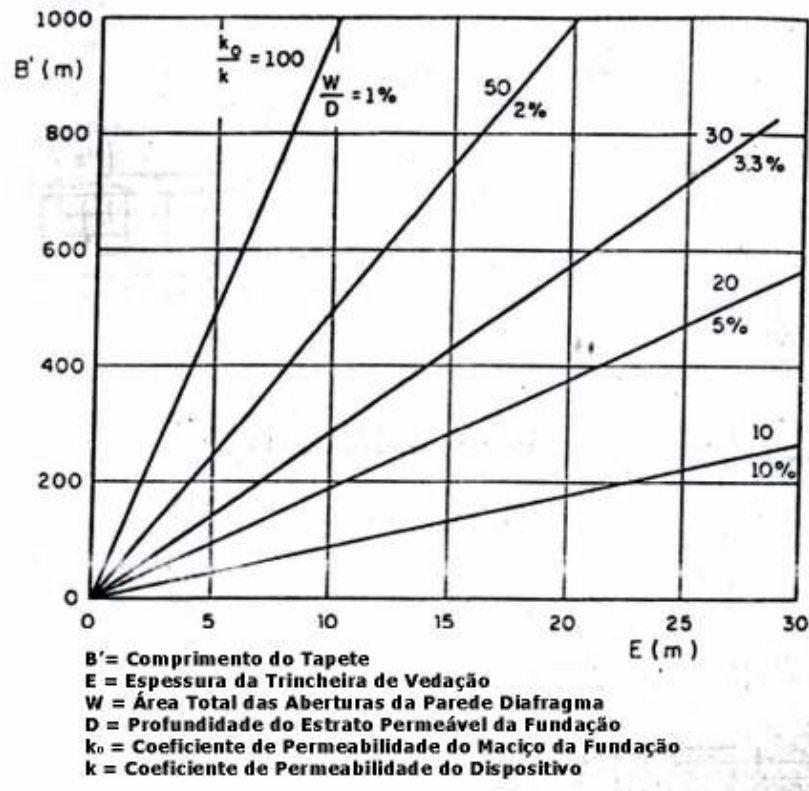


Figura 20 - Relação entre a geometria dos dispositivos para uma mesma vazão resultante (Marsal et al., 1971)

O tapete impermeável a montante é mais aplicado do que a cortina de injeção quando a permeabilidade (k_0) da fundação é baixa, pois o custo da injeção em fundações deste tipo é bastante elevado.

Quando a camada permeável da fundação é espessa, comparada com a base da barragem, uma redução substancial da vazão só será possível para um comprimento muito grande do tapete impermeável de montante ou para trincheira de vedação com espessura da ordem de k_0/k ou para parede diafragma com pequeno número de imperfeições/aberturas.

Neste trabalho, as vazões, os gradientes hidráulicos e as subpressões foram obtidas a partir do Método dos Elementos Finitos (MEF).

2.8.1 - Método dos Elementos Finitos (MEF)

O método dos elementos finitos é, provavelmente, o método mais utilizado para resolução de problemas mais complexos relacionados com a percolação de água através da fundação das barragens.

O Método dos Elementos Finitos transformam a equação diferencial parcial do fluxo em um conjunto de equações integrais, cuja solução é obtida a partir da discretização do domínio dos elementos. Além da discretização do domínio do problema, deve-se adotar uma função aproximada para descrever a variável dependente.

A confiabilidade dos resultados obtidos com este método irá depender do tipo de formulação, das condições de contorno impostas e, principalmente, dos parâmetros adotados. Segundo Cruz (1996), os estudos de percolação por métodos numéricos são recomendados em casos de fundações permeáveis, o que revela a compatibilidade com o problema analisado nesta pesquisa.

A Tabela 1 apresentada por Saré (2003) indica as principais características de alguns programas disponíveis para solucionar problemas de fluxo em solos através do Método dos Elementos Finitos (MEF).

Tabela 1 - Programas que empregam o MEF para solucionar problemas de fluxo

Programa	Geometria	Aplicação
UNSAT2	2D	Saturado/Não Saturado Fluxo Transiente
SEEP	2D	Saturado/Não Saturado Fluxo Permanente
TRASEE	2D	Modificação do SEEP Fluxo Transiente
SATURN	2D	Saturado/Não Saturado Fluxo Transiente
FLOW3D	3D	Saturado/Não Saturado Fluxo Transiente

Fonte: (Soré, 2003)

Uma análise da percolação através do Método dos Elementos Finitos é feita em três passos. O primeiro é modelar o problema, que envolve desenhar a malha de elementos finitos, determinar as propriedades dos materiais envolvidos e especificar as condições de contorno. O segundo passo é processar o modelo através da formulação e solução do sistema de equações de elementos finitos. O terceiro passo é a interpretação dos resultados (cargas hidráulicas, pressões neutras, gradientes e vazões).

Strufaldi (2004) explica que uma das regras mais importantes na modelagem da malha é iniciá-la a partir de um modelo simples e evoluir para um modelo mais complexo. Esta seqüência facilita a detecção de pontos que possam estar causando a dificuldade de convergência do modelo. Para esta autora, um modelo pode ser encarado como uma abstração de algum problema do mundo real através da teorização e da adoção de hipóteses e simplificações que visam permitir a sua representação de maneira "tratável", sendo o mais fiel possível à realidade.

De acordo com Lefebvre et al. (1981), os resultados obtidos a partir da análise da percolação utilizando o Método dos Elementos Finitos podem ser questionáveis em virtude da dificuldade de avaliar corretamente a condutividade hidráulica da fundação. Este método, porém, permite avaliar parametricamente a influência dos vários fatores que participam do processo, podendo auxiliar, por exemplo, na seleção do sistema de controle mais eficaz para um determinado projeto.

3 - VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

Para validar a utilização do Método dos Elementos Finitos em problemas de percolação de água através da fundação de barragens, foi elaborado um modelo computacional representativo da Barragem de Santa Helena, construída na Bahia. Os resultados obtidos neste modelo foram comparados com os dados da instrumentação da barragem, conforme apresentado a seguir.

A Barragem de Santa Helena localiza-se a cerca de 55 km de Salvador, em uma área de grande importância econômica e intenso desenvolvimento industrial provocado pelo Pólo Petroquímico de Camaçari. O maciço da barragem foi construído ao longo do Rio Jacuípe, na Fazenda Santa Terezinha, no município de Camaçari – Bahia. A bacia do Rio Jacuípe possui uma topografia ondulada constituída por solos aluvionares arenosos com características compatíveis com os solos estudados neste trabalho.

O barramento é constituído por um maciço de terra compactado de seção homogênea com cerca de 230,0 m de comprimento e um extravasor de concreto armado com 33,0 m de comprimento, conforme apresentado nas Figuras 21 e 22.

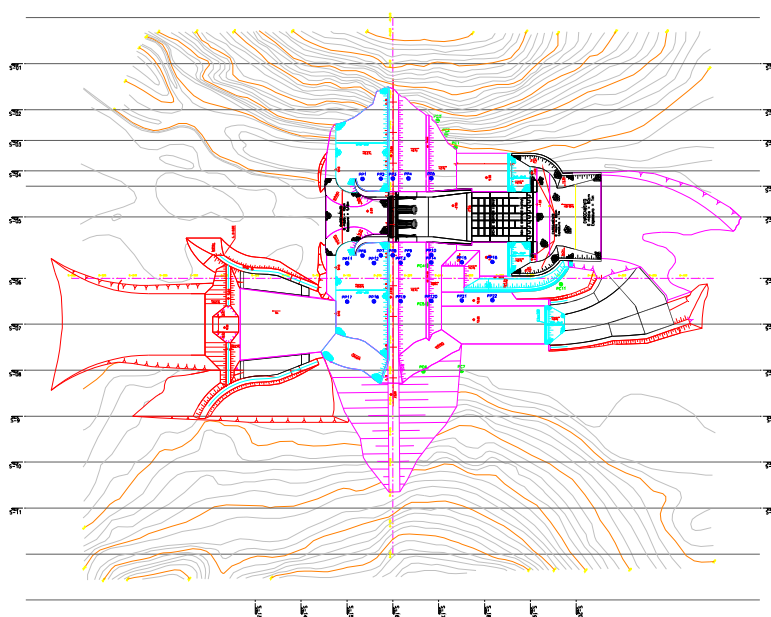


Figura 21 – Arranjo geral da Barragem de Santa Helena



Figura 22 – Vista da Barragem de Santa Helena com detalhe para os maciços de terra e o extravasador em concreto

Segundo Relatório do CEPED (Centro de Pesquisas e Desenvolvimento), a área de implantação da barragem está situada na parte sul da bacia sedimentar do recôncavo baiano, constituída por arenitos, siltitos e folhelhos da Formação São Sebastião, com vários níveis de decomposição até profundidades superiores a 30,0 m. Na ombreira direita

predominam solos residuais areno-argilosos provenientes do arenito que se apresenta pouco cimentado e extremamente friável até profundidades superiores a 30,0 m. Na área do vale encontram-se depósitos de sedimentos de origem geológica recente compostos de solos argilosos moles e areno-siltosos fofos sobre o arenito pouco cimentado. Na ombreira esquerda, os solos são predominantemente silto-argilosos com camadas alternadas de areias finas argilosas sobrejacentes ao arenito bem mais cimentado e menos friável.

O monitoramento da Barragem de Santa Helena é feito a partir das medições realizadas em 08 (oito) piezômetros tubo aberto tipo Casagrande, 22 (vinte e dois) piezômetros pneumáticos e 05 (cinco) marcos topográficos.

A EMBASA - Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A., responsável pelo monitoramento destes instrumentos, vem realizando leituras periódicas e apresentando os resultados em relatórios operacionais. Alguns destes instrumentos vêm apresentando resultados incoerentes e, por isso, foram descartados das análises. Neste trabalho serão considerados os resultados dos piezômetros Casagrande e pneumáticos. A EMBASA disponibilizou os relatórios operacionais dos anos de 2000, 2001, 2003, 2004 e 2005.

Durante a elaboração do projeto da barragem em 1976 foi feita uma extensa campanha de investigações geotécnicas no maciço de fundação através da realização de sondagens de simples reconhecimento com medida de SPT, ensaios de infiltração, sondagens rotativas com ensaios de perda

d'água, sondagens especiais com extração de amostras inderformadas do tipo "shelby", poços de inspeção a céu aberto e coleta de amostra para ensaios de caracterização, permeabilidade, adensamento e resistência ao cisalhamento. A partir da análise destes ensaios pode-se concluir que, de modo geral, os solos da fundação são predominantemente arenosos.

Os resultados obtidos nestas investigações geotécnicas, com ênfase nos parâmetros de interesse para este trabalho, foram plotados em 09 (nove) seções transversais e 08 (oito) seções longitudinais para avaliação da seção crítica quanto à percolação pela fundação. A Figura 23 apresenta a localização das sondagens e das seções transversais e longitudinais.

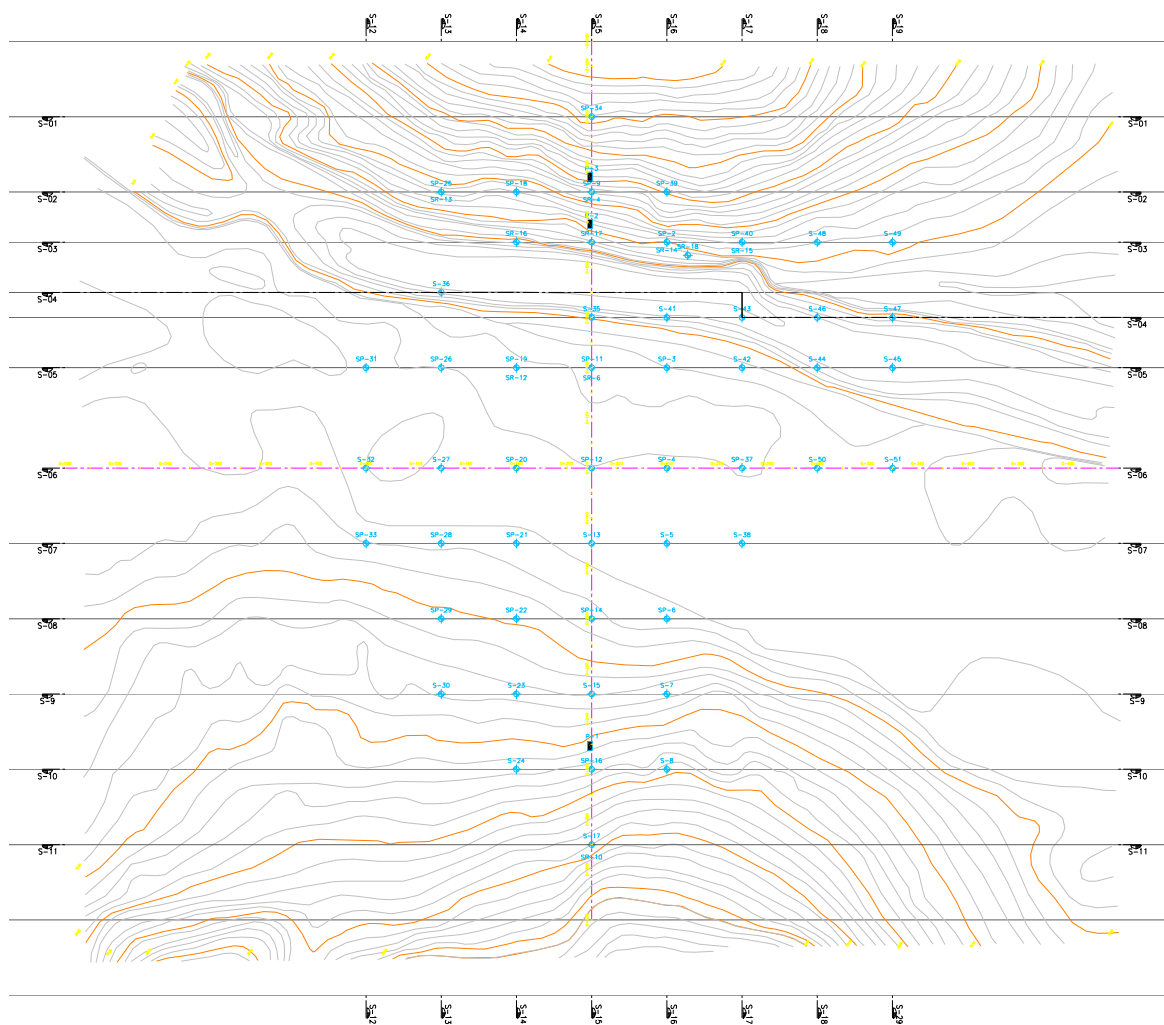


Figura 23 – Localização das sondagens e das seções transversais e longitudinais

Para determinação da seção crítica foi traçado também um perfil em três dimensões na área de influência da barragem e foi levada em consideração a localização dos instrumentos instalados e a qualidade das suas medições.

Diante destes critérios, foi escolhida a seção transversal 06. Esta seção está localizada na ombreira direita do maciço, onde o perfil estratigráfico do subsolo apresenta características desfavoráveis para a percolação, devido a espessa camada de solos arenosos com

permeabilidade média de cerca de $1,6 \times 10^{-4}$ cm/s. Além disso, esta seção está próxima dos piezômetros instalados na fundação.

A Figura 24 apresenta a seção transversal 06, e a Figura 25 apresenta o perfil em três dimensões do sítio da barragem com a indicação da seção escolhida. Neste perfil são apresentados o topo e a base de cada estrato do solo.

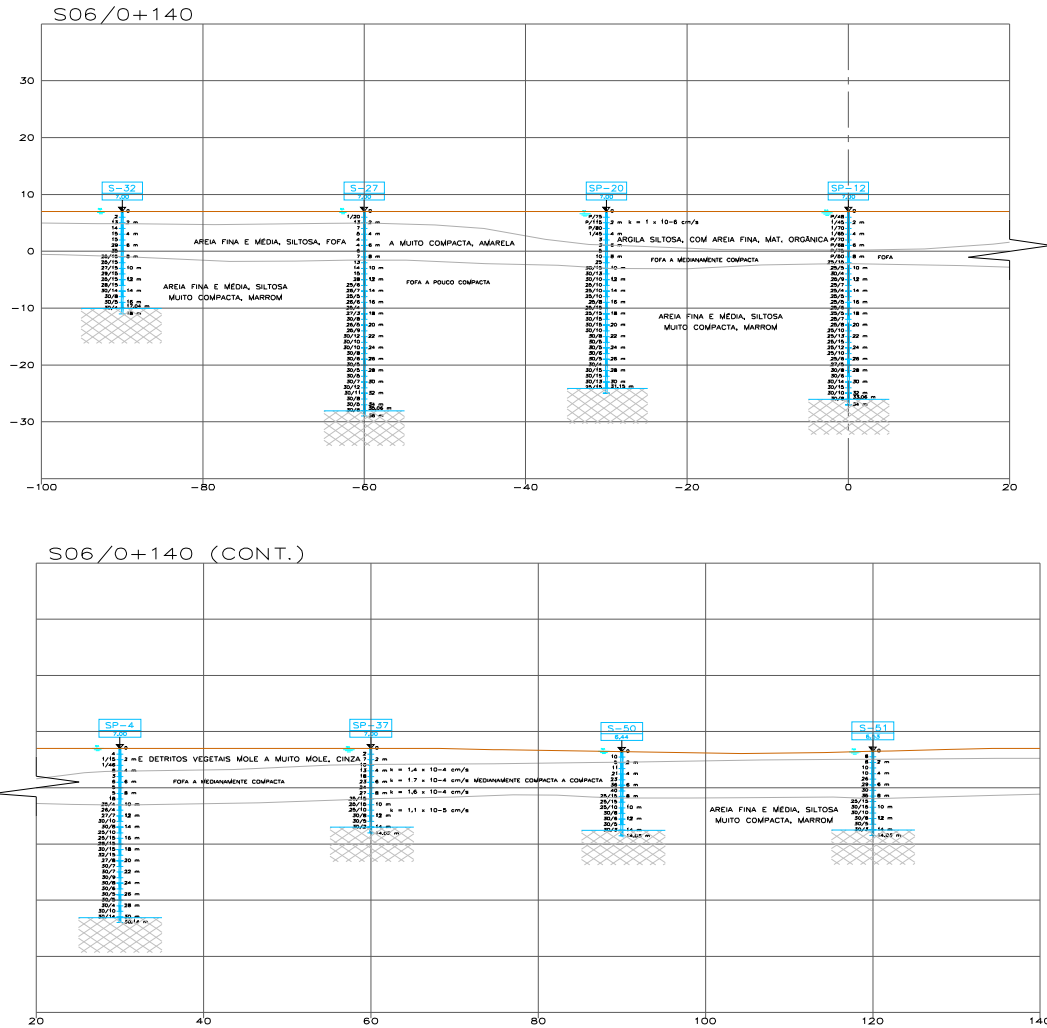


Figura 24 – Seção transversal 06 do maciço de fundação da Barragem de Santa Helena

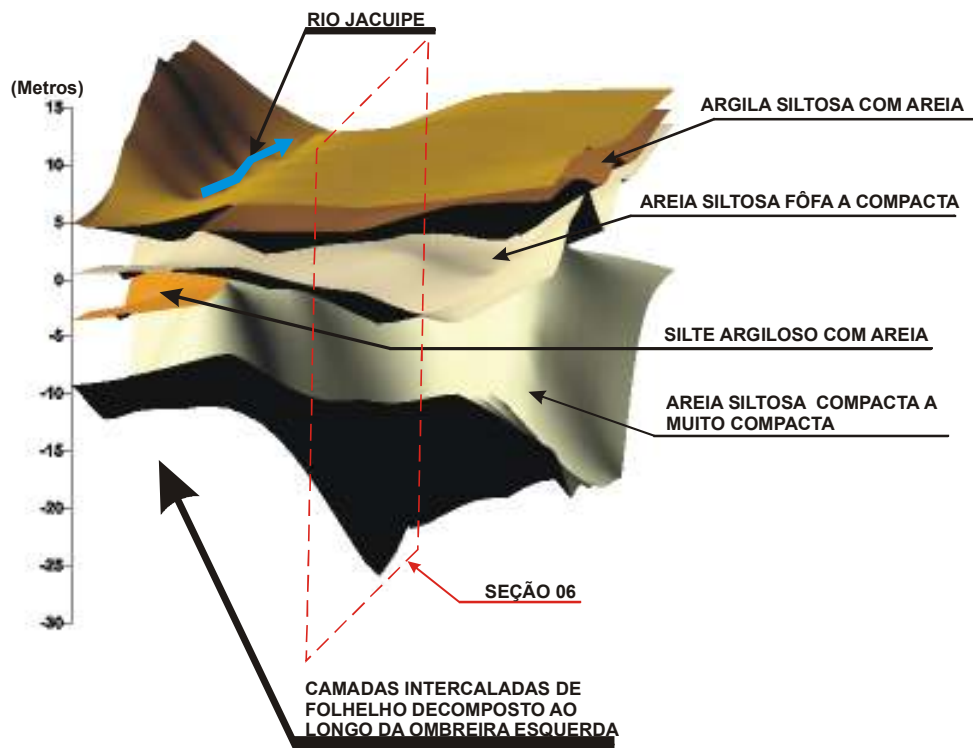


Figura 25 – Perfil 3D do sítio da Barragem de Santa Helena

Para controle da percolação pela fundação da barragem foi construído um tapete impermeável à montante com cerca de 126,0 m de comprimento. Esta solução foi adotada devido aos valores relativamente elevados da permeabilidade das camadas dos solos sedimentares do vale e residuais das ombreiras e a inexistência, em profundidades superiores a 30,0 m, de material de baixa permeabilidade. Também foram executados um filtro de areia tipo chaminé (vertical) com 1,0 m de largura e um tapete drenante horizontal com cerca de 1,3 m de espessura, conforme seção transversal típica apresentada na Figura 26.

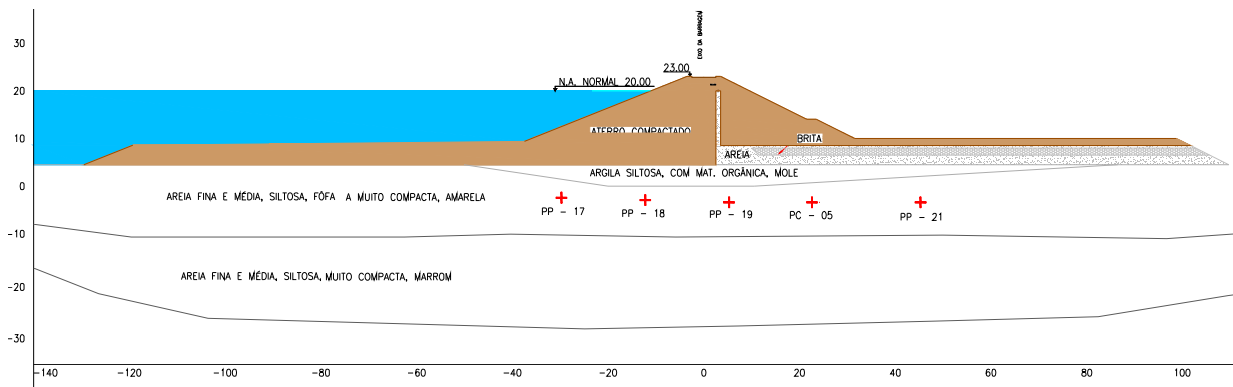


Figura 26 – Seção Típica da Barragem de Santa Helena

Foram realizadas as simulações das condições de fluxo bidimensional na fundação da Barragem de Santa Helena para validação do modelo computacional. Durante a modelagem do problema, foi considerado o perfil estratigráfico da seção 06, que apresenta uma camada de argila orgânica com coeficiente de permeabilidade médio de $1,0 \times 10^{-6}$ cm/s, uma camada de areia fina e média siltosa com coeficiente de permeabilidade médio de 1×10^{-4} cm/s e uma camada de solos residuais arenosos com permeabilidade média de 1×10^{-5} cm/s. Nesta seção existem 04 piezômetros pneumáticos e 01 piezômetro tipo Casagrande, conforme apresentado na Figura 26, cujas leituras serviram de parâmetro para a validação do modelo. A barragem possui 18,5 m de altura e o nível d'água a montante está na cota 20,0 m. A jusante não há nível d'água.

As condições de contorno do tapete drenante horizontal eram desconhecidas e então foram analisadas algumas situações possíveis. Foi considerado inicialmente que o tapete não contribuía para as condições de

fluxo através da fundação (situação em que o dispositivo estaria danificado), posteriormente foi estudada a situação que o tapete não possuía carga hidráulica no seu interior e por fim, considerou-se a situação em que havia carga hidráulica dentro do tapete, e aí foram consideradas cargas de 1 a 5 m.c.a. com redução linear até o pé do talude de jusante da barragem. A hipótese que apresentou os melhores resultados foi a que considerou a carga hidráulica dentro do tapete igual a zero, o que se justifica devido a presença da camada de argila de baixa permeabilidade que existe abaixo do tapete e devido a espessura do dispositivo (1,3 m) que lhe proporciona uma alta eficácia. As condições de contorno utilizadas foram: Carga total (H) igual a 20,0 m à montante e Carga de Pressão igual a zero no tapete drenante horizontal e a jusante do maciço.

Por fim, a última característica desta análise é a condição anisotrópica do maciço da fundação. Segundo Bourdeaux (2003), a relação entre os coeficientes de permeabilidade vertical e horizontal considerado no projeto da barragem foi muito menor do que a anisotropia hidráulica real. No projeto foi adotado $A = 0,25$ ao passo que para os consultores o valor mais coerente seria 0,1. Na análise apresentada a seguir foi considerado $A = k_v/k_h = 0,1$.

A Figura 27 apresenta a seção utilizada no modelo computacional, com a indicação das condições de contorno consideradas e dos coeficientes de permeabilidade das camadas do subsolo. A Figura 28, por sua vez, apresenta um detalhe da malha utilizada nas análises.

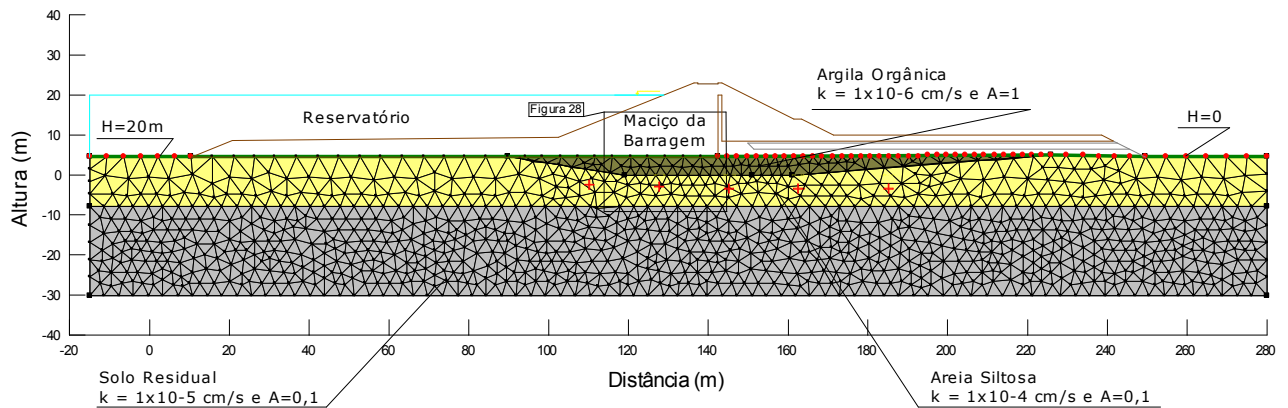


Figura 27 – Seção utilizada no modelo computacional

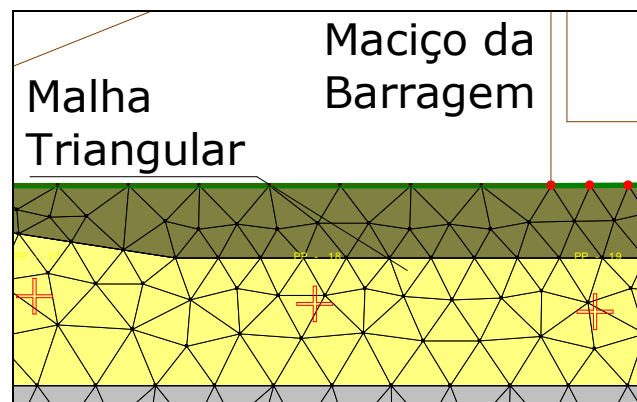


Figura 28 – Detalhe da malha utilizada na validação do modelo computacional

As leituras piezométricas realizadas ao longo do ano de 2005 nos instrumentos instalados na seção analisada (PC05, PP17, PP18, PP19 e PP21), que foram utilizadas na validação do modelo, são apresentadas na Figura 29. A Tabela 2 apresenta as leituras máximas das cargas piezométricas no ano de 2005.

