

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MICHELLE CAROLINE NOGUEIRA DE ARAUJO

**ESTUDO DE EQUIVALENCIA ENTRE DRENOS FRANCESES E TAPETES
DRENANTES EM BARRAGENS DE TERRA**

CURITIBA

2013

MICHELLE CAROLINE NOGUEIRA DE ARAUJO

**ESTUDO DE EQUIVALENCIA ENTRE DRENOS FRANCESES E TAPETES
DRENANTES EM BARRAGENS DE TERRA**

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

Orientador: Profº Dr. Sidnei Teixeira

CURITIBA

2013

Araujo, Michelle Caroline Nogueira

Estudo de equivalência entre drenos franceses e tapetes drenantes em barragens de terra / Michelle Caroline Nogueira Araujo. – Curitiba, 2014.

252 f. : il.; grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil.

Orientador: Sidnei Teixeira

1. Barragens de terra. 2. Drenagem. 3. Dreno francês. I. Teixeira, Sidnei. II. Título.

CDD: 627.54

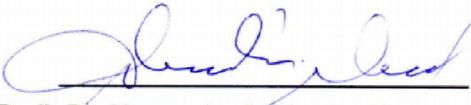
TERMO DE APROVAÇÃO

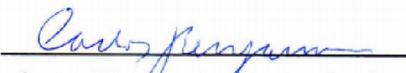
MICHELLE CAROLINE NOGUEIRA DE ARAÚJO

**ESTUDO DA EQUIVALENCIA ENTRE DRENOS FRANCESES E TAPETES
DRENANTES EM BARRAGENS DE TERRA**

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


Orientador: Prof. Dr. Sidnei Helder Teixeira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil – UFPR


Examinadores: Prof. Dr. Alessander C. Morales Korman
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, UFPR


Dr. Carlos Vinicius dos Santos Benjamim
Ober Geossintéticos – São Paulo

Curitiba, 13 de novembro de 2013

*Dedico este trabalho em especial aos meus pais
Renilde Araújo e Valdeci Araújo, que com muito carinho,
sabedoria e dedicação apoiaram toda a minha caminhada
e foram essenciais em mais esta conquista.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por ter me abençoado e capacitado para mais esta etapa da minha vida e por ter colocado, no meu caminho, pessoas muito especiais que contribuíram grandemente para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus amados pais, Renilde e Valdeci, por todo amor, apoio, incentivo e compreensão. A estes, sou eternamente grata.

Ao meu orientador Prof^o Dr. Sidnei Teixeira pelo grande auxílio e orientação, que através do seu conhecimento e dedicação me proporcionou a realização desta pesquisa e crescimento profissional.

Aos amigos do mestrado, Andrés Gonzales, Daniele Rodrigues, Débora Perelles, Karen Goslar e Maria Izabel Goto Zanlorenzi, e ao laboratorista Ricardo Volert, pela grande ajuda dispensada. A amizade e companheirismo de vocês tornou tudo mais especial.

Ao amigo Luis Reginaldo, laboratorista da empresa Engefoto S.A., que me ajudou a conseguir o material para a realização do modelo reduzido.

À todas as minhas amigas e amigos por todo o incentivo, apoio, compreensão e momentos de descontração, que foram muito importantes.

RESUMO

As simulações numéricas e modelagens físicas tendem a simplificar o comportamento de problemas reais, que na maioria das vezes não podem ser analisadas em campo. Para certos fenômenos como o fluxo através de barragem de terra os efeitos tridimensionais podem afetar consideravelmente os resultados obtidos com uma solução simplificada, seja em termos de vazão, cargas, gradientes hidráulicos ou fatores de segurança. Esta pesquisa tem como objetivo principal analisar o comportamento do fluxo mediante um sistema de drenagem interna pouco mencionada na literatura, que é o dreno francês (finger drain), através de modelagem física reduzida e modelagem numérica. Para este último foi utilizado o programa SEEP/2D, fornecido pelo grupo GeoStudio. Ambos os modelos consistiram em simular a percolação para diferentes espaçamentos entre os drenos e outras análises paramétricas, considerando situações não testadas fisicamente.

Palavras – chave: Fluxo em solos, modelagem tridimensional, barragem de terra, dreno francês.

ABSTRACT

Numerical simulations and physical modeling tend to simplify the behavior of real problems, which in most cases cannot be analyzed in the field. For some phenomena like the flow through earth dam, three-dimensional effects can significantly affect the results obtained with a simplified solution, in terms of flow, loads, hydraulic gradients or safety factors. This research has the objective at analyzing the behavior of the flow through an internal drainage system seldom mentioned in the literature, which is the finger drain, through physical modeling and numerical modeling. For the last one was used the SEEP/2D program, provided by the group GeoStudio. Both models consisted in simulating percolation for different spacing between the drains and other parametric analyzes, considering situations not tested physically.

Keywords: Physical modeling, numerical modeling, earth dam and finger drain.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Fluxo através do maciço de barragem de terra.....	22
FIGURA 2.2 – Curva característica.....	24
FIGURA 2.3 – Curvas características para diferentes tipos de solo.....	25
FIGURA 2.4 – Curvas características para o processo de umedecimento e secagem.....	26
FIGURA 2.5 – Representação da Curva de Retenção de Umidade do Solo	27
FIGURA 2.6 – Influência do índice de vazios	30
FIGURA 2.7 – Fluxo através do solo em camadas.....	32
FIGURA 2.8 – Representação da velocidade de percolação em um elemento de solo.....	34
FIGURA 2.9 – Condição de fluxo em barragem com fundação permeável e fundação impermeável.....	37
FIGURA 2.10 – Representação da rede de fluxo em barragem com fundação permeável	38
FIGURA 2.11 – a) Condição geral de fluxo; b) Malha formada por duas linhas de fluxo e duas equipotenciais.....	39
FIGURA 2.12 – a) Conjunto de parábolas confocais; b) Pontos com foco em comum	40
FIGURA 2.13 – Condições de entrada da linha de fluxo	40
FIGURA 2.14 – Condições de saída da linha de fluxo	41
FIGURA 2.15 – Determinação da linha freática de Schaffernak-van Iterson, modificada por A. Casagrande	42
FIGURA 2.16 – Determinação da linha freática pelo método de L. Casagrande	43
FIGURA 2.17 – Solução gráfica baseada no método de L. Casagrande	44
FIGURA 2.18 – Parábola de fluxo.....	44
FIGURA 2.19 – Método gráfico de Kozeny.....	45
FIGURA 2.20 – Construção da linha freática.....	45
FIGURA 2.21 – Método A. Casagrande.....	46
FIGURA 2.22 – Condições de saída para várias faces de escoamento.....	47
FIGURA 2.23 – Condições de saída para vários ângulos da face de drenagem	48
FIGURA 2.24 – Transformação de escala para solo anisotrópico.....	48
FIGURA 2.25 – Efeito da anisotropia na linha freática	49
FIGURA 2.26 – Rede de fluxo em barragem com fundação permeável	49
FIGURA 2.27 – Fluxo dividido em 4 fragmentos.....	52
FIGURA 2.28 – Modelos de areia	55
FIGURA 2.29 – Modelo elétrico de maciço de barragem	56
FIGURA 2.30 – Modelo vertical de placas paralelas	57
FIGURA 2.31 – Tipo de elementos finitos.....	58
FIGURA 2.32 – Representação esquemática de barragem de terra com tapete drenante: a) meio anisotrópico, b) meio isotrópico.....	64
FIGURA 2.33 – Representação esquemática de barragem de terra em meio anisotrópico com tapete drenante associado a dreno inclinado.	64

FIGURA 2.34 – Disposição dos drenos franceses na barragem de Três Irmãos e seção transversal do dreno.....	66
FIGURA 3.1 – Ensaio de sedimentação	72
FIGURA 3.2 – Esquema do permeâmetro de carga constante	73
FIGURA 3.3 – Etapas do ensaio de permeabilidade da areia.....	74
FIGURA 3.4 – Etapas do ensaio de permeabilidade do pedregulho.....	74
FIGURA 3.5 – Pesagem do solo para determinação do índice de vazios.....	75
FIGURA 3.6 – Ensaio de densidade real dos grãos: a) etapa de aquecimento; b e c) etapa de resfriamento das soluções inseridas nos picnômetros; d) pesagem do picnômetro	76
FIGURA 3.7 – Ensaio de cisalhamento direto: a) equipamento; b) processo de aplicação da força horizontal.....	77
FIGURA 3.8 – Esquema da coluna drenante.....	78
FIGURA 3.9 – Etapas do ensaio de coluna drenante. A primeira representa a modelagem da amostra de solo. A segunda representa a amostra saturada e o nível d'água estabilizado	79
FIGURA 3.10 – a) Caixa metálica; b) Caixa metálica com chapa divisória para simulação do espaçamento menor entre os drenos	80
FIGURA 3.11 – a) Painel de leitura; b) Geotêxtil na extremidade do piezômetro	80
FIGURA 3.12 – Esquema de posicionamento dos piezômetros no interior da barragem.....	81
FIGURA 3.13 – Esquema de posicionamento dos piezômetros no interior da barragem e das seções transversais.....	82
FIGURA 3.14 – procedimento utilizado para saturação dos piezômetros.....	84
FIGURA 3.15 – Esquema de posicionamento das seções longitudinais.....	86
FIGURA 3.16 – Seções de análise bidimensional em planos ortogonais	88
FIGURA 3.17 – Representação da obtenção das seções plana e transversal	89
FIGURA 4.1 – Curva de distribuição granulométrica.....	90
FIGURA 4.2 – Relação de altura de queda e γ	92
FIGURA 4.3 – Resistência de cisalhamento do solo	94
FIGURA 4.4 – Ângulo de atrito do pedregulho	94
FIGURA 4.5 – Curva de retenção de umidade do solo	95
FIGURA 4.6 – Modelo físico reduzido.....	95
FIGURA 4.7 – Simulação do modelo físico 1: a) disposição do tapete drenante; b) início da percolação pelo maciço; c) fluxo através da barragem; d) saída de água pelo dreno	96
FIGURA 4.8 – Drenagem do fluxo pelo tapete drenante, com saturação no pé de jusante da barragem	97
FIGURA 4.9 – Linhas piezométricas nas seções longitudinais do modelo 1	99
FIGURA 4.10 – Alturas piezométricas na seção transversal do modelo 1	99
FIGURA 4.11 – Simulação do modelo físico 2: a) disposição do dreno francês; b) percolação da água pelo maciço; c) leve escorregamento no talude de jusante; d) erosão na saída do dreno	100
FIGURA 4.12 – Linhas piezométricas nas seções longitudinais do modelo 2	102
FIGURA 4.13 – Alturas piezométricas na seção transversal do modelo 2.....	102
FIGURA 4.14 – Simulação do modelo físico 3: a) divisória metálica para diminuição da largura da barragem; b) percolação da água pelo maciço.....	103

FIGURA 4.15 – Simulação do modelo físico 3: a) Ocorrência de pipping no topo da barragem; b) saída da água pelo dreno	104
FIGURA 4.16 – Simulação do modelo físico 3: a) disposição dos drenos franceses; b) percolação da água pelo maciço; c) e d) início da saída d'água pelos drenos; e) erosão na saída nos drenos	105
FIGURA 4.17 – Linhas piezométricas nas seções longitudinais do modelo 3	107
FIGURA 4.18 – Alturas piezométricas na seção transversal do modelo 3	107
FIGURA 4.19 – Simulação do modelo físico 4: a) disposição dos três drenos franceses; b) percolação da água pelo maciço; c) e d) sequencia preferencial de percolação pelos drenos	108
FIGURA 4.20 – Ocorrência de erosão nos drenos	109
FIGURA 4.21 – Linhas piezométricas nas seções longitudinais do modelo 4	110
FIGURA 4.22 – Alturas piezométricas na seção transversal do modelo 4	110
FIGURA 4.23 – Gráfico das linhas piezometricas da seção S1 de cada modelo físico	111
FIGURA 4.24 – Gráfico das linhas piezometricas da seção S2 de cada modelo físico	112
FIGURA 4.25 – Gráfico das linhas piezometricas da seção S3 de cada modelo físico	112
FIGURA 4.26 – Relação entre as vazões e área de escoamento dos drenos	113
FIGURA 4.27 – Estabilidade do talude de jusante.....	114
FIGURA 4.28 – Comportamento da linha piezometrica do modelo 1	116
FIGURA 4.29 – Seções longitudinais do modelo 1 com imposição das alturas piezométricas	117
FIGURA 4.30 – Projeção das equipotenciais ao longo da superfície freatica no plano horizontal xy do modelo dotado de tepete drenante.....	118
FIGURA 4.31 – Seção transversao da projeção das equipotenciais ao longo da superfície freatica no plano vertical yz do modelo dotado de tepete drenante	118
FIGURA 4.32 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 1	119
FIGURA 4.33 – Seções longitudinais do modelo 2 com imposição das alturas piezométricas.	120
FIGURA 4.34 – Projeção das equipotenciais ao longo da superfície freatica no plano horizontal xy do modelo dotado de um dreno francês.....	121
FIGURA 4.35 – Seção transversao da projeção das equipotenciais ao longo da superfície freatica no plano vertical yz do modelo dotado de um dreno francês.....	121
FIGURA 4.36 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 2	122
FIGURA 4.37 – Seções longitudinais do modelo 3 com imposição das alturas piezométricas.	123
FIGURA 4.38 – Projeção das equipotenciais ao longo da superfície freatica no plano horizontal xy do modelo dotado de dois drenos franceses.....	124
FIGURA 4.39 – Seção transversao da projeção das equipotenciais ao longo da superfície freatica no plano vertical yz do modelo dotado de dois drenos franceses	124
FIGURA 4.40 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 3	125
FIGURA 4.41 – Seções longitudinais do modelo 4 com imposição das alturas piezométricas.	126
FIGURA 4.42 – Projeção das equipotenciais ao longo da superfície freatica no plano horizontal xy do modelo dotado de três drenos franceses	127

FIGURA 4.43 – Seção transversão da projeção das equipotenciais ao longo da superfície freatica no plano vertical yz do modelo dotado de três drenos franceses	127
FIGURA 4.44 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 4	128
FIGURA 4.45 – Comportamento do fluxo admitindo anisotropia 1	128
FIGURA 4.46 – Comportamento do fluxo admitindo anisotropia 0,8	129
FIGURA 4.47 – Comportamento do fluxo admitindo anisotropia 0,3	129
FIGURA 4.48 – Comportamento do fluxo admitindo anisotropia 0,2	130
FIGURA 4.49 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 1 para comprimento de dreno igual a 50 cm	133
FIGURA 4.50 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 2 para comprimento de dreno igual a 50 cm	134
FIGURA 4.51 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 3 para comprimento de dreno igual a 50 cm	135
FIGURA 4.52 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 4 para comprimento de dreno igual a 50 cm	136
FIGURA 4.53 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 1 para comprimento de dreno igual a 70 cm	138
FIGURA 4.54 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 2 para comprimento de dreno igual a 70 cm	139
FIGURA 4.55 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 3 para comprimento de dreno igual a 70 cm	141
FIGURA 4.56 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 4 para comprimento de dreno igual a 70 cm	142
FIGURA 4.57 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 1 para comprimento de dreno igual a 95 cm	143
FIGURA 4.58 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 2 para comprimento de dreno igual a 95 cm	145
FIGURA 4.59 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 3 para comprimento de dreno igual a 95 cm	146
FIGURA 4.60 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 4 para comprimento de dreno igual a 95 cm	148
FIGURA 4.61 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 1 para comprimento de dreno igual a 50 cm	149
FIGURA 4.62 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 2 para comprimento de dreno igual a 50 cm	151
FIGURA 4.63 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 3 para comprimento de dreno igual a 50 cm	152
FIGURA 4.64 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 4 para comprimento de dreno igual a 50 cm	153
FIGURA 4.65 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 1 para comprimento de dreno igual a 70 cm	155
FIGURA 4.66 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 2 para comprimento de dreno igual a 70 cm	156
FIGURA 4.67 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 3 para comprimento de dreno igual a 70 cm	158

FIGURA 4.68 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 4 para comprimento de dreno igual a 70 cm.....	159
FIGURA 4.69 – Grafico Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 1 para comprimento de dreno igual a 95 cm.....	161
FIGURA 4.70 – Grafico Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 2 para comprimento de dreno igual a 95 cm.....	162
FIGURA 4.71 – Grafico Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 3 para comprimento de dreno igual a 95 cm.....	164
FIGURA 4.72 – Grafico Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 4 para comprimento de dreno igual a 95 cm.....	166
FIGURA 4.73 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 1 para comprimento de dreno igual a 50 cm.....	167
FIGURA 4.74 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 2 para comprimento de dreno igual a 50 cm.....	169
FIGURA 4.75 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 3 para comprimento de dreno igual a 50 cm.....	170
FIGURA 4.76 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 4 para comprimento de dreno igual a 50 cm.....	171
FIGURA 4.77 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 1 para comprimento de dreno igual a 70 cm.....	173
FIGURA 4.78 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 2 para comprimento de dreno igual a 70 cm.....	174
FIGURA 4.79 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 3 para comprimento de dreno igual a 70 cm.....	176
FIGURA 4.80 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 4 para comprimento de dreno igual a 70 cm.....	177
FIGURA 4.81 – Grafico Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 1 para comprimento de dreno igual a 95 cm.....	179
FIGURA 4.82 – Grafico Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 2 para comprimento de dreno igual a 95 cm.....	181
FIGURA 4.83 – Grafico Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 3 para comprimento de dreno igual a 95 cm.....	182
FIGURA 4.84 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 4 para comprimento de dreno igual a 95 cm.....	184
FIGURA 4.85 – Cargas totais para a barragem dotada de tapete drenante	186
FIGURA 4.86 – Seção transversal das cargas totais para a barragem com tapete drenante .	186
FIGURA 4.87 – Cargas totais para a barragem com um dreno francês.....	189
FIGURA 4.88 – Seção transversal das cargas totais para a barragem com um dreno francês	190
FIGURA 4.89 – Cargas totais para a barragem com dois drenos franceses	192
FIGURA 4.90 – Seção transversal das cargas totais para a barragem com dois drenos franceses	193
FIGURA 4.91 – Cargas totais para a barragem com três drenos franceses	195
FIGURA 4.92 – Seção transversal das cargas totais para a barragem com três drenos franceses	196
FIGURA 4.93 – Seções do modelo dotado de drenos franceses associados à dreno vetical: a) seção longitudinal; b) seção plana; c) seção transversal	198

FIGURA 4.94 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo com dois drenos franceses associados ao dreno vertical	198
FIGURA 4.95 – Seção transversal das cargas totais para a barragem utilizando a combinação de drenos franceses com dreno vertical e para o modelo dotado de dois drenos franceses ..	199
FIGURA 4.96 – Seções do modelo dotado de drenos franceses associados à tapete drenante: a) e b) seções longitudinais; c) seção plana; d) seção transversal	200
FIGURA 4.97 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo com dois drenos franceses associados ao tapete drenante	201
FIGURA 4.98 – Seção transversal das cargas totais para a barragem utilizando a combinação de drenos franceses com tapete drenante e para o modelo dotado de dois drenos franceses	201
FIGURA 4.99 – Seção transversal das cargas totais para a barragem simulando os diferentes espaçamentos entre os drenos franceses	202

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVO DA PESQUISA	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 FLUXO DE ÁGUA EM MEIOS POROSOS.....	20
2.1.1 Equação de fluxo	20
2.1.2 Fluxo em meios saturados e não saturados.....	22
2.1.2.1 Sucção	23
2.1.2.2 Condutividade hidráulica.....	27
2.1.2.3 Anisotropia	31
2.2 PERCOLAÇÃO DE ÁGUA EM BARRAGENS DE TERRA.....	32
2.2.1 Solução da equação de Laplace	33
2.2.2 Percolação de água através do método da rede de fluxo	36
2.2.2.1 Condições de contorno	36
2.2.2.2 Definição da rede de fluxo e suas propriedades	38
2.2.2.3 Determinação da linha freática	39
2.2.2.4 Percolação em meio anisotrópico.....	48
2.2.2.5 Determinação da vazão de percolação	49
2.2.3 Métodos para análise de fluxo em barragens.....	50
2.2.3.1 Método Gráfico	51
2.2.3.2 Método Analítico	51
2.2.3.3 Método Analógico	52
2.2.3.4 Método Numérico.....	57
2.3 CONTROLE DE PERCOLAÇÃO EM BARRAGENS DE TERRA.....	60
2.3.1 Força de Percolação.....	60
2.3.2 Sistema de drenagem interna.....	61
2.3.2.1 Tapete drenante.....	63
2.3.2.2 Drenos franceses (Finger drains ou Stringer drains).....	64
2.3.3 Requisitos para sistemas de drenos.....	66
2.3.3.1 Critério de retenção	67
2.3.3.2 Critério de permeabilidade.....	68
2.3.3.3 Dimensionamento da vazão	68
3 MATERIAIS E MÉTODOS	70