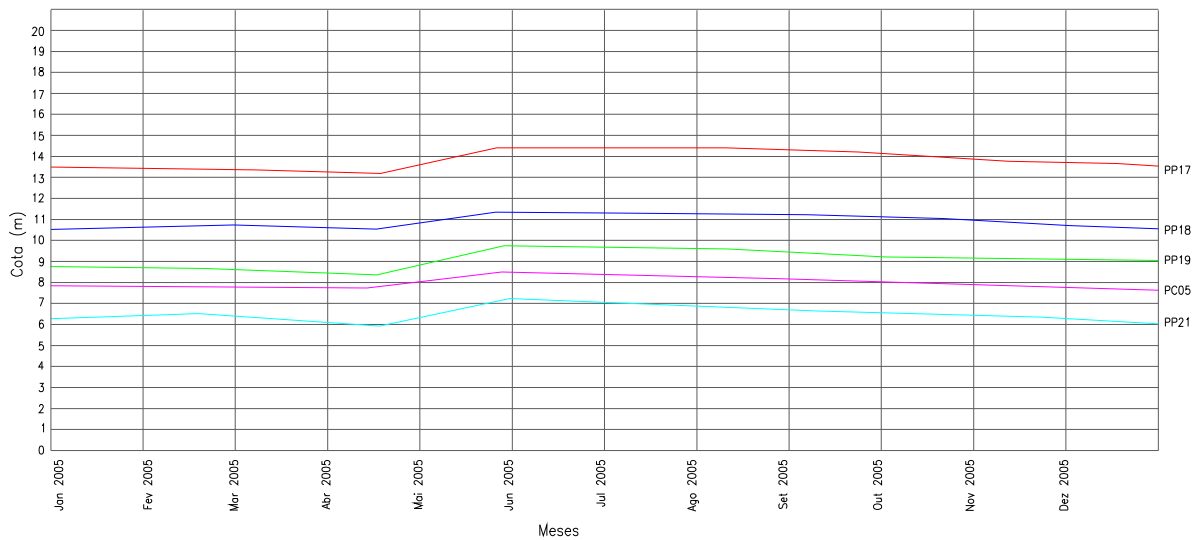


Figura 29 – Evolução dos piezômetros Pneumáticos e Casagrande em 2005 (EMBASA)

Tabela 2 – Cargas Piezométricas Máximas em 2005

Cargas Totais Máximas nos Piezômetros (m)				
Ano: 2005				
PP17	PP18	PP19	PC05	PP21
14,5	11,2	9,8	8,4	7,2

Foi considerada a contribuição do tapete drenante horizontal na percolação pela fundação da barragem e foi considerado o restante do maciço da barragem como impermeável, seguindo as recomendações de Cedergren (1977). Segundo este autor, nos casos de barragens de terra sobre fundação permeável a forma da rede de fluxo é controlada mais pela fundação do que pelo maciço da barragem. Para o autor, uma boa forma de traçar redes de fluxo nesta situação é considerar, inicialmente, o maciço da barragem como impermeável. A Figura 30 e a Tabela 3 apresentam, respectivamente, a rede de fluxo da Barragem de Santa Helena e as cargas totais nos pontos onde foram instalados os piezômetros.

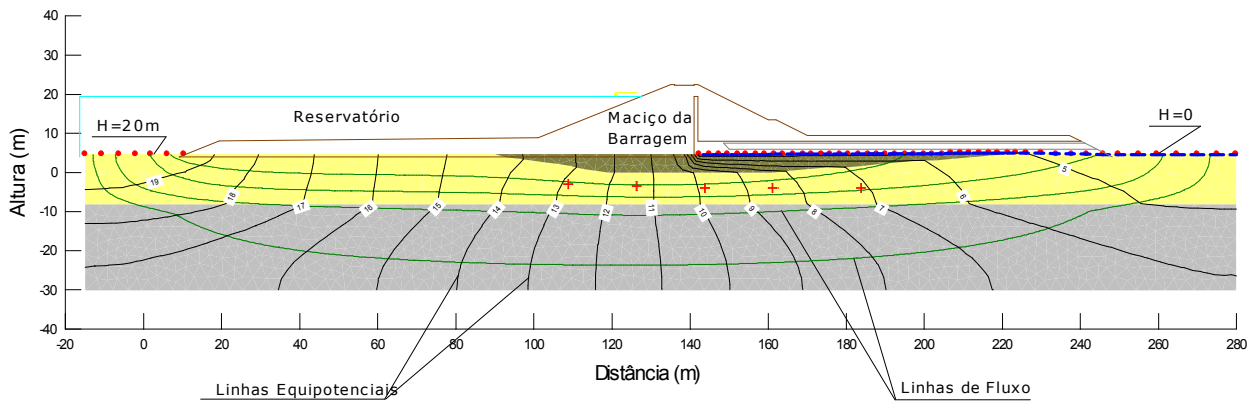


Figura 30 – Rede de Fluxo obtida para a Barragem de Santa Helena através do SEEP/W

Tabela 3 – Cargas Totais obtidas com o SEEP/W

Cargas Totais Obtidas com o SEEP/W (m)				
PP17	PP18	PP19	PC05	PP21
12,8	11,2	9,6	8,3	7,1

Os resultados encontrados com o SEEP/W aproximam-se dos valores obtidos com a instrumentação da barragem, conforme apresentado na Figura 31. Esta análise comprovou a aplicabilidade do Método dos Elementos Finitos através do programa SEEP/W na análise da percolação de água através de fundações permeáveis de barragens de terra. Portanto, o modelo computacional está validado e apto para ser utilizado na determinação da eficácia dos dispositivos de controle da percolação analisados nesta pesquisa.

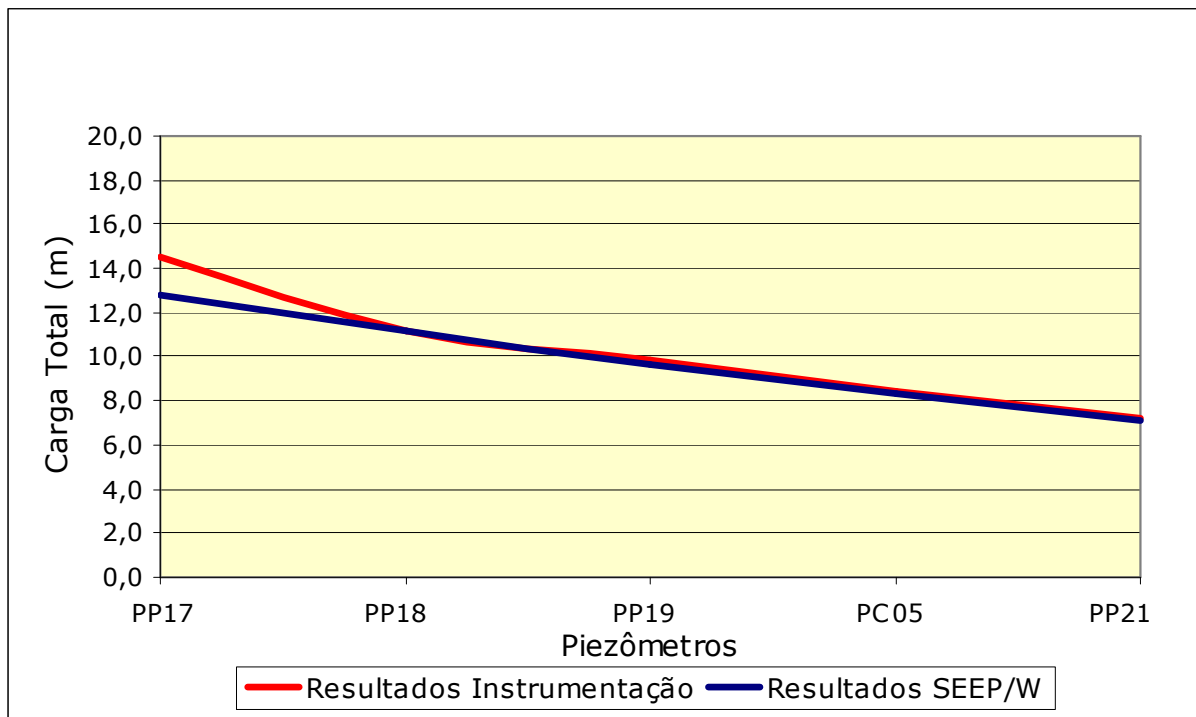


Figura 31 – Comparação dos resultados obtidos através da instrumentação da Barragem de Santa Helena e do programa SEEP/W

4 - MATERIAIS E MÉTODOS

A eficácia dos dispositivos de vedação e drenagem utilizados em fundações permeáveis de barragens de terra para controle da percolação foi determinada através de análises paramétricas realizadas em um modelo computacional representativo das barragens brasileiras existentes. Estas barragens têm em comum a alta permeabilidade do maciço de fundação que implica em problemas relacionados, principalmente, com a vazão, com a subpressão e com o gradiente hidráulico de saída.

Os resultados desta pesquisa serão válidos para a análise do comportamento destas barragens existentes e, principalmente, para as análises que poderão ser realizadas durante a elaboração de novos projetos de barragens que possuam características semelhantes com a barragem típica considerada neste trabalho.

Em todas as análises realizadas foram verificados os efeitos da anisotropia na permeabilidade do estrato da fundação. Foi adotado como anisotropia hidráulica, a relação entre os coeficientes de permeabilidade vertical e horizontal, dada pela fórmula $A = K_v/K_h$. Foram considerados os valores de anisotropia de 0.02, 0.1, 1 e 10 de forma a cobrir uma gama considerável de valores encontrados na prática.

Quanto às características dos recursos naturais que foram adotados nas análises paramétricas, considerou-se que, na região de implantação desta barragem típica, os solos argilosos disponíveis para utilização nos

dispositivos de vedação apresentam coeficiente de permeabilidade da ordem de 1×10^{-6} cm/s, que é um valor coerente com os materiais encontrados na realidade para utilização em obras desta magnitude.

Os materiais drenantes nestas obras normalmente não apresentam problemas, tendo em vista que estas barragens são implantadas em regiões com formações geológicas que se caracterizam pela ocorrência de espessas camadas de solos apropriados para serem utilizados, por exemplo, no dreno horizontal.

Neste capítulo serão abordadas as considerações sobre a seção típica da barragem, as condições de contorno, os dispositivos de controle utilizados e a metodologia para determinação da eficácia destes dispositivos.

4.1 - Seção Típica da Barragem

Para determinação da seção típica da barragem a ser analisada neste trabalho, foi realizado um levantamento das barragens brasileiras construídas sobre maciços de fundação constituídos por solos de formações aluvionares com altos coeficientes de permeabilidade. Foram encontradas 09 (nove) barragens com estas características, conforme apresentado na Tabela 4. Destas barragens, 08 (oito) estão localizadas na região nordeste e 01 (uma) na região sudeste.

Tabela 4 – Barragens brasileiras construídas sobre fundações altamente permeáveis

Barragens	Localização	Altura (m)	Altura do NA Máx. Normal (m)	Coefficiente de Permeabilidade Médio (cm/s)	Espessura Média da Camada Permeável (m)	Dispositivos para Controle do Fluxo pela Fundação
01 - Porto Primavera (Trecho Páleo)	Sudeste	24	21,7	$2,5 \times 10^{-2}$	5,0	Trincheira de Alívio
02 - Pedra Redonda	Nordeste	50	38	1×10^{-2}	13,0	Trincheira de Vedação Total
03 - Açú	Nordeste	40	33	1×10^{-2}	25,0	Trincheira de Vedação Total
04 - Jacaré	Nordeste	23	19,5	5×10^{-3}	10,0	Dreno Horizontal e Poços de Alívio
05 - Jenipapo	Nordeste	41	-	1×10^{-2}	20,0	Trincheira de Vedação Parcial
06 - Santa Helena	Nordeste	18,5	15,5	$1,6 \times 10^{-4}$	12,5	Tapete Impermeável à Montante
07 - Frecheirinha	Nordeste	27,5	25,6	1×10^{-2}	4,0	Trincheira de Vedação Total
08 - Tinguis	Nordeste	19	16,5	1×10^{-2}	5,0	Trincheira de Vedação Total
09 - Salinas	Nordeste	19,5	18,2	2×10^{-3}	8,0	Tapete à Montante e Poços de Alívio

A seção típica adotada foi determinada a partir dos valores médios encontrados nestas barragens. O resultado foi a obtenção da seção apresentada na Figura 32, cujas principais características são mostradas na Tabela 5.

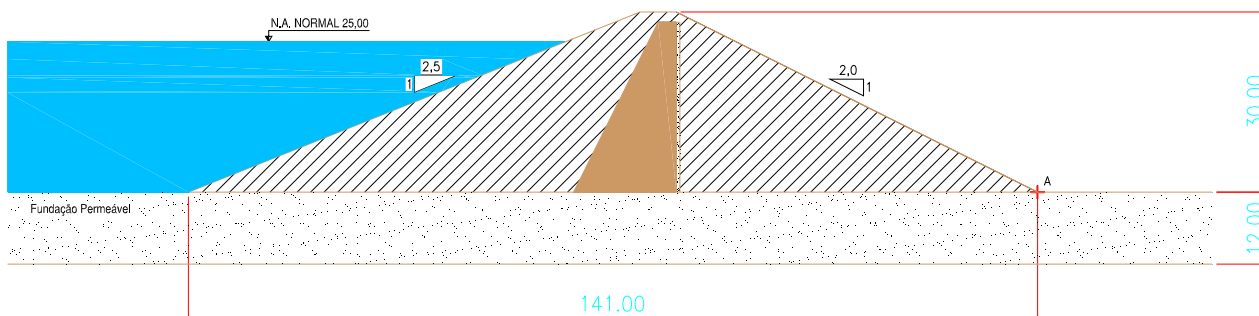


Figura 32 – Seção típica da barragem analisada

Tabela 5 – Principais características da barragem analisada

Altura (m)	Altura do NA Máx. Normal (m)	Coefficiente de Permeabilidade Médio da Fundação (cm/s)	Espessura Média da Camada Permeável (m)
30	25	1×10^{-2}	12,0

Foi adotada uma barragem de terra zoneada com núcleo constituído de solos argilosos de baixa permeabilidade, assentada sobre um maciço de fundação com 12 m de espessura, composto por solos aluvionares com coeficiente de permeabilidade de 1×10^{-2} cm/s.

4.2 - Modelo Computacional Utilizado

As análises paramétricas apresentadas ao longo desta pesquisa foram realizadas com o auxílio do programa SEEP/W do pacote GeoStudio. Este programa baseia-se no Método dos Elementos Finitos (MEF) para resolver os problemas de fluxo.

A modelagem do problema consistiu em determinar as características geométricas do maciço da fundação e suas condições de contorno quanto às cargas aplicadas, ao coeficiente de permeabilidade e à anisotropia hidráulica. O maciço da barragem foi considerado como impermeável, conforme recomendações de Cedergren (1977).

A malha do maciço da fundação foi modelada com base nas orientações apresentadas no manual do SEEP. Segundo este manual, a malha deve ser refinada ao máximo, de forma que seus elementos sejam compostos por quadrados ou por triângulos equiláteros, conforme apresentado na Figura 33. A obediência a estas orientações implica em um melhor desempenho do programa, e conseqüentemente, os resultados tornam-se mais confiáveis.

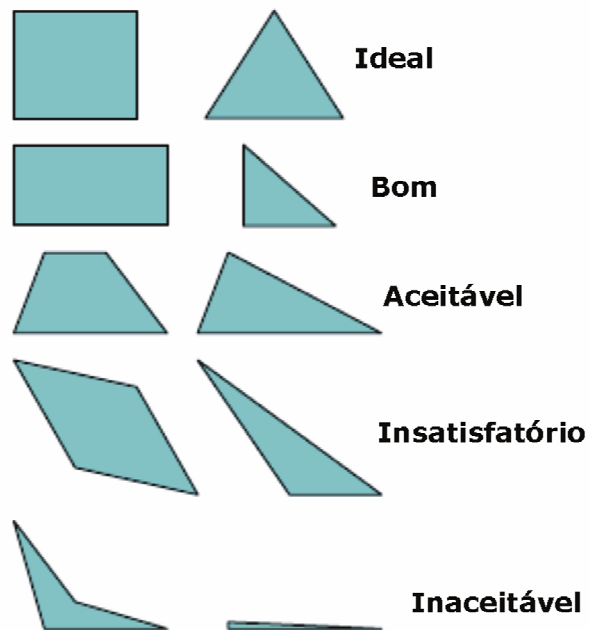


Figura 33 – Forma dos elementos da malha do SEEP e seu respectivo desempenho

Nas análises realizadas para determinação da eficácia dos dispositivos de controle, foram utilizadas malhas quadradas extremamente refinadas que contribuíram para obtenção de excelentes resultados. A Figura 34 mostra um detalhe da malha utilizada nas análises.

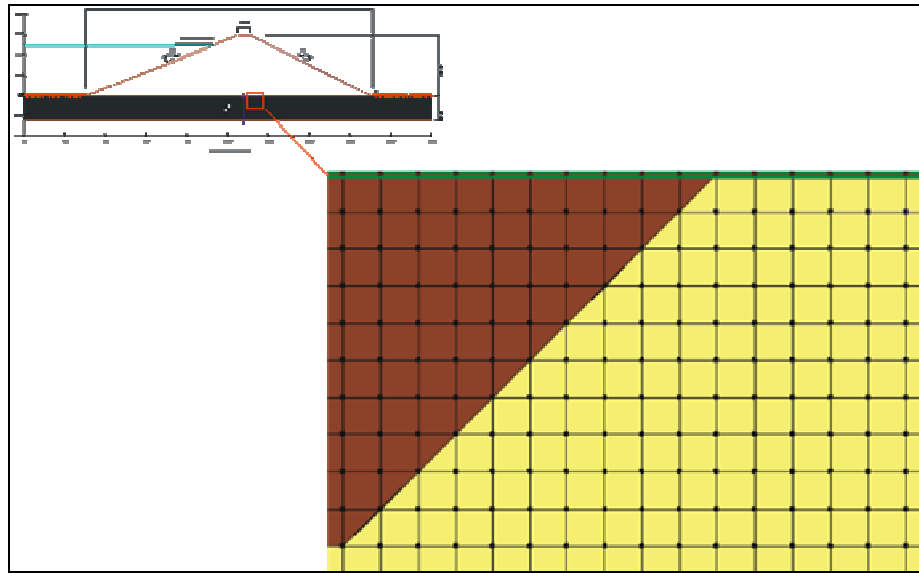


Figura 34 – Detalhe da malha quadrada utilizada nas análises paramétricas

4.2.1 - Condições de Contorno

Diante das características da barragem apresentadas na Figura 32 e na Tabela 5, foram determinadas às condições de contorno impostas ao modelo. No topo do maciço da fundação, em todo o trecho de montante, foi aplicada uma carga hidráulica total de 25 m.c.a para representar a carga hidráulica imposta pelo reservatório da barragem, conforme mostrado na Figura 35.

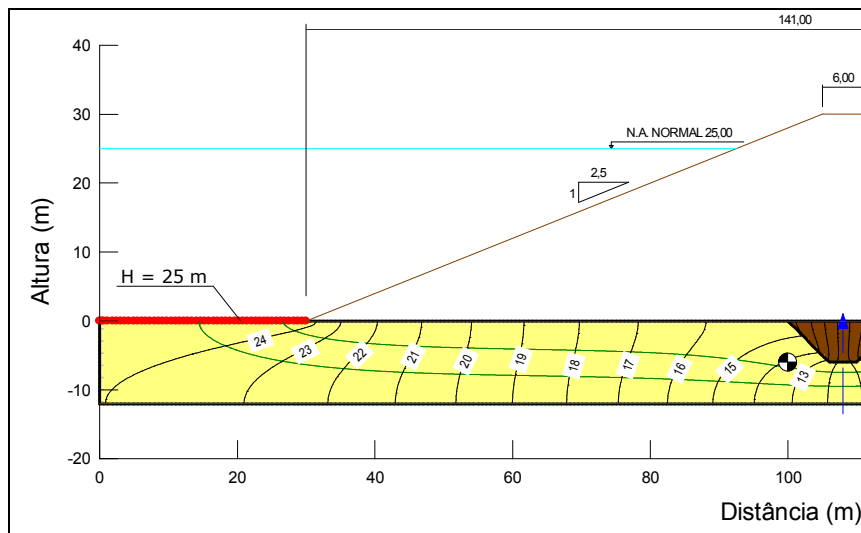


Figura 35 - Detalhe da condição de contorno aplicada à montante da barragem

À jusante do maciço da barragem, a carga total aplicada foi igual à zero, já que não foi considerado nível d'água nesta área (Figura 36).

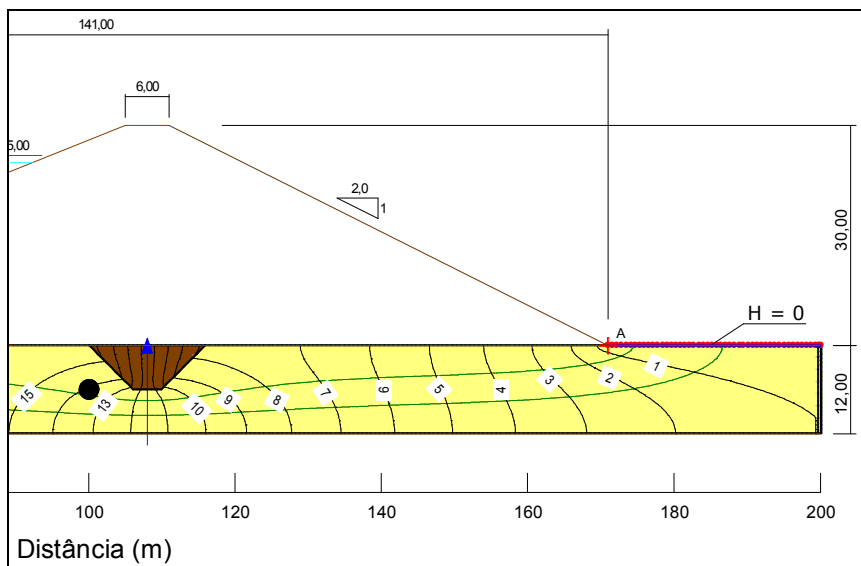


Figura 36 - Detalhe da condição de contorno aplicada à jusante da barragem

Os elementos da malha do maciço da fundação localizados nos extremos de montante e de jusante foram considerados como elementos

infinitos para que não houvesse interferência do tamanho da malha nos resultados obtidos. A Figura 37 ilustra a aplicação desta condição na malha utilizada.

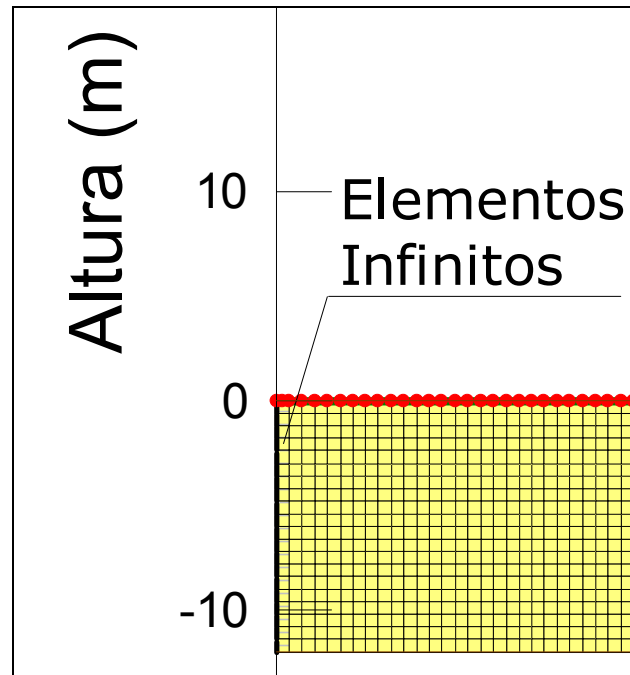


Figura 37 – Detalhe da consideração dos elementos infinitos nas extremidades da malha

Quanto às propriedades dos materiais utilizados, foi considerado que os solos que constituem o maciço da fundação possuem coeficiente de permeabilidade de 1×10^{-2} cm/s e que para a anisotropia hidráulica (A) deste solo, adotando $A = k_v/k_h$, foram utilizados os valores de 0.02, 0.1, 1 e 10.

As demais condições de contorno utilizadas são específicas de cada dispositivo analisado e serão apresentadas no Capítulo 5 desta dissertação.

4.3 - Dispositivos Analisados

Foi considerada neste trabalho a utilização dos seguintes dispositivos de controle da percolação:

- Dispositivos de Vedação
 - Trincheira de Vedação;
 - Parede Diafragma; e
 - Tapete Impermeável à Montante.
- Dispositivos de Drenagem
 - Tapete Drenante Horizontal; e
 - Trincheira de Alívio.

4.3.1 - Trincheira de Vedação

Conforme descrito anteriormente, a trincheira de vedação consiste na compactação do solo de baixa permeabilidade em trincheiras escavadas na fundação da barragem, sob o núcleo do maciço. A trincheira de vedação pode ser total ou parcial, ou seja, ela pode atravessar todo o estrato permeável ou penetrar apenas uma percentagem do mesmo, respectivamente.

O dimensionamento deste dispositivo de vedação foi realizado a partir das recomendações apresentadas nos livros e nos dados de barragens brasileiras encontrados durante esta pesquisa.

A trincheira foi adotada com as seguintes características: largura da base igual a 4,0 m para permitir a compactação do solo, conforme sugestão de Cruz (1996); inclinação dos taludes de 1V:1H, valor adotado em várias barragens do Nordeste do Brasil; e solo do aterro com coeficiente de permeabilidade médio de 1×10^{-6} cm/s. A Figura 38 apresenta as características da trincheira de vedação utilizada nas análises.

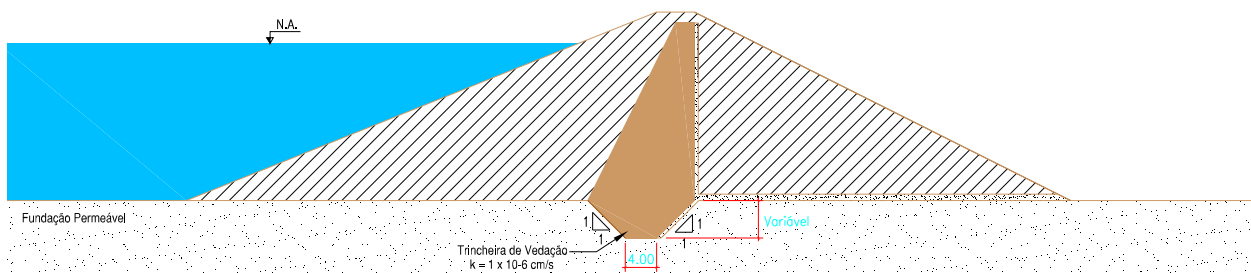


Figura 38 – Características da trincheira de vedação utilizada nas análises

Para verificar a influência do percentual de penetração da trincheira no estrato permeável da fundação, foram analisadas trincheiras com 25%, 50%, 75% de penetração (trincheiras parciais) e com 100% de penetração (trincheira total). Em todas as situações houve variação da anisotropia do solo de fundação.

4.3.2 - Parede Diafragma

A parede diafragma pode ser rígida, plástica, em colunas injetadas ou em colunas secantes de concreto, construída sob a zona do núcleo das barragens. São utilizadas em formações arenosas e em cascalho.

Dentre os tipos de paredes diafragma, destacam-se os diafragmas plásticos, que são constituídos por materiais deformáveis que compatibilizam melhor com o maciço da barragem, tornando-o menos susceptível ao trincamento.

A parede diafragma possui normalmente de 1 a 3 m de espessura e a profundidade é limitada pelo tipo de equipamento de escavação, pela compacidade do material de fundação e pela presença de matacões. A estabilidade das paredes da trincheira escavada é mantida com o uso de lama bentonítica.

A eficácia desta solução está estritamente relacionada com o seu processo construtivo. Na teoria, ela se apresenta como uma solução bastante interessante, pois intercepta todo o estrato permeável da fundação, assim como a trincheira de vedação, utilizando, porém, um volume muito menor de material de preenchimento. Entretanto, as características geométricas do diafragma associada às características do solo de fundação podem implicar em dificuldades construtivas que muitas vezes inviabilizam sua utilização. Exemplo disso ocorre nos casos em que o nível do lençol freático é elevado e impede a escavação do diafragma sem a utilização de revestimentos ou sem o rebaixamento do lençol. Além disso, a compactação/adensamento do material de preenchimento em escavações com estas características é muito complicada e pode acarretar em imperfeições na estrutura do diafragma que comprometem a sua eficácia. Nesta análise, foi adotada uma parede

diafragma com 1,0 m de espessura, conforme recomendações apresentadas anteriormente.

A representação das implicações das possíveis imperfeições na eficácia do sistema foi feita através da variação do coeficiente de permeabilidade médio do material de preenchimento. Ao invés de considerar um número de imperfeições/aberturas no diafragma que implicaria em um aumento da permeabilidade média do sistema, foi considerada diretamente uma variação da permeabilidade.

Da mesma forma que nos outros dispositivos de vedação, o material de preenchimento, seja ele solo, solo-bentonita, solo-cimento, dentre outros, apresenta um coeficiente de permeabilidade médio de 1×10^{-6} cm/s. Além deste valor, foram consideradas permeabilidades de 10^{-7} cm/s, para representar possíveis misturas que poderiam diminuir a permeabilidade do material natural, e 10^{-5} e 10^{-4} cm/s para representar as implicações das imperfeições.

A Figura 39 apresenta as características da parede diafragma utilizada nas análises.

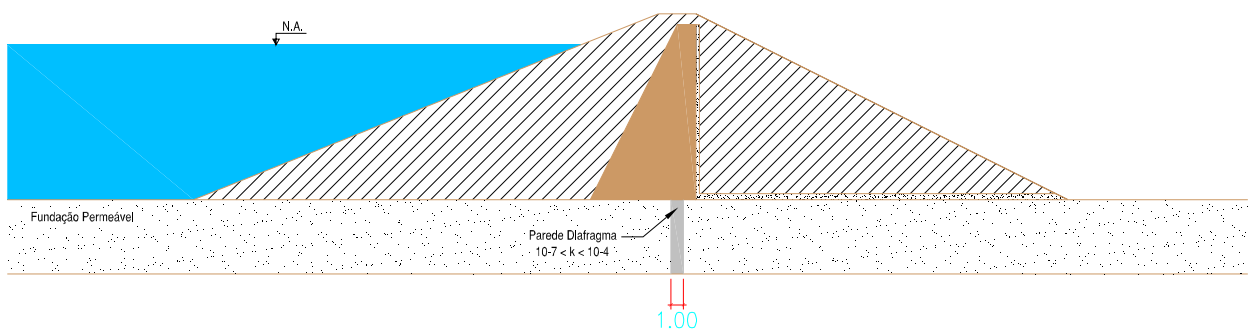


Figura 39 – Características da parede diafragma utilizada nas análises

4.3.3 - Tapete Impermeável à Montante

A técnica do tapete de montante, assim como da trincheira de vedação parcial, visa apenas aumentar o caminho de percolação. Esta solução é adotada quando o estrato permeável da fundação possui grande profundidade e a sua permeabilidade é relativamente baixa. O tapete impermeável consiste em um aterro compactado constituído de solo de baixa permeabilidade executado à montante da barragem, e que deve ser combinado com um sistema de drenagem à jusante. O comprimento deste tapete depende da carga hidráulica do reservatório e da permeabilidade da fundação (Marsal et al., 1971).

O solo utilizado na aplicação deste dispositivo foi o mesmo utilizado na trincheira de vedação, ou seja, com coeficiente de permeabilidade médio de 1×10^{-6} cm/s. Como este dispositivo visa aumentar o caminho de percolação na fundação da barragem, as análises realizadas avaliaram o comportamento das variáveis vazão, gradiente e subpressão em função do aumento do comprimento do tapete e da variação da anisotropia. A Figura 40 apresenta as características do tapete impermeável utilizado nas análises.

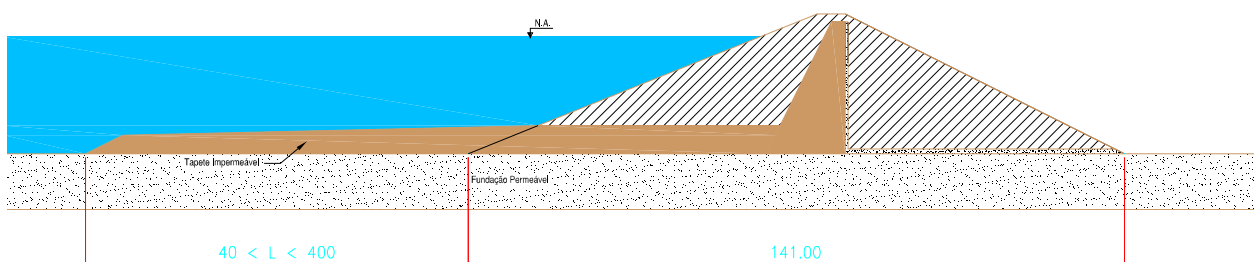


Figura 40 – Características do tapete impermeável utilizado nas análises

4.3.4 - Tapete Drenante Horizontal

Segundo Cruz (1996), apesar do tapete drenante horizontal ter a função de dar vazão a água que percola pelo maciço da barragem, seu principal objetivo é controlar o fluxo pela fundação.

O tapete drenante horizontal foi implantado abaixo do espaldar de jusante do maciço da barragem na interface com o maciço da fundação. Foi considerado um tapete muito mais permeável que o solo da fundação e adequadamente dimensionado, de forma a garantir a estabilidade do talude de jusante contra ruptura provocada pela ascensão elevada da linha freática dentro do tapete.

Adotou-se que a carga hidráulica ao longo do tapete atinge o valor máximo igual a 3 m.c.a na interseção deste dispositivo com o filtro vertical (chaminé) e atinge seu valor mínimo igual a zero no pé do talude de jusante. Para aplicação das condições de contorno nestes casos, foi considerado que a perda de carga ao longo do tapete é linear, conforme apresentado na Figura 41.

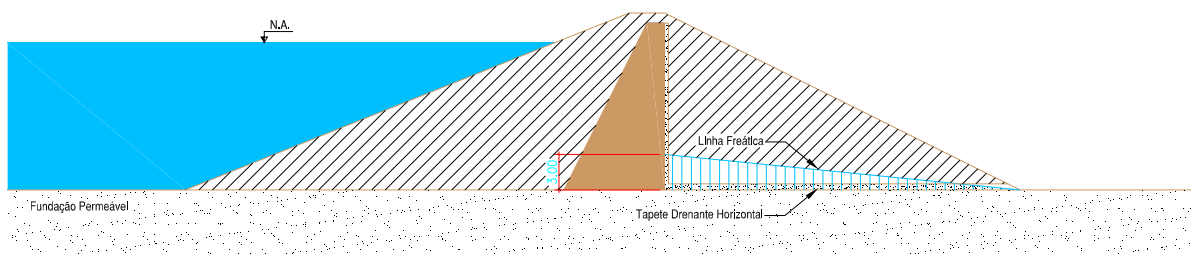


Figura 41 – Características do tapete drenante horizontal utilizado nas análises

4.3.5 - Trincheira de Alívio

Como dito anteriormente, a percolação de água através da fundação de uma barragem pode trazer riscos a sua segurança de formas diferentes: pode desenvolver elevadas subpressões sob o espaldar de jusante, diminuindo as tensões efetivas nessa região e, conseqüentemente, reduzindo a resistência ao cisalhamento do talude ou proporcionar elevados gradientes hidráulicos na sua saída, podendo originar um processo de erosão regressiva (*piping*).

O objetivo da trincheira de alívio é drenar as águas que fluem através do maciço e aliviar as subpressões impostas pela carga hidráulica do reservatório. Nas análises deste trabalho foi considerada uma trincheira com 3 e 6 m de profundidade e com 0,50 m de espessura.

A Figura 42 apresenta a seção da barragem analisada com este tipo de dispositivo.

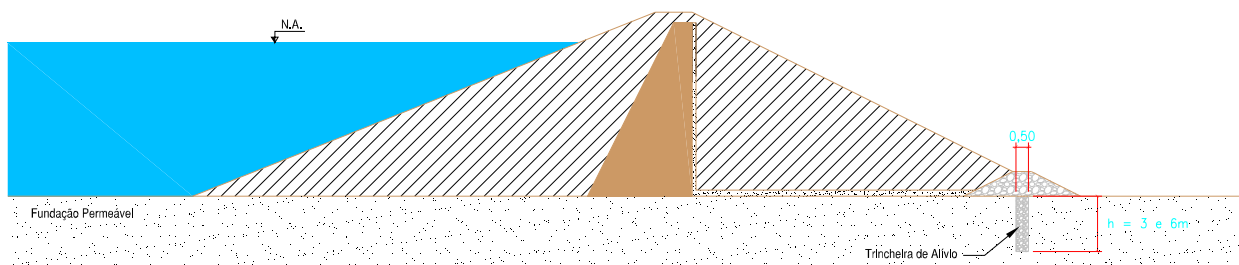


Figura 42 – Características da trincheira de alívio utilizada nas análises

4.4 - Metodologia para Determinação da Eficácia dos Dispositivos

Para conhecer a eficácia de todos os possíveis elementos de um sistema de controle da percolação é preciso determinar, preliminarmente, os parâmetros iniciais de projeto, considerando a barragem sem dispositivos para controle da percolação. A seção da barragem analisada é novamente apresentada na Figura 43.

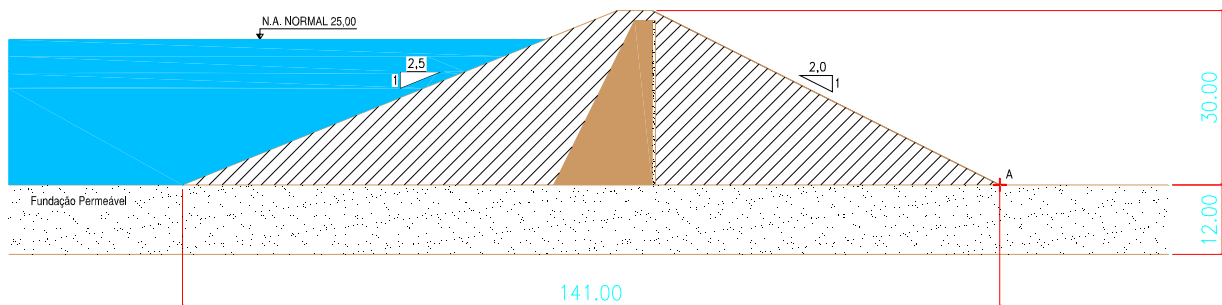


Figura 43 – Seção típica da barragem analisada

Nesta seção, foram calculadas as grandezas vazão, gradiente de saída no pé do talude de jusante (ponto A) e subpressão sob o espaldar de jusante sem considerar a utilização de dispositivos de controle. Nas análises realizadas nesta situação e em todas as análises realizadas posteriormente foram verificados os efeitos da anisotropia na permeabilidade do solo da fundação.

Foi adotada como anisotropia a relação entre os coeficientes de permeabilidade vertical e horizontal, dada pela fórmula K_v/K_h , e foram considerados os valores de 0.02, 0.1, 1 e 10.

A eficácia dos dispositivos foi calculada a partir das três variáveis analisadas (vazão, gradiente e subpressão), conforme Equações apresentadas a seguir.

$$E = 1 - \frac{Q}{Q_0}$$

Equação 17

$$E = 1 - \frac{i}{i_0}$$

Equação 18

$$E = 1 - \frac{u}{u_0}$$

Equação 19

Onde,

E = Eficácia do sistema;

Q = Vazão percolada através de uma seção transversal com dispositivo de controle ($L^3.T^{-1}$);

Q_0 = Vazão estimada considerando que não há dispositivo de controle e que o reservatório está completamente cheio ($L^3.T^{-1}$);

i = Gradiente de saída no pé do talude de jusante da barragem (ponto A) ($L.L^{-1}$);

i_0 = Gradiente de saída considerando que não há dispositivo de controle e que o reservatório está completamente cheio ($L.L^{-1}$);

u = Subpressão sob o espaldar de jusante da barragem ($F.L^{-1}$); e

u_0 = Subpressão considerando que não há dispositivos de controle e que o reservatório está completamente cheio ($F.L^{-1}$).

5 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta a eficácia dos dispositivos de controle empregados em fundações permeáveis de barragens de terra. Foram analisadas as seções em que os dispositivos de controle são utilizados isoladamente e em conjunto, onde foram encontrados os melhores resultados. Também foi analisada a equivalência dos resultados encontrados nesta pesquisa com os obtidos a partir das equações apresentadas por Ambraseys (1963) e por Marsal et al. (1971). A forma de apresentação dos resultados, principalmente com relação à eficácia dos dispositivos, buscou facilitar a compreensão do problema e permitir a sua aplicação, sempre que possível, nos projetos de barragens de terra assentadas sobre fundações permeáveis.

Inicialmente a seção típica da barragem foi analisada sem a utilização de dispositivos de controle para poder avaliar a eficácia destes dispositivos após a sua implantação. Foi analisada a vazão percolada através da fundação, o gradiente hidráulico de saída no pé de jusante da barragem (ponto A apresentado na Figura 43) e a subpressão sob o espaldar de jusante. A análise da subpressão foi realizada sob o espaldar de jusante da barragem, pois a sua principal implicação é a redução do fator de segurança contra o deslizamento do talude de jusante devido à redução da componente vertical responsável pela estabilização do maciço.

Posteriormente foram analisadas as seções típicas com a utilização isolada dos dispositivos de vedação e de drenagem e em seguida foram analisadas as situações em que estes dispositivos são utilizados em conjunto. As hipóteses de utilização dos dispositivos de controle, adotadas nesta pesquisa, são apresentadas a seguir.

- Aplicação Isolada dos Dispositivos de Vedação
 - Seção Típica com Trincheira de Vedação;
 - Seção Típica com Parede Diafragma; e
 - Seção Típica com Tapete Impermeável à Montante.
- Aplicação Isolada dos Dispositivos de Drenagem
 - Seção Típica com Tapete Drenante Horizontal; e
 - Seção Típica com Trincheira de Alívio.
- Aplicação, em Conjunto, dos Dispositivos de Vedação e Drenagem
 - Seção Típica com Trincheira de Vedação, com Tapete Drenante Horizontal e com Trincheira de Alívio;
 - Seção Típica com Parede Diafragma, com Tapete Drenante Horizontal e com Trincheira de Alívio; e
 - Seção Típica com Tapete Impermeável à Montante, com Tapete Drenante Horizontal e com Trincheira de Alívio.

5.1 - Seção Típica Sem Dispositivos de Controle

Os resultados obtidos para a seção típica da barragem analisada sem dispositivos de controle, considerando os valores de anisotropia hidráulica (k_v/k_h) de 0.02, 0.1, 1 e 10 são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados obtidos para a barragem SEM dispositivos de controle

Anisotropia (Kv/Kh)	Vazão (l/s/m)	Gradiente (m/m)	Subpressão (kN/m)
0,02	0,14	2,97	4474
0,1	0,17	1,63	4204
1	0,20	0,55	3800
10	0,21	0,14	3613

Os valores encontrados para as variáveis vazão, gradiente hidráulico e subpressão, com exceção do gradiente para uma anisotropia igual a 10, são muito superiores aos limites recomendados na literatura e apresentados no Capítulo 2, inviabilizando a construção de barragens sem a utilização de algum dos dispositivos de controle disponíveis. Foram adotados como aceitáveis valores abaixo de 0,08 l/s/m para a vazão, 0,5 m/m para o gradiente e 1500 kN/m para a subpressão, que representa cerca de 10% da componente vertical na área do espaldar de jusante.

Utilizando a fórmula de Ambraseys (1963), apresentada na Equação 9, a vazão que percola através do maciço da fundação sem dispositivos de controle, considerando uma anisotropia hidráulica igual a 1, é a mesma obtida através das análises realizadas neste trabalho, conforme apresentado na Equação 20 .

$$Q_0 = \frac{25 \cdot 10^{-4}}{(0,88 + 141/12)} = 0,0002m^3 / s / m = 0,20l / s / m$$

Equação 20

As Figuras 44 a 46 apresentam o comportamento das três variáveis analisadas em relação ao valor da anisotropia hidráulica do maciço da fundação em uma barragem sem dispositivos de controle. Os valores plotados nesta figura são os apresentados na Tabela 6.

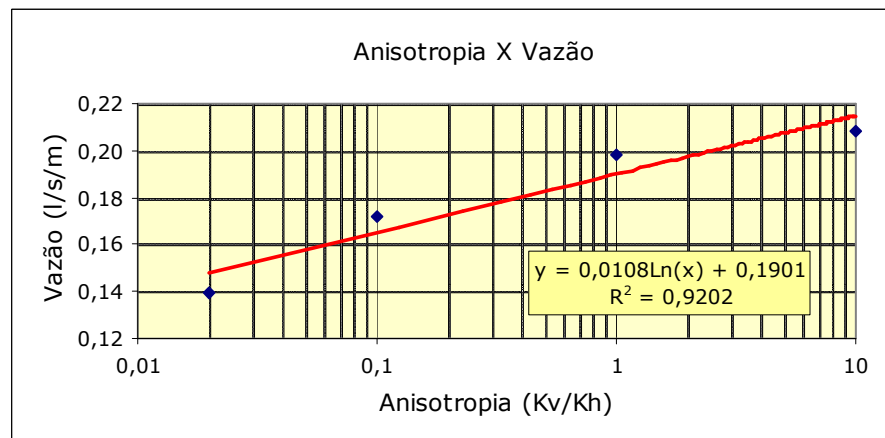


Figura 44 – Análise da vazão para seção típica SEM dispositivos de controle

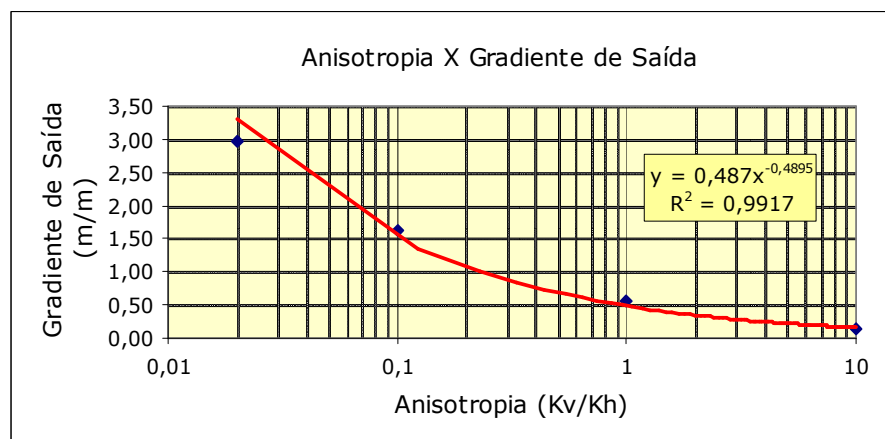


Figura 45 – Análise do gradiente para seção típica SEM dispositivos de controle

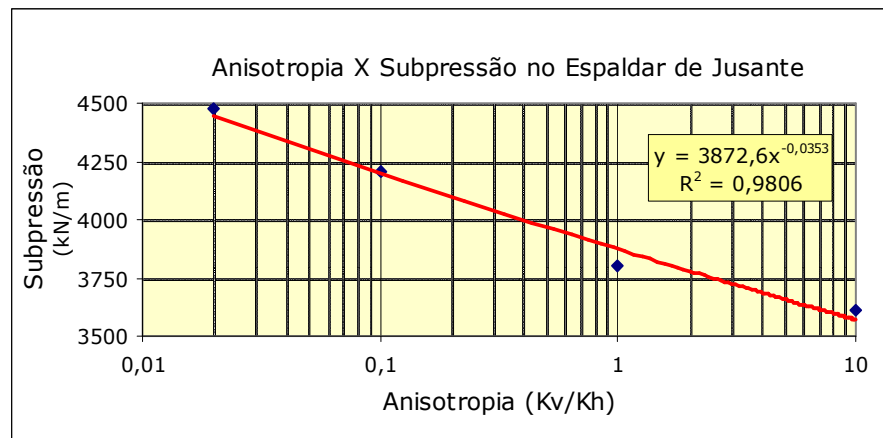


Figura 46 – Análise da subpressão para seção típica SEM dispositivos de controle

Pode-se notar que o aumento da anisotropia hidráulica implica em um aumento considerável da vazão percolada e em uma diminuição do gradiente hidráulico e da subpressão sob o espaldar de jusante da barragem. Estes resultados serviram de referência para todas as análises da eficácia dos dispositivos de vedação e drenagem considerados nesta pesquisa.

Considerando a análise realizada para uma anisotropia hidráulica igual a 0,1, a rede de fluxo representativa da percolação de água através do maciço da fundação da barragem é apresentada na Figura 47. Este valor de anisotropia é considerado como o mais próximo dos valores encontrados na prática para o tipo de formação geológica analisada, como no caso da Barragem de Santa Helena apresentado anteriormente.

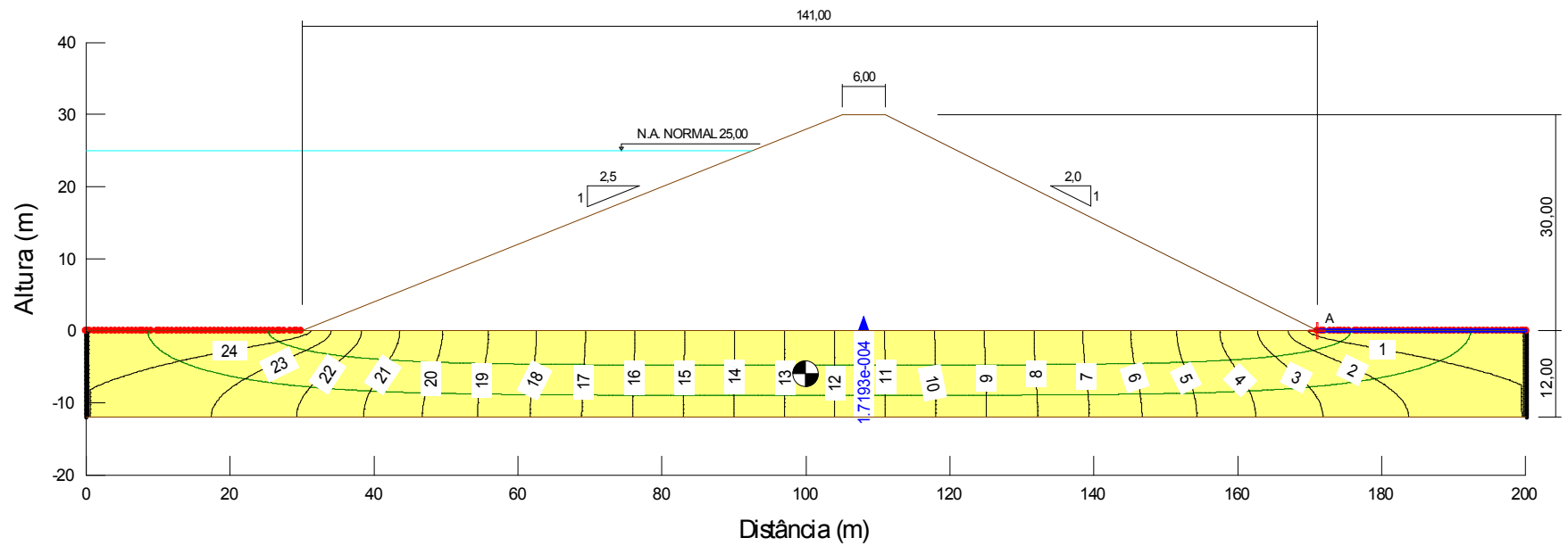


Figura 47 – Rede de fluxo para barragem SEM dispositivos de controle e com anisotropia hidráulica do maciço da fundação igual a 0,1

5.2 - Seção Típica com Trincheira de Vedação

Conforme descrito anteriormente, as análises realizadas para a trincheira de vedação verificaram a influência do percentual de penetração da trincheira no estrato permeável da fundação. Para isso foram analisadas trincheiras com 25%, 50%, 75% de penetração, trincheiras parciais, e com 100% de penetração, trincheira total. Em todas as situações foi variada também a anisotropia hidráulica do solo de fundação.

Os resultados obtidos para as três variáveis analisadas são apresentados na Tabela 7 e nas Figuras 48 a 50.

Tabela 7 – Resultados obtidos para a barragem com trincheira de vedação

Anisotropia (Kv/Kh)	Percentual de Penetração	Vazão (l/s/m)	Gradiente (m/m)	Subpressão (kN/m)
0,02	25%	0,13	2,73	3880
0,1		0,17	1,56	3964
1		0,19	0,53	3712
10		0,20	0,14	3556
0,02	50%	0,11	2,22	3112
0,1		0,15	1,40	3556
1		0,18	0,50	3530
10		0,20	0,13	3421
0,02	75%	0,09	1,64	2421
0,1		0,12	1,15	3002
1		0,16	0,44	3172
10		0,17	0,12	3117
0,02	100%	0,00	0,01	763
0,1		0,00	0,00	763
1		0,00	0,00	762
10		0,00	0,00	762

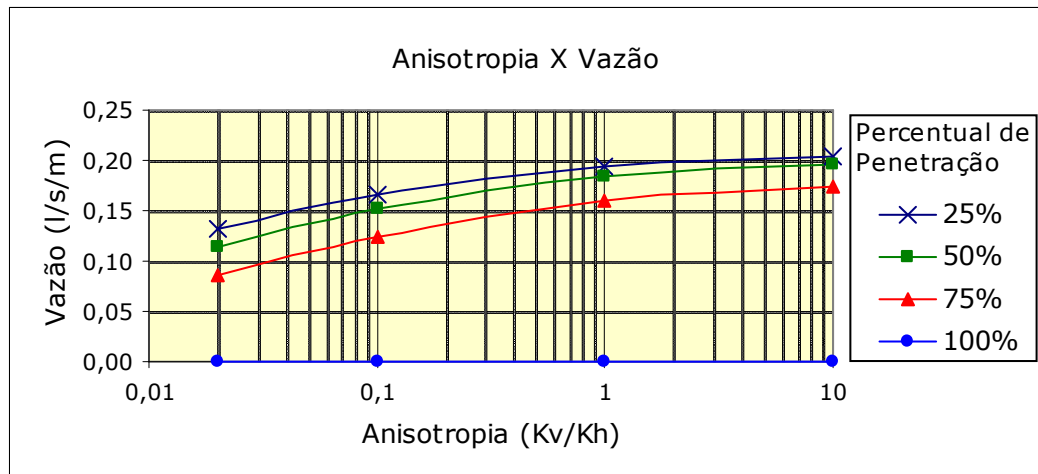


Figura 48 – Análise da vazão para seção típica com trincheira de vedação

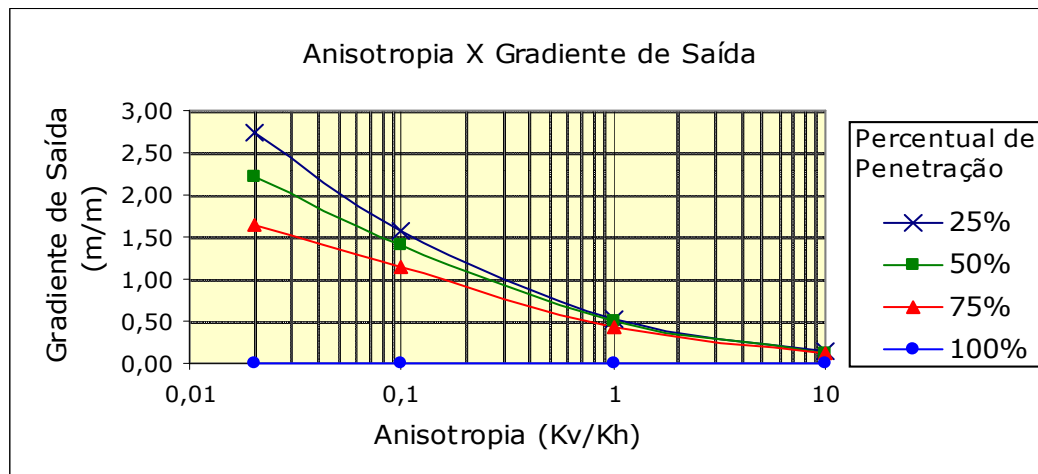


Figura 49 – Análise do gradiente para seção típica com trincheira de vedação

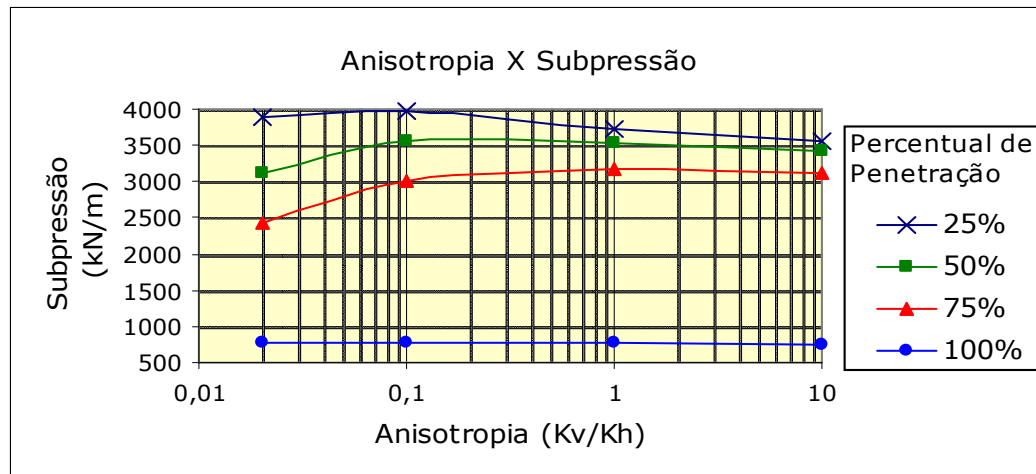


Figura 50 – Análise da subpressão para seção típica com trincheira de vedação

Quanto às variáveis vazão e gradiente hidráulico, é possível verificar que apesar da variação na ordem de grandeza dos valores obtidos, o comportamento do sistema é muito próximo do encontrado na análise da barragem sem dispositivos de controle, ou seja, há um aumento da vazão e uma diminuição do gradiente de saída com o aumento da anisotropia hidráulica, com exceção da situação da trincheira total em que os valores não variam com a anisotropia. Já para a subpressão, o comportamento do sistema sofre alterações, pois neste caso, o ponto de máxima subpressão pode ocorrer para uma anisotropia hidráulica de 0,1 ou 1, e não de 0,02 como ocorre para a seção sem dispositivos. Pode-se verificar também que, com exceção da trincheira total (100%), todos os valores encontrados continuam muito elevados e inaceitáveis na maioria dos casos.

Comparando os valores obtidos nesta pesquisa para a vazão percolada com os valores calculados a partir da Equação 15 apresentada por Marsal et

al.(1971), para a situação do maciço da fundação isotrópico ($A=1$), são encontrados os valores apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Comparação entre os resultados obtidos nesta pesquisa e os calculados a partir da equação de Marsal et al. (1971)

Percentual de Penetração	Vazões obtidas através da Equação de Marsal (l/s/m)	Vazões obtidas neste Trabalho (l/s/m)
25%	4,28E-04	1,94E-01
50%	3,00E-04	1,84E-01
75%	2,31E-04	1,61E-01
100%	1,87E-04	2,57E-04

Pode-se constatar que a equação proposta por Marsal et al. (1971) é válida apenas para a trincheira de vedação total, já que na sua fórmula o percentual de penetração da trincheira no estrato permeável da fundação não é considerado. Analisando o resultado para a trincheira total, o valor obtido nesta pesquisa para a vazão está bastante coerente com o valor calculado através da equação de Marsal et al.

A partir dos dados apresentados na Tabela 7 foi possível calcular a eficácia deste dispositivo em relação à percentagem de penetração na camada permeável da fundação para cada valor de anisotropia adotado. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 51 a 53.