3.1	INTRODUÇÃO	70
3.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO MATERIAL	70
3.2.1	Análise granulométrica	71
3.2.2	Permeabilidade	73
3.2.3	Compacidade	74
3.2.4	Determinação de densidade real dos grãos	75
3.2.5	Ensaio de cisalhamento direto	77
3.2.6	Ensaio de coluna drenante	78
3.3	MODELO EM ESCALA REDUZIDA	79
3.3.1	Características físicas do modelo	79
3.3.2	Metodologia do ensaio	82
3.4	MODELAGEM NUMÉRICA	84
3.4.1	Características do modelo	84
3.4.2	Metodologia	85
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	90
4.1	CARACTERÍSTICAS DO SOLO	90
4.1.1	Análise granulométrica	90
4.1.2	Permeabilidade	91
4.1.3	Compacidade	92
4.1.4	Determinação da densidade real dos grãos	93
4.1.5	Ensaio de cisalhamento direto	93
4.1.6	Ensaio de coluna drenante	94
4.2	MODELO FÍSICO	95
4.2.1	Modelo 1 – Barragem com tapete drenante	96
4.2.2	Modelo 2 – Barragem com 1 dreno francês	99
4.2.3	Modelo 3 – Barragem com 2 drenos franceses	102
4.2.3.1	Primeira tentativa	103
4.2.3.2	Modelo 3 – Segunda tentativa	104
4.2.4	Modelo 4 – Barragem com 3 drenos franceses	107
4.2.5	Análise geral dos resultados	111
4.3	MODELO NUMÉRICO	114
4.3.1	Condições de contorno	114
4.3.2	Etapa 1 – Imposição das alturas piezométricas	115
4.3.2.1	Modelo 1 – Barragem com tapete drenante	116
4.3.2.2	Modelo 2 – Barragem com 1 dreno francês simulando espaçamento de 88 cm	119
4.3.2.3	Modelo 3 – Barragem com 2 drenos franceses simulando espaçamento de 44 cm	122
4.3.2.4	Modelo 4 – Barragem com 3 drenos franceses simulando espaçamento de 22 cm	125
4.3.3	Etapas 2 – Determinação de k_z / k_x	128
4.3.4	Etapas 3 – Análises paramétricas	130

4.3.4.1	Simulação dos modelos com largura (L) de 44cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) de 50 cm.....	132
4.3.4.2	Modelo com largura (L) de 44cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) de 70cm.....	137
4.3.4.3	Modelo com largura (L) de 44 cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) de 95 cm.....	142
4.3.4.4	Modelo com largura (L) de 72 cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) de 50 cm.....	148
4.3.4.5	Modelo com largura (L) de 72 cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) de 70 cm.....	153
4.3.4.6	Modelo com largura (L) de 72 cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) de 95 cm.....	159
4.3.4.7	Barragem com largura (L) de 100 cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) de 50 cm.....	166
4.3.4.8	Modelo com largura (L) de 100 cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) de 70 cm.....	172
4.3.4.9	Barragem com largura (L) de 100 cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) de 95 cm.....	178
4.3.4.10	Análise geral dos resultados.....	184
4.3.4.11	Análises comparativas.....	197
4.3.5	Discussão.....	202
5	CONCLUSÃO.....	204
6	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	206
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	207
	ANEXOS DO CAPÍTULO 4.....	211
	ANEXO A – MODELO DE BARRAGEM COM LARGURA (L) 44 CM E DISPOSITIVOS DE DRENAGEM COM COMPRIMENTO (C) 50 CM.....	212
	ANEXO B – MODELO DE BARRAGEM COM LARGURA (L) 44 CM E DISPOSITIVOS DE DRENAGEM COM COMPRIMENTO (C) 70 CM.....	216
	ANEXO C – MODELO DE BARRAGEM COM LARGURA (L) 44 CM E DISPOSITIVOS DE DRENAGEM COM COMPRIMENTO (C) 95 CM.....	220
	ANEXO D – MODELO DE BARRAGEM COM LARGURA (L) 72 CM E DISPOSITIVOS DE DRENAGEM COM COMPRIMENTO (C) 50 CM.....	224
	ANEXO E – MODELO DE BARRAGEM COM LARGURA (L) 72 CM E DISPOSITIVOS DE DRENAGEM COM COMPRIMENTO (C) 70 CM.....	228
	ANEXO F – MODELO DE BARRAGEM COM LARGURA (L) 72 CM E DISPOSITIVOS DE DRENAGEM COM COMPRIMENTO (C) 95 CM.....	232
	ANEXO G – MODELO DE BARRAGEM COM LARGURA (L) 100 CM E DISPOSITIVOS DE DRENAGEM COM COMPRIMENTO (C) 50 CM.....	235
	ANEXO H – MODELO DE BARRAGEM COM LARGURA (L) 100 CM E DISPOSITIVOS DE DRENAGEM COM COMPRIMENTO (C) 70 CM.....	241
	ANEXO I – MODELO DE BARRAGEM COM LARGURA (L) 100 CM E DISPOSITIVOS DE DRENAGEM COM COMPRIMENTO (C) 95 CM.....	247

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de drenagem interna representam um dos principais dispositivos responsáveis pela estabilidade de barragens de terra. Uma drenagem que seja eficaz diminui muito os riscos de acidentes. Massad (2003) afirma que grande parte dos acidentes, envolvendo barragens de terra, foi ocasionado devido à falta de um sistema eficiente de controle de fluxo.

Antigamente, procurava-se impermeabilizar as barragens ao máximo, a fim de impedir a percolação da água para a jusante. Com o passar do tempo verificou-se que não é possível construir uma barragem de terra que seja 100% impermeável devido às características dos materiais utilizados, sendo inevitável a ocorrência de fluxo pela estrutura. Segundo Cruz (1996), os sistemas de drenagem constituem a principal defesa contra fluxos concentrados e preferenciais, ou seja, a drenagem regulariza a saída do fluxo, tanto da própria barragem como da fundação, atenuando as pressões e disciplinando seu escoamento para jusante da barragem.

Para que a estabilidade destas estruturas seja mantida, são projetados sistemas de drenagem que impeçam o desenvolvimento de níveis freáticos elevados. Estes sistemas de drenagem envolvem o uso de materiais com elevada permeabilidade, que normalmente são areias, pedregulhos e pedras britadas. Em algumas regiões do território nacional, a disponibilidade de materiais granulares é restrita, de modo que alguns projetistas têm optado pelo uso de drenos lineares, também conhecidos como drenos franceses, *fingerdrains*, ou *stringerdrains* como uma alternativa para minimizar os volumes de material granular empregado, porém garantindo a drenagem interna do maciço.

Os drenos franceses, embora sejam usados com certa frequência, são projetados de maneira simplista, pelo fato de não existirem resultados disponíveis de estudos relativos ao comportamento destes dispositivos de drenagem, que possam ser usados como procedimentos de cálculo. A forma da superfície freática tridimensional, que se forma nos maciços dotados de drenos lineares, bem como todo o formato da rede de fluxo e o modo como se distribuem as pressões neutras no maciço são, a rigor, desconhecidas.

Esta pesquisa foi desenvolvida com o objetivo de analisar o fluxo em barragens dotadas de drenos franceses como sistema de drenagem interna. Dessa forma foi avaliada a eficiência dos drenos franceses em relação ao o tapete drenante clássico.

Buscando-se entender o fluxo tridimensional no maciço dotado de drenos franceses a fim de se conseguir uma configuração otimizada da solução sob o ponto de vista de fluxo, minimização dos volumes de material granular.

Visando atingir este objetivo, o estudo foi realizado em duas etapas. A primeira consistiu na construção de quatro modelos físicos reduzidos de barragens, para análise do fluxo e comportamento dos drenos. E a segunda consistiu na modelagem numérica dos modelos físicos, por meio de análises bidimensionais, através de planos ortogonais (xz, xy e yz), para avaliação do comportamento do fluxo no interior das barragens, simuladas no modelo físico, utilizando o programa SEEP/W.

1.1 OBJETIVO DA PESQUISA

O objetivo principal foi avaliar o comportamento do fluxo no maciço da barragem utilizando um conjunto de drenos franceses dispostos lado a lado e comparar a sua eficiência com relação aos tradicionais tapetes drenantes, considerando um fluxo tridimensional que será modelado numericamente através de ferramentas computacionais visando a estabilidade destas estruturas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FLUXO DE ÁGUA EM MEIOS POROSOS

O fluxo através de meios porosos representa um dos fenômenos mais importantes para análise de estabilidade em barragens de terra. A presença de água influencia significativamente o comportamento do solo tanto no que se refere às características das partículas quanto nas forças atuantes no maciço. Contudo, os efeitos ocasionados com a presença deste fluido não se limitam as questões químicas e físicas. A facilidade com que a água atravessa meios porosos possui uma importância ainda maior.

Um meio poroso é definido como sendo um meio sólido ou semi-sólido, mas que contenha espaços vazios. O interligamento destes espaços, denominados poros, determina a porosidade do meio, caracterizando um material como: quanto mais poroso, mais permeável. Podendo-se concluir que a quantidade de fluxo percolado por um meio está diretamente relacionado à permeabilidade do material.

De acordo com os fundamentos de hidráulica, o fluxo de água pode assumir dois estados característicos de movimento, o laminar, em que cada partícula percorre seu caminho sem interceptar o caminho de outra, e o turbulento, que define um caminho irregular, entrelaçado, entre as partículas, e aleatório (Taylor, 1948).

2.1.1 Equação de fluxo

A análise de permeabilidade através de meios porosos é regida basicamente pela Lei de Darcy, o qual descreve a interação do movimento da água com a estrutura do solo.

Sabendo-se que carga total de uma partícula de fluido, em qualquer ponto, estando em repouso ou movimento, é composta por três cargas, sendo elas carga piezométrica, que representa a pressão da água dividida pelo peso específico da mesma, carga altimétrica, que é a distância vertical de um ponto em relação ao nível de referencia, e a carga cinética, que pode ser desprezada, pois a velocidade de percolação é desprezível, obtém-se uma carga total de:

$$h = z + \frac{u}{\gamma_w} \quad (2.1)$$

A diferença de carga total entre dois pontos, localizados na mesma linha de fluxo, é denominada de gradiente hidráulico (i), o qual é responsável por gerar e manter o fluxo através do solo:

$$i = \frac{h_A - h_B}{L} \quad (2.2)$$

Através de ensaios experimentais em solos granulares saturados, variando o comprimento do meio percolado e a pressão da água, Darcy observou que a velocidade de percolação (v) é proporcional ao gradiente hidráulico:

$$v = ki \quad (2.3)$$

em que k é o coeficiente de permeabilidade do solo, o qual representa a facilidade com que o fluxo de água percola pelo material, e v que é igual a:

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

Substituindo as expressões, tem-se a equação básica de fluxo em meio poroso:

$$Q = kiA \quad (2.5)$$

Com esta equação Darcy demonstrou que a vazão é proporcional ao gradiente hidráulico e permeabilidade, representando que quanto mais permeável for um material maior a vazão e mais rápido será o escoamento. Esta Lei é válida para a maioria das situações que envolvem escoamento de fluido, considerando fluxo laminar e unidirecional.

TAYLOR (1948), porem, mostrou que o solo possui uma região de transição entre o fluxo laminar e o turbulento, concluindo que em um solo uniforme, com tamanho de grãos menor ou igual a 0,5 mm e que apresente um gradiente hidráulico superior a 100%, o fluxo é sempre laminar.

CEDERGREN (1989) apresentou algumas teorias e métodos que se baseia essencialmente na Lei de Darcy, como:

1. teoria de adensamento de argilas;
2. teoria de fluxo laminar através de meios porosos;
3. solução de rede de fluxo através da Equação de Laplace.

2.1.2 Fluxo em meios saturados e não saturados

Ao se analisar o fenômeno de percolação através de barragens de terra nota-se que o fluxo pode assumir diversos comportamentos. A linha freática divide o maciço em duas zonas, saturada e não-saturada (Figura 2.1). A zona saturada compreende a região abaixo da linha freática em que todos os vazios do solo estão totalmente preenchidos por água e a zona não-saturada compreende a região acima da linha freática em que os vazios são preenchidos por ar e água, admitindo grau de saturação inferior a 100%. TERZAGHI et. al. (1996) explica que a linha freática define a superfície em que a poropressão é nula dentro do maciço. Neste caso a zona localizada abaixo desta linha, apresenta carga de pressão positiva e a zona acima apresenta carga de pressão negativa, também denominada de sucção.

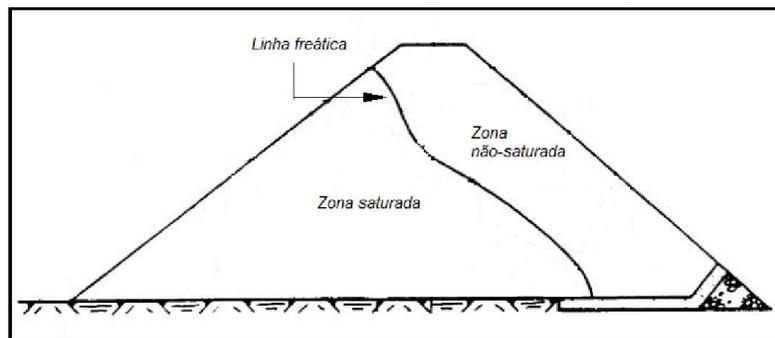


FIGURA 2.1 – Fluxo através do maciço de barragem de terra

FONTE: Vargas (modificado – 1977)

De acordo com Delgado (2000), citado por BRAZ (2003), a saturação do meio poroso é de suma importância, desde que outras propriedades, tais como sucção e permeabilidade, sejam apresentadas em função da mesma.

A sucção está diretamente relacionada ao volume de água presente nos vazios. Com a diminuição do grau de saturação, os vazios maiores, responsáveis em grande parte pela condutividade hidráulica do meio poroso, são os primeiros a serem drenados, interrompendo o canal de fluxo. A maior parte do líquido, então, se transfere para os vazios menores, se concentrando sob forma de meniscos no contato com as partículas. Este efeito causa a redução do coeficiente de permeabilidade do meio em até 100 mil vezes em relação ao seu valor na condição saturada. Para baixos teores de umidade ou altas sucções o coeficiente de permeabilidade pode ser tão pequeno que podem ser necessários gradientes hidráulicos elevados ou intervalos de tempo

muito grandes para que seja possível detectar a ocorrência de fluxo no meio (Quispe, 2008).

Pode-se ainda dizer que, entre regiões saturada e não-saturada, há uma zona intermediária que possibilita a saturação do solo com poropressão negativa. A este fenômeno é dado o nome de capilaridade. O contato do solo com a linha freática neutra promove a ascensão capilar do líquido através dos pequenos canais formados pelas partículas, tornando esta uma zona saturada. LAMBE e WHITMAN (1969) afirmam que a altura capilar é muito variável e inversamente proporcional ao diâmetro dos vazios.

A análise do fluxo através de meios não-saturados representa-se mais complexa do que em meios saturados. LAMBE e WHITMAN (1969) apontam cinco características que definem o comportamento do fluxo em solos não-saturados, sendo eles: tamanhos das partículas, grau de saturação, índice de vazios, composição e estrutura. Resumidamente, pode-se dizer que o fator determinante para análise em meios não-saturados é a condutividade hidráulica, já que esta depende do volume de água presente nos vazios do solo.

2.1.2.1 Sucção

A sucção (ψ) é referida como o estado de energia livre da água no solo e definida como a diferença de pressão de ar (u_a) no interior da massa de solo e a pressão de água (u_w), como é mostrado na equação 2.20.

$$\psi = u_a - u_w \quad (2.6)$$

Este parâmetro pode ser relacionado com o grau de saturação (S) e teor de umidade volumétrico (θ), o qual é definido como a razão entre o volume de água (V_m), presente no interior do meio poroso e o volume total (V).

$$\theta = \frac{V_m}{V} \quad (2.7)$$

A relação entre a magnitude de sucção e o teor de umidade volumétrico é descrito pela curva característica de sucção, também conhecida como curva característica de retenção e umidade (CRUS), como mostra a Figura 2.2. Se um determinado valor de sucção é aplicado a um solo saturado, nenhum fluxo ocorrerá até que ela ultrapasse o valor crítico que ocasione a expulsão da água existente no

vazio de maior diâmetro. A essa sucção crítica é dado o nome de entrada de ar (ψ_{ar}) e este ponto é determinado, no gráfico, pela diferença entre as pressões de ar e de água.

O teor de umidade volumétrica saturada (θ_s), teoricamente correspondente à porosidade (n) do solo, e é representado pelo ponto máximo de saturação do solo em que a sucção possui magnitude zero. Com o aumento gradual da sucção há ocorrência de capilaridade, o qual é definida por um teor de umidade volumétrico praticamente constante. Acima da franja capilar o grau de saturação do solo é reduzido e o valor da sucção aumenta até atingir um teor de umidade residual (θ_r). Este decaimento da curva representa a região funicular, caracterizada pela ocorrência de fluxo não-saturado devido a presença de ar e água contínuas.

O teor de umidade volumétrico residual (θ_r) corresponde a uma região do solo em que o mesmo não suporta mais a possibilidade de fluxo, identificando fase de ar contínua e fase de água descontínua, correspondendo a uma forma de fluxo de água que não é mais líquida.

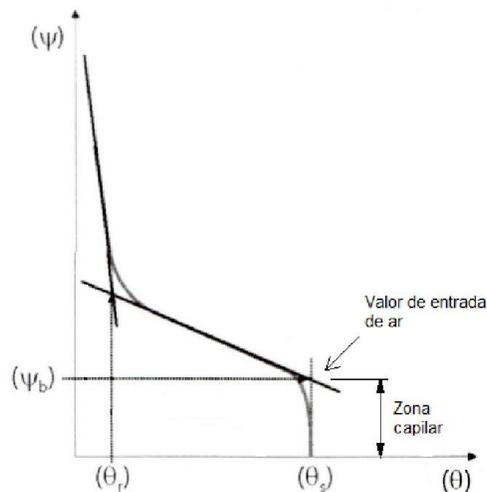


FIGURA 2.2 – Curva característica

FONTE: Gerscovich (2012)

Como o efeito da sucção é inversamente proporcional ao diâmetro do poro, o tipo de solo torna-se um fator fundamental para a determinação da curva característica. A Figura 2.3 apresenta o comportamento esquemático para alguns tipos de solo. Nota-se que para solos arenosos a variação é mais brusca e a zona capilar e a entrada de ar apresentam-se menores do que nos solos siltsos e

argilosos. Isso explica que para solos com granulometria mais fina a ascensão capilar é maior, como ocorre em um solo argiloso, por exemplo, o qual conseqüentemente determina valores de umidade volumétrica saturada mais elevadas. FREDLUND et. al. (1994) menciona que quanto maior a quantidade de fração de argila, maior será o valor de umidade para um mesmo valor de sucção.

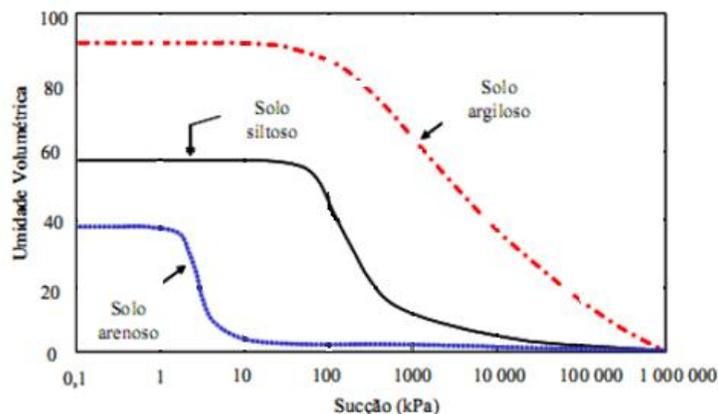


FIGURA 2.3 – Curvas características para diferentes tipos de solo

FONTE: Fredlund e Xing (1994)

GERSCOVICH (2012) faz uma relação entre os valores de entrada de ar e alturas capilares esperadas que cada tipo de solo possa atingir. Nota-se que para solos coesivos a entrada de ar apresenta-se bastante alta, ao contrário do que acontece em solos granulares.