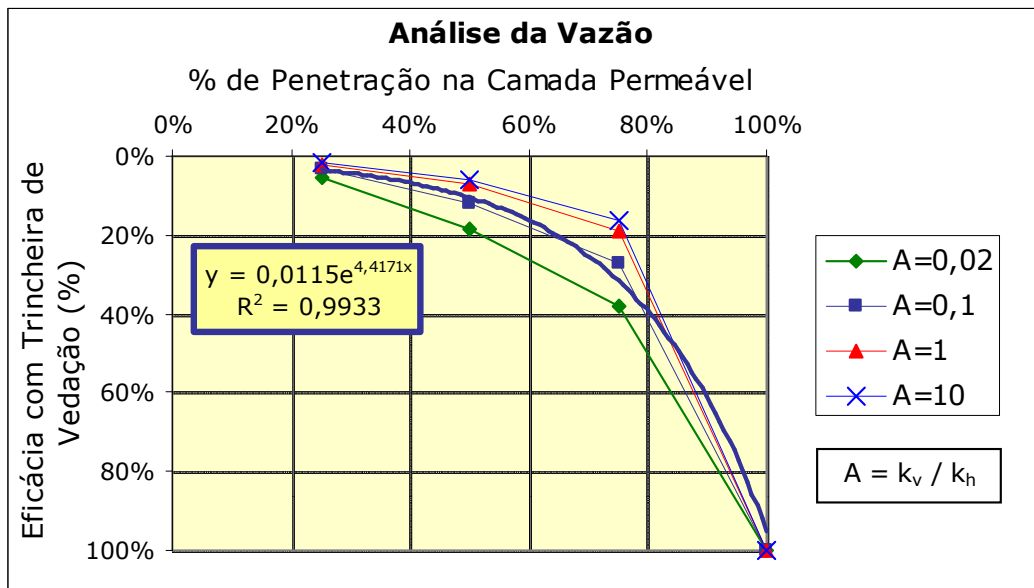


Figura 51 - Eficácia da seção típica com a trincheira de vedação - Análise da Vazão

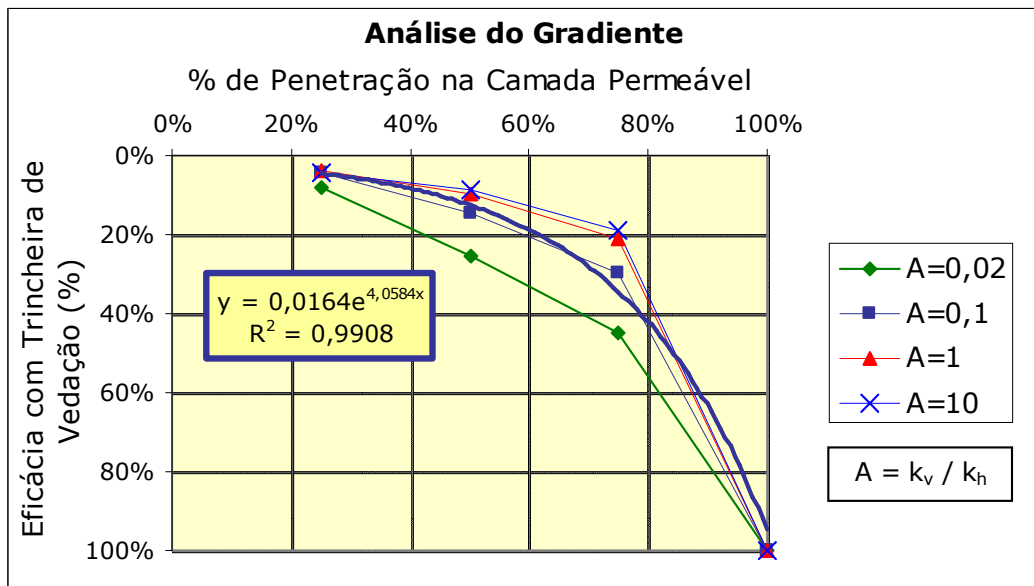


Figura 52 - Eficácia da seção típica com a trincheira de vedação - Análise do Gradiente

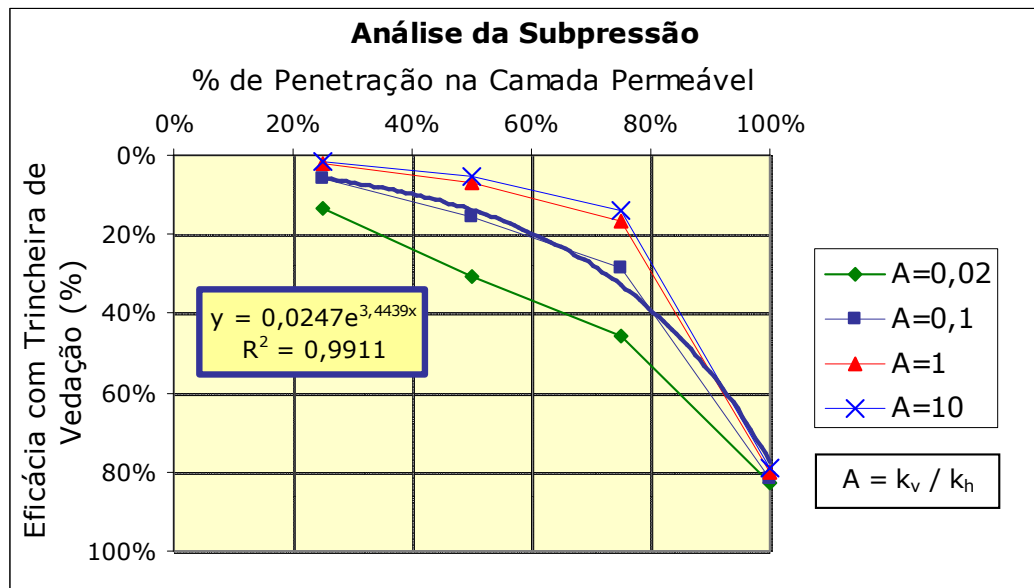


Figura 53 - Eficácia da seção típica com a trincheira de vedação – Análise da Subpressão

Como esperado, as Figuras 51 a 53 mostram claramente a baixa eficácia da trincheira parcial. No controle da vazão, por exemplo, a eficácia da trincheira que penetra 50% da camada permeável é de cerca de 15%. Estes valores são coerentes com os apresentados por Sowers (1962) e por Creager et al. (1945).

Os valores encontrados para os coeficientes de determinação, para uma razão de anisotropia de 0,1, foram extremamente satisfatórios e permitem a realização de análises preliminares em projetos de barragens.

Para representar a forma da rede de fluxo obtida com a utilização deste dispositivo, é apresentada na Figura 54 a seção típica da barragem para uma trincheira que penetra 50% da camada permeável da fundação. Foi considerado que o subsolo apresenta anisotropia igual a 0,1.

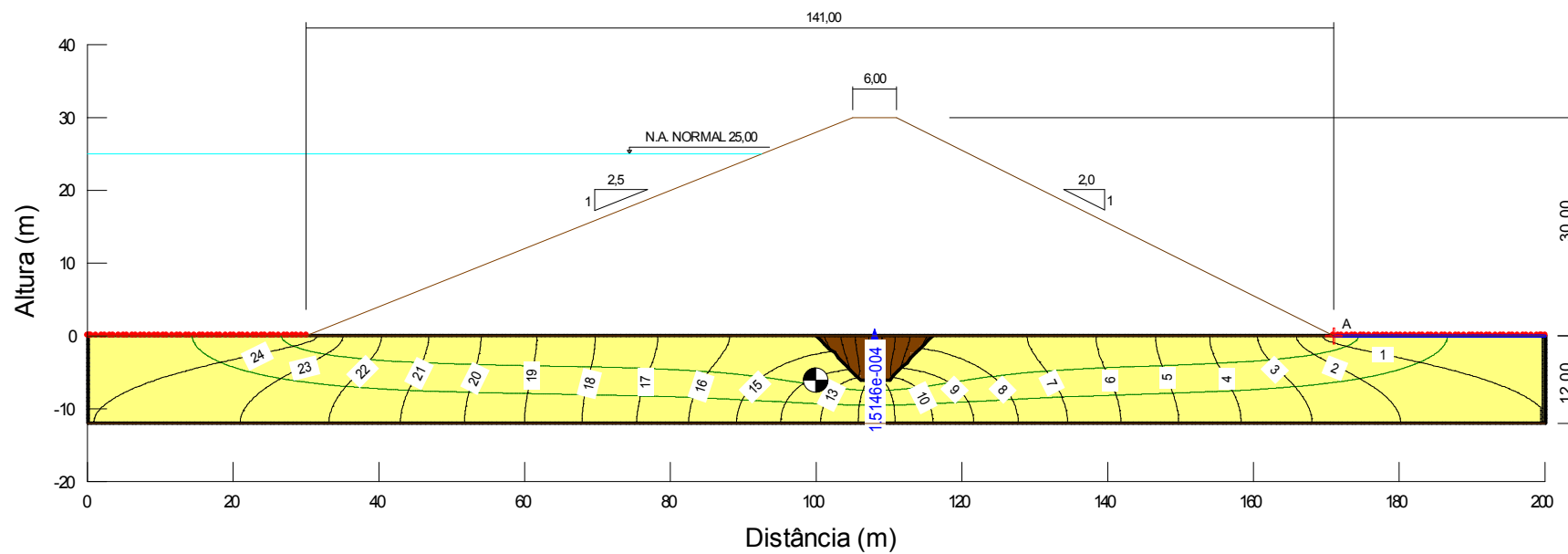


Figura 54 - Rede de fluxo para barragem com trincheira de vedação que penetra 50% da camada permeável e com anisotropia hidráulica do maciço da fundação igual a 0,1

5.3 - Seção Típica com Parede Diafragma

A análise apresentada a seguir refere-se a uma parede diafragma com 1,0 m de espessura e que atravessa todo o estrato permeável da fundação. As imperfeições deste dispositivo foram representadas através da variação do coeficiente de permeabilidade médio do seu material de preenchimento. Foram considerados materiais de preenchimento com coeficiente de permeabilidade que variam de 10^{-7} a 10^{-4} cm/s. Estes materiais podem ser solo, misturas de solo-bentonita ou solo-cimento, dentre outros tipos de preenchimento. Os coeficientes de permeabilidade de 10^{-5} e 10^{-4} cm/s representam o dispositivo com imperfeições/aberturas que aumentam a permeabilidade média do sistema. Os coeficientes 10^{-6} e 10^{-7} cm/s representam a parede diafragma intacta. Em todas as situações foi variada também a anisotropia hidráulica do solo de fundação.

Os resultados obtidos para as variáveis vazão, gradiente e subpressão são apresentados na Tabela 9 e nas Figuras 55 a 57. Nestas figuras foi considerada a relação entre o coeficiente de permeabilidade da parede diafragma (k) e o coeficiente de permeabilidade da fundação (k_0).

Tabela 9 - Resultados obtidos para a barragem com parede diafragma

Anisotropia (Kv/Kh)	Coef. de Permeabilidade da Parede Diafragma (cm/s)	Relação k/k_0 *	Vazão (l/s/m)	Gradiente (m/m)	Subpressão (kN/m)
0,02	1,0E-04	1,0E-02	0,10	1,97	3046
0,1			0,11	1,02	2692
1			0,12	0,32	2309
10			0,12	0,08	2154
0,02	1,0E-05	1,0E-03	0,02	0,51	808
0,1			0,03	0,24	651
1			0,03	0,07	527
10			0,03	0,02	483
0,02	1,0E-06	1,0E-04	0,00	0,06	124
0,1			0,00	0,03	103
1			0,00	0,01	87
10			0,00	0,00	82
0,02	1,0E-07	1,0E-05	0,00	0,01	40
0,1			0,00	0,00	39
1			0,00	0,00	37
10			0,00	0,00	36

* k_0 = Coef. de Permeabilidade da Fundação
 k = Coef. de Permeabilidade da Parede Diafragma

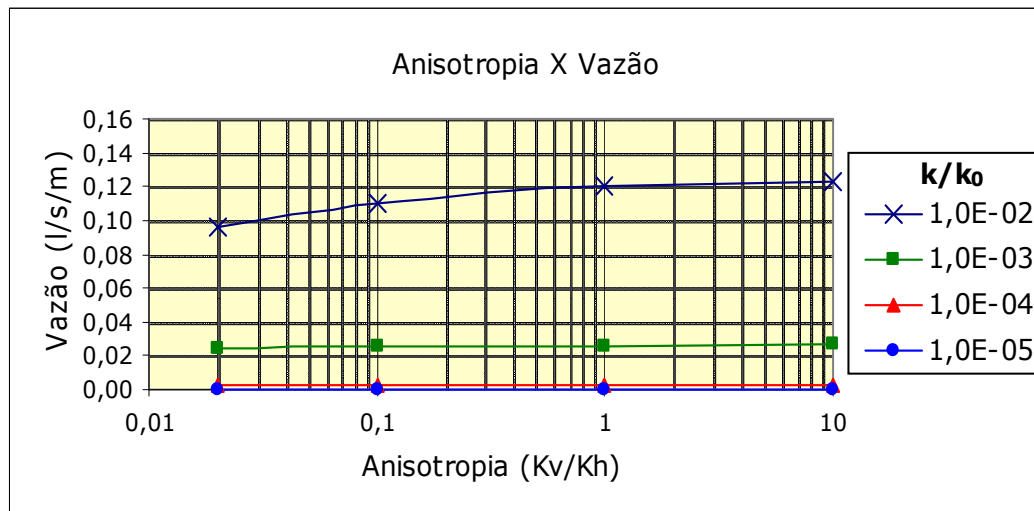


Figura 55 – Análise da vazão para seção típica com parede diafragma

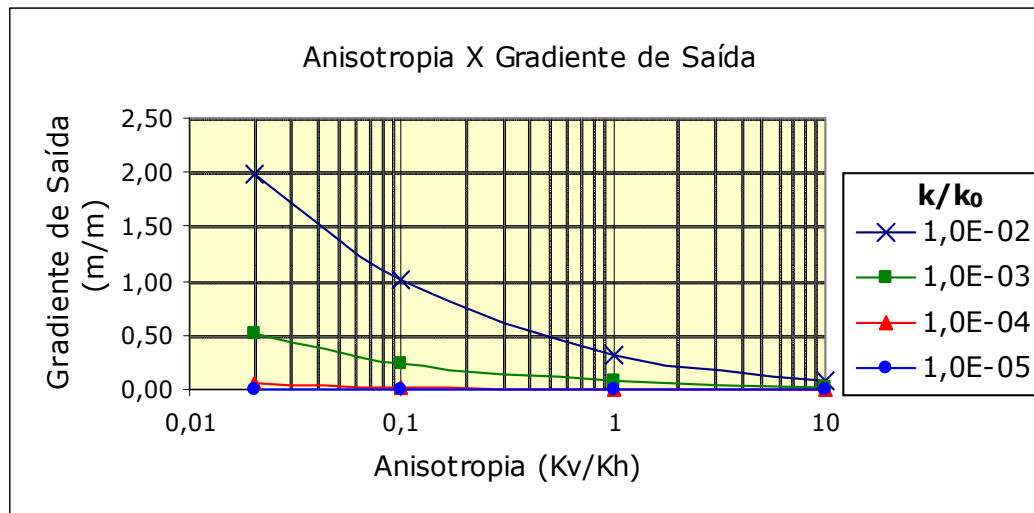


Figura 56 – Análise do gradiente para seção típica com parede diafragma

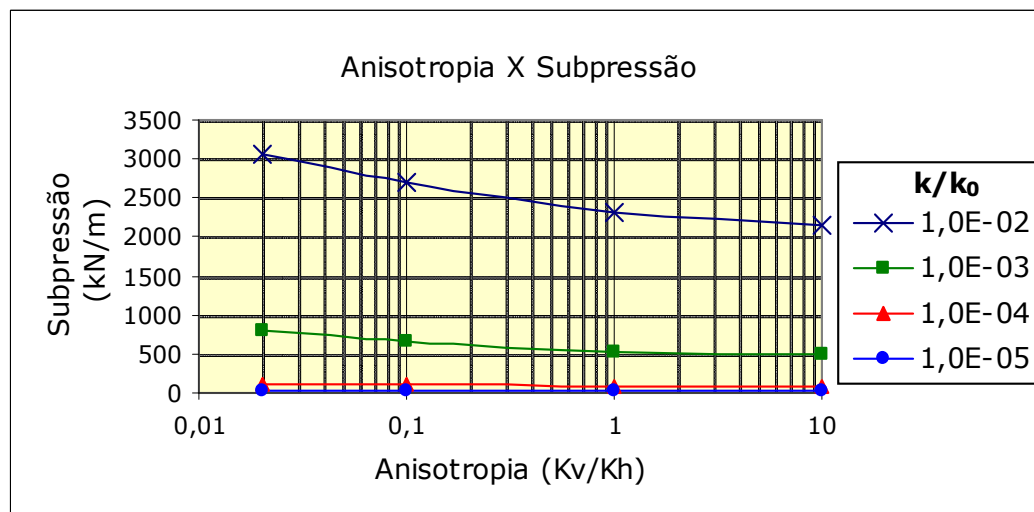


Figura 57 – Análise da subpressão para seção típica com parede diafragma

Como esperado, a parede diafragma sem imperfeições (relação entre os coeficientes de permeabilidade igual a 10^{-4} e 10^{-5}) apresenta resultados excelentes para todas as variáveis analisadas, muito semelhantes aos obtidos com a trincheira de vedação total. Com a presença das imperfeições, representada através do aumento do coeficiente de permeabilidade do

dispositivo e, conseqüentemente, do aumento da relação k/k_0 , os resultados atingem valores mais elevados, principalmente para relação $k/k_0 = 10^{-2}$.

Para este dispositivo, Marsal et al. (1971) também apresentaram uma formulação para determinação da vazão percolada através da fundação, conforme apresentado na Equação 16. Comparando os valores obtidos através desta equação com os obtidos nesta pesquisa encontram-se os resultados apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Comparação entre os resultados obtidos nesta pesquisa e os calculados a partir da equação de Marsal et al. (1971)

Resultados obtidos nesta Pesquisa			Resultados obtidos a partir da Equação de Marsal et al.	
Coef. de Permeabilidade da Parede Diafragma (cm/s)	Relação entre os Coef. de Permeabilidade do Diafragma e da Fundação (k/k_0)	Vazões Obtidas (l/s/m)	Relação "D/W" da Equação de Marsal et al.	Vazões obtidas (l/s/m)
1,0E-04	1,0E-02	1,20E-01	100	1,20E-01
1,0E-05	1,0E-03	2,61E-02	1000	2,61E-02
1,0E-06	1,0E-04	2,96E-03	10000	2,96E-03
1,0E-07	1,0E-05	3,00E-04	100000	3,00E-04

Os resultados apresentados na Tabela 10 mostram com bastante clareza a relação direta que existe entre o parâmetro apresentado por Marsal et al. (1971) para mensurar as imperfeições da parede diafragma (D/W) e o parâmetro adotado nesta pesquisa através da relação entre os coeficientes de permeabilidade médio da parede diafragma e da fundação (k/k_0), conforme apresentado na Figura 58.

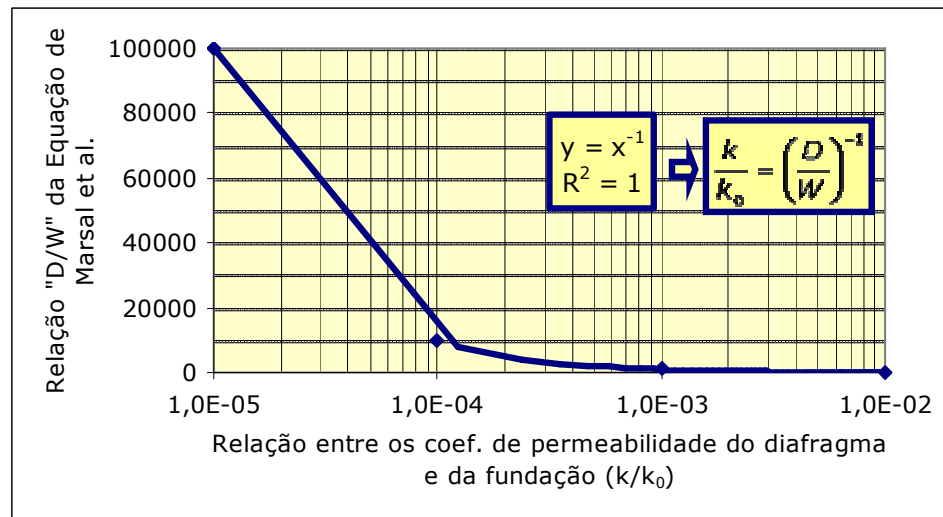


Figura 58 – Correlação entre o parâmetro adotado nesta pesquisa para as imperfeições do diafragma e o parâmetro adotado por Marsal et al. (1971)

A representação das imperfeições da parede diafragma adotada nesta pesquisa através da variação do coeficiente de permeabilidade do dispositivo permite uma melhor visualização e aplicação destas análises na prática. Sendo assim, a Equação 21 apresenta uma adequação da Equação 16 apresentada por Marsal et al. (1971) com a substituição da relação (D/W) pela relação $(k/k_0)^{-1}$.

$$\frac{Q}{k_0 \cdot H} = \frac{1}{0,88 + \frac{B}{D} + \left[\left(\frac{k}{k_0} \right)^{-1} - 1 \right] \cdot \frac{E}{D}}$$

Equação 21

Vale ressaltar que as imperfeições/aberturas que causam à elevação da vazão percolada através da fundação, no caso em que a relação (k/k_0) é igual a 1×10^{-2} , representam uma área total de $0,12 \text{ m}^2/\text{m}$ (variável W de Marsal et al.), ou seja, o somatório das aberturas existentes ao longo do

diafragma representa apenas 1% da área total do dispositivo. A influência destas imperfeições na eficácia deste dispositivo é apresentada nas Figuras 59 a 61.

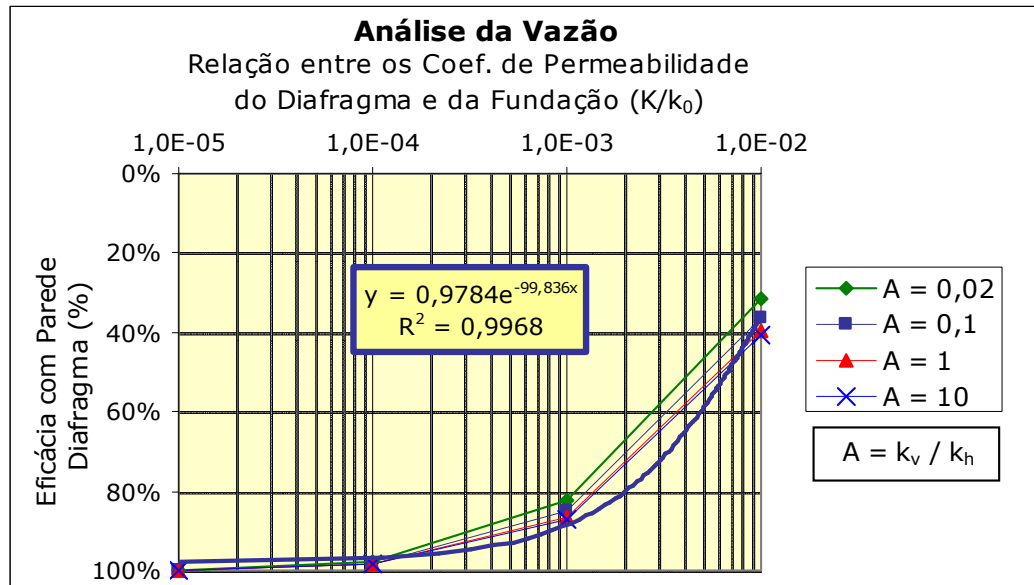


Figura 59 - Eficácia da seção típica com a parede diafragma – Análise da Vazão

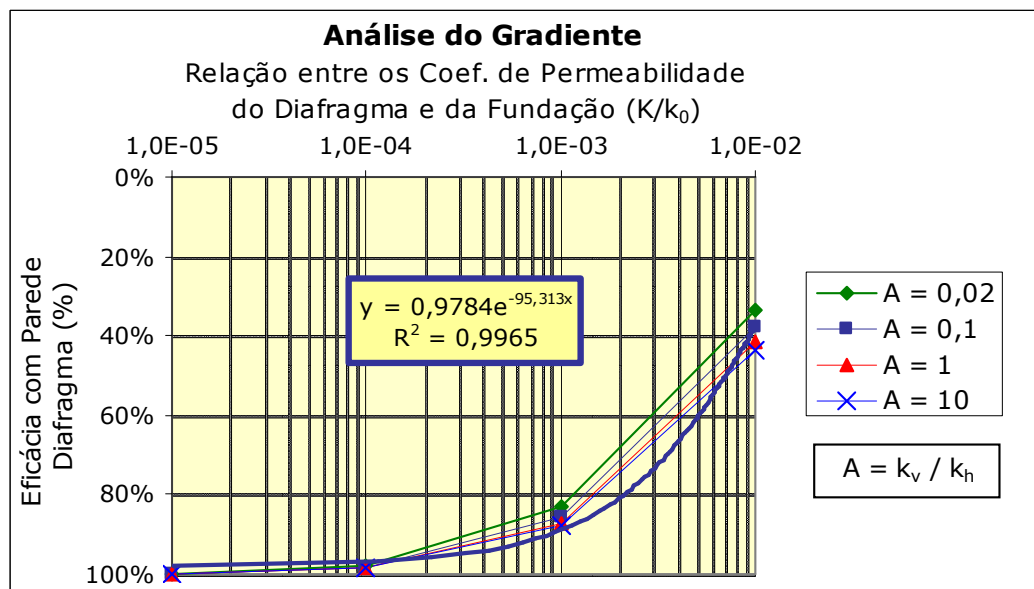


Figura 60 - Eficácia da seção típica com a parede diafragma – Análise do Gradiente

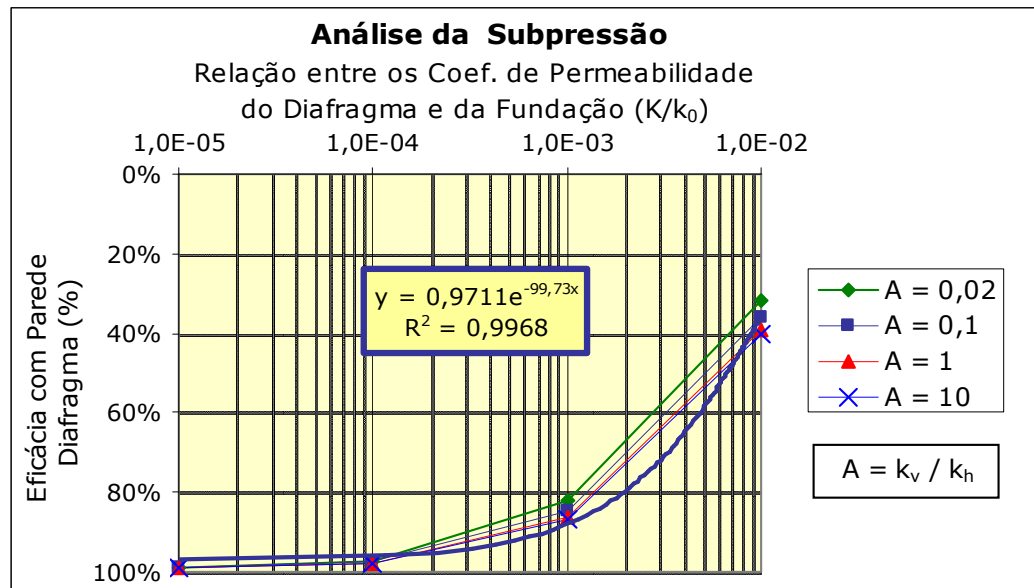


Figura 61 - Eficácia da seção típica com a parede diafragma- Análise da Subpressão

Pequenas imperfeições na parede diafragma, da ordem de $0,12 \text{ m}^2/\text{m}$, que corresponde a um coeficiente de permeabilidade médio do dispositivo de $1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, podem gerar grande redução na eficácia do dispositivo comprometendo a segurança da obra. Conforme apresentado nas Figuras 59 a 61, a eficácia do diafragma pode variar entre 99% e 30% a depender do estado físico do dispositivo.

Para representar a forma da rede de fluxo obtida com a utilização deste dispositivo, é apresentada na Figura 62 a seção típica da barragem para uma parede diafragma com coeficiente de permeabilidade de $1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, considerando que o subsolo apresenta anisotropia igual a 0,1.

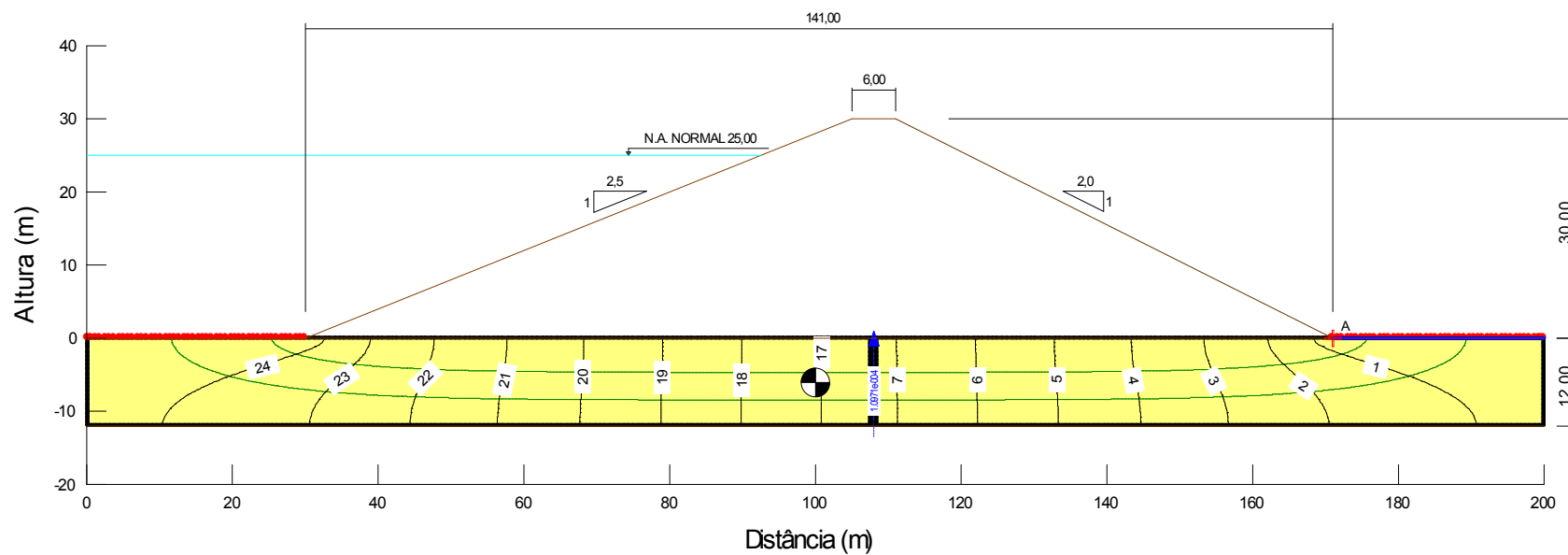


Figura 62 - Rede de fluxo para barragem com parede diafragma com $k = 1 \times 10^{-4}$ cm/s e com anisotropia hidráulica do maciço da fundação igual a 0,1

5.4 - Seção Típica com Tapete Impermeável à Montante

O solo utilizado na aplicação deste dispositivo foi o mesmo utilizado na trincheira de vedação, ou seja, com coeficiente de permeabilidade médio de 1×10^{-6} cm/s. Como este dispositivo visa aumentar o caminho de percolação na fundação da barragem, as análises realizadas avaliaram o comportamento da vazão, do gradiente e da subpressão em função do aumento do comprimento do tapete e da variação da anisotropia. Os gráficos foram traçados em função da relação entre o comprimento do tapete e a largura da base do maciço da barragem (L/B), conforme apresentado na Figura 63.