TABELA 2.1 – Entrada de ar e altura capilar aproximada para cada tipo de solo

FONTE: Gerscovich, 2012

Material	Ψ_{ar} (kPa)	Altura capilar (cm.c.a)
Areia grossa	0,2 a 1	2 a 10
Areia média	1 a 3,5	10 a 35
Areia fina	3,5 a 7,5	35 a 75
Silte	7 a 25	70 a 250
Argila	> 25	> 250

Quando se obtém experimentalmente a curva característica, o solo pode seguir uma trajetória de secagem, a partir de uma amostra inicialmente saturada, ou uma trajetória de umedecimento, a partir de uma amostra inicialmente seca. De acordo com o sentido adotado, para uma dada sucção, os teores de umidade no equilíbrio serão diferentes, como mostrado na Figura 2.4.

Um dos fatores mais importantes que podem influenciar significativamente na relação entre umidade e sucção apresentada na curva característica é o fenômeno da histerese da trajetória de secagem e umedecimento (Leme, 2009). Este processo interfere diretamente na capacidade de retenção de água do solo. A ocorrência deste fenômeno pode ser explicada através do processo de retenção de água nos poros em que a drenagem tende a ser governada por um maior valor de pressão e controlada pelo tamanho dos poros menores. O que ocorre é que no processo de umedecimento a sucção é mantida na entrada dos poros menores e não no interior dos poros maiores. Da mesma forma acontece no processo de secagem, porém o interior dos poros maiores é preenchido por ar. Porém pode-se concluir que para um determinado valor de sucção a umidade será maior durante a secagem do que durante o umedecimento.

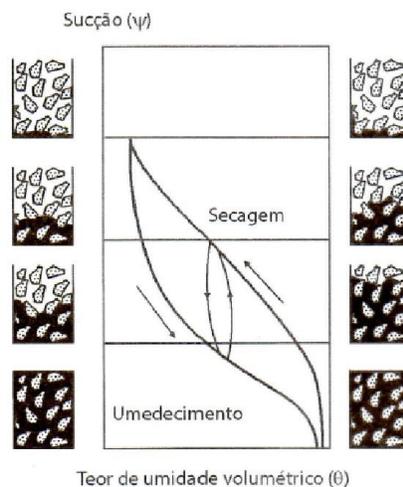


FIGURA 2.4 – Curvas características para o processo de umedecimento e secagem

FONTE: Gerscovich (2012)

O estudo a respeito da curva característica de sucção são encontrados os modelos propostos por van Genuchten (1980), Srivastava Yet (1991), Fredlund e Xing (1994) e Gardner (1958). Para esta pesquisa foi adotado o modelo do primeiro autor mencionado e será apresentada a seguir.

2.1.2.1.1 Modelo de van Genuchten (1980)

O modelo proposto por van Genuchten é o mais utilizado para simular o comportamento de solos não-saturados. Sua metodologia considera uma capacidade de retenção nula para a condição de saturação sendo capaz de determinar a zona de

ascensão capilar. O autor sugeriu a seguinte equação para representar da relação entre o teor de umidade volumétrico e a sucção do solo.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha|\psi|)^n\right]^m} \quad (2.8)$$

onde α , n e m são parâmetros de ajuste da curva, sendo:

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2.9)$$

Segundo Miller et. al. (1998), citado por QUISPE (2008), o parâmetro α está relacionado com a dimensão média dos poros e o n com a uniformidade da distribuição dos poros de diferentes dimensões. O formato da curva de acordo com o modelo de van Genuchten é mostrado na Figura 2.5.

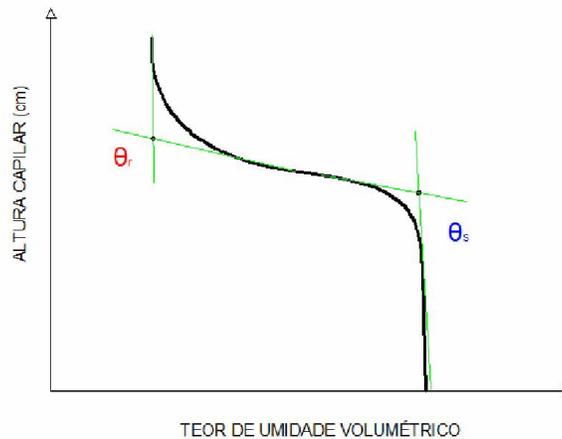


FIGURA 2.5 – Representação da Curva de Retenção de Umidade do Solo

FONTE: Furlan (2008)

2.1.2.2 Condutividade hidráulica

Para se estimar o volume de água percolada pelo maciço de uma barragem de terra, torna-se necessário determinar o coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica dos materiais. A condutividade hidráulica representa a maior ou menor facilidade com que a água pode fluir através dos poros do solo, movida pelo gradiente potencial total da água entre dois pontos no solo. FREDLUND e RAHARDJO (1993) afirmam que a principal diferença entre solos saturados e não saturados se refere a permeabilidade dos meios, em que para o primeiro é assumido valor constante enquanto que o segundo está em função da sucção e grau de saturação.

No caso de solos saturados, como todos os vazios estão preenchidos por água, a condutividade hidráulica apresenta-se constante (k_{sat}) e depende em grande parte da forma e continuidade do sistema poroso, variando de um local para outro. Neste caso, pode-se dizer que a condutividade em condição saturada é mais dependente da estrutura do que da textura do solo.

A primeira equação utilizada para quantificar o movimento da água em solos foi determinada por Darcy, em 1856, utilizando colunas de areia saturada de água, o qual estabelecia que a quantidade de água que passa por unidade de tempo e de área através de um meio poroso saturado era proporcional ao gradiente de potencial total da água.

A determinação da condutividade hidráulica em solos saturados pode ser realizada através de ensaios laboratoriais como: permeâmetro de carga constante, utilizada para ensaios em solos arenosos com elevada condutividade hidráulica em que se mantém a vazão constante; permeâmetro de carga variável, utilizada para ensaios em solos finos a partir da variação do nível de água com o tempo; câmaras triaxiais e oedométrico, podendo ser realizada para solos finos, como argilas e siltes.

Em solos não saturados a aferição desta propriedade se torna um pouco mais complicada. Segundo FREDLUND e RAHARDJO (1993), para os solos não saturados, a condutividade hidráulica é afetada pela combinação de mudanças do índice de vazios e grau de saturação. Neste caso, com a substituição de água por ar, nos poros maiores, a água inicia seu percurso através dos poros menores descrevendo uma trajetória de fluxo cada vez mais tortuosa. Como resultado, a permeabilidade da água no solo diminui rapidamente com o espaço reduzido para o fluxo de água.

Richards, em 1931, foi o primeiro autor a apresentar um método para a determinação da condutividade hidráulica em meios não-saturados, combinando a equação de Darcy com a equação da continuidade e obtendo-se uma equação diferencial que descrevia o movimento da água no solo (Gonçalves, 2011).

A determinação da condutividade hidráulica não saturada pode ser realizada experimentalmente e empiricamente através dos modelos matemáticos propostos por Gardner (1958), van Genuchten (1980), Brooks e Corey (1964), entre outros.

LAMBE e WITHMAN (1979), apontam cinco características que influenciam a condutividade hidráulica, sendo elas: o tamanho dos grãos, índice de vazios, composição, estrutura e grau de saturação.

2.1.2.2.1 Granulometria

A permeabilidade e a velocidade de percolação da água pelo maciço variam significativamente de acordo com granulometria e representa-se extremamente sensível à quantidade, característica e distribuição da fração mais fina do solo. Quanto mais finas forem as partículas do solo, menor será a permeabilidade.

TERZAGHI et. al. (1996) apresentou uma relação entre as características dos solos os coeficientes de permeabilidade típicos de cada um, o qual é mostrado na Tabela 2.2.

TABELA 2.2 – Características de permeabilidade e drenagem dos solos

FONTE: TERZAGHI et. al. (1996)

Coeficiente de Permeabilidade k (cm/s)												
	10^2	10^1	10^0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
Drenagem	Boa						Pobre			Praticamente impenetrável		
Permeabilidade	Elevada			Média		Baixa		Muito baixa		Praticamente impermeável		
Tipos de solo	Pedregulhos limpos	Areia limpa, areia limpa e mistura de pedregulho			Areia muito fina, silte orgânico e inorgânico, mistura de silte arenoso e argila, depósito de argila estratificada, etc.			Solo "impermeável", argilas homogêneas abaixo da zona intemperizada				
					Solo "impermeável" modificado pelos efeitos da vegetação e intemperismo							

2.1.2.2.2 Índice de vazios

Solos com maior índice de vazios representam maior porosidade do meio, o qual conseqüentemente são mais permeáveis.

LAMBE e WHITMAN (1979) realizaram alguns experimentos (Figura 2.6) a fim de se analisar a influência do índice de vazios na permeabilidade dos solos. É possível observar que quanto maior o espaço vazio entre as partículas maior é a permeabilidade do meio.

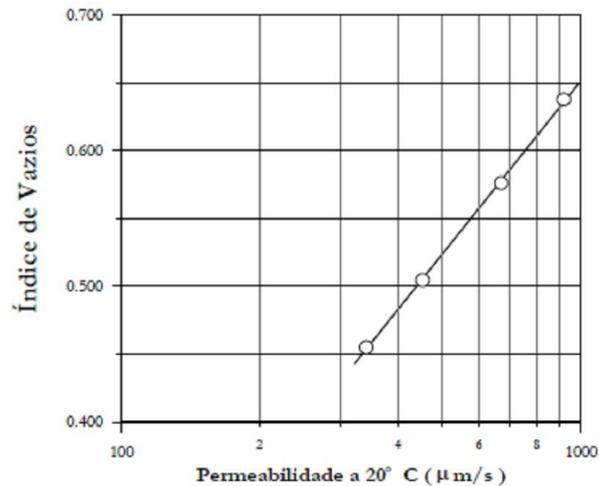


FIGURA 2.6 – Influência do índice de vazios

FONTE: Lambe e Whitman (1979)

2.1.2.2.3 Composição

A influência da composição mineralógica do solo é geralmente menos importante em siltes, areias e pedregulhos, ao contrário do que acontece com as argilas. Segundo VARGAS (1977), o tipo e a quantidade de argilominerais influenciam na magnitude da permeabilidade. Neste caso, a predominância de mica e matéria orgânica neste tipo de solo reduz a permeabilidade do material devido a absorção de água destes componentes mineralógicos.

2.1.2.2.4 Estrutura

Segundo MITCHELL (1993), o meio poroso está associado ao arranjo das partículas. A estrutura é uma das mais importantes características que influenciam a permeabilidade, principalmente em solos granulares.

Segundo LAMBE e WITHMAN (1969), comparando amostras de solos com mesmo índice de vazios, pode ser verificado que os que apresentam estado floculento possuem maior permeabilidade, enquanto que os solos mais dispersos possuem permeabilidade mais baixa.

Em solos estratificados, devido a situação anisotrópica em relação a permeabilidade, apresentam maior condutividade hidráulica na direção horizontal do

que na vertical. De acordo com SOUZA PINTO (2000), o coeficiente de permeabilidade na direção horizontal pode ser até 15 vezes maior do que na vertical. Contudo, CRUZ (1996) afirma que o valor mais comum de ser encontrado é uma diferença de 5 vezes.

2.1.2.2.5 Grau de saturação

Como já explicado anteriormente, a presença de ar confinada entre os grãos influencia diretamente na percolação de água. Quando o solo se encontra em situação de saturação, os vazios estão totalmente preenchidos por água, possibilitando maior permeabilidade. No entanto, em solos não-saturados a presença de ar nos vazios diminui o número de canais disponíveis para o fluxo e dificulta a passagem da água, interferindo diretamente na permeabilidade, o qual torna-se menor.

Segundo Falleiros (1998), citado por GONÇALVES (2011), a relação entre a condutividade do solo e o conteúdo de água presente no mesmo apresenta elevada sensibilidade, de tal modo que apenas uma variação de 1 a 2% de água pode afetar o coeficiente de variação da permeabilidade em valores superiores a 170%.

2.1.2.3 Anisotropia

A maioria dos solos não apresenta característica isotrópica em relação a permeabilidade. Em determinados depósitos de solo, como os sedimentares, ou até mesmo em barragens de terra compactadas, a magnitude da permeabilidade muda de acordo com a direção do fluxo, devido a disposição relativa dos grãos no interior do maciço (Figura 2.7). Neste caso, quando há compactação do solo, as partículas tendem a se orientar ficando com suas maiores dimensões, na posição horizontal, ocasionando uma permeabilidade maior do que na vertical.

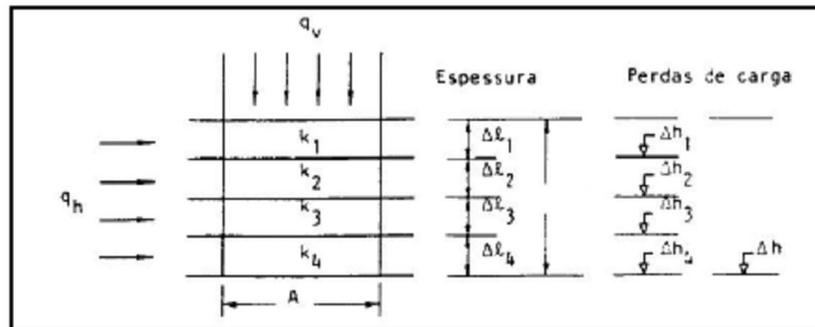


FIGURA 2.7 – Fluxo através do solo em camadas

FONTE: Vargas (1977, apud Braz, 2003)

Para situações como esta é conveniente que o coeficiente de permeabilidade seja correspondente à média geométrica dos coeficientes correspondentes às componentes do fluxo em duas direções ortogonais, o qual é expresso pela permeabilidade equivalente, dada pela expressão:

$$k = \sqrt{k_z k_x} \quad (2.10)$$

2.2 PERCOLAÇÃO DE ÁGUA EM BARRAGENS DE TERRA

Em situações de percolação de água em barragens de terra é necessário a análise do comportamento do fluxo e das propriedades que influenciam o fenômeno propriamente dito.

A percolação em barragens de terra envolve basicamente fluxo em meios saturados e não saturados, podendo estar em condição confinada, com percolação pela fundação, ou não confinada, com fluxo através do maciço. Outro fator a ser também considerado se refere a condição de percolação que pode ser permanente, em regime estacionário, ou transiente, com fluxo variável ao longo do tempo.

O método mais utilizado para se determinar a percolação em barragens de terra é através da rede de fluxo o qual representa o problema bidimensionalmente. A equação diferencial que governa este tipo de situação é a de continuidade de Laplace, o qual descreve a carga de todos os pontos dentro do maciço.

A solução da rede de fluxo pode ser obtida através de vários métodos, sendo o gráfico, o analítico, o analógico e o numérico, os quais serão apresentados nos itens a seguir.

2.2.1 Solução da equação de Laplace

Em situações reais o escoamento ocorre geralmente em mais de uma direção e o solo não apresenta uniformidade dos grãos. Neste caso a percolação de água é estudada utilizando-se redes de fluxo, que consideram a interação do meio poroso com o fluido em movimento, possibilitando a determinação das condições de percolação em um dado ponto do maciço de solo, em regime permanente, garantindo a condição de continuidade do fluido.

O método da rede de fluxo é baseado na Equação da Continuidade de Laplace, e devem ser assumidas algumas hipóteses básicas:

1. o solo é homogêneo;
2. os vazios estão saturados;
3. não ocorrem adensamento ou expansão do solo;
4. o solo e a água são incompressíveis;
5. o fluxo é laminar.

TERZAGHI et al. (1996) define o meio contínuo como o volume de água, por unidade de tempo, que percola para dentro ou fora de um elemento de solo, sendo igual a mudança de volume de água, por unidade de tempo, no mesmo elemento, ou seja, a quantidade de água que entra em um elemento deve ser a mesma que sai, mantendo o volume constante ou variando continuamente com o tempo.

Considerando um elemento de solo (Figura 2.7) em que ocorre fluxo laminar nas três direções x , y e z , as velocidades de percolação de entrada e saída são representadas a seguir:

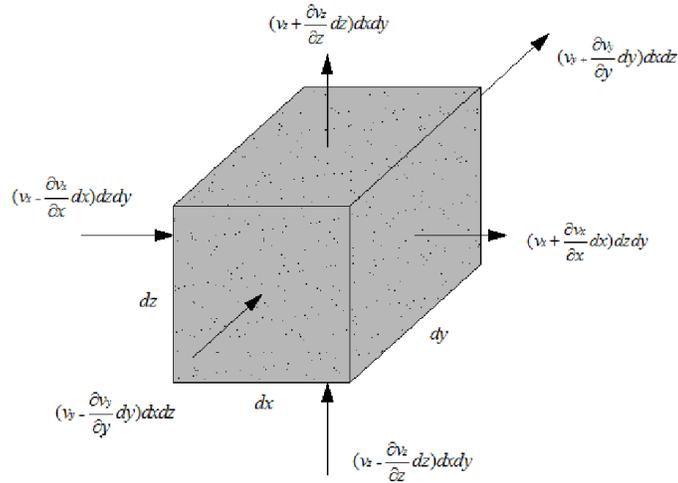


FIGURA 2.8 – Representação da velocidade de percolação em um elemento de solo

FONTE: Terzaghi et al. (modificado - 1996)

Atendendo a hipótese básica da equação de Laplace e assumindo que a água é incompressível e que não ocorre alteração de volume no solo, pode-se afirmar que a vazão total de entrada é igual a vazão de saída, portanto:

$$\left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx\right) dz dy + \left(v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} dy\right) dx dz + \left(v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz\right) dx dy = v_x dz dy + v_y dx dz + v_z dx dy \quad (2.11)$$

Assim, para uma percolação em condição permanente o volume de água no elemento é nula, sendo:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (2.12)$$

Utilizando a Lei de Darcy e aplicando a equação (2.3):

$$v_x = k_x i_x = k_x \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v_y = k_y i_y = k_y \frac{\partial h}{\partial y}, \quad v_z = k_z i_z = k_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.13)$$

Substituindo a equação (2.13) em (2.12) e admitindo que k_x , k_y e k_z são constantes nas direções x , y e z tem-se:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2.14)$$

Caso o solo seja isotrópico, ou seja, $k = k_x = k_y = k_z$, a equação pode ser simplificada:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2.15)$$

A equação acima representa a percolação de água para análises tridimensionais. No caso de análise de rede de fluxo, admite-se somente as parcelas referente ao plano x e z , devido análise bidimensional, portanto:

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

A expressão (2.16) representada acima é conhecida como a Equação de Continuidade de Laplace, cuja solução possibilita a análise de fluxo em meio isotrópico (Lambe et al., 1979).

Para análise de fluxo em meio anisotrópico ($k_x \neq k_y$), como é o caso de solos estratificados e barragens de terra compactadas, a permeabilidade horizontal é maior do que a vertical. Neste caso é necessário fazer uma transformação de variáveis que corresponda a uma transformação da escala do desenho, o qual representa esta diferença anisotrópica. Portanto, a partir da equação 2.12, tem-se:

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

Segundo TAYLOR (1948), se x_t é definido como a nova coordenada variável, então:

$$x_t = x \sqrt{\frac{k_z}{k_x}} \quad (2.18)$$

Neste caso, se a variável x_t é igual a variável x , pode-se assumir que:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x_t^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2.19)$$

Esta equação Laplaciana passa, então, a admitir a transformação da escala para solos estratificados. A literatura afirma que esta transformação deve ser realizada antes da modelagem da rede de fluxo.

2.2.2 Percolação de água através do método da rede de fluxo

Segundo A. CASAGRANDE (1937), a rede de fluxo é o método mais utilizado para se determinar o comportamento do fluxo em barragens. Quando a água é forçada a atravessar um meio poroso, as partículas fluem através dos poros interconectados do solo, formando caminhos de fluxo que chegam a ser quase infinitos. A rede de fluxo é uma representação destes caminhos no maciço de solo e pode ser solucionado através da equação da continuidade de Laplace. De acordo com LAMBE e WHITMAN. (1969), esta representação possibilita a determinação de parâmetros como vazão, gradiente hidráulico e distribuição de subpressão.

2.2.2.1 Condições de contorno

As redes de fluxo podem ser representadas de diversas maneiras, dependendo da configuração e da quantidade de zonas de solos ou rochas que será percolado.

O primeiro passo para solucionar problemas de fluxo é estabelecer as condições de contorno que limitam externamente a rede de percolação. De acordo com CEDERGREN (1989) o fluxo de água em meio poroso pode ser definido como:

1. Confinado, em que as condições de contorno são fixadas e a linha freática é conhecida;
2. Não confinado, em que pelo menos duas das condições de contorno não são conhecidas, sendo uma delas a linha freática.

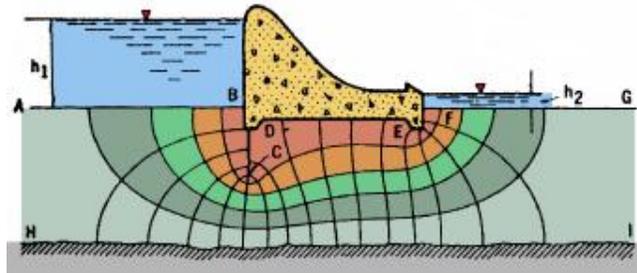
No caso de fluxo confinado, como apresentado na Figura 2.9 (a), a percolação é realizada através da fundação, portanto os pontos de entrada e saída do fluxo são conhecidos e as condições de contorno são mais fáceis de serem impostas, correspondendo à:

- I. AB – limite entre a água e o solo de fundação permeável;
- II. HI – limite entre solo de fundação permeável e solo impermeável;
- III. FG – limite entre solo de fundação permeável e ar (linha de descarga).

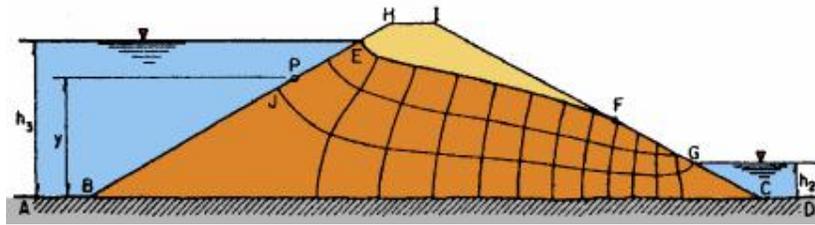
No caso de fluxo não confinado, como apresentado na Figura 2.9 (b), a percolação é realizada através do maciço, portanto se conhece o ponto de entrada,

mas não o de saída, bem como a posição da linha freática no interior do maciço. Neste caso, as condições de contorno correspondem à:

- I. AB – limite entre a água e o solo de fundação impermeável;
- II. AC – limite entre solo da barragem permeável e solo de fundação impermeável;
- III. BE – limite entre solo da barragem permeável e a água.
- IV. EF e FG – são condições desconhecidas.



a) Barragem com fluxo em condição confinada



b) Barragem com fluxo em condição não confinada

FIGURA 2.9 – Condição de fluxo em barragem com fundação permeável e fundação impermeável

FONTE: Reyna (2008)

Uma vez determinada as condições limites, somente uma única rede poderá ser traçada que satisfaça as condições propostas. Caso alguma destas condições seja alterada, a rede de fluxo devera ser definida novamente.

Como no caso desta pesquisa a percolação de água se deu através do maciço, pode-se considerar que as análises foram realizadas em meio não confinado, objetivando determinar o comportamento da linha freática, a principio, desconhecida.

2.2.2.2 Definição da rede de fluxo e suas propriedades

Considerando um fluxo de água através do solo em regime laminar, uma partícula de água descreve uma trajetória bem definida sem interceptar a trajetória de outra. Este percurso representa uma linha de percolação ou linha de fluxo, o qual inicia a trajetória com uma determinada carga total. Com o atrito desta partícula de água com o solo, esta carga é dissipada gradativamente. Ao longo de cada linha de fluxo, haverá pontos onde a carga total representa uma fração da carga ainda disponível. A linha que une estes pontos, em várias linhas de percolação, possui a mesma carga e é dado o nome de linha equipotencial, ou seja, cada curva correspondente a uma equipotencial define a distribuição de carga hidráulica e as poropressões da água no maciço de solo (TERZAGHI, 1996; Taylor 1948). Portanto, pode-se dizer que a rede de fluxo é a representação gráfica destas duas famílias de curvas (Figura 2.10), que se interceptam com ângulos retos, formando quadrados curvilíneos.

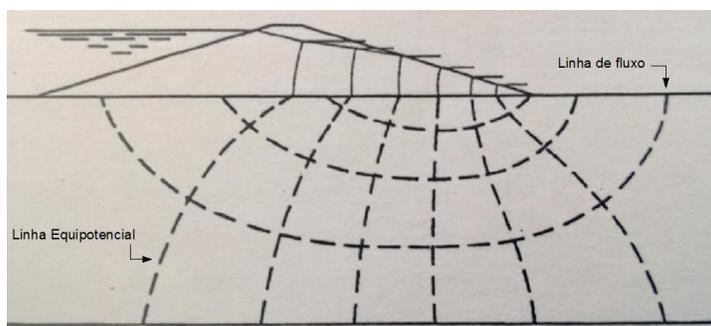


FIGURA 2.10 – Representação da rede de fluxo em barragem com fundação permeável

FONTE: Cedergren (1989)

A Figura 2.11 (a) representa uma condição geral de percolação, composta por linhas de fluxo e equipotenciais. Na linha freática, representada pela linha superior, são impostas algumas condições que não são comuns às outras linhas de fluxo, como por exemplo, o fato de nesta existir pressão atmosférica constante, o qual separa o maciço entre a zona saturada e não saturada.

O espaço existente entre duas linhas de fluxo representam os canais de percolação (Figura 2.11 – b). Em cada canal a vazão escoada permanece constante ao longo do trajeto ocasionando perdas de carga, também, constantes, já que as linhas de carga hidráulica são equidistantes.

A magnitude do gradiente hidráulico, ao longo de uma linha de fluxo, é representada pela diferença de elevação (Δh) entre duas linhas equipotenciais consecutivas no ponto que estas interceptam a linha freática.

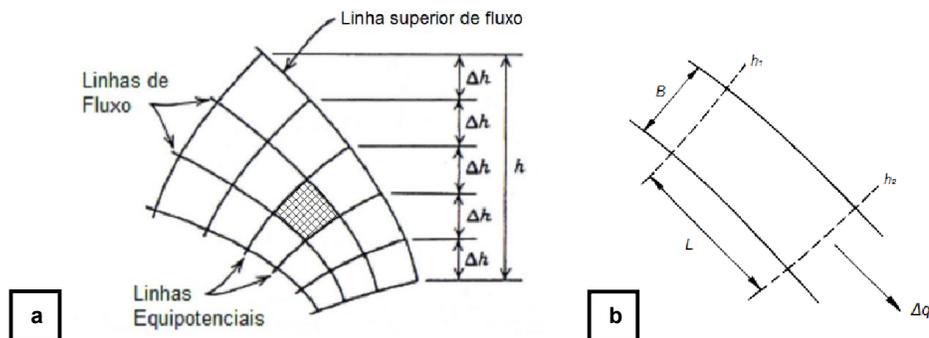


FIGURA 2.11 – a) Condição geral de fluxo; b) Malha formada por duas linhas de fluxo e duas equipotenciais

FONTE: Taylor (1948); TERZAGHI et. al. (1996)

Em solos isotrópicos a tendência é que a água percole pelos caminhos de maior gradiente hidráulico. Já em meios anisotrópicos o trajeto de escoamento dependerá da condutividade hidráulica de cada material.

2.2.2.3 Determinação da linha freática

Como no caso de barragem de terra, com fluxo preferencial através do maciço, a posição da linha freática não é conhecida, alguns métodos distintos foram determinados para a definição da mesma, buscado analisar o comportamento da percolação da água no interior do maciço.

A posição da linha freática depende basicamente da geometria da barragem e das condições de drenagem que esta oferece. De acordo com TAYLOR (1948), sua configuração apresenta formato parabólico caracterizando a rede de fluxo como um conjunto de parábolas confocais, como apresentada na Figura 2.12 (a). A parábola define que cada ponto da curva seja equidistante tanto do foco como da diretriz. Pela Figura 2.12 (b) pode-se observar que a distância entre FG é a mesma que para GA, assim como a distância entre FD é a mesma que para DE.

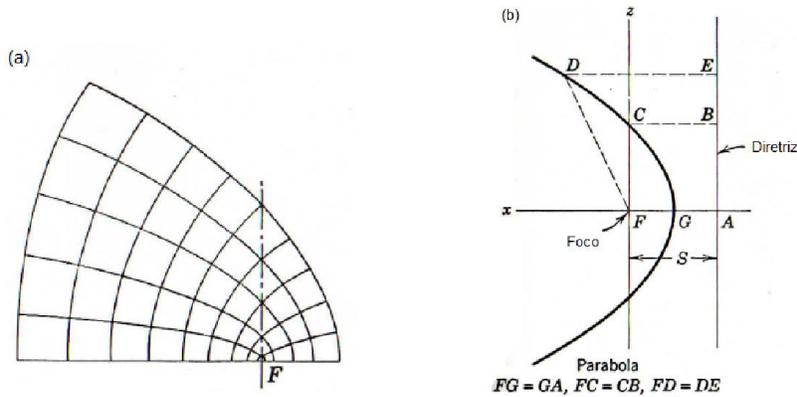


FIGURA 2.12 – a) Conjunto de parábolas confocais; b) Pontos com foco em comum
 FONTE: Taylor (1948)

Contudo os taludes de montante e jusante são planos e não parabólicos. Desta forma, a rede de fluxo formada pelas parábolas deve ser corrigida nos pontos de entrada e saída da linha de fluxo.

A determinação do ponto de partida da linha freática pode ser definida por A. Casagrande (1937, *apud* Cedergren, 1989). Segundo estudos realizados por ele, a posição de entrada da linha de fluxo deve ser normal ao talude de montante, pois o mesmo representa uma linha equipotencial. A Figura 2.13 apresenta três tipos de configuração do talude para a determinação da entrada da linha freática. A situação mais comum ocorre quando o ângulo de inclinação do talude com a base impermeável do reservatório é maior do que 90° , possibilitando que a linha de fluxo desenvolva uma curvatura convexa, para baixo. Para situações em que a inclinação do talude seja igual ou menor que 90° , o início da linha freática apresenta configuração côncava. TAYLOR (1948) e CEDERGREN (1989) explicam que este tipo de curvatura no início da percolação é descrito devido à diferença de permeabilidade entre os materiais que compõe o maciço, o qual podem não apresentar resistência necessária ao fluxo, como é o caso dos materiais granulares.

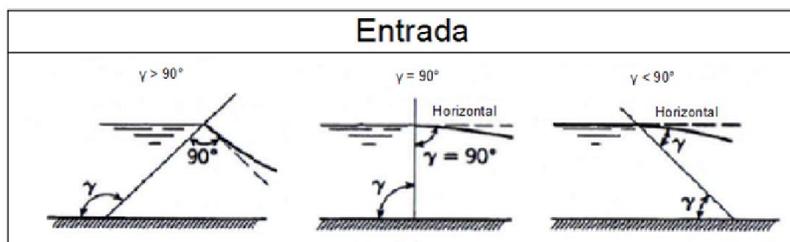


FIGURA 2.13 – Condições de entrada da linha de fluxo
 FONTE: A. Casagrande (1937, *apud* Cedergren, 1989)

Com relação ao final da linha freática a Figura 2.14 apresenta algumas situações. O comportamento da descarga do fluxo depende basicamente das condições de drenagem da barragem. De acordo com TAYLOR (1948), como as partículas de água emergem dos poros, tendem a seguir caminhos o mais próximo possível da pressão atmosférica, desta forma a saída do fluxo apresenta-se tangente ao talude de jusante. Quando há dispositivo de drenagem na parte de jusante da barragem admite-se que o mesmo possua pressão igual a atmosférica. Neste caso considera-se que o ponto de contato da linha freática com o dreno seja vertical.

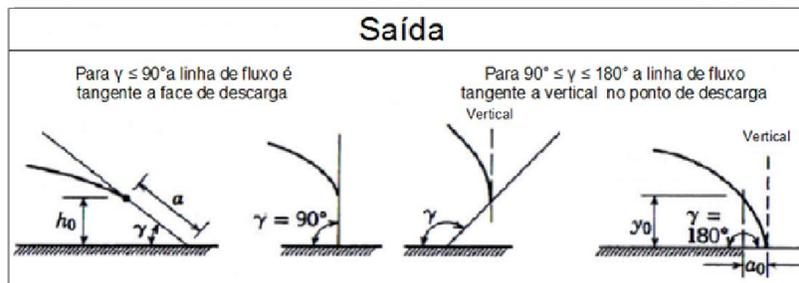


FIGURA 2.14 – Condições de saída da linha de fluxo
 FONTE: A. Casagrande (1937, *apud* Cedergren, 1989)

Para ambas as situações demonstradas, para a determinação da saída da linha freática, alguns autores apresentam condições mais detalhadas. Os métodos que serão mencionados a seguir representam a continuação do estudo proposto por Dupuit, em 1863, o qual introduziu as análises referentes a fluxo em meios não confinados.

A proposta apresentada por ele define a posição da parábola que representa a linha de fluxo no interior do maciço, o qual admite as seguintes hipóteses básicas:

1. Se a linha freática possuir pequena inclinação, as linhas de fluxo podem ser consideradas horizontais e as equipotenciais, verticais;
2. O gradiente hidráulico é igual à declividade da linha freática e constante em toda a seção vertical ($i = dz / dx$).

Desta forma a linha freática podia ser determinada, analiticamente, pela equação:

$$y^2 - h_1^2 = \frac{h_2^2 - h_1^2}{d_0} \quad (2.20)$$

2.2.2.3.1 Método proposto por Schaffernak e van Iterson

Como a proposta apresentada por Dupuit não considerava as condições de entrada e saída da linha freática, Schaffernak e van Iterson, em 1917, realizaram algumas correções mantendo as hipóteses básicas do primeiro.

O método proposto por eles se aplica a talude de jusante com ângulo (α) menor que 30° . Para este caso admite-se que a seção transversal seja homogênea e não possua dispositivo de drenagem interno, ocasionando escoamento pelo talude de jusante.

A solução gráfica desenvolvida (Figura 2.15), embora considerasse as condições de entrada e saída, definia que a parábola básica tinha início no ponto de interseção entre o nível d'água e o talude de montante. Posteriormente, A. Casagrande pôde comprovar que o início do fluxo se dava, na verdade, no ponto C e não C', como estimado por Schaffernak, o qual corresponde a $1/3$ da distancia "m".

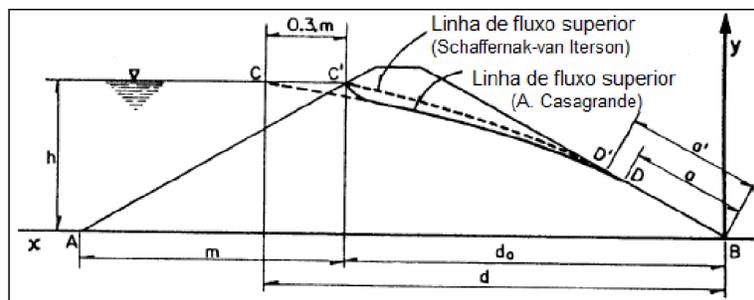


FIGURA 2.15 – Determinação da linha freática de Schaffernak-van Iterson, modificada por A. Casagrande

FONTE: Reyna (2008)

A determinação do ponto de descarga pode ser realizada através de solução analítica apresentada pela equação 2.21, corrigida por A. Casagrande, o qual define a distância em que a saída da linha de fluxo se encontra do pé do talude de jusante.

$$a = \frac{d}{\cos \alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}} \quad (2.21)$$

Como a solução de Schaffernak e van Iterson admite que os valores de gradiente hidráulico sejam iguais a curva da linha freática, a vazão percolada pelo meio pode ser determinada pela equação:

$$q = k.a.\sin \alpha.\tan \alpha \quad (2.22)$$

2.2.2.3.2 Método proposto por L. Casagrande

Após a determinação do método de Schaffernak e van Iterson, L. Casagrande, em 1932, comprovou que para taludes de jusante com ângulos maiores que 30° e menores que 90° o método apresentava algumas divergências com relação ao gradiente hidráulico, o qual resultava em uma estimativa muito mais elevada do que encontrada experimentalmente (DAS, 2007). Como Dupuit e Schaffernak consideravam gradiente igual a dz/ds , L. Casagrande sugeriu a hipótese de considerar, para este caso:

$$i = \frac{dz}{ds} = \operatorname{sen} \alpha \quad (2.23)$$

Onde s , representa a distancia ao longo da curva da linha freática, apresentada na Figura 2.16.

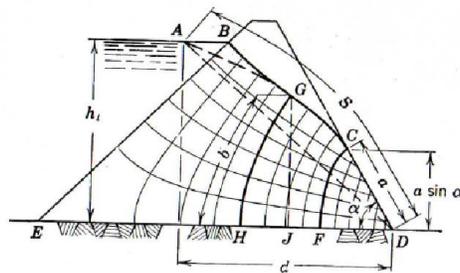


FIGURA 2.16 – Determinação da linha freática pelo método de L. Casagrande

FONTE: Taylor (1948)

A solução gráfica (Figura 2.17) para se determinar o ponto de saída da linha freática se baseia na equação 2.24.

$$a = \sqrt{d^2 + h_i^2} - \sqrt{d^2 - h_i^2 \cot^2 g^2 \alpha} \quad (2.24)$$

Neste caso o autor desenvolveu o seguinte procedimento: partindo-se do ponto conhecido A, que se refere ao ponto inicial de percolação, é traçado um arco de raio AD até a intercessão com o prolongamento do talude de jusante, no ponto 1. Em seguida, é desenhada uma semicircunferência com diâmetro $\overline{D1}$. Prolongando a linha do nível d'água, do ponto A, até o talude de jusante, se obtém o ponto 3. Então é traçado um arco com raio $\overline{D3}$, até a intercessão desta com a semicircunferência. Por ultimo traça-se um arco de raio $\overline{14}$, até a intercessão com o talude de jusante e se obtém a distancia (α). Após este procedimento, o inicio e o final da linha freática podem ser determinadas.

A método gráfica (Figura 2.19) consiste primeiramente em desenhar a seção transversal da barragem provida de dreno horizontal. Baseado nos estudos de Kozeny o foco da parábola se encontra no ponto F, localizado no início do dreno. Os pontos A e B correspondem ao talude de montante. Como visto anteriormente, sabe-se que o início do fluxo se dá no ponto C, localizado a $0,3 L$ do ponto B. Para locar a diretriz da parábola, prolonga-se a linha do nível d'água do reservatório e traça-se um arco de raio CF. A intercessão deste arco com o prolongamento da linha determina-se o ponto D. Desta forma, é desenhada uma linha vertical ate o dreno, no ponto H, o qual representa a diretriz. Nota-se que a distância entre CF é mesma que entre CD, e o mesmo acontece para todos os pontos da parábola. Por fim determina-se o ponto G, localizado na metade da distancia entre FH, o qual representa o final da linha freática.

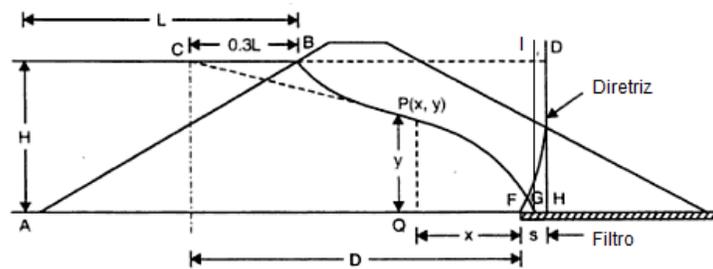


FIGURA 2.19 – Método gráfico de Kozeny

FONTE: Punmia (2005)

Para se obter os pontos intermediários da linha freática pode-se seguir dois procedimentos. O primeiro (Figura 2.20) consiste em traçar uma vertical no ponto G e dividir as distancias CI e GI em partes iguais. Em seguida une-se os pontos de CI ao ponto G. Para os pontos de GI deve-se traçar retas que interceptem os seguimentos de CI, cujos pontos representam a linha freática. Por ultimo os pontos de entrada e saída da linha devem ser ajustados. A segunda forma de se obter estes pontos é, sabendo-se que a distancia QH é a mesma que FP, estima-se qualquer distancia x entre QH. Com esta mesma medida e com foco em F, é possível obter os pontos da freática.

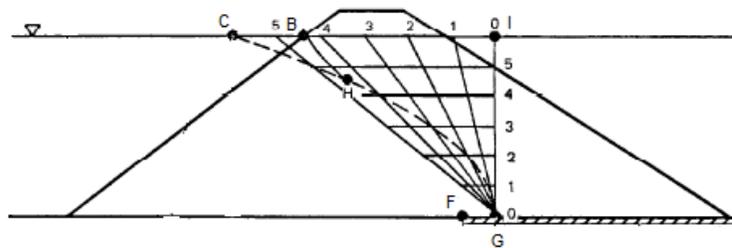


FIGURA 2.20 – Construção da linha freática

FONTE: U.S. Army Corps of Engineers (1986)

Analicamente, a distância (s) entre o foco e a diretriz podem ser obtidas através da equação:

$$s = d - \sqrt{d^2 + h^2} \quad (2.26)$$

Consequentemente a vazão percolada pelo maciço pode ser estimada pela equação:

$$q = k \cdot s \quad (2.27)$$

2.2.2.3.4 Método de proposto por A. Casagrande

A partir dos estudos desenvolvidos por Kozeny, A. Casagrande estendeu as soluções para o traçado da linha de fluxo em seções que não possuem dreno horizontal ou possuem outro tipo de dispositivo. O método desenvolvido por ele se aplica a ângulos maiores que 30° e menores do que 180° .