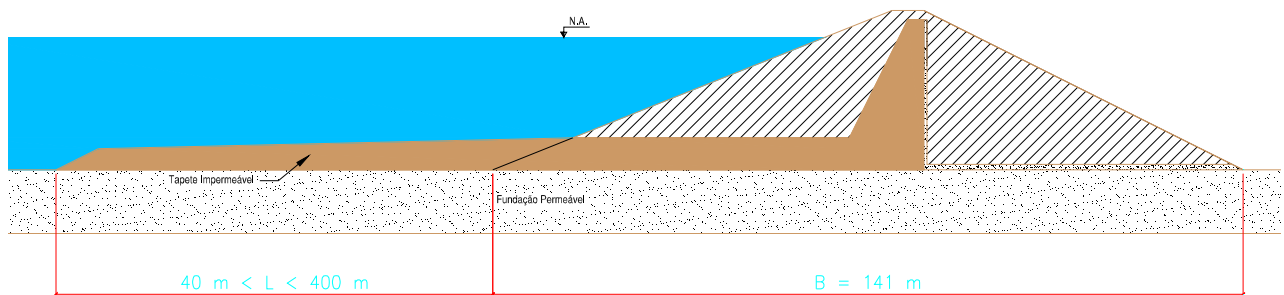


Figura 63 – Identificação dos parâmetros B (largura da base da barragem) e L (comprimento do tapete)

Os resultados obtidos para as três variáveis analisadas são apresentados na Tabela 11 e nas Figuras 64 a 66.

Tabela 11 - Resultados obtidos para a barragem com tapete impermeável à montante

Anisotropia (Kv/Kh)	Comprimento do Tapete (m)	Relação L/B*	Vazão (l/s/m)	Gradiente (m/m)	Subpressão (kN/m)
0,02	40	0,28	0,12	2,50	3761
0,1			0,14	1,34	3424
1			0,16	0,44	3005
10			0,16	0,11	2828
0,02	80	0,57	0,10	2,17	3255
0,1			0,12	1,13	2891
1			0,13	0,36	2486
10			0,13	0,09	2323
0,02	120	0,85	0,09	1,93	2874
0,1			0,10	0,98	2502
1			0,11	0,31	2119
10			0,11	0,08	1972
0,02	160	1,13	0,08	1,73	2577
0,1			0,09	0,87	2207
1			0,10	0,27	1847
10			0,10	0,07	1712
0,02	200	1,42	0,07	1,58	2339
0,1			0,08	0,78	1974
1			0,09	0,24	1637
10			0,09	0,06	1513
0,02	240	1,70	0,07	1,45	2144
0,1			0,07	0,71	1786
1			0,08	0,21	1470
10			0,08	0,05	1356
0,02	280	1,99	0,06	1,35	1980
0,1			0,07	0,65	1631
1			0,07	0,19	1333
10			0,07	0,05	1228
0,02	320	2,27	0,06	1,26	1842
0,1			0,06	0,59	1501
1			0,06	0,18	1220
10			0,06	0,04	1122
0,02	400	2,84	0,05	1,11	1618
0,1			0,05	0,51	1295
1			0,05	0,15	1043
10			0,06	0,04	957

* L = Comprimento do tapete impermeável (m)
B = Largura da base do maciço da barragem (m)

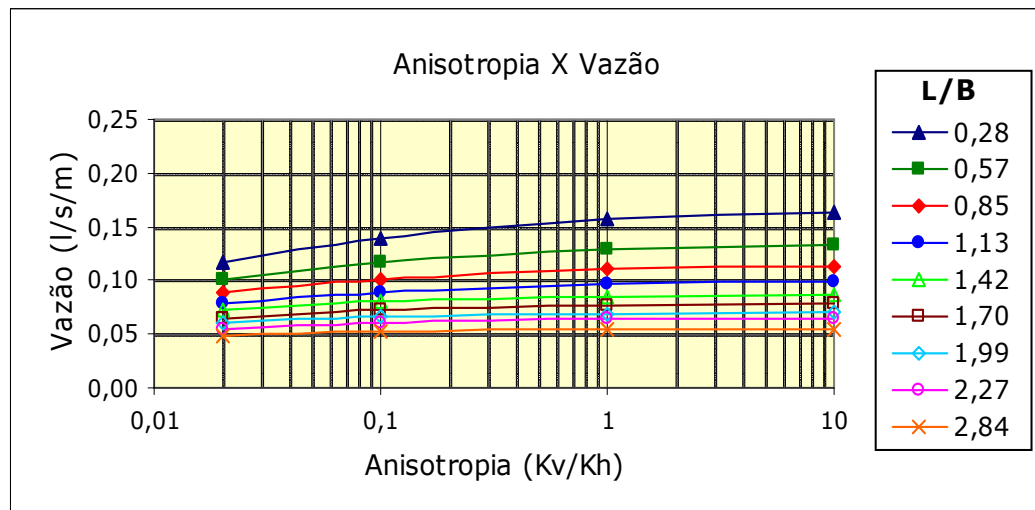


Figura 64 – Análise da vazão para seção típica com tapete impermeável à montante

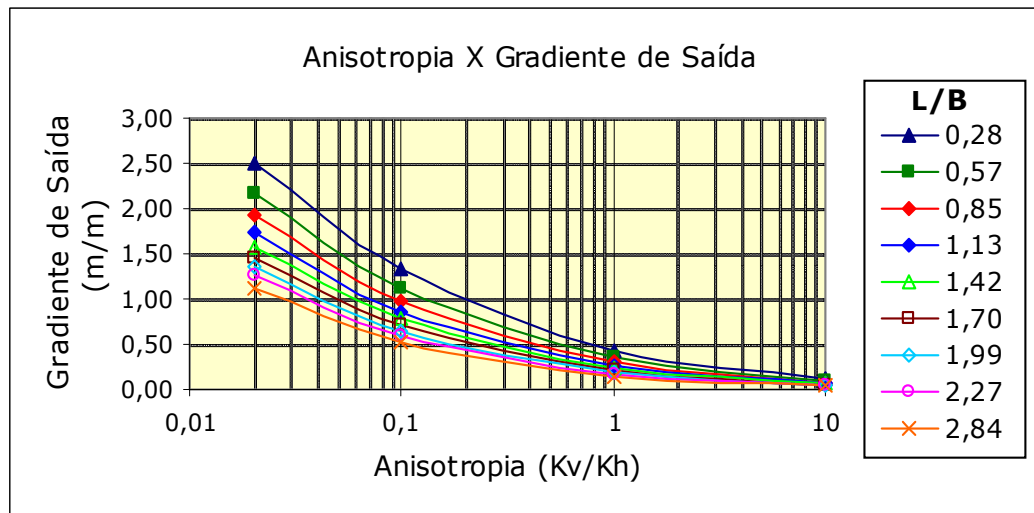


Figura 65 – Análise do gradiente para seção típica com tapete impermeável à montante

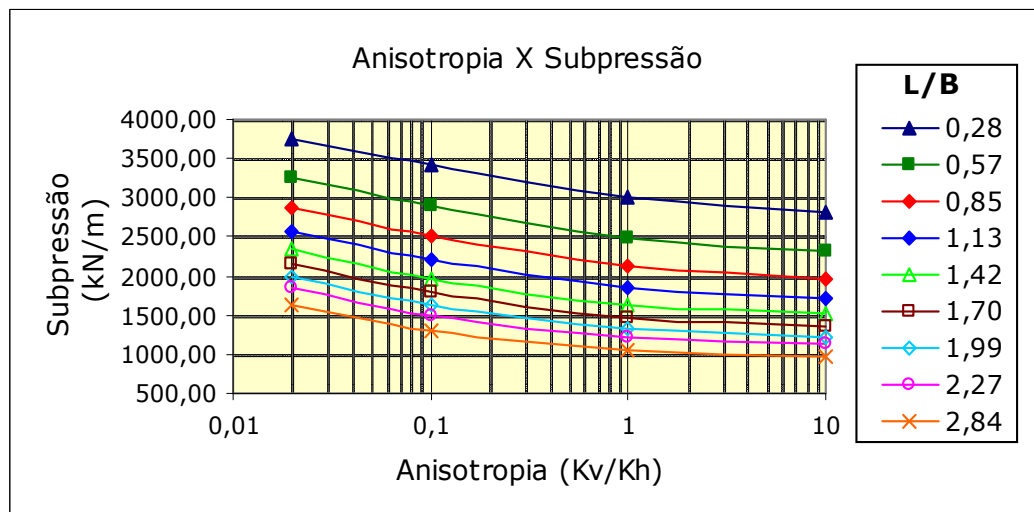


Figura 66 – Análise da subpressão para seção típica com tapete impermeável à montante

Novamente o comportamento das três variáveis analisadas é muito semelhante ao comportamento do sistema sem dispositivos de controle. Porém, para tapetes com comprimento acima de 240 m ($L/B = 1,70$) as vazões começam a atingir valores aceitáveis, da ordem de 0,08 l/s/m. Vale ressaltar que esta avaliação é subjetiva, já que a determinação das vazões

admissíveis depende de cada caso específico. Quanto às variáveis gradiente de saída e subpressão, os valores continuam elevados, acima de 0,5 m/m e 1500 kN/m, respectivamente, principalmente para anisotropia hidráulica de 0,1 que são comuns neste tipo de formação geológica.

Para este dispositivo, Marsal et al. (1971) também apresentaram uma formulação para determinação da vazão percolada através da fundação, conforme apresentado na Equação 14. Comparando os valores obtidos através desta equação com os obtidos nesta pesquisa são encontrados os resultados apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Comparação entre os resultados obtidos nesta pesquisa e os calculados a partir da equação de Marsal et al. (1971)

Comprimento do Tapete (m)	Relação L/B	Vazões obtidas através da Equação de Marsal (l/s/m)	Vazões obtidas neste Trabalho (l/s/m)
40	0,28	1,57E-01	1,57E-01
80	0,57	1,30E-01	1,30E-01
120	0,85	1,10E-01	1,11E-01
160	1,13	9,63E-02	9,64E-02
200	1,42	8,53E-02	8,54E-02
240	1,70	7,66E-02	7,67E-02
280	1,99	6,95E-02	6,95E-02
320	2,27	6,36E-02	6,36E-02
400	2,84	5,44E-02	5,44E-02

Os resultados apresentados na Tabela 12 mostram que os resultados obtidos através da equação de Marsal et al. (1971), para um meio isotrópico, foram os mesmos obtidos nesta pesquisa, validando, portanto, a equação apresentada por estes autores.

A eficácia deste dispositivo é apresentada nas Figuras 67 a 69.

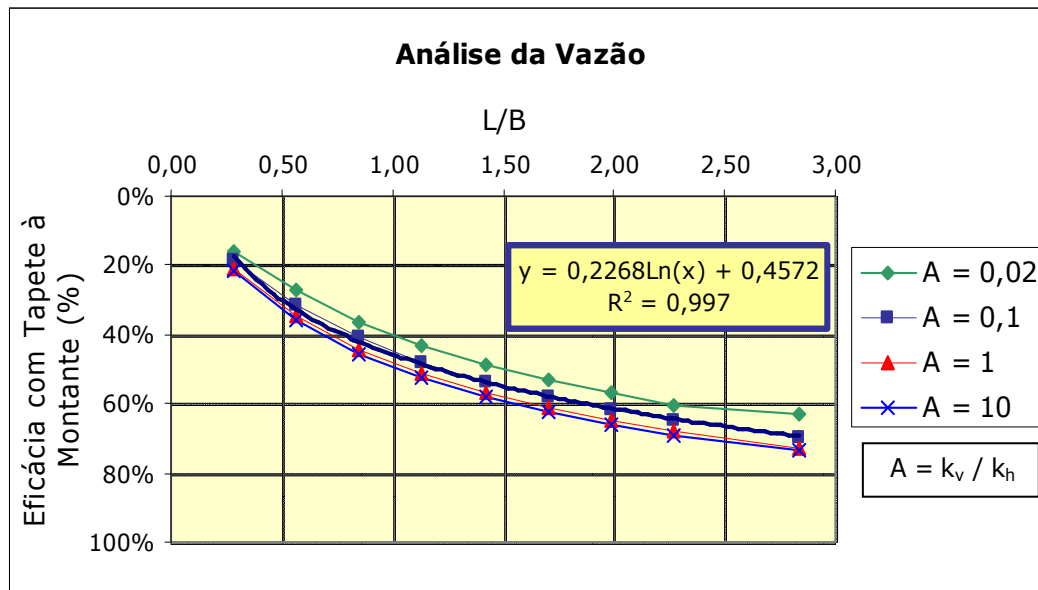


Figura 67 - Eficácia da seção típica com tapete impermeável à montante – Análise da Vazão

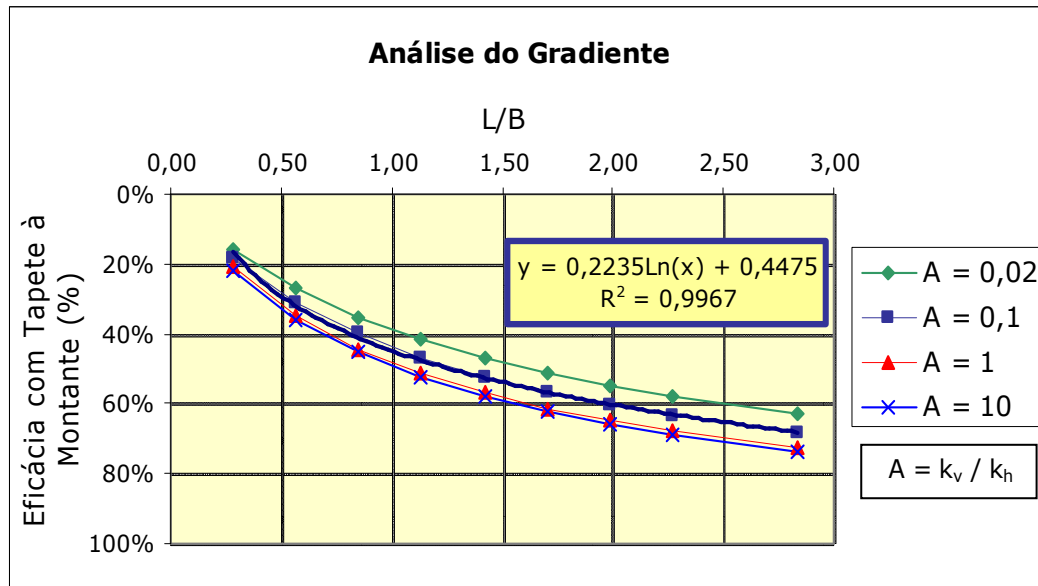


Figura 68 - Eficácia da seção típica com tapete impermeável à montante – Análise do Gradiente

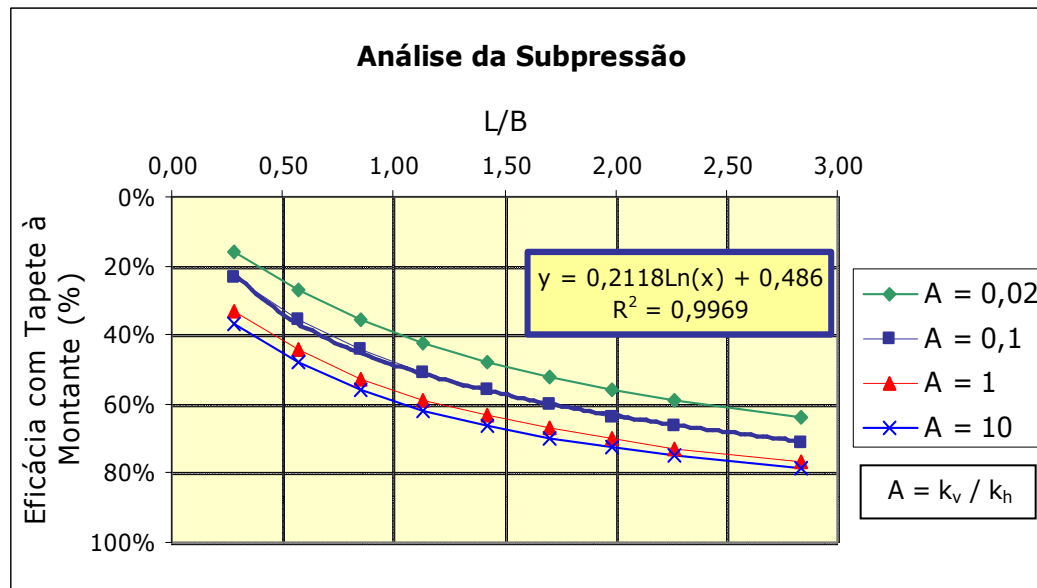


Figura 69 - Eficácia da seção típica com tapete impermeável à montante – Análise da Subpressão

O aumento da eficácia deste dispositivo é diretamente proporcional ao aumento do comprimento do tapete impermeável. Entretanto, a partir de comprimentos da ordem de 240 m ($L/B = 1,70$) o ganho na eficácia torna-se bastante reduzido, ou seja, o aumento do comprimento do tapete pode não trazer ganhos significativos na eficácia do sistema.

Para representar a forma da rede de fluxo obtida com a utilização deste dispositivo, é apresentada na Figura 70 a seção típica da barragem para um tapete impermeável à montante com $L/B = 1,70$, considerando que o subsolo apresenta anisotropia igual a 0,1.

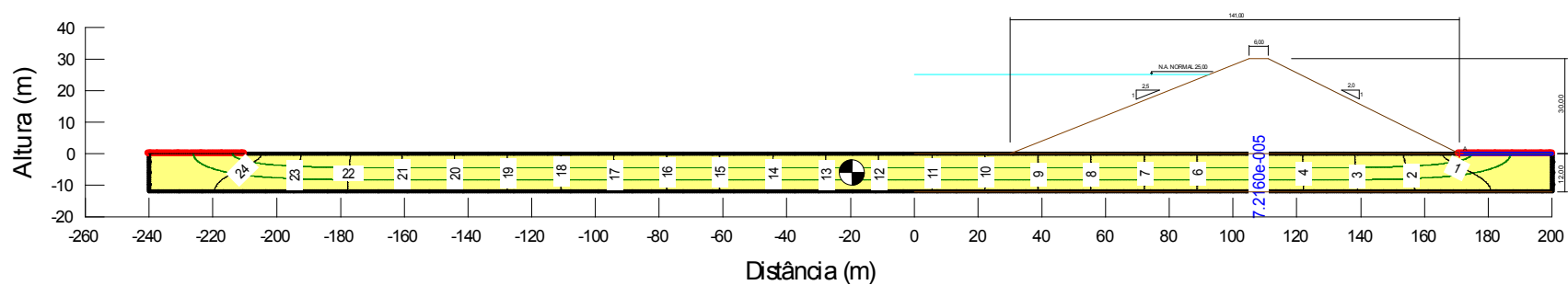


Figura 70 - Rede de fluxo para a barragem com tapete impermeável à montante com $L/B = 1,70$ e com anisotropia hidráulica do maciço da fundação igual a 0,1

5.5 - Seção Típica com Tapete Drenante Horizontal

A partir de agora serão analisados os dispositivos de drenagem aplicados de forma isolada na seção típica da barragem. Inicialmente serão apresentados os resultados para o tapete drenante horizontal e no item 5.6 serão apresentados os resultados obtidos com a trincheira de alívio.

O tapete drenante horizontal foi implantado abaixo do espaldar de jusante do maciço da barragem na interface com o maciço da fundação. Foi considerado um tapete muito mais permeável que o solo da fundação e adequadamente dimensionado de forma a garantir a estabilidade do talude de jusante contra ruptura provocada pela ascensão elevada da linha freática dentro do tapete. Adotou-se que a carga hidráulica ao longo do tapete atinge o valor máximo igual a 3 m.c.a na interseção deste dispositivo com o filtro vertical (chaminé) e atinge seu valor mínimo igual a zero no pé do talude de jusante.

Os resultados obtidos para as três variáveis analisadas são apresentados na Tabela 13 e nas Figuras 71 a 73.

Tabela 13 - Resultados obtidos para a barragem com tapete drenante horizontal

Anisotropia (Kv/Kh)	Vazão (l/s/m)	Gradiente (m/m)	Subpressão (kN/m)
0,02	0,18	0,74	1024
0,1	0,24	0,25	1025
1	0,29	0,06	1018
10	0,31	0,01	1009

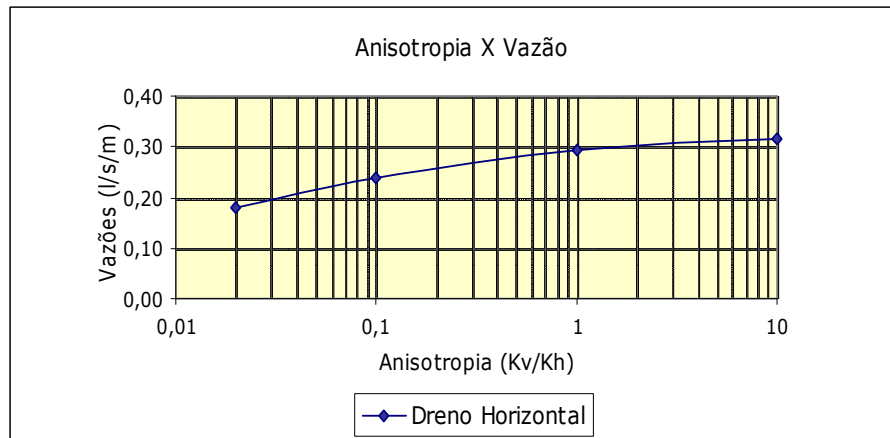


Figura 71 – Análise da vazão para seção típica com tapete drenante horizontal

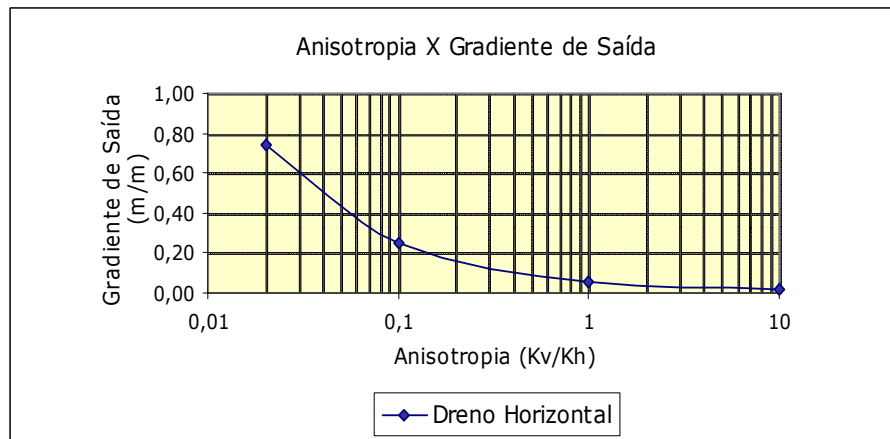


Figura 72 – Análise do gradiente para seção típica com tapete drenante horizontal

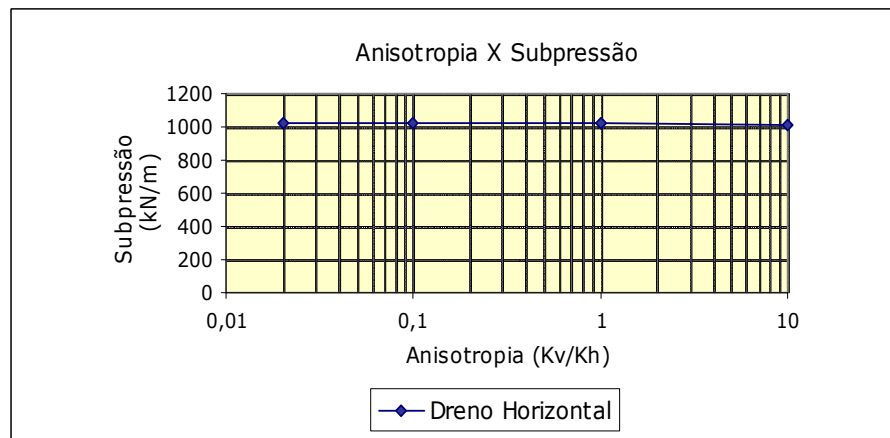


Figura 73 – Análise da subpressão para seção típica com tapete drenante horizontal

Os resultados apresentados demonstram que a inclusão do tapete drenante horizontal aumenta significativamente os valores da vazão percolada quando comparada com a seção sem dispositivos de controle. Este fato deve-se à consideração do alto coeficiente de permeabilidade do dreno. Quanto ao gradiente de saída e à subpressão, os resultados retratam uma redução substancial dos valores destas variáveis. A implicação da utilização deste dispositivo na eficácia do sistema é apresentada claramente nas Figuras 74 a 76.

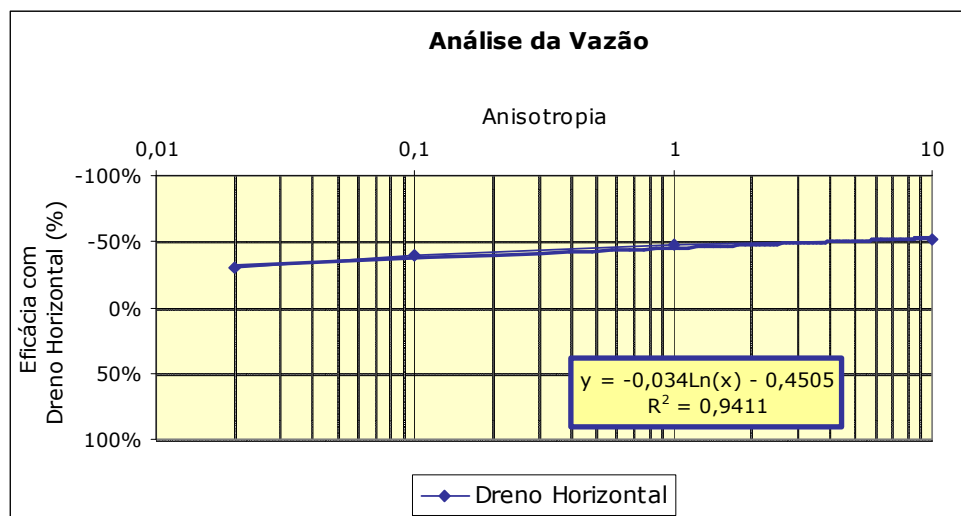


Figura 74 - Eficácia da seção típica com tapete drenante horizontal – Análise da Vazão

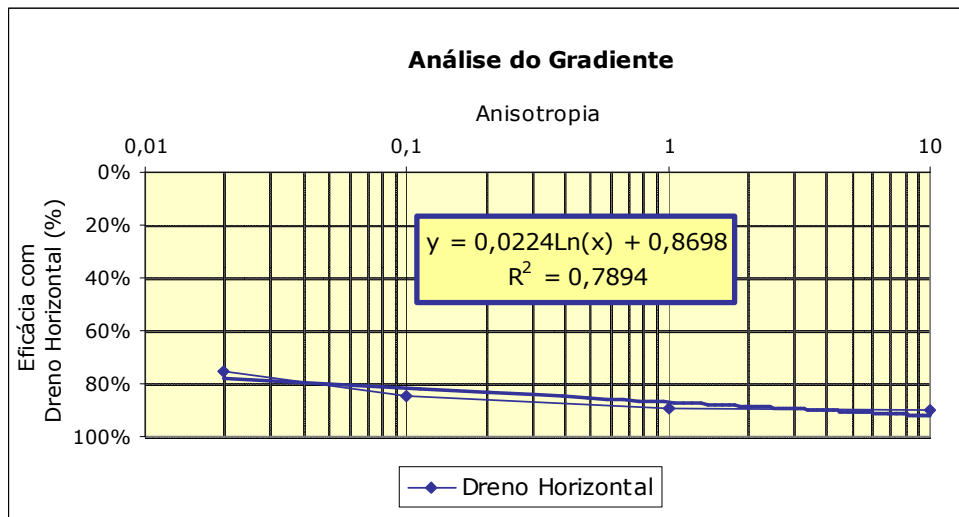


Figura 75 - Eficácia da seção típica com tapete drenante horizontal – Análise do Gradiente

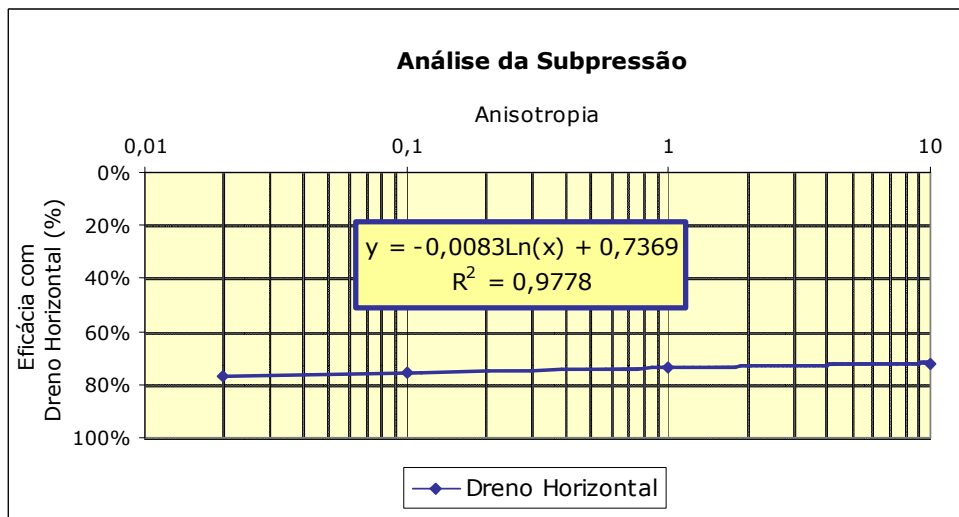


Figura 76 - Eficácia da seção típica com tapete drenante horizontal – Análise da Subpressão

Em virtude do aumento da vazão percolada através da fundação, torna-se evidente que a eficácia do sistema, quando se analisa a vazão, apresenta valores negativos. Para as outras variáveis analisadas, foram encontrados valores satisfatórios para a eficácia do dispositivo, com exceção do gradiente hidráulico para anisotropia igual a 0,02.