A Figura 2.21 representa uma barragem sem sistema de drenagem. Diferentemente do método proposto por Kozeny, neste caso, a posição do foco se encontra no pé do talude de jusante, possibilitando que a parábola básica extrapole o limite do talude de jusante no ponto C_0 . Como a condição de descarga do fluxo impõe que a linha seja tangente a face drenante, que neste caso representa o talude, esta deve ser corrigida para que a condição seja atendida. A distância deste deslocamento é definida por " Δa " e a distância entre o foco e o ponto de fuga da linha freática é denominado " a ", igualmente para os outros métodos apresentados.

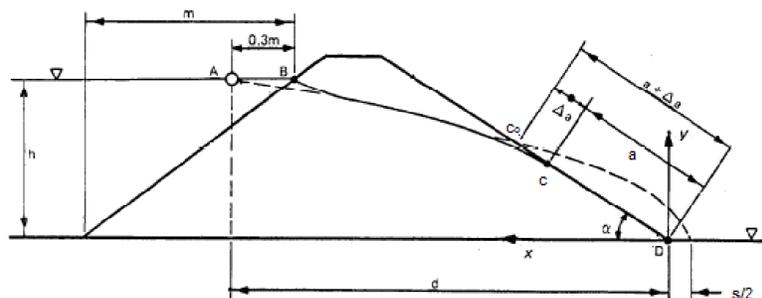


FIGURA 2.21 – Método A. Casagrande

FONTE: U.S. Army Corps of Engineers (1986)

A Figura 2.22 apresenta alguns casos que demonstram a posição da linha freática frente a diferentes faces drenantes. Nota-se que para ângulos maiores que 30°

e menores que 180° o método de Casagrande é válido. Já para ângulo igual a 180° utiliza-se o método de Kozeny.

É possível observar que o ponto de saída da linha freática é mais baixo do que o ponto de contato da parábola básica com a face drenante. TAYLOR (1948) explica que a face drenante, correspondente a distância “a” não é nem uma equipotencial e nem uma linha de fluxo, porém se assemelha à linha freática. Neste caso a pressão neste ponto é atmosférica e a carga em qualquer ponto possui a mesma magnitude da carga altimétrica.

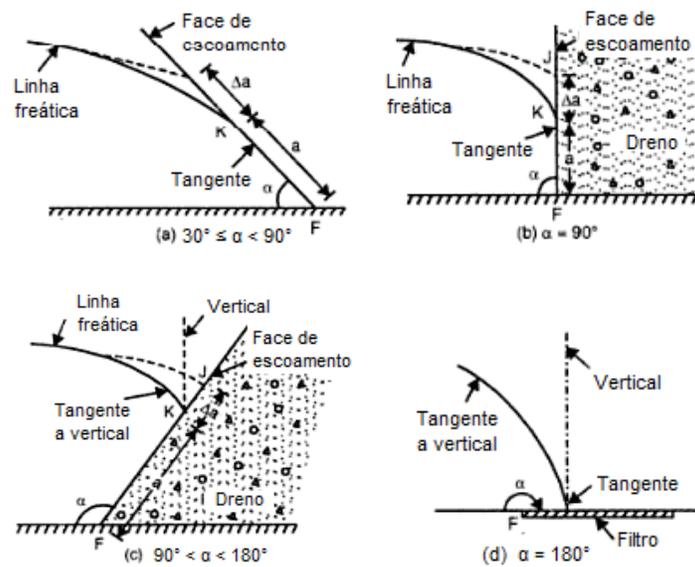


FIGURA 2.22 – Condições de saída para várias faces de escoamento

FONTE: Punmia (2005)

Baseado na análise de diversos modelos experimentais, utilizando vários ângulos (α) e diferentes distâncias entre o foco e o ponto de descarga da linha freática ($\Delta a + a$), A. Casagrande elaborou a correção de Δa através da curva apresentada na

Figura 2.23, o qual correlaciona $c = \frac{\Delta a}{\Delta a + a}$ com “ α ”.

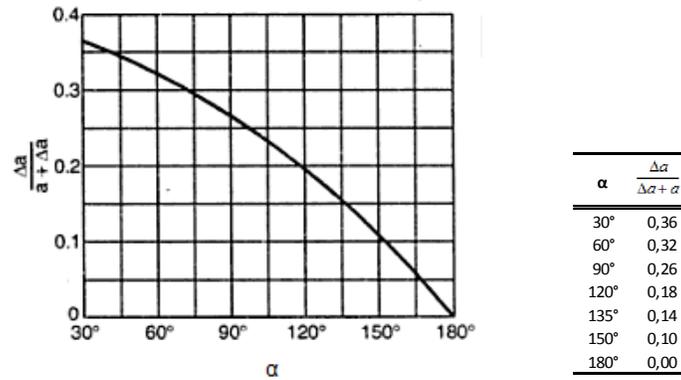


FIGURA 2.23 – Condições de saída para vários ângulos da face de drenagem

FONTE: Taylor (1948)

Após a determinação da linha freática é possível determinar a vazão de percolação pela através da equação 2.28.

$$q = k(\sqrt{d^2 + h^2} - d) \quad (2.28)$$

2.2.2.4 Percolação em meio anisotrópico

Devido ao estado de compactação do maciço de barragens, pode-se dizer que o solo apresenta característica anisotrópica, proporcionando maior permeabilidade na direção horizontal do que na vertical.

Segundo LAMBE e WHITMAN (1969), o traçado da rede de fluxo para meios anisotrópicos consiste primeiramente em reduzir a seção horizontal, possibilitando a transformação da escala da permeabilidade do solo, conforme mostrado na Figura 2.24. Desta forma, são impostas condições isotrópicas e as regras, para construção da rede de fluxo, podem ser atendidas.

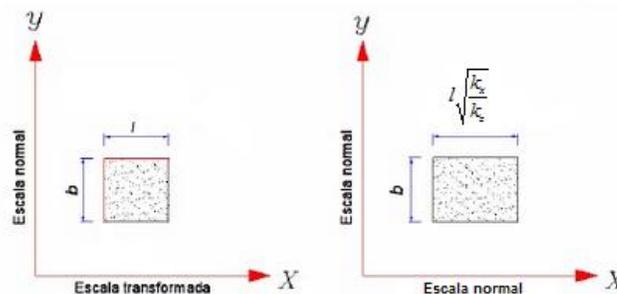


FIGURA 2.24 – Transformação de escala para solo anisotrópico

De acordo com TAYLOR (1948), para barragens que apresentam alto índice de estratificação, a parábola básica não representa a solução real do problema. A Figura 2.25 representa a diferença de traçado da linha freática para meios isotropicos (1) e anisotropicos (2). LAMBE e WHITMAN (1969), afirmam que a seção transformada pode ser utilizada para determinação da carga de pressão em qualquer ponto da freática. Porém, para a obtenção do gradiente hidráulico deve-se considerar a distancia corrigida no qual ocorreu a perda de carga.

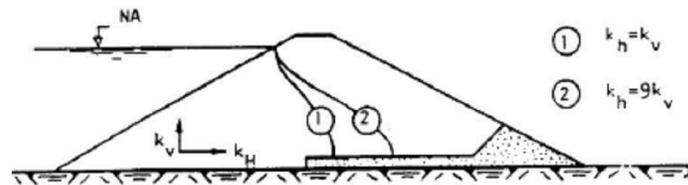


FIGURA 2.25 – Efeito da anisotropia na linha freática

FONTE: Vargas (1977, apud Braz, 2003)

2.2.2.5 Determinação da vazão de percolação

A vazão de percolação em uma rede de fluxo pode ser determinada através da equação básica de Darcy.

$$\Delta q = k \Delta h \frac{b}{l} \quad (2.29)$$

onde b é a largura do canal de fluxo e l , a extensão.

O número de canais de fluxo e equipotenciais podem ser contados em qualquer tipo de rede de fluxo. Tomando como exemplo a Figura 2.26, tem-se que o número de canais é representado por n_f e o número de quedas de potencial é n_d . Considerando que o canal seja quadrado a expressão torna-se:

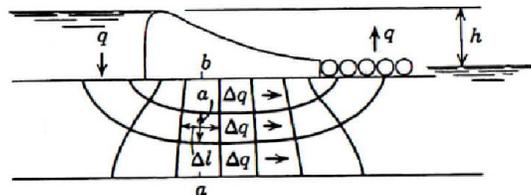


FIGURA 2.26 – Rede de fluxo em barragem com fundação permeável

FONTE: Cedergren (1989)

$$\Delta q = k \times \Delta h \quad (2.30)$$

Portanto, pode-se dizer que a vazão total que flui através dos canais n_f é:

$$q_t = n_f \times \Delta q \quad (2.31)$$

Uma vez que:

$$h_t = n_d \times \Delta h \quad (2.32)$$

Pode-se concluir que a vazão, por metro de barragem, para fluxo em meio isotrópico, é:

$$q_t = kh_t \times \frac{n_f}{n_d} \quad (2.33)$$

Para uma percolação em solo anisotrópico, cuja permeabilidade k_h é maior que k_v , a vazão é estimada através da permeabilidade efetiva:

$$\bar{k} = \sqrt{k_h k_v} \quad (2.34)$$

Portanto a vazão total para um meio anisotrópico é:

$$q_t = \sqrt{k_h k} \times h_t \times \frac{n_f}{n_d} \quad (2.35)$$

2.2.3 Métodos para análise de fluxo em barragens

Muitos estudos já foram realizados a fim de se entender melhor as características de fluxo em meios porosos. A bibliografia descreve diversos métodos para esta análise tais como o gráfico, o analítico, o analógico e o numérico. Para que um modelo seja utilizado adequadamente, faz-se necessário à compreensão da estrutura do modelo e suas limitações. Além desses fatores, deve-se ressaltar que muitos modelos necessitam de calibração para que reproduza o mais próximo possível o fenômeno a ser modelado, uma vez que, devido aos métodos matemáticos utilizados para cada modelo, surge uma série de parâmetros relacionados a estes métodos, que representam as características e os processos físicos do problema a ser estudado.

2.2.3.1 Método Gráfico

O método gráfico consiste na representação da rede de fluxo através de uma malha formada por linhas equipotenciais e linhas de fluxo, ortogonais entre si, cujo conceito tem como base a equação da continuidade de Laplace, o qual define as condições de percolação da água em determinado ponto no maciço, em regime permanente, e avalia as cargas no meio. Este método representa-se simples e mais eficiente em problemas cujo meio é homogêneo, isotrópico e quando a água flui somente através de zona saturada.

2.2.3.2 Método Analítico

O método analítico consiste basicamente em soluções matemáticas desenvolvidas a partir da equação de Laplace. Embora seja muito preciso, é pouco utilizado, pois as funções dependentes são difíceis de serem obtidas e muito complexas. Basicamente, este modelo considera fluxo em meio homogêneo e condições de contorno simples e bem definidas.

O trabalho realizado por MUSKAT (1946) apresenta uma coletânea de pesquisas realizadas utilizando soluções analíticas para análise de fluxos bi e tridimensionais aplicados em diversos casos como fluxo radial em poços, fluxo ao redor de cortinas impermeáveis, vazão e distribuição de poropressões na base de barragens poços e parcialmente penetrantes. CEDERGREN (1989) menciona o trabalho realizado por Harr (1962), em que este apresenta soluções matemáticas bastante rigorosas relacionada à percolação em reservatórios de barragens e outras estruturas.

Um dos métodos analíticos utilizados é modelo dos fragmentos (Figura 2.27), o qual permite resolver problemas de infiltração complexos, simplesmente fracionando a seção transversal em partes, possibilitando a análise do fluxo em cada fragmento e obter uma solução global. De acordo com estudo realizado por Pavlovsky (1935-1956), citado por REYNA (2008), este método representa uma aproximação analítica para o cálculo do fluxo e de pressão em águas subterrâneas. A hipótese básica, desenvolvida por ele, é que as linhas equipotenciais, em diversos pontos críticos do fluxo, representam retas verticais.

Segundo HUERTAS (2006), o método também pode ser utilizado em meios porosos anisotrópicos, neste caso considerando-se fragmentos formados em domínio geométrico transformado, resultado da substituição de variáveis.

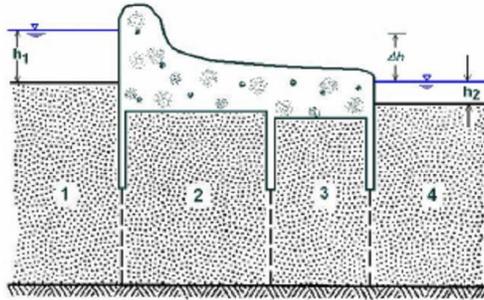


FIGURA 2.27 – Fluxo dividido em 4 fragmentos

FONTE: Harr (1977, *appud* Huerta, 2006)

2.2.3.3 Método Analógico

O método analógico se baseia no fato de que outros fenômenos também são governados pela equação de Laplace. Corresponde aos modelos físicos em escala reduzida utilizando, em alguns casos, meios porosos homogêneos. Embora os mais comuns sejam os modelos de areia, elétrico e de placas, projetos hidráulicos de grandes dimensões que envolvem protótipos reais, como usinas hidroelétricas, análise de estabilidade de encostas, também são largamente utilizados.

A utilização de modelos físicos tem-se mostrado uma boa alternativa para análise e previsão de fenômenos que ocorrem em campo, fornecendo informações necessárias que complementem um projeto e aumentem sua eficiência e confiabilidade. Segundo RIBEIRO (2000) as escalas de tempo, forças e velocidades podem prever condições e características de comportamento que seriam, em termos práticos, impossíveis de serem observadas na escala real.

ROCHA (2006) utilizou o modelo em escala reduzida para analisar o projeto de desvio de rio para a construção de uma barragem.

RIBEIRO (2006) simulou uma barragem de rejeito através da utilização de um Equipamento de Simulação de Deposição Hidráulica (ESDH), objetivando analisar as variáveis que influenciam o processo de deposição hidráulica.

SILVA (2012), também utilizou a modelagem reduzida, cujo objetivo foi analisar as condições do escoamento e caracterizar o campo de velocidades na entrada da tomada d'água da UHE Foz Tua.

SILVA (2013) utilizou a modelagem reduzida para analisar sistemas de fraturas em encostas tomando como protótipo encostas na Serra do Mar, no Paraná.

FUDIMORI et. al. (2013) pretenderam analisar efeitos de erosão na saída de vertedouros da UHE Foz do Chapecó.

A utilização de modelo reduzido necessita ser feita com muito cuidado, de maneira a possibilitar que os fenômenos do protótipo sejam reproduzidos adequadamente pelo modelo hidráulico. Como este tipo de redução pode gerar alterações em algumas grandezas físicas que invalidariam o modelo é importante que certas condições de proporcionalidade sejam satisfeitas.

Um comportamento semelhante significa que um mesmo fenômeno se passa em dois sistemas. RIBEIRO (2006) menciona que o importante ao se modelar é identificar as grandezas mais importantes na previsão e que intervêm no fenômeno físico. Segundo SILVA (2013), a equivalência de comportamento entre protótipo – modelo é observada a partir da similitude física entre os dois processos, o qual pode ser definido através de fatores de escala. Para que exista esta similitude é necessário que as grandezas físicas apresentem semelhança geométrica, cinemática e dinâmica.

A escala geométrica é fundamental para qualquer modelo. Essa similitude é garantida com a observação de um fator de escala relacionando as dimensões do protótipo com as do modelo. De acordo com RIBEIRO (2006) a escolha de uma escala geométrica adequada depende do tipo de sistema que se deseja estudar e do espaço disponível para implantação do modelo. A obtenção da semelhança geométrica representa a razão entre um comprimento no modelo em relação ao comprimento correspondente no protótipo.

A semelhança cinemática é garantida relacionando a aceleração e velocidade a qual o protótipo está submetido com a aceleração e velocidade imposta ao modelo. De acordo com SILVA (2013) existem duas possibilidades para esta similitude. A primeira consiste na semelhança obtida pela imposição de uma mesma aceleração (gravidade terrestre) em ambas as situações. A segunda consiste em submeter o modelo à aceleração maior que a atuante no protótipo.

Com relação à similitude dinâmica a mesma autora descreve como sendo um fator de escala constante que relacione as forças atuantes no protótipo e modelo.

Estas estão relacionadas a qualquer tipo de força que se pretenda escalar, como peso próprio, viscosidade, força de percolação, rugosidade, entre outras.

Embora o critério de escala dependa de uma lei particular de modelagem o procedimento usado para gerar estas escalas não varia. Segundo RIBEIRO (2006) o uso de duas leis mais apropriadas para os modelos hidráulicos é suficiente para demonstrar o procedimento.

2.2.3.3.1 Modelo de Areia

Os modelos de areia compreendem os modelos em escala reduzida, cujo objetivo é simular os vários problemas de fluxo confinado e não confinado. A literatura fornece alguns estudos referentes a este modelo voltado a aplicação em barragens, canais, movimento de águas subterrâneas, entre outros.

A construção deste tipo de modelo normalmente é feito dentro de caixas, com pelo menos uma das faces transparente, e utilizando material impermeabilizante, a fim de que a água se obrigue a passar pelo interior do maciço, dependendo do objetivo do estudo. Para a identificação das pressões no interior do maciço e do nível d'água, utilizam-se piezômetros, também na escala do modelo. Ainda, para facilitar a visualização do fluxo, são adicionados corantes.

A geometria do modelo deve ser correspondente à do protótipo obedecendo aos fatores de escala. Para a modelagem em meio homogêneo geralmente utiliza-se areia com granulometria única e para simulação em condição anisotrópica a literatura recomenda que seja utilizada material granular com diferentes diâmetros de partícula a fim de simular as diferentes camadas do solo.

Em situações de fluxo não confinado o efeito da capilaridade na areia é desproporcionalmente maior e deve ser majorado, pois este fenômeno não é tão representativo como nos protótipos. Já para estudos de configuração de fluxo de aquíferos livres, que simulam rebaixamento em poços, por exemplo, é de fundamental importância a aplicação dos fatores de semelhança para a correção do efeito de ascensão capilar.

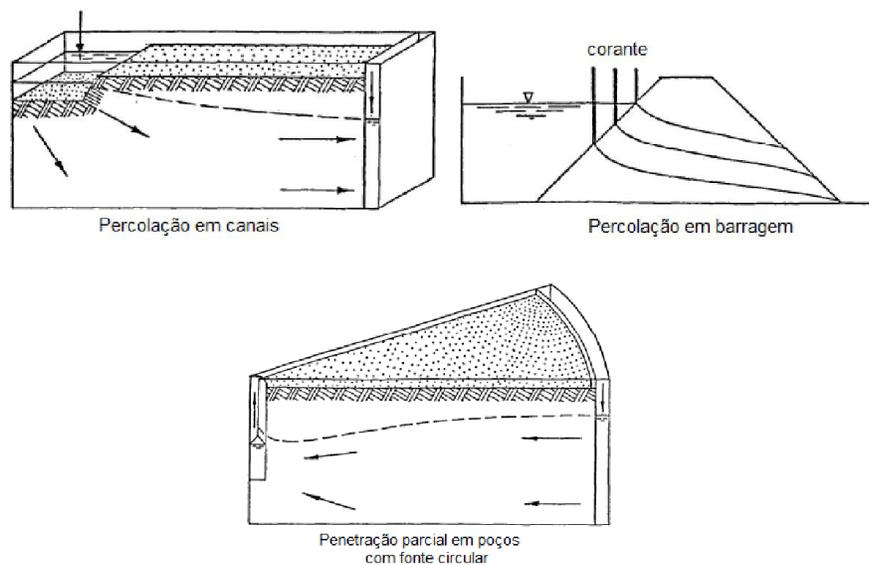


FIGURA 2.28 – Modelos de areia
 FONTE: U.S. Army Corps of Engineers (1993)

2.2.3.3.2 Modelo Elétrico

O modelo elétrico é um dos métodos mais utilizados para analisar problemas de percolação de água, sendo este adaptado para estudar situações em bi e tridimensionais. Como a equação de Laplace rege o problema da condução de corrente, pode-se solucionar experimentalmente um problema de fluxo d'água através de analogia com o fluxo elétrico em um meio condutor (Ortigão, 2007).

A utilização deste modelo se deve a similaridade entre a lei de Darcy e a lei de Ohms (Tabela 2.3). Segundo TAYLOR (1948) o fluxo de corrente elétrica é proporcional à queda de tensão, representando uma analogia com o fluxo de água através do solo em que a percolação é proporcional a carga dissipada. Neste caso a condutividade elétrica é correspondente à permeabilidade do solo.