Para representar a forma da rede de fluxo obtida com a utilização deste dispositivo, é apresentada na Figura 77 a seção típica da barragem com um tapete drenante horizontal com carga hidráulica no início do tapete igual a 3 m.c.a e com perda de carga linear até o pé do talude de jusante, quando a carga é igual a zero. O subsolo foi considerado com anisotropia igual a 0,1.

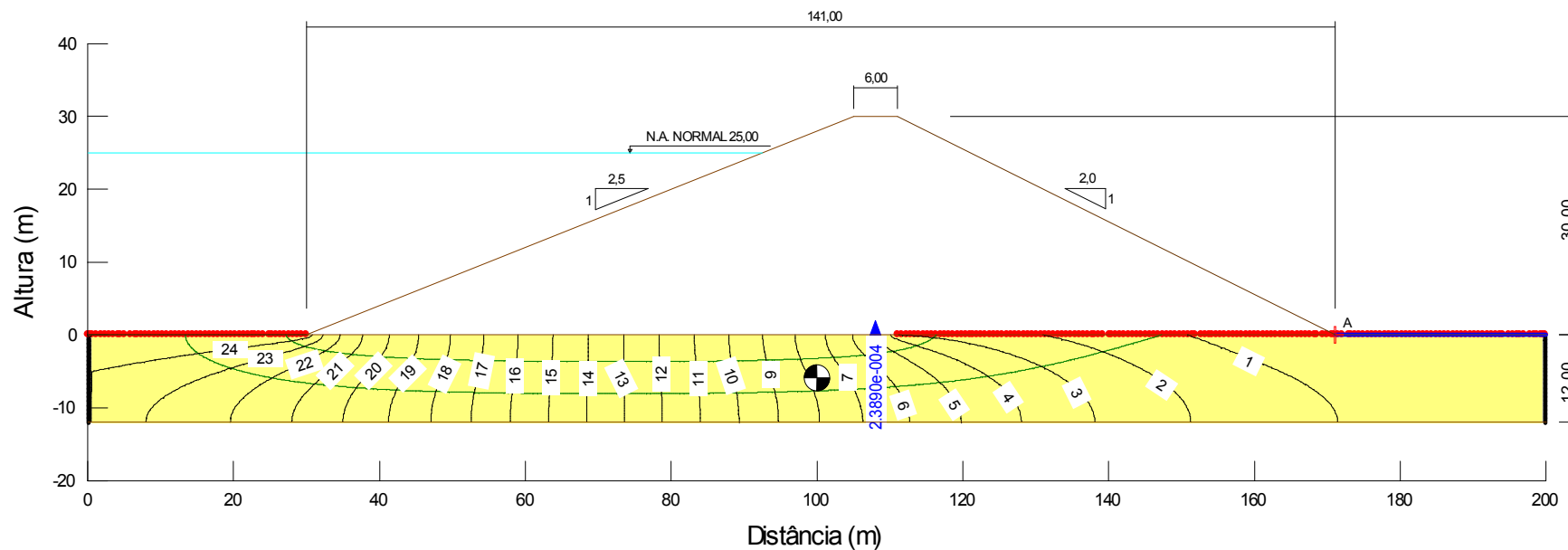


Figura 77 - Rede de fluxo para a barragem com tapete drenante horizontal com anisotropia hidráulica do maciço da fundação igual a 0,1

5.6 - Seção Típica com Trincheira de Alívio

A trincheira de alívio foi adotada com 3 e 6 m de profundidade, com 0,50 m de espessura e localizadas no pé do talude de jusante da barragem.

Os resultados obtidos para a vazão, o gradiente hidráulico de saída e a subpressão são apresentados na Tabela 14 e nas Figuras 78 a 80.

Tabela 14 - Resultados obtidos para a barragem com trincheira de alívio

Anisotropia (Kv/Kh)	Profundidade da Trincheira	Vazão (l/s/m)	Gradiente (m/m)	Subpressão (kN/m)
0,02	3 m	0,15	0,00	3485
0,1		0,18	0,00	3652
1		0,20	0,00	3601
10		0,21	0,00	3547
0,02		6 m	0,16	0,00
0,1	0,19		0,00	3350
1	0,20		0,00	3480
10	0,21		0,00	3507

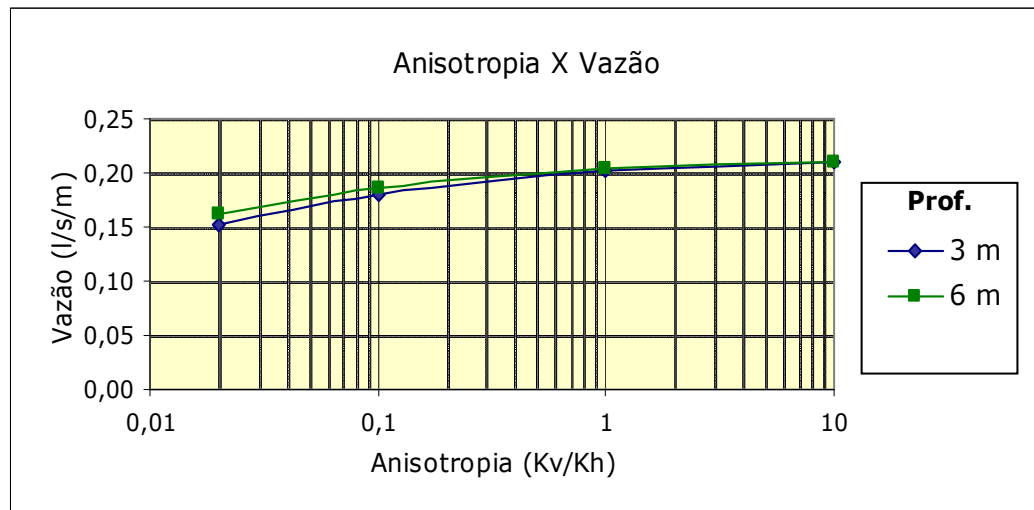


Figura 78 – Análise da vazão para seção típica com trincheira de alívio

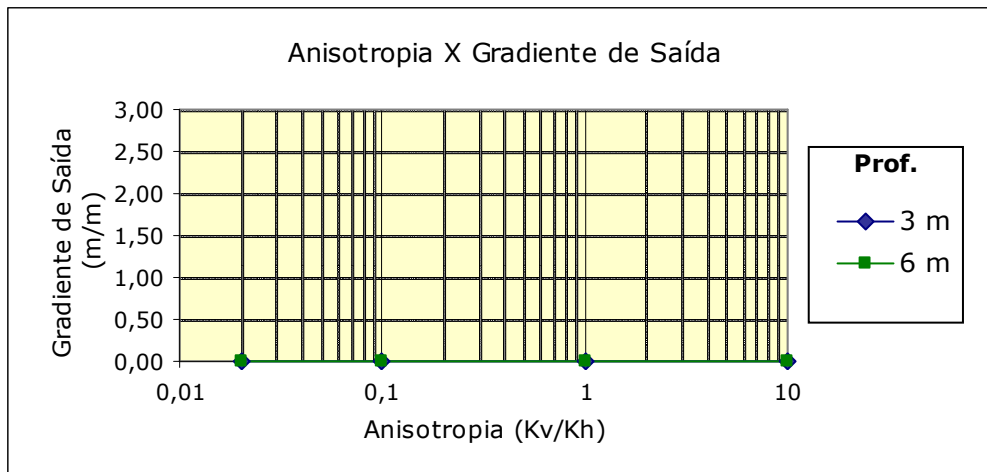


Figura 79 – Análise do gradiente para seção típica com trincheira de alívio

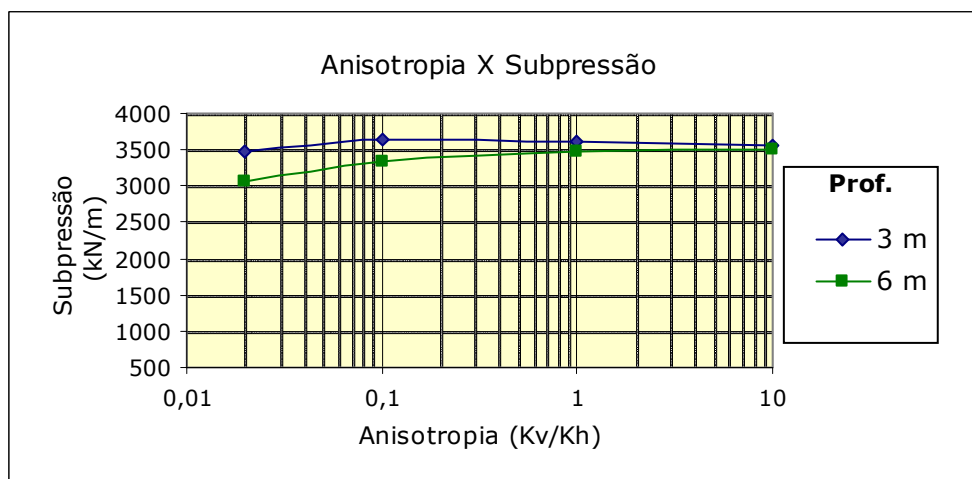


Figura 80 – Análise da subpressão para seção típica com trincheira de alívio

A trincheira de alívio é extremamente eficaz quanto ao gradiente hidráulico de saída, conforme apresentado na Figura 82. Para as variáveis vazão e subpressão, os valores obtidos são muito próximos dos encontrados para a seção típica sem dispositivos de controle (Figuras 81 e 83).

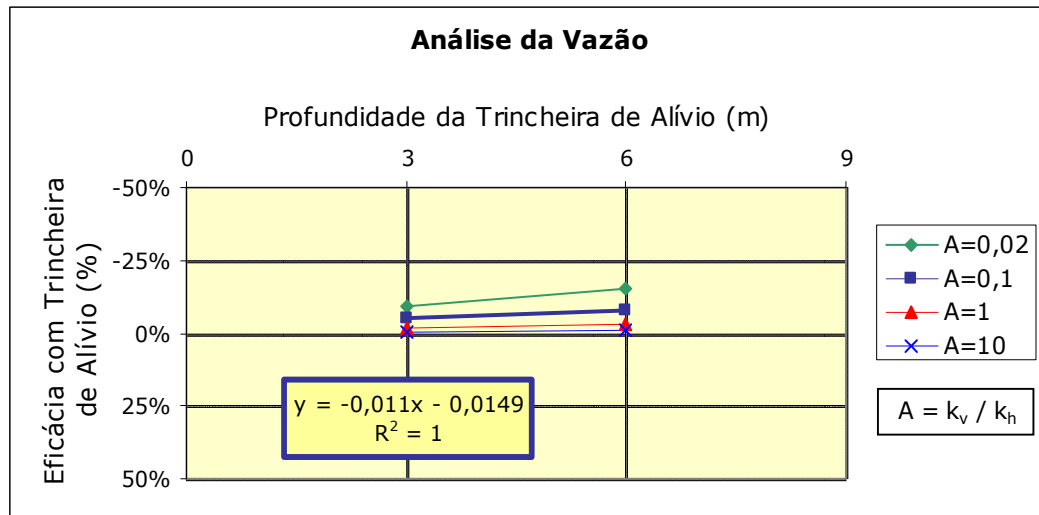


Figura 81 - Eficácia da seção típica com trincheira de alívio – Análise da Vazão

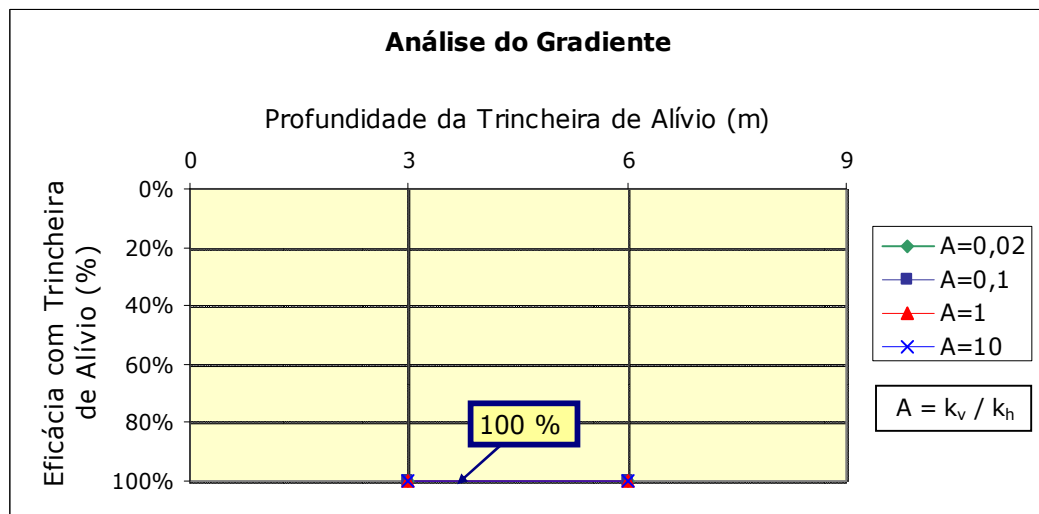


Figura 82 - Eficácia da seção típica com trincheira de alívio – Análise do Gradiente

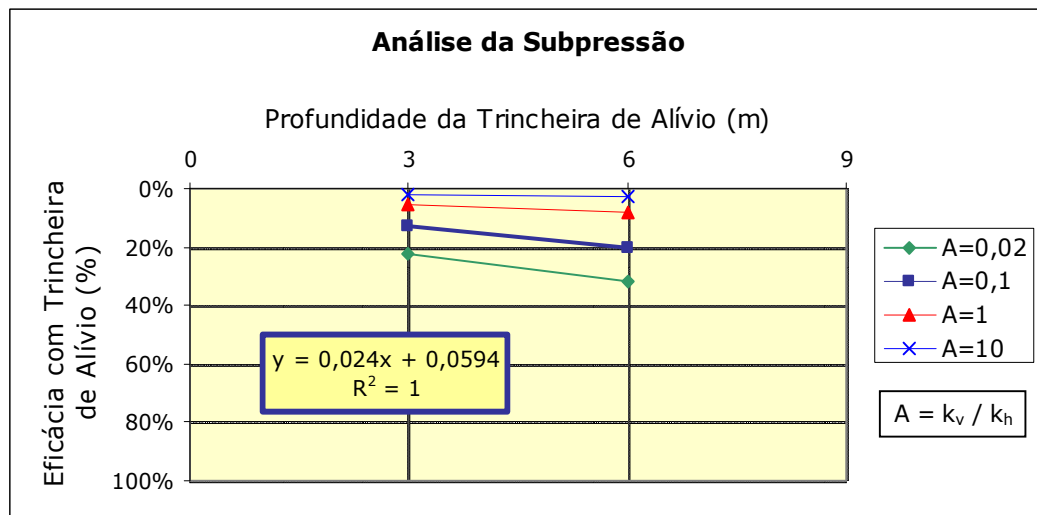


Figura 83 - Eficácia da seção típica com trincheira de alívio – Análise da Subpressão

A trincheira de alívio com 6 m de profundidade se mostrou mais eficaz no controle da subpressão do que a trincheira com 3 m de profundidade. Para a vazão, a trincheira com 3 m foi ligeiramente mais eficaz, porém, para as duas situações os resultados foram maiores do que os encontrados com a seção sem dispositivos de controle, sendo encontrados valores negativos para a eficácia. Para o gradiente hidráulico, os resultados foram excelentes, com 100% de eficácia. Diante disso, nas análises realizadas com a associação dos dispositivos de vedação e drenagem, apresentadas a seguir, foram adotadas trincheiras com 6 m de profundidade.

Para representar a forma da rede de fluxo obtida com a utilização deste dispositivo, é apresentada na Figura 84 a seção típica da barragem para uma trincheira de alívio com 6 m de profundidade. O subsolo foi considerado com anisotropia igual a 0,1.

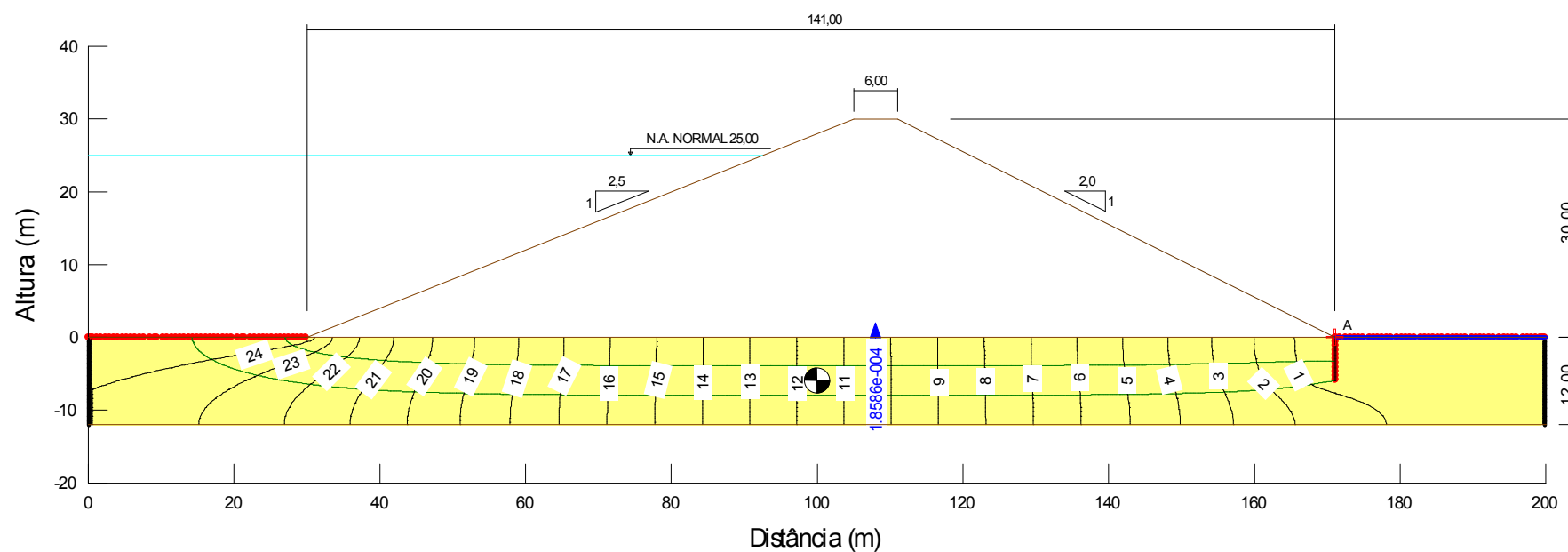


Figura 84 - Rede de fluxo para barragem com trincheira de alívio e com anisotropia hidráulica do maciço da fundação igual a 0,1

5.7 - Seção Típica com Trincheira de Vedação, Tapete Drenante Horizontal e Trincheira de Alívio

A primeira combinação analisada foi a associação entre a trincheira de vedação, o tapete drenante horizontal e a trincheira de alívio. Esta solução buscou aliar a eficácia da trincheira de vedação quanto ao controle da vazão e a eficácia do tapete drenante e da trincheira de alívio quanto ao gradiente de saída e a subpressão. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 15 e nas Figuras 85 a 87.

Tabela 15 - Resultados obtidos para a barragem com a associação da trincheira de vedação, do tapete drenante horizontal e da trincheira de alívio

Anisotropia (Kv/Kh)	Percentual de Penetração	Vazão (l/s/m)	Gradiente (m/m)	Subpressão (kN/m)
0,02	25%	0,16	0,00	1130
0,1		0,21	0,00	1104
1		0,27	0,00	1070
10		0,30	0,00	1053
0,02	50%	0,13	0,00	1245
0,1		0,18	0,00	1210
1		0,25	0,00	1150
10		0,27	0,00	1121
0,02	75%	0,09	0,00	1368
0,1		0,14	0,00	1341
1		0,20	0,00	1272
10		0,22	0,00	1238
0,02	100%	0,00	0,00	1497
0,1		0,00	0,00	1545
1		0,00	0,00	1586
10		0,00	0,00	1601

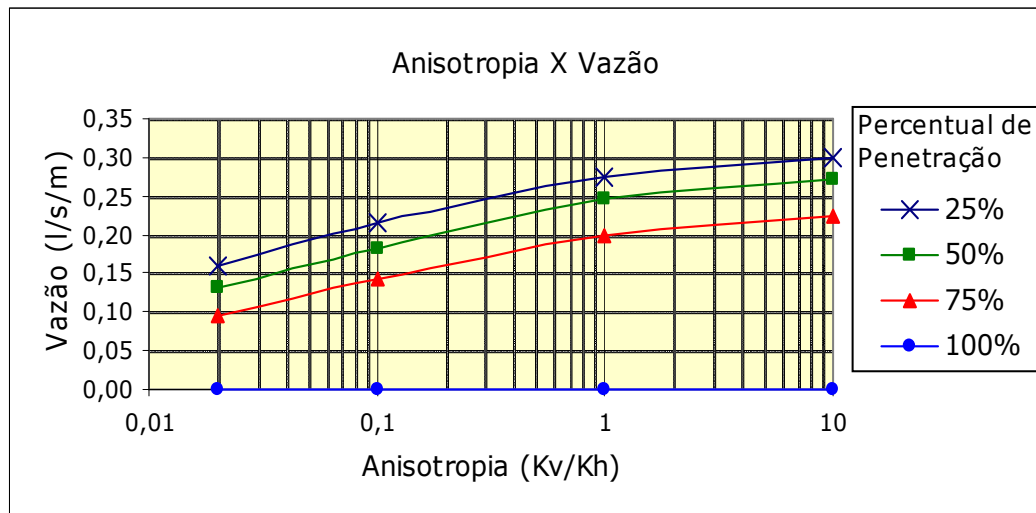


Figura 85 – Análise da vazão para seção típica com a associação da trincheira de vedação, do tapete drenante horizontal e da trincheira de alívio

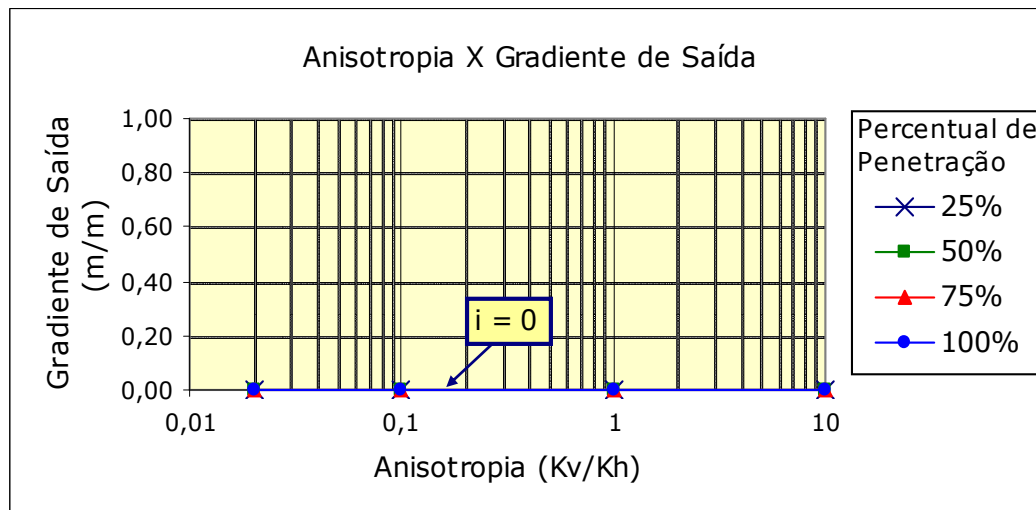


Figura 86 – Análise do gradiente para seção típica com a associação da trincheira de vedação, do tapete drenante horizontal e da trincheira de alívio

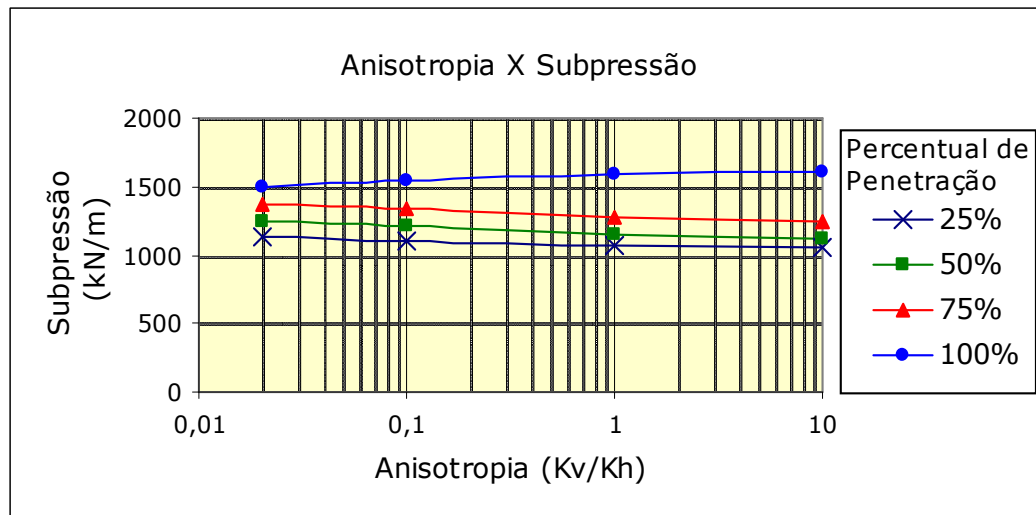


Figura 87 – Análise da subpressão para seção típica com a associação da trincheira de vedação, do tapete drenante horizontal e da trincheira de alívio

Os resultados demonstraram que esta associação apresenta ganhos significativos na eficácia das trincheiras parciais quanto ao gradiente e a subpressão. Entretanto, o problema das trincheiras parciais quanto à vazão, característico deste dispositivo, continua prejudicando sua utilização. As Figuras 88 a 90 apresentam os resultados da eficácia desta associação de dispositivos de controle.

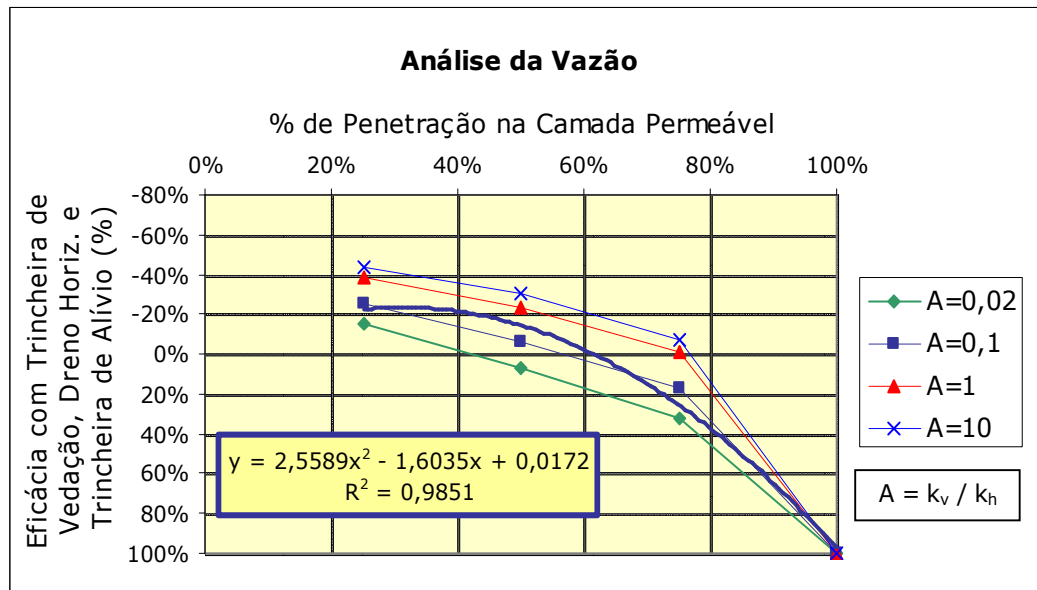


Figura 88 - Eficácia da seção típica com a associação da trincheira de vedação, do tapete drenante horizontal e da trincheira de alívio – Análise da Vazão

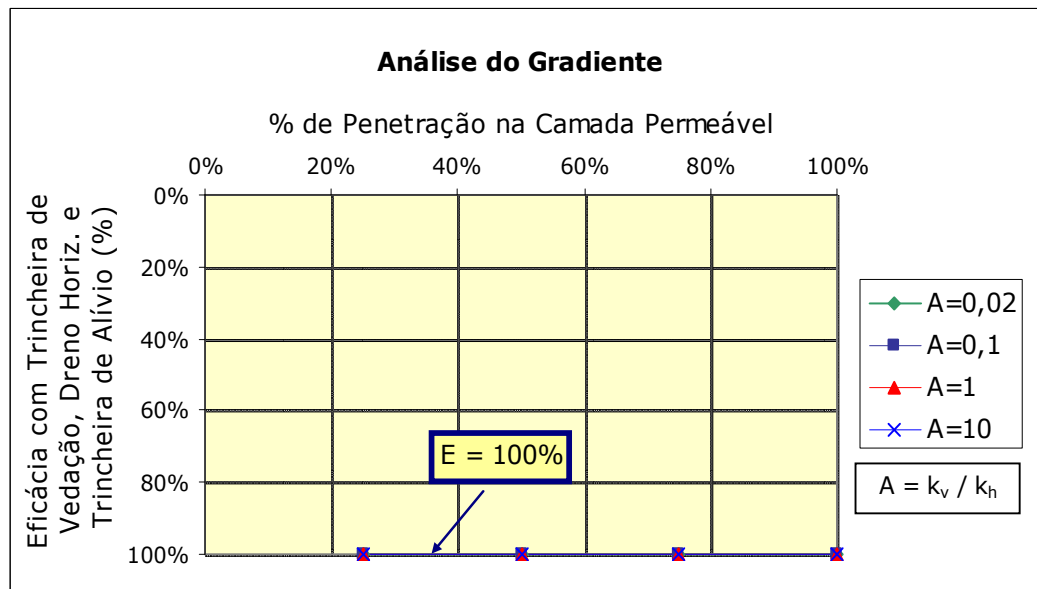


Figura 89 - Eficácia da seção típica com a associação da trincheira de vedação, do tapete drenante horizontal e da trincheira de alívio – Análise do Gradiente

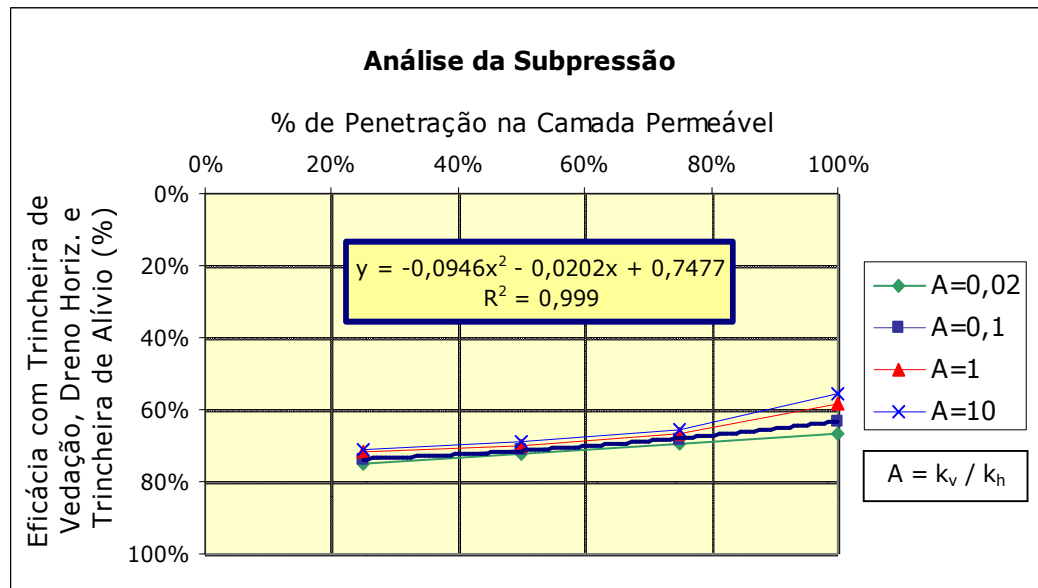


Figura 90 - Eficácia da seção típica com a associação da trincheira de vedação, do tapete drenante horizontal e da trincheira de alívio – Análise da Subpressão

Quanto à vazão, verifica-se o mesmo comportamento apresentado na solução apenas com a trincheira de vedação e quanto ao gradiente e à subpressão, há uma melhoria significativa nos resultados. Mesmo no caso da trincheira total em que os valores da eficácia para as três variáveis não muda significativamente, é importante a utilização do dispositivo de drenagem para que possíveis fluxos de água sejam interceptados e impeçam a elevação dos valores do gradiente e da subpressão.