TABELA 2.3 – Comparação entre a Condutividade hidráulica e a elétrica

FONTE: Reyna, 2008

Fluxo em regime permanente	Corrente elétrica
Carga tota = h	Voltagem = V
Condutividade hidráulica = k	Condutividade = σ
Velocidade de descarga = v	Corrente = I
Lei de Darcy: $v = -K \text{ grad } h$	Lei de Ohm: $I = -\sigma \text{ grad } V$
$\Delta^2 h = 0$	$\Delta^2 V = 0$
Linhas equipotenciais: $h = \text{constante}$	Linhas equipotenciais: $V = \text{constante}$
Borda impermeável: $\partial h / \partial n = 0$	Borda impermeável: $\partial V / \partial n = 0$

De acordo com HUERTAS (2006) os modelos elétricos (Figura 2.29) se restringem a fluxos permanentes e os tipos mais simples admitem aquíferos isotrópicos homogêneos. A analogia elétrica apresenta muitas vantagens sobre outros métodos, principalmente quando há necessidade de realizar análises tridimensionais ou problemas que envolvem geometria complexa que não permitem adequar as hipóteses simplificativas dos métodos analíticos. A desvantagem deste método se refere a análise em barragem, em que o topo da linha freática no modelo deve ser locada sem conhecer ao certo sua posição, pois não há força de gravidade equivalente que possa produzir o nível d'água existente nos aquíferos livres e determinar o limite da superficial livre.

Neste caso a pressão atmosférica em todos os pontos da superfície livre da água, acarreta um decréscimo da carga que deve ser proporcional à queda de potencial elétrico ao longo dessa superfície, possibilitando que as linhas equipotenciais interceptem a linha freática em pontos onde os valores de carga de elevação sejam iguais às cargas totais ali medidas. Em todo caso se isto não ocorrer, a posição da linha freática devera ser estimada novamente. A utilização deste modelo, embora seja bastante empregado e eficiente, representa-se muito trabalhoso.

Este método consiste em colocar uma barra de metal ao longo dos taludes de montante e jusante, sendo este ultimo ligado a resistores, e impor diferentes potenciais elétricos, sendo possível a visualização da corrente elétrica através da seção transversal do maciço de solo formando a suposta linha de fluxo. Como as condições são análogas, as linhas equipotenciais também podem ser obtidas através de um instrumento eletrônico.

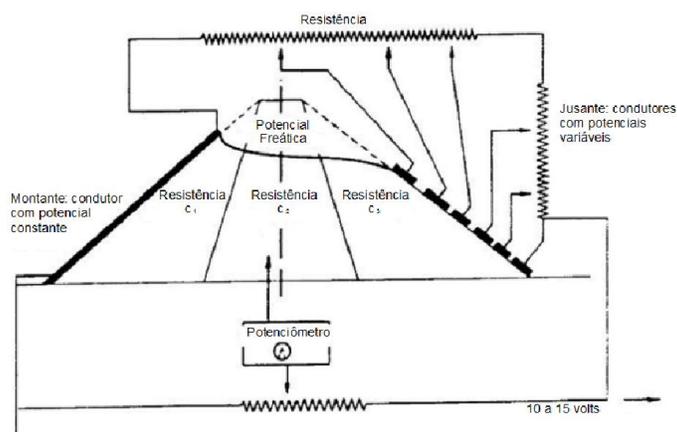


FIGURA 2.29 – Modelo elétrico de maciço de barragem

FONTE: Vargas (1977)

2.2.3.3.3 Modelo de Placas

O modelo de placas tem sido utilizado para estudar o fluxo instável e os efeitos dos drenos. Este método é limitado a análises bidimensionais e depende do fluxo de um fluido viscoso, entre duas placas paralelas separadas por uma determinada distância. Normalmente a construção é complicada e o funcionamento requer cuidado com a temperatura e a capilaridade que afeta o fluxo.

O princípio do modelo de placas paralelas (Figura 2.30) é baseado na substituição do conjunto de poros do solo por uma abertura contínua, de largura pequena que garanta condições de fluxo laminar (Huertas, 2006). A linha de saturação se mantém por meio de depósitos de água (ou outro líquido) reguláveis, e que corresponde à linha de saturação do meio real. Com este modelo é possível obter a permeabilidade do solo variando a separação das placas, assim como o peso específico e a viscosidade dinâmica.

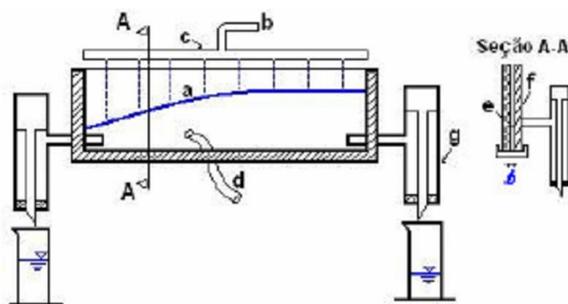


FIGURA 2.30 – Modelo vertical de placas paralelas

FONTE: Huertas (2006)

2.2.3.4 Método Numérico

A dificuldade de se obter uma solução analítica para resolver problemas de fluxo em condições de campo leva à utilização de métodos numéricos. O método numérico representa a técnica mais utilizada atualmente, para análises bi e tridimensionais e se baseia nos modelos de diferenças finitas e elementos finitos. Para este último, em estudo de percolação de barragens, o domínio do fluxo é dividido em elementos discretos gerando uma malha. Em cada elemento são determinadas algumas propriedades e impostos condições de contorno, com a função de se determinar o comportamento geral do fluxo.

O método de elementos finitos é a técnica mais usual para análise de problemas de fluxo, seja bi ou tridimensional, em estado permanente ou transiente,

permitindo a inserção de parâmetros de vários materiais e imposição de condições de contorno bastante complexas. Este método transforma as equações diferenciais de fluxo em equações integrais, cuja solução é obtida a partir da discretização do domínio dos elementos (Oliveira, 2008).

Um modelo numérico representa uma simulação matemática de um processo físico real. Este método se baseia em um modelo de malha que divide a região do fluxo em elementos discretos, interconectados em pontos nodais, gerando uma série de equações e variáveis. Neste caso cada elemento possui propriedades e condições de contorno específicas. Os elementos mais utilizados em análises bidimensionais são os quadriláteros de quatro e oito nós e os triangulares de três e seis nós, apresentados na Figura 2.31.

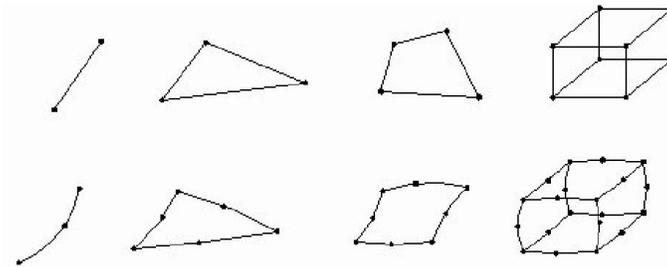


FIGURA 2.31 – Tipo de elementos finitos

FONTE: Rocha (2007)

A análise de um problema através do método de elementos finitos envolve três etapas distintas: discretização do domínio, cálculo das variáveis do problema e visualização dos resultados. A primeira representa a subdivisão do domínio em elementos finitos formando uma malha, cujo refinamento fornece resultados mais precisos. A segunda se refere à caracterização dos elementos segundo as propriedades dos materiais, condições de contorno e quaisquer outras informações relevantes. A terceira se refere ao pós-processamento em que é possível a visualização gráfica dos resultados e análise do problema formulado.

Para cada elemento discretizado é gerada uma matriz de rigidez composta pelos coeficientes das equações de equilíbrio derivados a partir da geometria e propriedades de cada elemento. ROCHA (2007) explica que as forças distribuídas nos elementos são convertidas em forças nodais equivalentes que formam um equilíbrio entre a matriz de rigidez, o vetor de deslocamento nodal e vetor de força nodal. Quando esses elementos são associados, a matriz de rigidez, por sua vez, forma um sistema de fluxo global.

Em problemas de fluxo, a variável básica é a carga hidráulica total nos pontos nodais. Considerando que as cargas hidráulicas, impostas em toda a malha de elementos finitos, sejam iguais à carga hidráulica máxima do problema, obtém-se as cargas de pressão, possibilitando que a permeabilidade de cada elemento seja determinada através da matriz de fluxo, o qual é representada pela expressão:

$$[K]^{(i-1)} = \sum_{m=1}^n \int_{V^{(m)}} [B^{(m)}]^T [C^{(m)(i-1)}] [B^{(m)}] dV^{(m)} \quad (2.36)$$

Onde $[K]^{(i-1)}$ é a matriz de fluxo na interação (i-1), considerando os n elementos da malha, $[B^{(m)}]$ é a matriz que relaciona gradientes com cargas hidráulicas nodais no elemento m , $[C^{(m)(i-1)}]$ é a matriz das permeabilidades principais na interação (i-1).

A partir da matriz de fluxo de cada elemento é possível montar uma matriz de fluxo global K , o qual depende basicamente da numeração global dos nós do elemento. Neste caso a matriz global de fluxo é:

$$K \times h = q \quad (2.37)$$

Onde K é a matriz global de fluxo, h é o vetor de carga hidráulica total para todo o sistema e q é o vetor de fluxo imposto total para todo o sistema. Neste caso, os vetores h e q possuem N elementos, onde N é o número total de nós da malha, e K representa uma matriz quadrada ($N \times N$). Ao vetor de fluxo q geralmente é imposto valor nulo, a menos que haja um bombeamento onde uma determinada vazão seja introduzida ou retirada do solo.

Portanto, a solução do sistema global fornece carga hidráulica total em todos os pontos da malha. A partir destes valores é possível traçar linhas de igual valor de carga total, que correspondem as equipotenciais, e também é possível calcular todas as outras variáveis relacionadas ao fluxo como, cargas piezométricas, poropressão, gradiente hidráulico e velocidades de fluxo.

A confiabilidade dos resultados obtidos no método de elementos finitos depende do tipo de formulação e características adotadas para o modelo. O refinamento da malha facilita a detecção de pontos que possam causar dificuldade de convergência do modelo.

2.3 CONTROLE DE PERCOLAÇÃO EM BARRAGENS DE TERRA

Todas as barragens de terra ou enrocamento estão sujeitas à percolação pelo maciço e/ou fundação e os sistemas de controle de percolação são de extrema importância para a confiabilidade e segurança das barragens. São necessários para prevenir a elevação da pressão, instabilidade do talude de jusante, *piping* através do maciço e/ou fundação da barragem e erosão, ocasionado devido ao carreamento de material fino. Uma drenagem que seja eficaz diminui muito os riscos de acidentes. MASSAD (2003) afirma que grande parte dos acidentes, envolvendo barragens de terra, foram ocasionados devido à falta de um sistema eficiente de controle de percolação.

Até o final da década de 1940, as barragens de terra construídas no Brasil, eram projetadas em bases puramente empíricas, sem critérios apoiados na ciência de mecânica dos solos. Os primeiros sistemas de drenagem interna de barragens de terra consistiam em um único dreno, posicionado no pé do talude de jusante, cujo objetivo era simplesmente evitar que a água percolada através do maciço de aterro emergisse diretamente no talude. Com o passar dos anos, elementos mais eficientes e sistemas mais complexos foram sendo aplicados e possibilitava maior estabilidade à estrutura.

De acordo com CEDERGREN (1989) a maioria das rupturas causadas pela percolação se deve ao excesso de força atuante no maciço proveniente de elevados gradientes hidráulicos. Esta falha pode ser classificada em duas categorias: a primeira se refere àquelas que ocorrem quando as partículas de solo migram em direção a região externa da barragem, causando *piping* ou rupturas geradas por erosões internas do maciço. A segunda se refere àquelas causadas por padrões de percolação não controlados que conduzem a saturação do solo e à elevação da subpressão e da força de percolação. Para tanto se faz necessário a utilização de dispositivos que filtrem e drenem a água percolada, a fim de evitar tais acontecimentos.

2.3.1 Força de Percolação

Os fenômenos relacionados a percolação de água em barragens de terra é de fundamental importância, já que seu comportamento pode ocasionar a falha da estrutura. O fluxo de água através do maciço da barragem exerce forças devido ao atrito entre a água e as partículas do solo, o qual é denominado de força de percolação e é descrita pela expressão seguinte. Essa força possui unidade

semelhante ao peso específico, uma vez que a sua dissipação é considerada uniformemente em todo o volume de solo.

$$j = \frac{\Delta h A \gamma_w}{L A} = i \gamma_w \quad (2.38)$$

Sendo j a força de percolação atuante (kN/m^3), Δh a diferença de carga hidráulica, γ_w o peso específico da água (kN/m^3), L o comprimento total percolado pela água (m) e A a área da seção transversal (m^2).

Quando esta força é maior do que a que resiste o movimento, as partículas tentem a ser arrastadas dando-se início a erosão interna. Neste caso, o gradiente hidráulico é o fator influenciador deste fenômeno. No geral, barragens de terra com percolação preferencial pelo maciço, estão bastante sujeitas a erosão interna. O fator importante para prevenção destas forças de percolação se refere a implantação de sistemas de drenagem interna adequados que dissipem as cargas geradas no maciço.

2.3.2 Sistema de drenagem interna

Segundo CRUZ (1996), os sistemas de drenagem constituem a principal defesa contra fluxos concentrados e preferenciais. A drenagem regulariza a saída do fluxo, tanto da própria barragem como da fundação, atenuando as pressões e disciplinando seu escoamento para jusante da barragem.

A implantação de filtros e drenos no interior do maciço de barragens de terra deve ser primordial. A utilização destes dispositivos deve ser executada corretamente, do contrário, sua aplicação pode causar falhas na estrutura como, por exemplo, o processo de erosão em barragens, o qual possibilita a obstrução dos filtros e drenos, e em casos mais extremos, pode causar a ruptura do maciço por *piping*. Consequentemente, a drenagem de superfícies suscetíveis a erosão necessitam ser cobertas com camadas especiais de proteção que permitem a água escoar livremente, mantendo as partículas firmes no local.

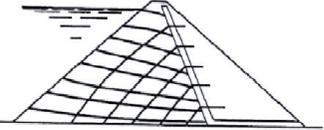
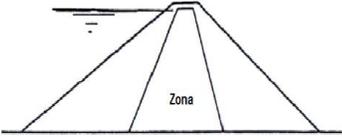
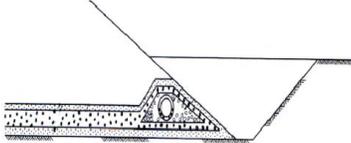
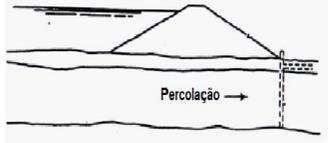
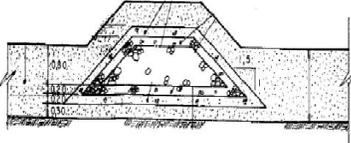
A seleção do sistema de drenagem deve ser feito de forma criteriosa para que atenda aos requisitos básicos e satisfaça as condições de percolação. Neste caso os drenos devem obedecer aos critérios de filtragem e apresentar valores de permeabilidade condizentes com as especificações de projeto. Segundo CEDERGREN (1989), 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 extremamente fraturadas.

Os principais dispositivos de drenagem utilizados no controle de percolação através do maciço de barragens são apresentados na Tabela 2.4.

TABELA 2.4 – Dispositivos de drenagem utilizados para controle de percolação em barragens de terra

FONTES: Gaioto (2003); Cedergren (1989); Pacheco (1981); Quintas (2002).

Dispositivo de drenagem	Descrição	
Dreno chaminé (vertical ou inclinado)	Fica localizado entre o núcleo e o talude de jusante. Tem como objetivo interceptar todo o fluxo horizontal e manter não-saturada a zona do espaldar de jusante.	
Barragem zoneada	Possuem uma seção interna impermeável chamada de núcleo.	
Tapete drenante horizontal	Tem a função de conduzir para o pé de jusante da barragem as águas coletadas pelo dreno chaminé e as percoladas pela fundação., como objetivo de proteger o maciço contra os efeitos da erosão interna.	
Dreno de pé	Fica localizado no pé do talude de jusante, paralelo ao eixo da barragem. Sua função é coletar as águas percoladas pelo dreno chaminé e tapete drenante.	
Trincheira drenante	Intercepta o fluxo de água através de camadas permeáveis mais superficiais da fundação.	
Poço de alívio	É utilizado quando as camadas abaixo da barragem são muito profundas e inviabilizam a implantação de <i>cutoffs</i> . Tem a função de aliviar as pressões no maciço	
Drenos franceses (<i>finger drains</i> ou <i>stringer drains</i>)	Drenos lineares, transversais ao eixo da barragem, com determinado espaçamento entre si. Tem a função de coletar e transportar as águas percoladas pelo interior do maciço, aliviando as pressões geradas e mantendo a estabilidade do talude de jusante. (A figura apresenta a seção transversal do dreno)	

Como o objetivo da presente pesquisa é avaliar o fluxo mediante a utilização de tapete drenante horizontal e drenos franceses, estes serão apresentados com mais detalhes nos subitens a seguir.

2.3.2.1 Tapete drenante

Os tapetes drenantes são os drenos mais comumente utilizados. Constituem um dreno horizontal contínuo disposto na base de jusante da barragem no sentido do fluxo principal, cuja função é dar vazão à água que percola pelo interior do maciço e controlar o fluxo pela fundação (CRUZ, 1996). Suas dimensões são consideradas únicas, ou seja, o dreno possui largura, altura e comprimento constantes permitindo, assim, que o fluxo seja escoado uniformemente, podendo ser considerado como um elemento planar.

Segundo GAIOTO (2003), este sistema previne contra a elevação da subpressão e mantém a zona de jusante não-saturada. Neste caso o tapete drenante deve trabalhar com cargas hidráulicas muito baixas e com coeficiente de permeabilidade alto.

CEDERGREN (1989) afirma que quando este dispositivo é projetado adequadamente, pode remover todo o fluxo percolado pelo maciço sem proporcionar risco de colmatção do dreno ou ruptura do maciço por *piping*. Porém, ainda segundo ele, esta eficiência somente pode ser garantida quando o dreno é implantado sobre fundação relativamente uniforme e em maciços não estratificados.

CRUZ (1996) apresenta diversos casos de barragens que utilizam este tipo de dispositivo. Nos estudos mostrados por ele, a implantação do tapete drenante sempre é associada a outro dispositivo, como por exemplo, o dreno vertical.

OLIVEIRA (2008) apresentou na sua pesquisa uma análise a respeito da eficácia dos dispositivos de vedação para controle da percolação em fundação de barragens. Em uma de suas simulações ele pôde comprovar que a implantação de tapete drenante associado a outro dispositivo é mais eficiente do que o mesmo ser utilizado sozinho, dependendo das condições do projeto.

A justificativa que embasa a escolha da implantação do tapete drenante, somente, ou associado ao dreno vertical, ou outro dispositivo de drenagem, depende principalmente do grau de estratificação das camadas do solo, como explicado por Cedergren (1989). Em barragens de terra geralmente há estratificação devido à

variabilidade das características dos materiais utilizados para o aterro. Quando estes são compactados, as partículas de solo tendem a se alinhar horizontalmente possibilitando a ocorrência de anisotropia no maciço, ou seja, permeabilidade horizontal diferente da vertical. Neste caso, a permeabilidade vertical do maciço é determinada de acordo com a permeabilidade da camada menos permeável. Segundo CEDERGREN (1989), a relação entre a permeabilidade vertical e horizontal pode variar de 2 a 10, ou mais.

Portanto, para um solo estratificado, a implantação de tapete drenante não é suficiente para prevenir o talude de jusante contra a saturação e a suscetível ruptura por *piping* (Figura 2.32-a). Para a utilização deste dispositivo é recomendado que a permeabilidade horizontal e vertical seja a mesma ($k_h = k_v$), como apresentado na Figura 2.32 (b).

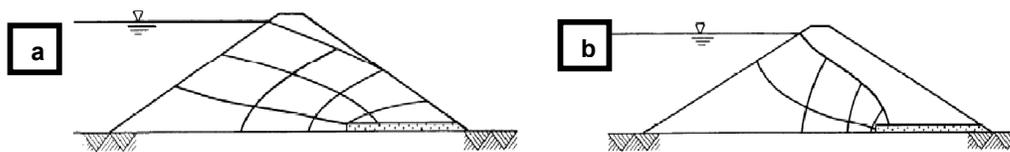


FIGURA 2.32 – Representação esquemática de barragem de terra com tapete drenante: a) meio anisotrópico, b) meio isotrópico

FONTE: Cedergren (1989)

Para casos em que há anisotropia ($k_h \neq k_v$) recomenda-se que seja adotado tapete drenante associado a drenos verticais (ou inclinados) ou a outros sistemas de drenagem, como apresentado na Figura 2.33, o qual permite maior controle da linha de saturação no talude de jusante.