Para representar a forma da rede de fluxo obtida com a utilização desta associação de dispositivos, é apresentada na Figura 91 a seção típica da barragem com uma trincheira de vedação que penetra 50% da camada permeável, um tapete drenante horizontal e uma trincheira de alívio com 6 m de profundidade. O subsolo foi considerado com anisotropia igual a 0,1.

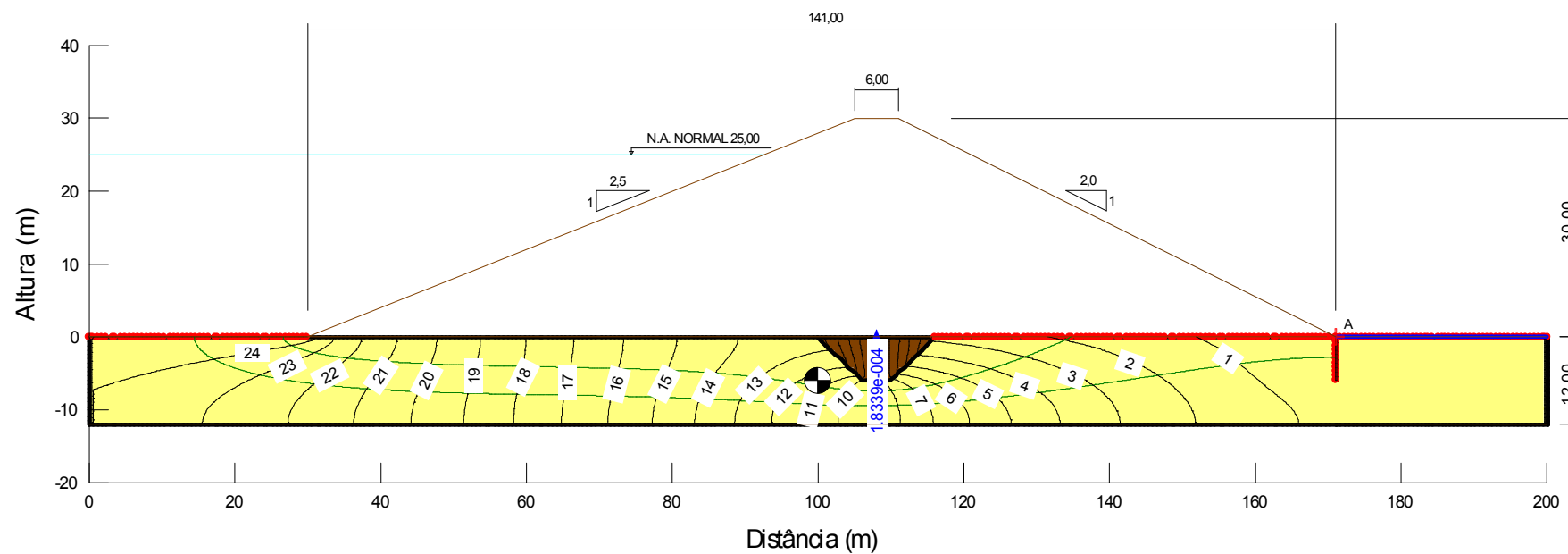


Figura 91 - Rede de fluxo para a barragem com a associação da trincheira de vedação, do tapete drenante horizontal e da trincheira de alívio e com anisotropia hidráulica do maciço da fundação igual a 0,1

5.8 - Seção Típica com Parede Diafragma, Tapete Drenante Horizontal e Trincheira de Alívio

Nesta análise, o dispositivo de vedação que apresenta excelentes resultados quando não há imperfeições na sua estrutura é associado a dispositivos de drenagem para avaliarmos se existem ganhos na eficácia do sistema mesmo nos casos em que o dispositivo possui imperfeições. Os resultados são apresentados na Tabela 16 e nas Figuras 92 a 94.

Tabela 16 - Resultados obtidos para a barragem com a associação da parede diafragma, do tapete drenante horizontal e da trincheira de alívio

Anisotropia (Kv/Kh)	Coef. de Permeabilidade da Parede Diafragma (cm/s)	Relação k/k_0 *	Vazão (l/s/m)	Gradiente (m/m)	Subpressão (kN/m)
0,02	1,0E-04	1,0E-02	0,11	0,00	922
0,1			0,13	0,00	924
1			0,14	0,00	924
10			0,14	0,00	922
0,02	1,0E-05	1,0E-03	0,02	0,00	923
0,1			0,02	0,00	923
1			0,02	0,00	924
10			0,02	0,00	925
0,02	1,0E-06	1,0E-04	0,00	0,00	923
0,1			0,00	0,00	923
1			0,00	0,00	924
10			0,00	0,00	925
0,02	1,0E-07	1,0E-05	0,00	0,00	923
0,1			0,00	0,00	923
1			0,00	0,00	924
10			0,00	0,00	925

* k_0 = Coef. de Permeabilidade da Fundação

k = Coef. de Permeabilidade da Parede Diafragma

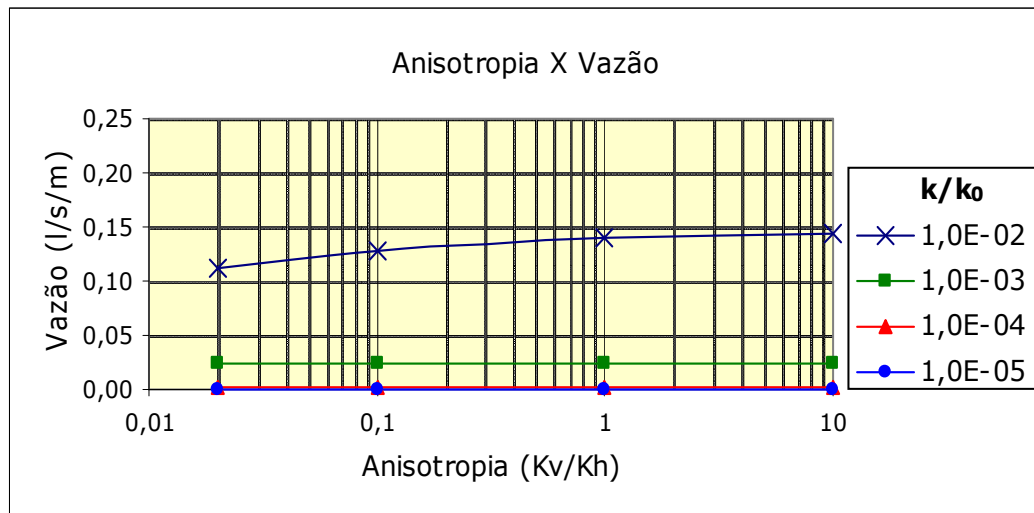


Figura 92 – Análises da vazão para seção típica com a associação da parede diafragma, do tapete drenante horizontal e da trincheira de alívio

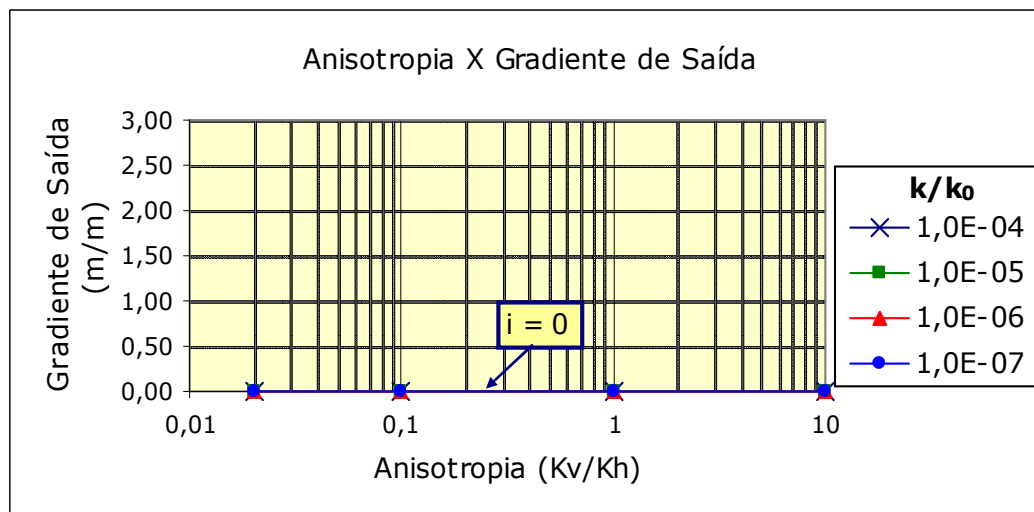


Figura 93 – Análise do gradiente para seção típica com a associação da parede diafragma, do tapete drenante horizontal e da trincheira de alívio

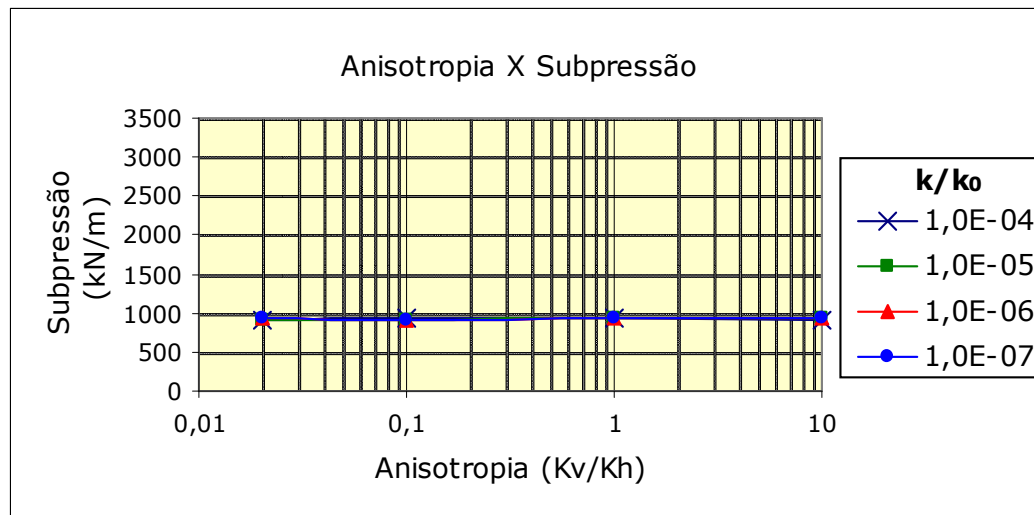


Figura 94 – Análise da subpressão para seção típica com a associação da parede diafragma, do tapete drenante horizontal e da trincheira de alívio

Diante dos resultados apresentados nas Figuras 92 a 94, verifica-se que as implicações das imperfeições a que este dispositivo está vulnerável continuam comprometendo a sua utilização. As Figuras 95 a 97 apresentam a eficácia desta associação para as três variáveis analisadas.

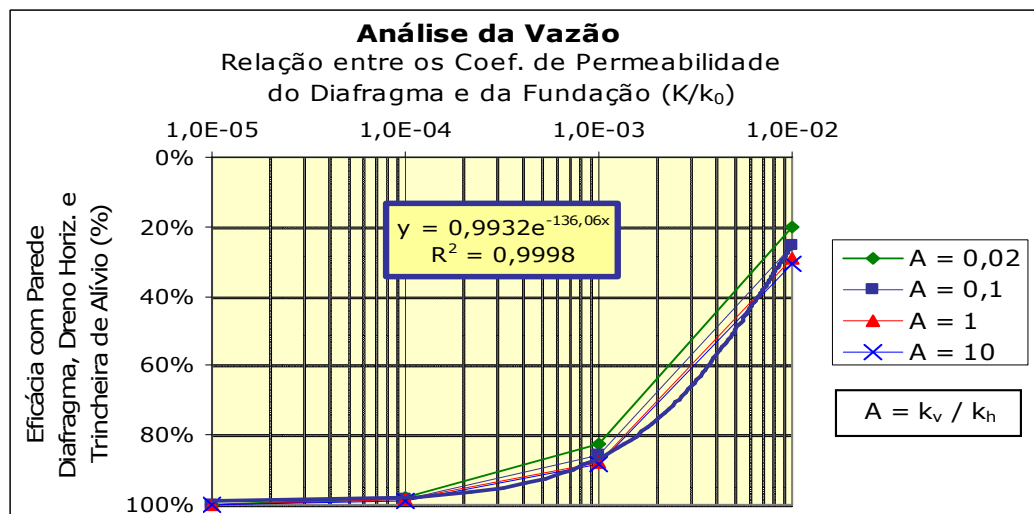


Figura 95 - Eficácia da seção típica com a associação da parede diafragma, do tapete drenante horizontal e da trincheira de alívio; (a) – Análise da Vazão

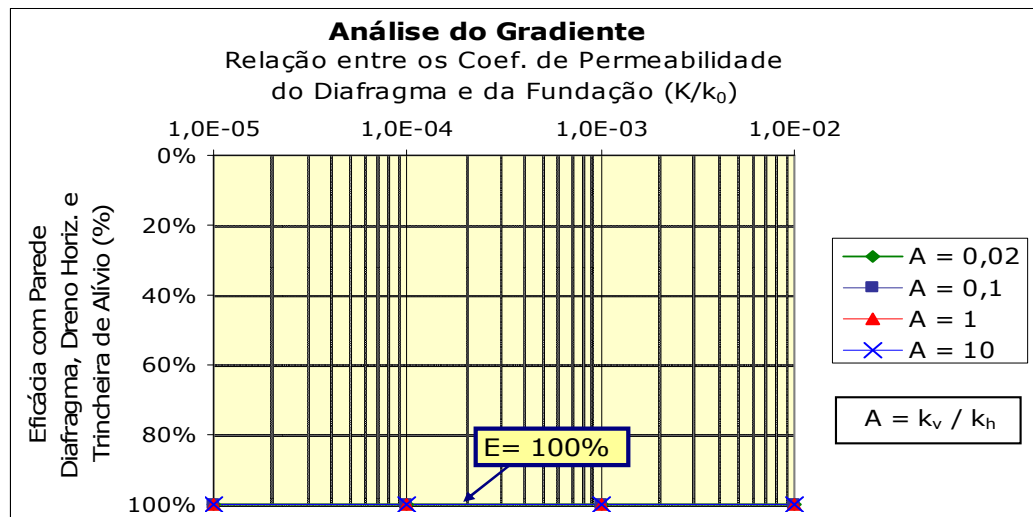


Figura 96 - Eficácia da seção típica com a associação da parede diafragma, do tapete drenante horizontal e da trincheira de alívio – Análise do Gradiente

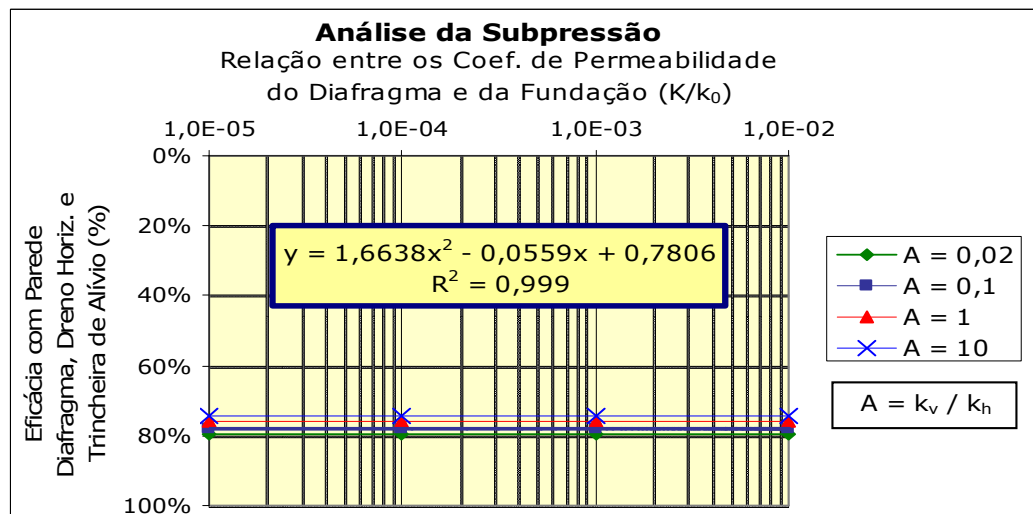


Figura 97 - Eficácia da seção típica com a associação da parede diafragma, do tapete drenante horizontal e da trincheira de alívio – Análise da Subpressão

Os resultados mostram que caso a vazão percolada seja aceitável, mesmo considerando algum tipo de imperfeição do diafragma, esta associação pode ser utilizada, pois os dispositivos de drenagem eliminam os problemas relacionados com o gradiente e com a subpressão.

Para representar a forma da rede de fluxo obtida com a utilização destes dispositivos, é apresentada na Figura 98 a seção típica da barragem com uma parede diafragma com coeficiente de permeabilidade de 1×10^{-4} cm/s, um tapete drenante horizontal e uma trincheira de alívio com 6 m de profundidade. O subsolo foi considerado com anisotropia igual a 0,1.

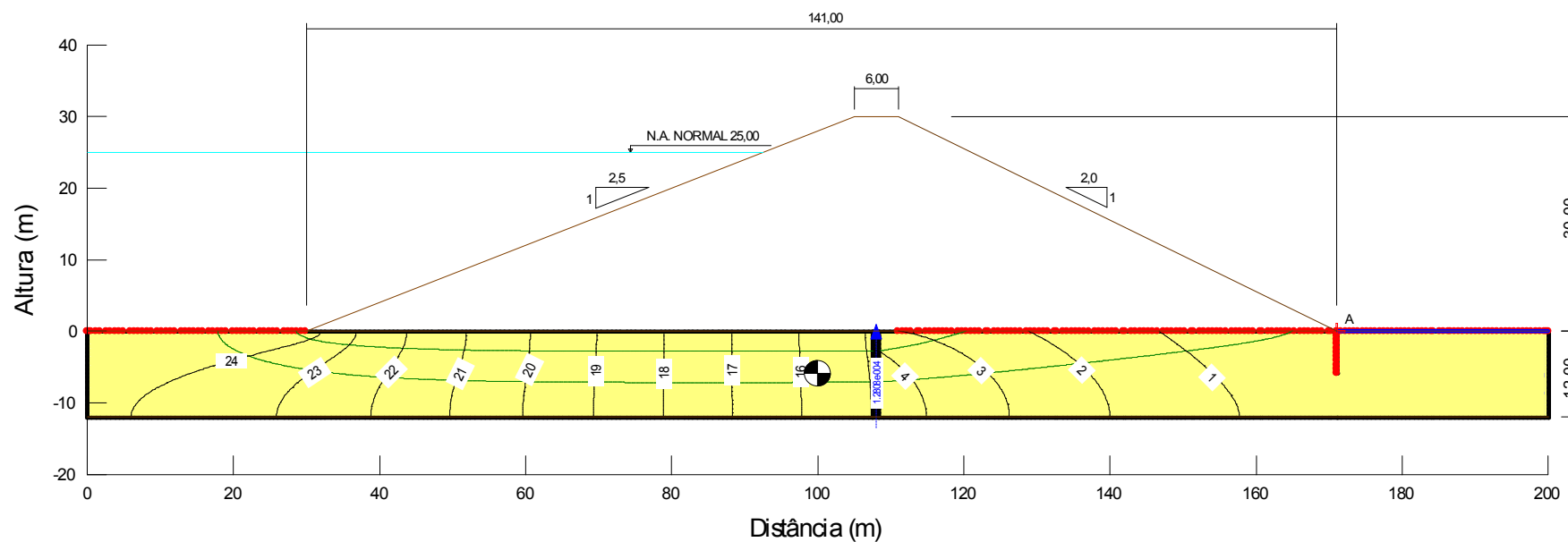


Figura 98 - Rede de fluxo para barragem com a associação da parede diafragma com $k=1 \times 10^{-4}$ cm/s, do tapete drenante horizontal e da trincheira de alívio e com anisotropia hidráulica do maciço da fundação igual a 0,1

5.9 - Seção Típica com Tapete Impermeável à Montante, Tapete Drenante Horizontal e Trincheira de Alívio

O tapete impermeável à montante torna-se interessante quando a camada de solo permeável da fundação possui grande espessura e inviabiliza a utilização de dispositivos de vedação como trincheiras de vedação total ou paredes diafragma. Nestes casos a associação do tapete impermeável com dispositivos de drenagem tende a apresentar resultados satisfatórios dependendo, é claro, do comprimento do tapete impermeável. Os resultados são apresentados na Tabela 17 e nas Figuras 99 a 101.

Tabela 17 - Resultados obtidos para a barragem com a associação do tapete impermeável à montante, do tapete drenante horizontal e da trincheira de alívio

Anisotropia (Kv/Kh)	Comprimento do Tapete (m)	Relação L/B*	Vazão (l/s/m)	Gradiente (m/m)	Subpressão (kN/m)
0,02	40	0,28	0,15	0,00	1059
0,1			0,18	0,00	1060
1			0,20	0,00	1055
10			0,21	0,00	1049
0,02	80	0,57	0,12	0,00	1053
0,1			0,14	0,00	1053
1			0,16	0,00	1049
10			0,16	0,00	1045
0,02	120	0,85	0,10	0,00	970
0,1			0,12	0,00	970
1			0,13	0,00	967
10			0,13	0,00	964
0,02	160	1,13	0,09	0,00	954
0,1			0,10	0,00	953
1			0,11	0,00	951
10			0,11	0,00	949
0,02	200	1,42	0,08	0,00	965
0,1			0,09	0,00	965
1			0,09	0,00	963
10			0,09	0,00	962
0,02	240	1,70	0,07	0,00	963
0,1			0,08	0,00	962
1			0,08	0,00	961
10			0,08	0,00	961
0,02	280	1,99	0,06	0,00	961
0,1			0,07	0,00	961
1			0,07	0,00	960
10			0,07	0,00	960
0,02	320	2,27	0,06	0,00	913
0,1			0,06	0,00	913
1			0,06	0,00	913
10			0,07	0,00	913
0,02	400	2,84	0,05	0,00	911
0,1			0,05	0,00	911
1			0,05	0,00	911
10			0,05	0,00	912

* L = Comprimento do tapete impermeável (m)

B = Largura da base do maciço da barragem (m)

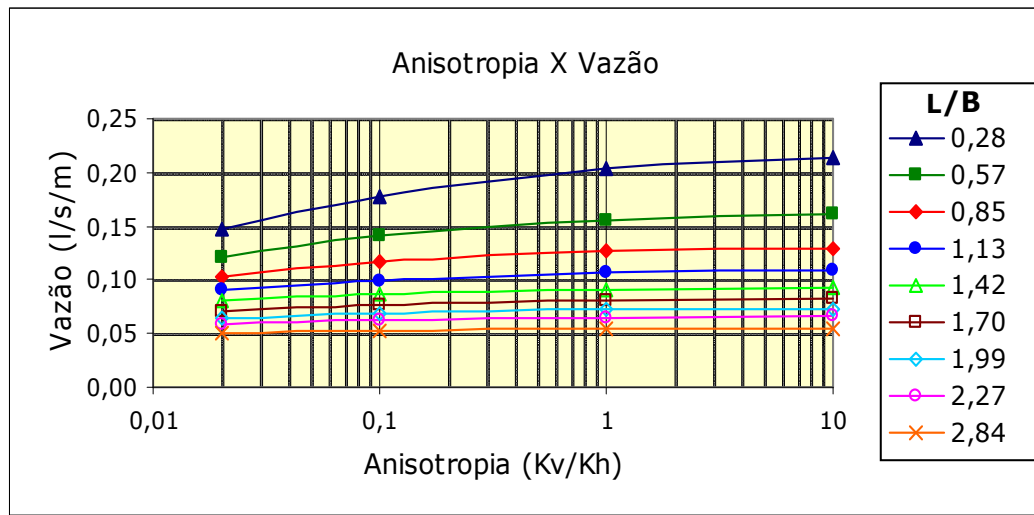


Figura 99 – Análise da vazão para seção típica com a associação do tapete impermeável à montante, do tapete drenante horizontal e da trincheira de alívio

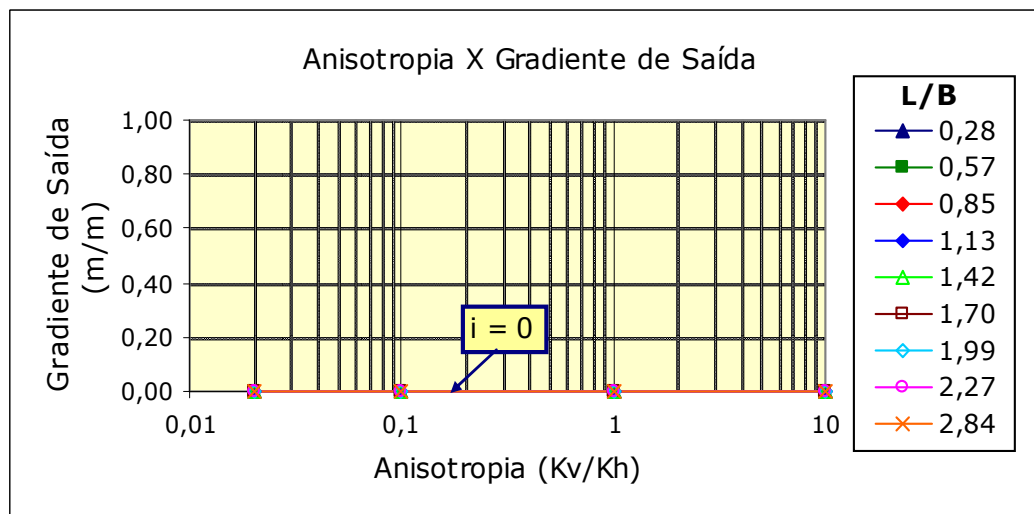


Figura 100 – Análise do gradiente para seção típica com a associação do tapete impermeável à montante, do tapete drenante horizontal e da trincheira de alívio

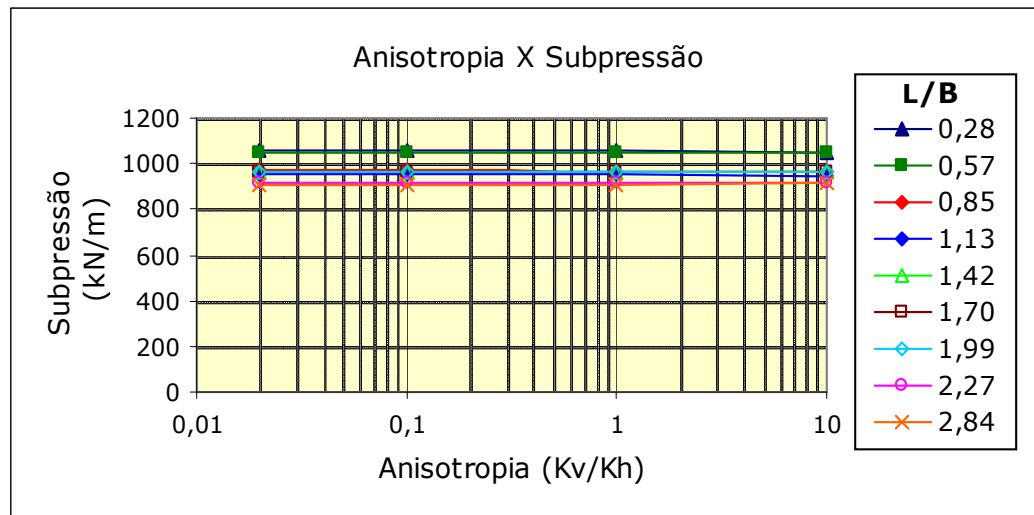


Figura 101 – Análise da subpressão para seção típica com a associação do tapete impermeável à montante, do tapete drenante horizontal e da trincheira de alívio

Os resultados demonstram que os problemas com o gradiente de saída e com a subpressão, que prejudicam a utilização do tapete impermeável sozinho, são solucionados com a associação com os dispositivos de drenagem. Entretanto, a eficácia desta associação no controle da vazão depende diretamente do comprimento do tapete impermeável. Tapetes com cerca de 240 m de comprimento ($L/B=1,70$) apresentam resultados considerados aceitáveis, conforme limites estabelecidos no item 5.1. Esta conclusão é a mesma que foi obtida quando o tapete impermeável foi analisado de forma isolada. A vazão que poderá percolar pela fundação da barragem e que indicará exatamente qual o comprimento necessário deverá ser analisada caso a caso. As Figuras 102 a 104 apresentam a eficácia desta associação.