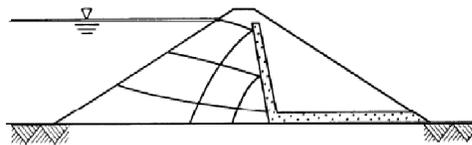


FIGURA 2.33 – Representação esquemática de barragem de terra em meio anisotrópico com tapete drenante associado a dreno inclinado.

FONTE: Cedergren (1989)

2.3.2.2 Drenos franceses (*Finger drains* ou *Stringer drains*)

Os drenos franceses são elementos lineares, dispostos lado a lado no sentido principal do fluxo, transversalmente ao eixo, com espaçamento entre eles. A utilização deste dispositivo de drenagem é recomendada como alternativa para o tapete

drenante quando o custo do material é elevado ou quando o material, em grande quantidade, é de difícil obtenção. O material utilizado para a construção deste sistema possui características que são excelentes para drenagem, porém sua disposição na barragem deve ser manuseada corretamente.

Os drenos devem ser projetados para possuírem laterais inclinadas, para que as tensões no solo sejam mais bem distribuídas. A seção transversal dos drenos franceses (Figura 2.34) deve ser suficientemente grande e/ou permeável, para suportar a vazão que percola pela barragem, sem elevar as poropressões do maciço. Assim sendo, é necessário avaliar o espaçamento entre eles, para que as cargas hidráulicas sejam dissipadas de forma que as tensões não interfiram no funcionamento da estrutura.

Os drenos franceses, embora sejam usados com certa frequência, são projetados de maneira simplista, pelo fato de não existirem resultados disponíveis de estudos relativos ao comportamento destes dispositivos de drenagem, que possam ser usados como procedimentos de cálculo. CRUZ (1996) menciona dois casos em que foi utilizado este tipo de dispositivo, sendo eles a barragem de Três Irmãos e Rosana.

Para o caso da barragem Três Irmãos, PACHECO (1981) desenvolveu um artigo referente a implantação de tapete drenante e drenos franceses. Segundo ele, este sistema de drenagem foi escolhido como alternativa, pois a central de britagem, responsável pelo fornecimento de material granular, não dispunha da quantidade necessária para a execução do tapete drenante. A mesma justificativa foi apresentada por CRUZ (1996) para a barragem de Rosana. Embora ambos os trabalhos tenham demonstrado a eficiência do dispositivo, a implantação dos drenos franceses foi associada ao tapete drenante e ao dreno vertical, pois foi verificado que os primeiros não seriam suficientes para dissipar as cargas hidráulicas do maciço. A mesma explicação a respeito desta associação com outros dispositivos se refere a anisotropia do maciço, explicada no item de tapete drenante.

O dimensionamento hidráulico dos drenos franceses deve ser feito com base nas vazões de percolação e possuir área de seção transversal suficiente para satisfazer o fluxo percolado a fim de que não comprometa a estabilidade da barragem.

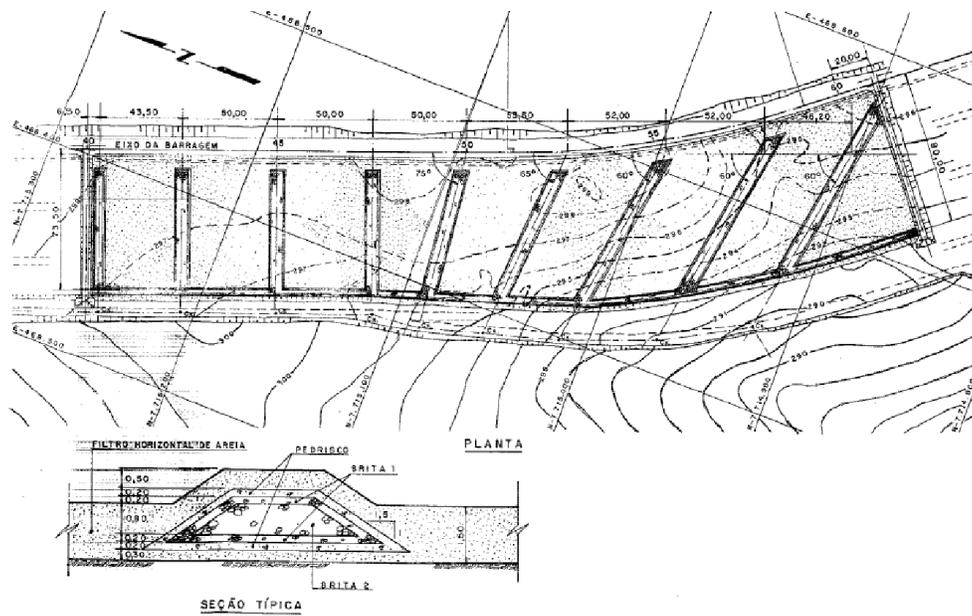


FIGURA 2.34 – Disposição dos drenos franceses na barragem de Três Irmãos e seção transversal do dreno

FONTE: Pacheco (1981)

2.3.3 Requisitos para sistemas de drenos

Como já mencionado, a função dos drenos é permitir a percolação da água pelo maciço sem que haja o carreamento de material fino, proporcionando estabilidade a estrutura. Segundo CRUZ (1996), o transporte das partículas depende basicamente da ação da força de percolação e da força de gravidade, combinadas.

Muitos dos problemas associados a projetos de filtros e drenos provem da necessidade em satisfazer dois requisitos principais. O primeiro requisito se refere aos filtros e drenos garantirem a não ocorrência de erosão do maciço e obstrução dos dispositivos, devendo atender ao *critério de retenção*. Já o segundo, igualmente importante se refere a capacidade de descarga a que o sistema de drenagem deve proporcionar, para que não haja elevação de pressão no maciço da barragem, devendo atender ao *critério de permeabilidade*.

2.3.3.1 Critério de retenção

Em qualquer interface de dois materiais porosos granulares, onde haja fluxo de água do material mais fino para o material mais grosseiro, é inevitável que algum transporte de partículas venha ocorrer. CRUZ (1996) explica que na zona do material base, determinada de zona de pré-filtro, algumas partículas ou grumos finos e médios são carregados para os vazios do filtro. As partículas maiores são retidas no momento em que o diâmetro do poro fica maior do que a partícula. As partículas finas passam, mas a medida que as partículas maiores são retidas, elas retêm as partículas menores, e depois de algum tempo o processo se estabiliza.

O critério de retenção se refere à prevenção deste transporte de material fino do maciço que possa acarretar a colmatção dos drenos e conseqüentemente a ruptura da barragem por *piping*.

De acordo com CEDERGREN (1989), se o diâmetro dos vazios é pequeno o suficiente para manter 85% do tamanho das partículas de solo (D_{85}) no lugar, as partículas mais finas também se manterão no lugar. Partindo deste princípio, TERZAGHI sugeriu que a seleção dos materiais para a composição dos drenos atendessem a duas condições:

Critério 1 – Determina que as dimensões dos vazios no material filtrante devem ser suficientemente pequenas para reter as partículas maiores do material protegido. Neste caso admite-se que 15% do tamanho das partículas do dreno (D_{15}) não devem exceder quatro ou cinco vezes 85% do tamanho do solo protegido (D_{85}).

$$\frac{D_{15(F)}}{D_{85(S)}} \leq 4 \text{ a } 5 \quad (2.39)$$

Critério 2 – Determina que o material filtrante deva ter alta condutividade hidráulica para impedir a geração de grandes forças de percolação e pressões hidrostáticas aplicadas aos filtros. Neste caso admite-se que 15% do tamanho das partículas do dreno (D_{15}) devem ser quatro ou cinco vezes maior do que 15% do tamanho do solo protegido (D_{15}).

$$\frac{D_{15(F)}}{D_{15(S)}} \geq 4 \text{ a } 5 \quad (2.40)$$

Estudos realizados pela Marinha norte-americana (U.S. Navy (1977)), definiram as seguintes condições, para impedir o deslocamento das partículas do solo protegido:

$$\frac{D_{15(F)}}{D_{85(S)}} \leq 5; \quad \frac{D_{50(F)}}{D_{50(S)}} \leq 25; \quad \frac{D_{15(F)}}{D_{15(S)}} \leq 20 \quad (2.41)$$

Os critérios mencionados pela marinha podem ser aplicados a proteção de todos os solos, exceto para argilas com média ou alta plasticidade, sem areia e silte. Caso seja utilizado pedregulho como material drenante, a relação entre o D_{15}/D_{85} deve ser menor do que 5. Sherard (1963), citado por CEDERGREN (1989), admite ainda outra condição. Segundo ele, quando o solo protegido contém grande porcentagem de material granular, o filtro deve ser projetado baseando-se na porção de solo mais fino que 25 mm (1in), determinado através da curva granulométrica.

O Boletim 95 da ICOLD (1994) recomenda que para filtros finos adjacentes a camadas impermeáveis ou fundação de solo granular fino, é recomendado que se utilize filtro de areia ou areia e pedregulho com tamanho superior a 12,7mm a 19 mm, com 55% a 80% do material passante na peneira 4.

2.3.3.2 Critério de permeabilidade

Os filtros e drenos devem ter a função de escoar a água proveniente do maciço de forma rápida, sem induzir o fluxo a altas forças de percolação e gerar acúmulo de pressão hidrostática. Quando os dispositivos de drenagem são projetados para uma grande capacidade de vazão, a linha de fluxo não atinge a zona acima do dreno, garantindo maior estabilidade ao talude. CEDERGREN (1989) explica que a vazão percolada, que deve ser escoada pelo dreno, deve ser analisada através da rede de fluxo, o qual assume que os drenos possuam permeabilidade infinita.

Para se garantir a permeabilidade dos filtros e drenos, além do critério 2, apresentado no subitem anterior, ter de ser satisfeito, os dispositivos de drenagem devem ser dimensionados adequadamente para suportar a vazão necessária.

2.3.3.3 Dimensionamento da vazão

O dimensionamento do sistema de drenagem deve considerar a pior hipótese. De acordo com CEDERGREN (1989) os dispositivos podem ser determinados de acordo com a Lei de Darcy. Neste caso o que se pretende é determinar a espessura necessária dos filtros e drenos para que a vazão escoe sem causar danos a estrutura.

Para a determinação desta espessura através da Lei de Darcy, primeiramente estima-se as vazões de fluxo que deverão ser percoladas pelos drenos. O gradiente hidráulico permissível depende da relação entre a maior carga (h) que se desenvolve no dreno, sem causar pressão hidrostática elevada, e o comprimento do dispositivo de drenagem. CEDERGREN (1989) menciona que a permeabilidade pode ser estimada através de ensaios de laboratório ou adotando-se valores comerciais dos agregados utilizados.

Para o caso dos drenos franceses, PACHECO (1981) descreveu que o dimensionamento hidráulico foi feito com base nas vazões de percolação obtidas nos estudos realizados para o dreno horizontal de areia, e foram majoradas por um adequado fator de segurança. Já o espaçamento entre eles, foi determinado a partir do máximo valor de carga hidráulica admitida na camada de areia existente entre os drenos, de forma a resultar uma zona de saturação acima do filtro horizontal.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 INTRODUÇÃO

O trabalho de pesquisa consistiu na realização de testes de percolação, em escala reduzida, em barragens de terra dotadas de sistema de drenagem interna com uso de drenos franceses (finger drains). Com base nos resultados dos testes em escala reduzida, foi feita a calibração de modelos numéricos de percolação, baseados no método dos elementos finitos. Os modelos numéricos calibrados permitiram ainda a realização de análises adicionais de percolação, considerando situações não testadas fisicamente.

A primeira etapa da pesquisa consistiu em determinar as características dos materiais que foram utilizados para compor o maciço da barragem e dos drenos franceses. Para tanto foram realizados alguns ensaios laboratoriais para padronização de suas características, os quais foram executados nas dependências do CESEC/UFPR e LACTEC.

A segunda se referiu a construção de quatro modelos físicos de barragens simulando diferentes espaçamentos entre os drenos, com o objetivo de analisar o comportamento do fluxo e avaliar a eficiência dos dispositivos.

E a terceira, representa a modelagem numérica, adotada para a realização dos estudos bidimensionais, através de planos ortogonais, do comportamento do fluxo no interior das barragens, simuladas no modelo físico, utilizando o programa SEEP/W fornecido pelo grupo GeoStudio International Ltda.

3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO MATERIAL

Para atender ao objetivo deste estudo, alguns parâmetros do solo tiveram de ser obtidos através de ensaios de caracterização física. Os materiais utilizados para compor o maciço da barragem e os drenos foram fornecidos por um areal, através da colaboração da empresa Engefoto S.A., possuindo, até então, características desconhecidas.

A seleção de amostras para a realização dos ensaios considerou a finalidade dos materiais e as características específicas dos métodos experimentais, cujos detalhes metodológicos serão descritos a seguir e os resultados apresentados no próximo capítulo. Na Tabela 3.1 é apresentada uma relação dos ensaios de caracterização que foram realizados em cada material.

TABELA 3.1 – Ensaio de caracterização realizados

Ensaio	Areia	Pedregulho
Granulometria	√	-
Sedimentação	√	-
Permeabilidade	√	√
Índice de vazios	√	-
Densidade Real dos grãos	√	√
Cisalhamento direto	√	-
Ensaio de coluna drenante	√	-

Como o fluxo se daria preferencialmente pelo material arenoso, não se julgou necessário a execução de alguns ensaios no pedregulho.

3.2.1 Análise granulométrica

Este ensaio consistiu na determinação do tamanho das partículas presentes no solo, cujo procedimento é normatizado pela ABNT NBR 7181. Segundo a norma, o ensaio pode ser realizado através da combinação dos procedimentos de peneiramento e sedimentação.

De acordo com a ABNT NBR 6502/95, o ensaio de peneiramento consiste em classificar a granulometria dos solos granulares, com tamanhos de partículas maiores que 0,075 mm de diâmetro, e separar os grãos em diversos tamanhos utilizando um conjunto de peneiras padronizadas de aberturas progressivamente menores. O procedimento do ensaio consiste basicamente em secar uma amostra de solo, em estufa, realizar o peneiramento que, neste caso, foi auxiliado por um agitador mecânico, e determinar a massa retida em cada peneira. Para o material com tamanho inferior a 0,075 mm é realizado o ensaio de sedimentação.

O ensaio de sedimentação consiste em determinar a granulometria dos solos finos, considerado os de partícula menor que 0,075 mm de diâmetro, através da

velocidade de queda das partículas do solo em água, correlacionando a velocidade de queda das partículas com seu respectivo diâmetro. O procedimento do ensaio consiste basicamente em preparar a amostra, no mínimo 12 horas antes do início das leituras, adicionando-se uma solução química defloculante, para a separação dos grãos. Em seguida, coloca-se a solução no dispersor por um tempo de 30 min. e despeja-se o líquido em uma proveta graduada para a realização das leituras. O densímetro é então colocado na suspensão de solo por um tempo t , determinado a partir do início do ensaio de sedimentação, e feito a leitura dos pesos específicos, o qual representa a quantidade de solo que se encontra em suspensão. Feito as leituras, o material da proveta é despejado em uma peneira 0,075 mm e lavado, a fim de se realizar o peneiramento fino do solo.

Para finalizar, os ensaios devem ser representados graficamente através da curva de distribuição granulométrica.



FIGURA 3.1 – Ensaio de sedimentação

No caso específico desta pesquisa o ensaio de granulometria foi realizado somente para a areia, o qual foi utilizada para compor o maciço da barragem, pois havia a necessidade de conhecer os seus componentes, que poderiam influenciar significativamente na condutividade hidráulica do maciço. Como a areia selecionada para o modelo físico possuía material com diâmetro de grãos superior e inferior a 0,075 mm, o mesmo foi submetido ao ensaio de peneiramento, para o material com granulometria maior que 0,075 mm, e sedimentação, para material com granulometria menor que 0,075mm.

3.2.2 Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade é descrito pela norma da NBR 13292. O equipamento utilizado consistiu em um permeâmetro de carga constante de parede rígida, formada por um tubo de plástico, um reservatório, piezômetros no topo e na base do permeâmetro e um dispositivo de descarga de vazão.

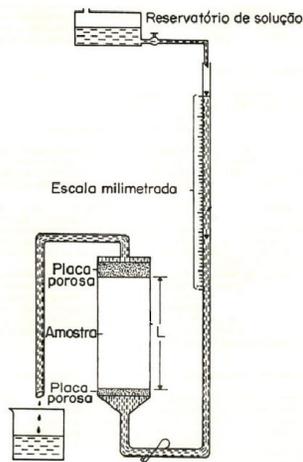


FIGURA 3.2 – Esquema do permeâmetro de carga constante

FONTE: Ellert (1988)

O ensaio consistiu em depositar no interior do permeâmetro a amostra do material, através de um funil e uma mangueira flexível acoplada na abertura inferior do mesmo, o qual permitiu a deposição homogênea do material. Em seguida foi adicionado água na amostra até a saturação da mesma e estabilização do nível d'água. Por se tratar de um ensaio de carga constante a amostra foi submetida a uma mesma carga hidráulica durante o ensaio. Com o auxílio de uma proveta graduada, foi coletada a água percolada pela amostra, por um determinado período de tempo, e efetuado a leitura da vazão. O coeficiente de permeabilidade foi, então, obtido através da relação entre a vazão e o tempo de escoamento.

No caso desta pesquisa foram feitas duas leituras para a areia e três para o pedregulho, a fim de se obter um resultado mais aproximado e coerente.

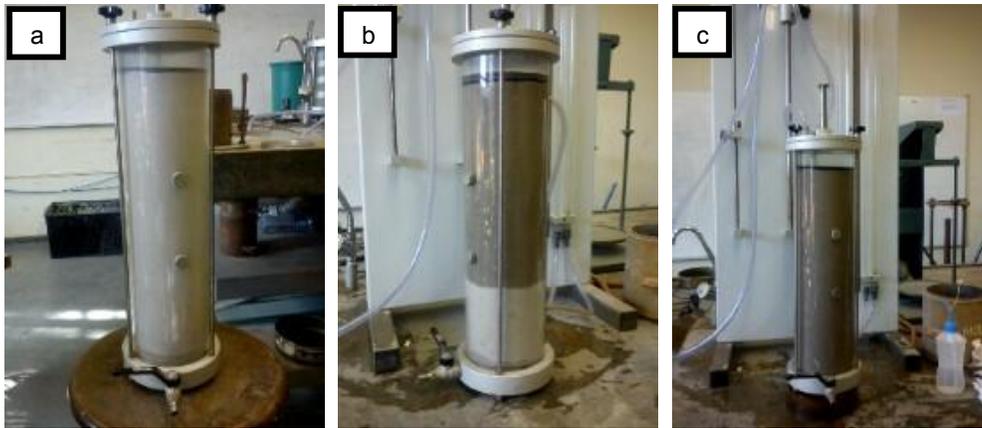


FIGURA 3.3 – Etapas do ensaio de permeabilidade da areia

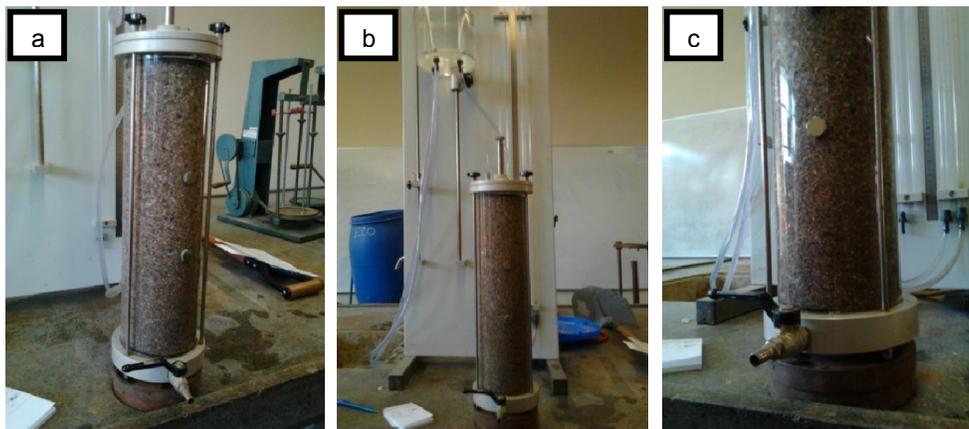


FIGURA 3.4 – Etapas do ensaio de permeabilidade do pedregulho

3.2.3 Compacidade

A característica referente aos índices de vazios máximos e mínimos em solos não coesivos representa o parâmetro básico para a avaliação do estado de compacidade do solo, correspondendo a relação entre o volume de vazios e o volume dos sólidos existente em igual volume de solo, cuja finalidade é indicar a variação volumétrica do mesmo ao longo do tempo.