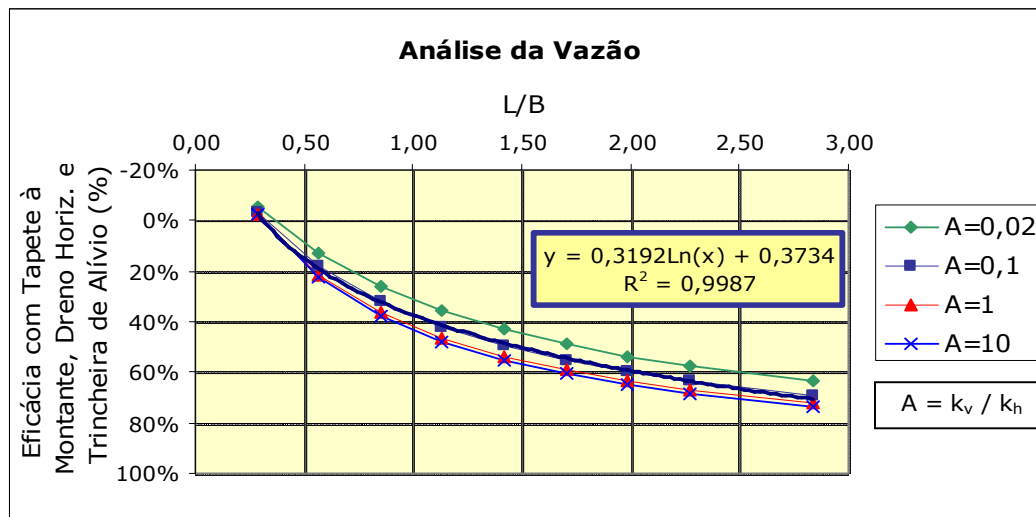


Figura 102 - Eficácia da seção típica com a associação do tapete impermeável à montante, do tapete drenante horizontal e da trincheira de alívio – Análise da Vazão

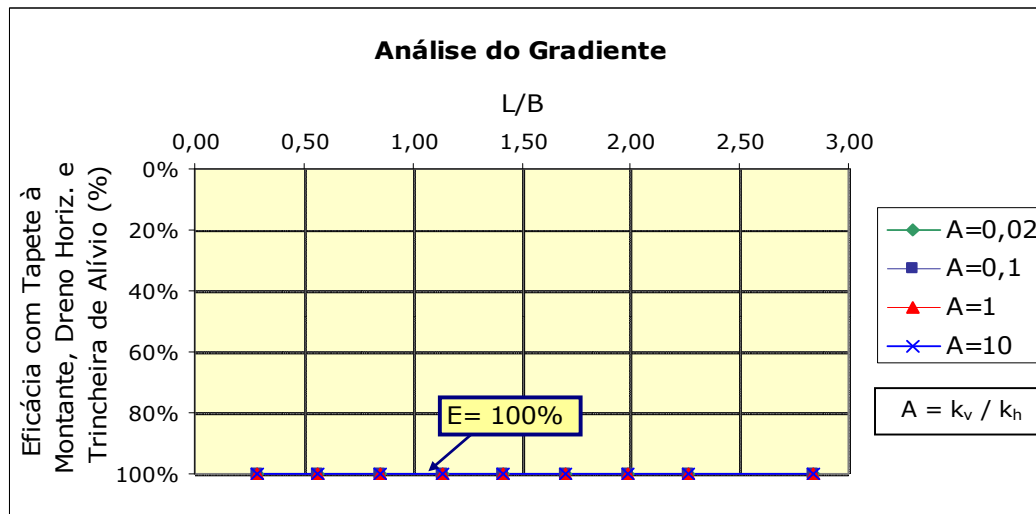


Figura 103 - Eficácia da seção típica com a associação do tapete impermeável à montante, do tapete drenante horizontal e da trincheira de alívio – Análise do Gradiente

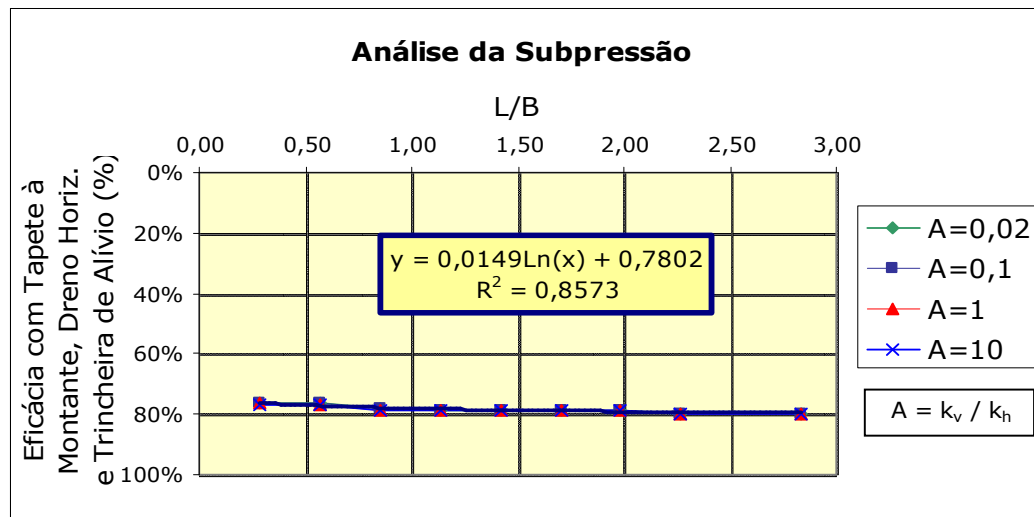


Figura 104 - Eficácia da seção típica com a associação do tapete impermeável à montante, do tapete drenante horizontal e da trincheira de alívio – Análise da Subpressão

Com os resultados apresentados é possível determinar o comprimento do tapete impermeável que levará à maior eficácia do sistema, mas para isso é importante considerar as ressalvas apresentadas ao longo deste trabalho e uma razão de anisotropia igual a 0,1.

Para representar a forma da rede de fluxo obtida com a utilização desta associação de dispositivos, é apresentada na Figura 105 a seção típica da barragem com um tapete impermeável à montante com relação L/B 1,70 ($L = 240\text{m}$), um tapete drenante horizontal e uma trincheira de alívio com 6 m de profundidade. O subsolo foi considerado com anisotropia igual a 0,1.

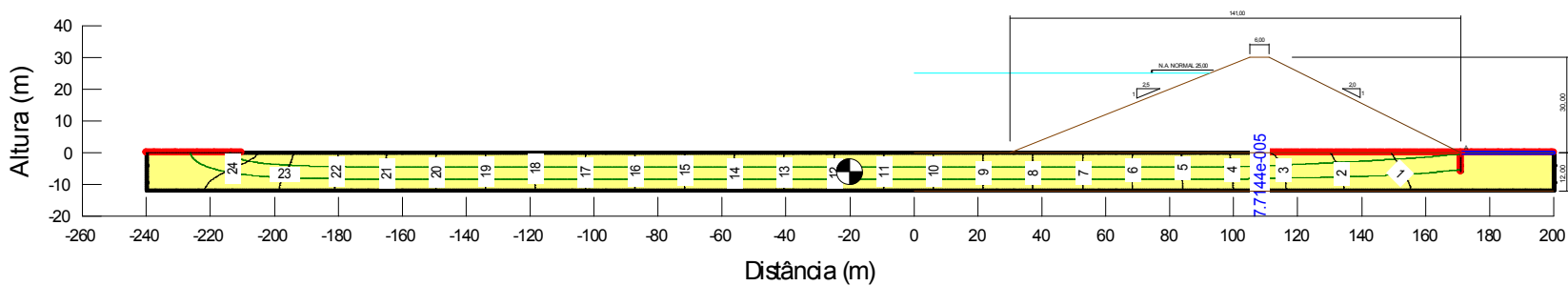


Figura 105 - Rede de fluxo para barragem com a associação do tapete impermeável à montante, do tapete drenante horizontal e da trincheira de alívio e com anisotropia hidráulica do maciço da fundação igual a 0,1

5.10 - Análise Geral dos Resultados

Diante da compatibilidade encontrada entre os resultados obtidos nessa pesquisa e os calculados a partir das equações de Ambraseys (1963) e de Marsal et al. (1971), pode-se concluir que estes resultados podem ser utilizados em análises preliminares de projetos de barragens para determinação da eficácia dos dispositivos de controle. Para todas as análises realizadas foram encontradas equações para determinação desta eficácia. Estas equações apresentaram coeficientes de determinação excelentes, sempre muito próximos de 1.

A Tabela 18 apresenta todas as equações obtidas nesta pesquisa para determinação da eficácia dos dispositivos de controle a partir da vazão, do gradiente hidráulico de saída e da subpressão, considerando uma anisotropia hidráulica igual a 0,1. As Tabelas 19, 20 e 21 apresentam as equações para determinação da eficácia considerando uma anisotropia de 0.02, 1 e 10, respectivamente. Nestas equações as variáveis têm os significados apresentados a seguir:

$P = d/D$ (prof. da trincheira de vedação/prof. do estrato permeável);

$k_0 =$ permeabilidade do estrato permeável da fundação ($L.T^{-1}$);

$k =$ permeabilidade da parede diafragma ($L.T^{-1}$);

$L =$ comprimento do tapete impermeável (L);

$B =$ largura da base do maciço da barragem (L);

$A =$ anisotropia hidráulica da fundação (k_v/k_h); e

$p =$ profundidade da trincheira de alívio.

Tabela 18 – Equações para determinação da eficácia dos dispositivos de controle para anisotropia hidráulica igual a 0,1

DISPOSITIVOS ISOLADOS	Equações para Determinação da Eficácia quanto a:		
	Vazão	Gradiente Hidráulico	Subpressão
Trincheira de Vedação	$E(\%) = (0,0115.e^{4,4171.P}).100$	$E(\%) = (0,0164.e^{4,0584.P}).100$	$E(\%) = (0,0247.e^{3,4439.P}).100$
Parede Diafragma	$E(\%) = \left[0,9784.e^{-99,836.\left(\frac{K}{K_0}\right)}\right].100$	$E(\%) = \left[0,9784.e^{-95,313.\left(\frac{K}{K_0}\right)}\right].100$	$E(\%) = \left[0,9711.e^{-99,730.\left(\frac{K}{K_0}\right)}\right].100$
Tapete Impermeável à Montante	$E(\%) = \left[0,2268.Ln\left(\frac{L}{B}\right) + 0,4572\right].100$	$E(\%) = \left[0,2235.Ln\left(\frac{L}{B}\right) + 0,4475\right].100$	$E(\%) = \left[0,2118.Ln\left(\frac{L}{B}\right) + 0,4860\right].100$
Tapete Drenante Horizontal	$E(\%) = [-0,0340.Ln(A) - 0,4505].100$	$E(\%) = [0,0224.Ln(A) + 0,8698].100$	$E(\%) = [-0,0083.Ln(A) + 0,7369].100$
Trincheira de Alívio	$E(\%) = [(-0,011.P) - 0,0149].100$	$E(\%) = 100\%$	$E(\%) = [(0,024.P) + 0,0594].100$
DISPOSITIVOS ASSOCIADOS	Equações para Determinação da Eficácia quanto a:		
	Vazão	Gradiente Hidráulico	Subpressão
Trincheira de Vedação, Tapete Drenante Horizontal e Trincheira de Alívio	$E(\%) = [2,5589.P^2 - 1,6035.P + 0,0172].100$	$E(\%) = 100\%$	$E(\%) = [-0,0946.P^2 - 0,0202.P + 0,7477].100$
Parede Diafragma, Tapete Drenante Horizontal e Trincheira de Alívio	$E(\%) = \left[0,9932.e^{-136,06.\left(\frac{K}{K_0}\right)}\right].100$	$E(\%) = 100\%$	$E(\%) = \left[1,6638.\left(\frac{K}{K_0}\right)^2 - 0,0559.\left(\frac{K}{K_0}\right) + 0,7806\right].100$
Tapete Impermeável à Montante, Tapete Drenante Horizontal e Trincheira de Alívio	$E(\%) = \left[0,3192.Ln\left(\frac{L}{B}\right) + 0,3734\right].100$	$E(\%) = 100\%$	$E(\%) = \left[0,0149.Ln\left(\frac{L}{B}\right) + 0,7802\right].100$

Tabela 19 – Equações para determinação da eficácia dos dispositivos de controle para anisotropia hidráulica igual a 0,02

DISPOSITIVOS ISOLADOS	Equações para Determinação da Eficácia quanto a:		
	Vazão	Gradiente Hidráulico	Subpressão
Trincheira de Vedação	$E(\%) = (0,0237 \cdot e^{3,7646 \cdot P}) \cdot 100$	$E(\%) = (0,0405 \cdot e^{3,2498 \cdot P}) \cdot 100$	$E(\%) = (0,0804 \cdot e^{2,3636 \cdot P}) \cdot 100$
Parede Diafragma	$E(\%) = \left[0,9712 \cdot e^{-112,89 \cdot \left(\frac{K}{K_0}\right)} \right] \cdot 100$	$E(\%) = \left[0,9713 \cdot e^{-107,15 \cdot \left(\frac{K}{K_0}\right)} \right] \cdot 100$	$E(\%) = \left[0,9647 \cdot e^{-111,1 \cdot \left(\frac{K}{K_0}\right)} \right] \cdot 100$
Tapete Impermeável à Montante	$E(\%) = \left[0,2158 \cdot \ln\left(\frac{L}{B}\right) + 0,4119 \right] \cdot 100$	$E(\%) = \left[0,2085 \cdot \ln\left(\frac{L}{B}\right) + 0,3988 \right] \cdot 100$	$E(\%) = \left[0,2130 \cdot \ln\left(\frac{L}{B}\right) + 0,4068 \right] \cdot 100$
Tapete Drenante Horizontal	$E(\%) = \left[-0,0340 \cdot \ln(A) - 0,4505 \right] \cdot 100$	$E(\%) = \left[0,0224 \cdot \ln(A) + 0,8698 \right] \cdot 100$	$E(\%) = \left[-0,0083 \cdot \ln(A) + 0,7369 \right] \cdot 100$
Trincheira de Alívio	$E(\%) = \left[(-0,0217 \cdot P) - 0,0234 \right] \cdot 100$	$E(\%) = 100\%$	$E(\%) = \left[(0,0316 \cdot P) + 0,1262 \right] \cdot 100$
DISPOSITIVOS ASSOCIADOS	Equações para Determinação da Eficácia quanto a:		
	Vazão	Gradiente Hidráulico	Subpressão
Trincheira de Vedação, Tapete Drenante Horizontal e Trincheira de Alívio	$E(\%) = \left[1,8375 \cdot P^2 - 0,818 \cdot P - 0,0408 \right] \cdot 100$	$E(\%) = 100\%$	$E(\%) = \left[-0,0133 \cdot P^2 - 0,0927 \cdot P + 0,7714 \right] \cdot 100$
Parede Diafragma, Tapete Drenante Horizontal e Trincheira de Alívio	$E(\%) = \left[0,9876 \cdot e^{-159,46 \cdot \left(\frac{K}{K_0}\right)} \right] \cdot 100$	$E(\%) = 100\%$	$E(\%) = \left[-7,33 \cdot \left(\frac{K}{K_0}\right)^2 + 0,0998 \cdot \left(\frac{K}{K_0}\right) + 0,7936 \right] \cdot 100$
Tapete Impermeável à Montante, Tapete Drenante Horizontal e Trincheira de Alívio	$E(\%) = \left[0,3055 \cdot \ln\left(\frac{L}{B}\right) + 0,3206 \right] \cdot 100$	$E(\%) = 100\%$	$E(\%) = \left[0,0147 \cdot \ln\left(\frac{L}{B}\right) + 0,7802 \right] \cdot 100$

Tabela 20 – Equações para determinação da eficácia dos dispositivos de controle para anisotropia hidráulica igual a 1

DISPOSITIVOS ISOLADOS	Equações para Determinação da Eficácia quanto a:		
	Vazão	Gradiente Hidráulico	Subpressão
Trincheira de Vedação	$E(\%) = (0,0065.e^{5,0354.P}).100$	$E(\%) = (0,0135.e^{4,3141.P}).100$	$E(\%) = (0,0069.e^{4,5946.P}).100$
Parede Diafragma	$E(\%) = \left[0,9824.e^{-91,331.\left(\frac{K}{K_0}\right)}\right].100$	$E(\%) = \left[0,9825.e^{-86,236.\left(\frac{K}{K_0}\right)}\right].100$	$E(\%) = \left[0,9744.e^{-91,284.\left(\frac{K}{K_0}\right)}\right].100$
Tapete Impermeável à Montante	$E(\%) = \left[0,2297.Ln\left(\frac{L}{B}\right) + 0,4874\right].100$	$E(\%) = \left[0,2297.Ln\left(\frac{L}{B}\right) + 0,4873\right].100$	$E(\%) = \left[0,1951.Ln\left(\frac{L}{B}\right) + 0,5647\right].100$
Tapete Drenante Horizontal	$E(\%) = [-0,0340.Ln(A) - 0,4505].100$	$E(\%) = [0,0224.Ln(A) + 0,8698].100$	$E(\%) = [-0,0083.Ln(A) + 0,7369].100$
Trincheira de Alívio	$E(\%) = [(-0,0036.P) - 0,006].100$	$E(\%) = 100\%$	$E(\%) = [(0,0106.P) + 0,0206].100$
DISPOSITIVOS ASSOCIADOS	Equações para Determinação da Eficácia quanto a:		
	Vazão	Gradiente Hidráulico	Subpressão
Trincheira de Vedação, Tapete Drenante Horizontal e Trincheira de Alívio	$E(\%) = [3,4524.P^2 - 2,5661.P + 0,0781].100$	$E(\%) = 100\%$	$E(\%) = [-0,2462.P^2 + 0,132.P + 0,6988].100$
Parede Diafragma, Tapete Drenante Horizontal e Trincheira de Alívio	$E(\%) = \left[0,9967.e^{-122,99.\left(\frac{K}{K_0}\right)}\right].100$	$E(\%) = 100\%$	$E(\%) = \left[1,0476.\left(\frac{K}{K_0}\right)^2 - 0,0242.\left(\frac{K}{K_0}\right) + 0,7569\right].100$
Tapete Impermeável à Montante, Tapete Drenante Horizontal e Trincheira de Alívio	$E(\%) = \left[0,3312.Ln\left(\frac{L}{B}\right) + 0,4071\right].100$	$E(\%) = 100\%$	$E(\%) = \left[0,0142.Ln\left(\frac{L}{B}\right) + 0,7807\right].100$

Tabela 21 – Equações para determinação da eficácia dos dispositivos de controle para anisotropia hidráulica igual a 10

DISPOSITIVOS ISOLADOS	Equações para Determinação da Eficácia quanto a:		
	Vazão	Gradiente Hidráulico	Subpressão
Trincheira de Vedação	$E(\%) = (0,0045.e^{5,3415.P}).100$	$E(\%) = (0,0165.e^{4,0980.P}).100$	$E(\%) = (0,0040.e^{5,0888.P}).100$
Parede Diafragma	$E(\%) = \left[0,9836.e^{-88,518.\left(\frac{K}{K_0}\right)} \right].100$	$E(\%) = \left[0,9837.e^{-81,598.\left(\frac{K}{K_0}\right)} \right].100$	$E(\%) = \left[0,9752.e^{-88,478.\left(\frac{K}{K_0}\right)} \right].100$
Tapete Impermeável à Montante	$E(\%) = \left[0,2303.Ln\left(\frac{L}{B}\right) + 0,4982 \right].100$	$E(\%) = \left[0,2303.Ln\left(\frac{L}{B}\right) + 0,4982 \right].100$	$E(\%) = \left[0,1859.Ln\left(\frac{L}{B}\right) + 0,5948 \right].100$
Tapete Drenante Horizontal	$E(\%) = \left[-0,0340.Ln(A) - 0,4505 \right].100$	$E(\%) = \left[0,0224.Ln(A) + 0,8698 \right].100$	$E(\%) = \left[-0,0083.Ln(A) + 0,7369 \right].100$
Trincheira de Alívio	$E(\%) = \left[(-0,0011.P) - 0,0022 \right].100$	$E(\%) = 100\%$	$E(\%) = \left[(0,0037.P) + 0,0072 \right].100$
DISPOSITIVOS ASSOCIADOS	Equações para Determinação da Eficácia quanto a:		
	Vazão	Gradiente Hidráulico	Subpressão
Trincheira de Vedação, Tapete Drenante Horizontal e Trincheira de Alívio	$E(\%) = \left[3,7598.P^2 - 2,8798.P + 0,0817 \right].100$	$E(\%) = 100\%$	$E(\%) = \left[-0,3259.P^2 + 0,2123.P + 0,6731 \right].100$
Parede Diafragma, Tapete Drenante Horizontal e Trincheira de Alívio	$E(\%) = \left[0,9977.e^{-118,7.\left(\frac{K}{K_0}\right)} \right].100$	$E(\%) = 100\%$	$E(\%) = \left[-6,9123.\left(\frac{K}{K_0}\right)^2 + 0,1511.\left(\frac{K}{K_0}\right) + 0,7438 \right].100$
Tapete Impermeável à Montante, Tapete Drenante Horizontal e Trincheira de Alívio	$E(\%) = \left[0,3357.Ln\left(\frac{L}{B}\right) + 0,4181 \right].100$	$E(\%) = 100\%$	$E(\%) = \left[0,0136.Ln\left(\frac{L}{B}\right) + 0,7812 \right].100$

6 - CONCLUSÕES

As análises realizadas tiveram o objetivo de fundamentar tecnicamente os estudos preliminares feitos durante a elaboração de projetos de barragens de terra assentadas sobre fundações permeáveis. Foi considerada uma seção típica representativa de barragens brasileiras existentes que possibilitou uma melhor visualização da necessidade e da aplicabilidade destes estudos. O sucesso destas análises é expresso através dos coeficientes de determinação obtidos e através da proximidade dos valores encontrados com os valores calculados a partir das equações de Ambraseys (1963) e Marsal et al. (1971).

A determinação do dispositivo de controle mais eficaz para barragens com estas características é uma resposta única para cada projeto. Cada barragem possui uma vazão admissível e peculiaridades específicas como, por exemplo, disponibilidade de recursos naturais, resistência do solo de fundação e a existência de estratos impermeáveis no maciço de fundação que permitam o engaste dos dispositivos de vedação.

Para todos os dispositivos analisados foi verificado o comportamento das variáveis vazão, gradiente de saída e subpressão para as situações em que o maciço da fundação é isotrópico e anisotrópico. Foi demonstrado que a variação da anisotropia hidráulica implica em alterações importantes nas grandezas das variáveis analisadas, por exemplo, o gradiente de saída pode

variar de 0,21 a 1,45 quando é adotado um tapete impermeável com 240 m de comprimento e uma anisotropia de 1 e 0,02 (K_v/K_h), respectivamente.

Avaliando somente as variáveis técnicas, este trabalho confirmou as constatações de outros autores, de que a trincheira de vedação total é o dispositivo mais eficaz para o controle da vazão, apresentando cerca de 100% de eficácia. O tapete impermeável de montante apresentou eficácia crescente com o seu comprimento. Esta eficácia atingiu cerca de 60% para tapetes com comprimento de 240 m ($L/B=1,70$). A partir desta relação de L/B (comprimento do tapete impermeável / largura da base da barragem), a eficácia do tapete não aumenta significativamente.

Quanto à parede diafragma, os resultados obtidos para o dispositivo sem imperfeições são excelentes, porém este sistema é altamente vulnerável ao surgimento de fissuras/aberturas que comprometem completamente a eficácia do dispositivo e que, conseqüentemente, comprometem sua maior utilização.

Os resultados apresentados também confirmaram a grande eficácia dos dispositivos de drenagem (tapete drenante horizontal e trincheira de alívio) quanto à redução dos gradientes de saída e da subpressão sob o espaldar de jusante. Quanto à vazão, a utilização destes dispositivos implica em um aumento da vazão que percola através da fundação.

Por fim, foram analisadas as associações dos dispositivos de vedação e drenagem para compatibilizar a eficácia dos dispositivos de vedação quanto

à vazão e a eficácia dos dispositivos de drenagem quanto ao gradiente de saída e a subpressão. Nestes casos foram encontrados os melhores resultados.

As equações para determinação da eficácia dos dispositivos de controle apresentadas neste trabalho poderão ser úteis em novos projetos de barragens de terra e em análises do comportamento de barragens existentes.

REFERÊNCIAS

AMBRASEYS, N.N. Cuf-off Efficiency os Grout Curtains and Slurry Trenches. In: Grout and Drilling Muds in Engineering Practice, 1963, London – **Proceedings** - Butterworths. p 43 - 46

ASSIS, A.P. et al. **Apostila de Barragens**. 2003. UNB – Brasília/DF. 170 p.

BUREAU OF RECLAMATION. **Avaliação de Pequenas Barragens**. 2002. Manual de Irrigação. v.6 – Brasília/DF. 74 p.

CASAGRANDE, A. Control of Seepage through Foundations and Abutments of Dams: First Rankine Lecture. **Géotechnique**, London, 1961. Volume 11, n.3, p.161-182.

CASAGRANDE, A. Seepage Through Dams. Journal of the New England Water Works Association. 42 p. London, 1937.

CEDERGREN, H.R. **Seepage, Drainage, and Flow Nets**, New York/USA, John Wiley and Sons, 1977, 534 p.

CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO – CEPED. Acidente com a Barragem de Santa Helena – Relatório da Junta de Consultores.

CREAGER, W.P et al. **Engineering for Dams**, New York/USA: Volume I, John Wiley and Sons, 1945, 245 p.

CRUZ, P.T. **100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção e Projeto**, São Paulo/SP: Oficina de Textos, 1996, 648 p.

EMBASA – Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A. Barragem de Santa Helena - **Relatório Operacional**. 2000, 2001, 2003; 2004 e 2005.

GAIOTO, N.. **Sistemas de Controle de Percolação de Água em Projetos de Barragens de Terra**. Concurso de Livre-Docência. EESC/USP, São Carlos/SP, 1992.

GAIOTO, N. **Introdução ao projeto de barragens de terra e de enrocamento**. São Carlos/SP: EESC-USP, 2003. 126 p.

GEOTÉCNICA S.A. Engenheiros Consultores. Barragem de Santa Helena. Projeto Executivo. 1976.

GEOTÉCNICA S.A. Engenheiros Consultores. Barragem de Santa Helena. Investigações Geotécnicas na Fundação. 1976.

GUIMARÃES, M.C.A.B. **Uma análise de métodos de avaliação de subpressão em estruturas tipo gravidade**. 238 p. Dissertação (Mestrado)

- Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.

BOURDEAUX, G. H. R. M. **Diagnóstico do Deslizamento da Ombreira Esquerda a Jusante da Barragem de Santa Helena e Solução para Recuperação**. 51 p. Relatório Técnico. São Paulo/SP. 2003

LAMBE T. W. and WHITMAN R. V. **Soil Mechanics**. John Wiley and Sons, 1969, 553 p.

LEFEBVRE, G. et al. Effectiveness of Seepage Control Elements for Embankments on Semipervious Foundations. **Canadian Geotechnical Journal**, nov. 1981. Volume 18, n 4, p 572 – 576.

LEVIS, S.D. **Verificação da eficácia dos sistemas de vedação e drenagem em fundações de barragens de concreto**. 186p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

MARSAL, R.J. et al. Effectiveness of Cutoffs. in Earth Foundations and Abutments of Dams. In: Fourth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1971, Volume I, San Juan / Puerto Rico – **Proceedings** – American Society of Civil Engineers. p 237 – 312.

SARÉ, A. R. **Análise das Condições de Fluxo na Barragem de Curuá-Una, Pará.** 167 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio, Rio de Janeiro/RJ, 2003.

MEDEIROS, C.H.A.C. **Síntese de metodologias Propostas para Elaboração de Estudos Geológicos-Geotécnicos de Fundações de Barragens. Ênfase para Pequenas Barragens (Região do Semi-Árido).** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1986.

SOUZA PINTO. C. **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** 2ª Edição. 355 p. Oficina de Textos. São Paulo/SP. 2002.

PORTO, E.C. **Critério para Determinação de Vazões pela Fundação de Barragens com Base nos Ensaios de Perda D'água: O Caso da USINA Hidrelétrica de Itaipú.** Curitiba/PR. 2002. 6 p.

SHERARD, J.L. et al. **Earth and Earth-Rock Dams**, New York/USA: John Wiley and Sons, 1963, 725 p.

SILVEIRA, J.F.A. et al. Desempenho dos Dispositivos de Impermeabilização e Drenagem da Fundação da Barragem de Terra de Água Vermelha. In: **XIV** Seminário Nacional de Grandes Barragens, 1981, v. 1, Recife/PE – **Anais** – Comitê Brasileiro de Grandes Barragens. p 433 – 456.

SILVEIRA, J.F.A. **Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento**. São Paulo/SP. Oficina de Textos, 2006, 413 p.

SIMÕES, P.R.M. **AZ Dicionário de Termos Técnicos em Engenharia Civil**. 1ª Edição. Salvador/BA. 1993. 222 p.

SOWERS, G.F. **Earth and Rockfill Dam Engineering**, Índia: Ásia Publishing House, 1962, 283 p.

STRUFALDI, E.G.B. **Retroanálise Probabilista: Aplicação Prática de Análise de Percolação em uma Barragem de Terra**. 82 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

UGINCHUS, A.A. **Seepage Through Earth Dams**, 1960, 158 p.

VARGAS, M. Effectiveness of Cutoffs under Three Earth Dams. In: Fourth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1971, Volume II, San Juan / Puerto Rico – **Proceedings** – American Society of Civil Engineers. p 257 – 273.