Os ensaios para a determinação destes índices são descritos pelas normas NBR 12004/90 e NBR 12051/91. Segundo estas normas, quando o solo encontra-se no seu estado mais fofo, diz-se que o mesmo apresenta um índice de vazios máximo e quando o solo encontra-se no seu estado mais compacto, este apresenta índice de vazios mínimo.

A determinação do índice de vazios mínimo consiste em despejar a amostra de solo, previamente seca em estufa, no interior de um cilindro de Proctor, com o auxílio de um funil, de forma que, depois de submetido à vibração, haja um excesso de 1 a 2

cm acima do topo do molde. Fixa-se então o conjunto na mesa vibratória, colocando o disco base sobre a superfície da amostra. Após a vibração, a norma recomenda que o excesso seja rasado com uma régua e pesado. Para a determinação do índice de vazios máximo, o solo é levemente depositado com o auxílio de um funil, de forma que os grãos não sejam compactados e em seguida a amostra é pesada.

Em ambos os casos foram efetuados quatro amostragens. Os índices de vazios foram obtidos através da relação entre o peso específico seco do material e peso específico aparente seco do mesmo, menos o volume de sólidos do solo, que representa um, representada pela expressão 3.1.

$$e = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_d} \right) - 1 \quad (3.1)$$

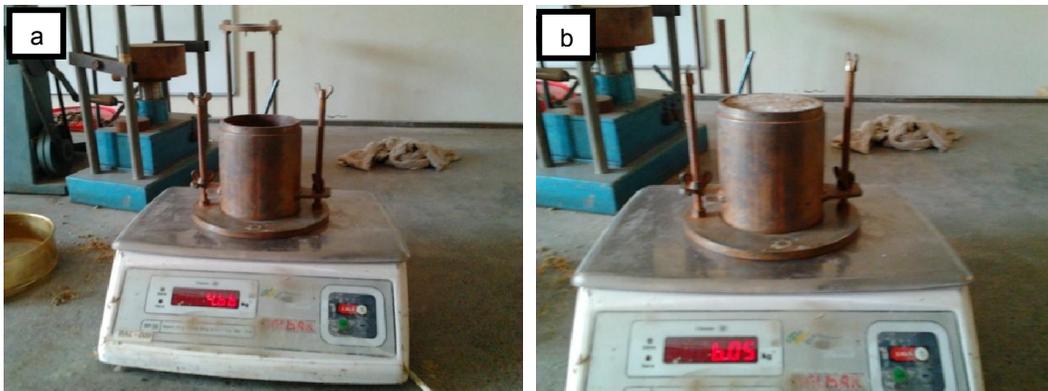


FIGURA 3.5 – Pesagem do solo para determinação do índice de vazios

No caso desta pesquisa, este ensaio foi realizado somente para a areia, com o objetivo de fornecer informação referente a compacidade da mesma para a execução da deposição do material da barragem através do método de chuva de areia, garantindo, assim, que o ensaio de permeabilidade fosse efetuado na mesma condição que as simulações do modelo reduzido. Desta maneira, não houve a necessidade de padronizar a deposição do pedregulho, pois admitiu-se que as pressões atuantes no dreno seriam muito próximas da atmosférica, independentemente do índice de vazios, já que a permeabilidade deste deve ser maior que no maciço.

3.2.4 Determinação de densidade real dos grãos

A determinação da densidade real dos grãos é descrita pela DNER-ME 093/94. Segundo a norma o procedimento do ensaio é realizado da seguinte maneira: primeiramente pesa-se o picnômetro vazio. Em seguida, é adicionada a amostra de

solo e este é pesado novamente. No mesmo picnômetro coloca-se água destilada, cobrindo a amostra, devendo este ser aquecido por pelo menos 15 min. para garantir que não haja ar entre as partículas de solo. Logo após, o picnômetro deve ser esfriado em temperatura ambiente e completado com água destilada e colocado em um banho de água, também em temperatura ambiente, por mais 15 min. Acopla-se a rolha perfurada de modo que a água aflore na parte superior da mesma. O picnômetro deve ser então, pesado e a água do banho deve ter sua temperatura medida. Por ultimo, todo o material deve ser removido e depois completado novamente com água destilada e pesado.

A densidade real dos grãos é obtida através da relação a seguir:

$$G = \frac{M_2 - M_1}{(M_4 - M_1) - (M_3 - M_2)} \quad (3.2)$$

Sendo, G a densidade real dos grãos, M1 a massa (g) do picnômetro vazio seco, M2 a massa do picnômetro + solo (g), M3 a massa do picnômetro + solo + água (g), M4 a massa do picnômetro + água (g).

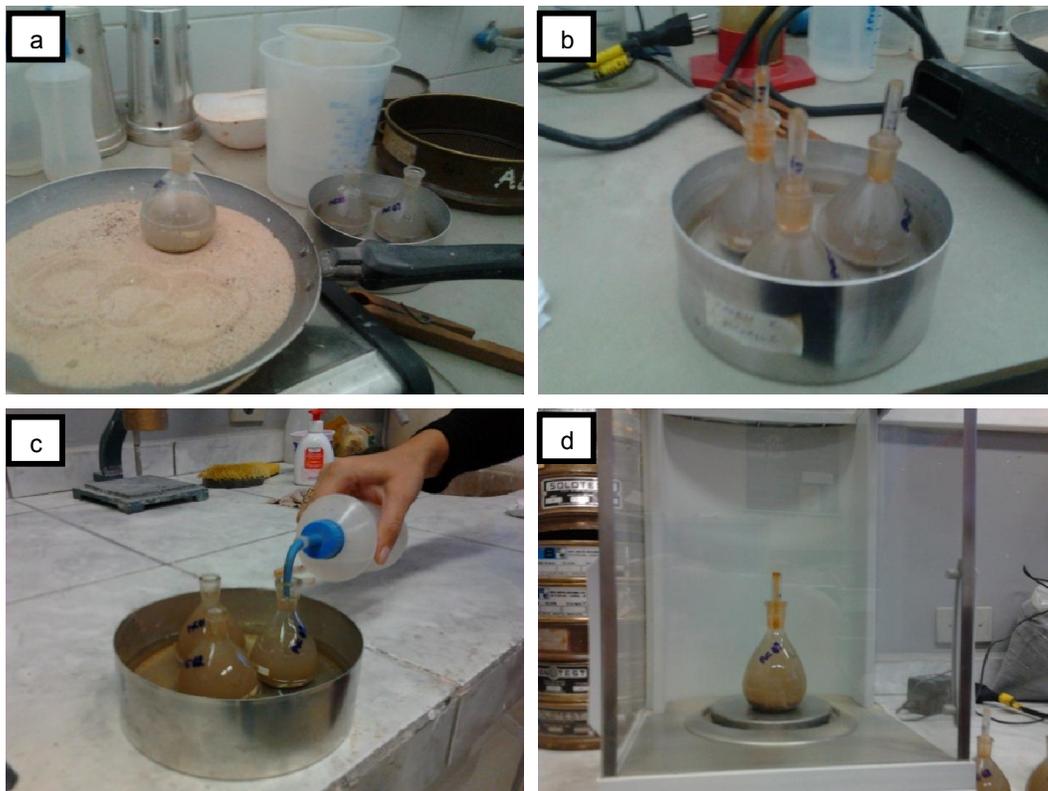


FIGURA 3.6 – Ensaio de densidade real dos grãos: a) etapa de aquecimento; b e c) etapa de resfriamento das soluções inseridas nos picnômetros; d) pesagem do picnômetro

Da mesma forma que para o ensaio de compactação, somente a areia foi ensaiada. A justificativa para este caso também se refere ao fornecimento de informação para a deposição do material pelo método de chuva de areia, não sendo necessária a padronização do pedregulho.

3.2.5 Ensaio de cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto tem como principal objetivo medir a resistência ao cisalhamento do solo, aplicando-se uma tensão normal e tangencial ao plano. No caso desta pesquisa foi utilizada a norma descrita pela BS 1377-7/9.

O procedimento consistiu em moldar um corpo de prova, parcialmente, dentro de uma caixa de cisalhamento de metal quadrada, dividida horizontalmente em duas metades, o qual foi posicionada no equipamento. A amostra foi saturada, a fim de obter a resistência cisalhante do solo em meio drenado, dando-se início, então, ao carregamento de uma força vertical N , a partir do topo da caixa, com velocidade baixa, que neste caso correspondeu a 0,30 mm/min, para que ocorresse a dissipação das poropressões presentes no interior do solo. Em seguida foi aplicada uma força cisalhante T movendo uma metade da caixa, em relação a outra, e conseqüentemente provocando o deslocamento dos grãos, resultando na força que romperá o solo.

O resultado das tensões atuantes (τ e σ) no solo foi obtido dividindo-se as forças T e N pela seção transversal do corpo de prova, podendo estes valores ser plotados em gráficos para a representação da variação da altura do corpo de prova e deslocamento cisalhante do solo.

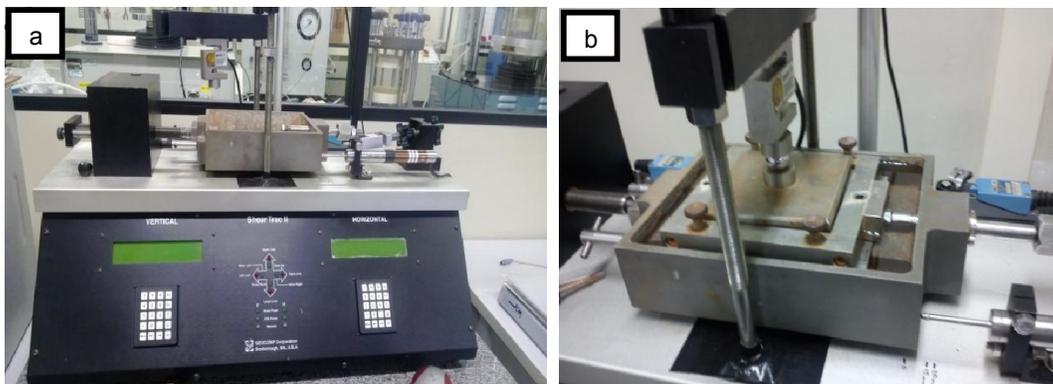


FIGURA 3.7 – Ensaio de cisalhamento direto: a) equipamento; b) processo de aplicação da força horizontal

3.2.6 Ensaio de coluna drenante

Este ensaio tem por objetivo a determinação da CRUS (Curva de retenção de umidade do solo) através dos processos de umedecimento e secagem do solo. O equipamento utilizado (Figura 3.11) foi adaptado por Dell'Avanzi e Furlan (2007) e consiste basicamente em um sistema de três colunas conjugadas e comunicantes pela base, sendo a central utilizada para a moldagem da amostra de solo, controladores de velocidade de descarga aplicados no topo e na base da coluna, um sistema de manutenção do nível d'água na base da amostra, chave de controle de vazão e sensores de umidade ao longo da coluna, sendo este último opcional.

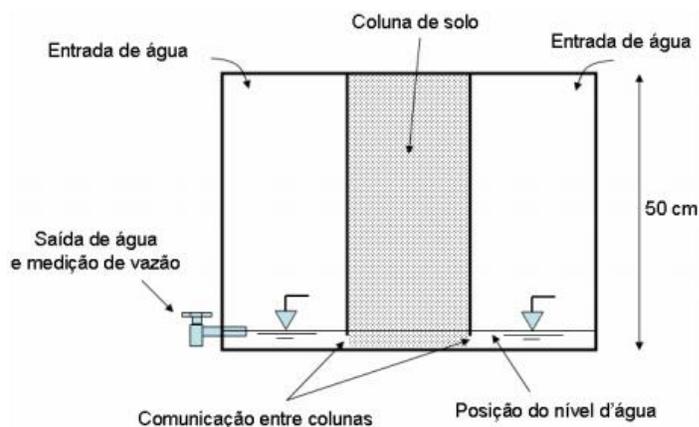


FIGURA 3.8 – Esquema da coluna drenante

FONTE: Dell'Avanzi e Furlan (2007)

A realização do ensaio consistiu em moldar a amostra na coluna intermediária através do procedimento de chuva de areia utilizando um funil, o qual permitiu que o material fosse depositado uniformemente a uma altura de queda pré-determinada, mantendo a mesma compactidade estabelecida nos ensaios de índice de vazios.

A água foi então colocada mantendo-se o nível d'água em aproximadamente dois centímetros de altura durante o ensaio até se verificar a estabilização da altura capilar no perfil da amostra de solo, determinado como ciclo de umedecimento. Ao final do procedimento, são coletadas amostras de alturas pré-determinadas. A CRUS é obtida através da relação entre o teor de umidade com a respectiva altura capilar definida durante a amostragem do solo.

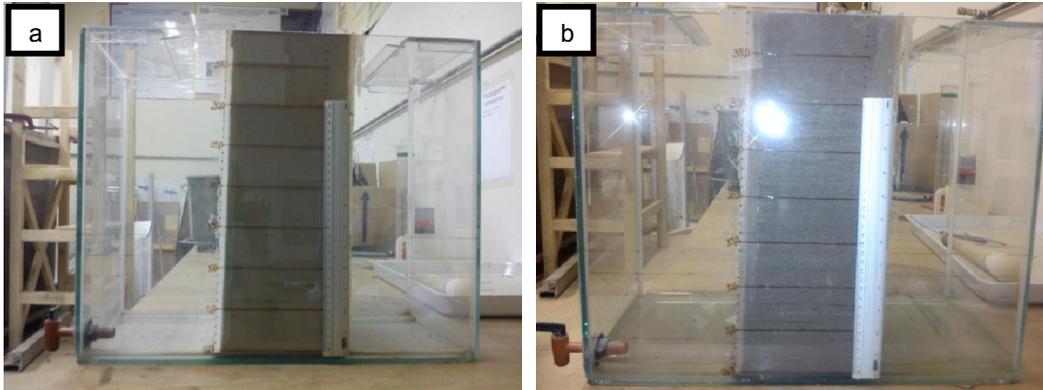


FIGURA 3.9 – Etapas do ensaio de coluna drenante. A primeira representa a modelagem da amostra de solo. A segunda representa a amostra saturada e o nível d'água estabilizado

3.3 MODELO EM ESCALA REDUZIDA

A modelagem física representa uma ferramenta muito útil para o estudo em barragens. Pelo fato destas estruturas possuírem uma grande quantidade de características, torna-se mais fácil o seu estudo mediante uma análise tridimensional e real das condições.

Geralmente a escolha por analisar um caso através de modelo reduzido se deve a dificuldade em prever as condições e os efeitos de uma obra. Devido a grande eficácia da transmissão dos resultados obtidos em modelo reduzido para os protótipos, os primeiros ganham grande confiabilidade. Entretanto, este processo deve ser feito com muito cuidado e critério (Rocha, 2006).

O modelo reduzido realizado nesta pesquisa visa simular o comportamento do fluxo no maciço da barragem mediante a utilização de drenos franceses, como sistema de drenagem interna, com diferentes espaçamentos entre si.

3.3.1 Características físicas do modelo

Os materiais utilizados para compor o corpo da barragem e dos drenos foram ensaiados em laboratório a fim de obter as suas respectivas características físicas, sendo que para o primeiro foi utilizado areia fina e para o segundo, pedregulho.

A construção do modelo físico foi executada no interior de uma caixa metálica com dimensões de 2,50 m de comprimento, 44 cm de largura e 60 cm de altura, sendo instalado na parte frontal um paramento de acrílico para possibilitar a visualização do

comportamento da água no interior da barragem e dos drenos durante as simulações (Figura 3.10 - a). Como o objetivo do estudo se refere a análise do fluxo mediante diferentes espaçamentos entre os drenos, foram instalados perfis metálicos nas duas chapas laterais, na parte interna da caixa, possibilitando a inserção de uma chapa metálica sobressalente, possibilitando a diminuição da largura do modelo (Figura 3.1 - b).



FIGURA 3.10 – a) Caixa metálica; b) Caixa metálica com chapa divisória para simulação do espaçamento menor entre os drenos

Com relação à instrumentação, alguns piezômetros de tubo aberto foram instalados com a finalidade de medir das poropressões no interior da barragem e verificar quaisquer indicio de irregularidade no maciço.

Os piezômetros consistiram em mangueiras de polietileno com 3 mm de diâmetro interno, os quais foram instalados na chapa de aço, da base da caixa, atravessando-a, e sendo fixados no painel de leitura localizado na parede lateral do modelo (Figura 3.11 - a). A extremidade de entrada de cada piezômetro foi revestida com papel filtro e geotêxtil não-tecido (Figura 3.11 - b), para garantir que não houvesse entrada de material fino que pudesse prejudicar as leituras.

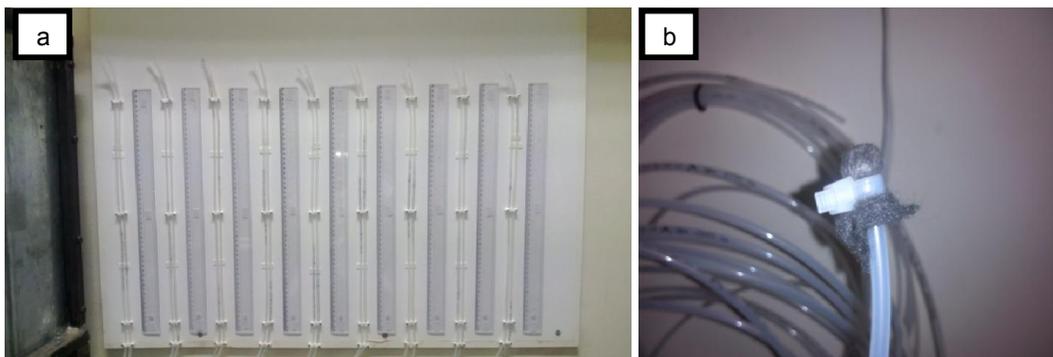


FIGURA 3.11 – a) Painel de leitura; b) Geotêxtil na extremidade do piezômetro

No total, 18 piezômetros foram posicionados nas laterais direita e esquerda e no centro da barragem, distribuídos entre os taludes de montante, jusante e crista. O esquema da Figura 3.12 apresenta o posicionamento dos mesmos.

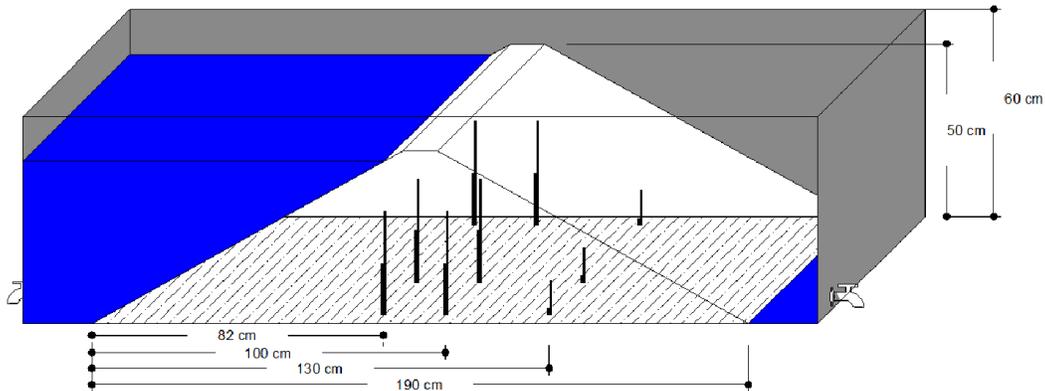


FIGURA 3.12 – Esquema de posicionamento dos piezômetros no interior da barragem

Em cada posição, demonstrada na Figura 3.12, foram instalados dois piezômetros com alturas variando entre 15 cm e 30 cm, para os do talude de montante e crista, e 2 cm e 10 cm, para os do talude de jusante.

Para facilitar a leitura foi adotada uma nomenclatura, cuja sigla determina a respectiva posição e altura de cada piezômetro instalado. Esta, por sua vez, contém duas letras, sendo que a primeira define a posição transversal da barragem, ou seja, se o mesmo se encontra na transversal da frente (F), meio (M) ou atrás (A). A segunda se refere a posição no sentido do fluxo, o qual pode ser à montante (M), crista (C) ou à jusante (J). A numeração representa a altura do piezômetro. O esquema da Figura 3.13 demonstra a posição de cada instrumento e a nomenclatura adotada.

Para simplificar o estudo do comportamento do fluxo as leituras piezométricas foram analisadas por seções transversais da barragem, sendo S1 a seção na frente do modelo (próximo ao acrílico), S2 no meio do modelo e S3 no fundo, próximo à lateral metálica. O esquema de posicionamento das seções transversais também é demonstrado na Figura 3.13.

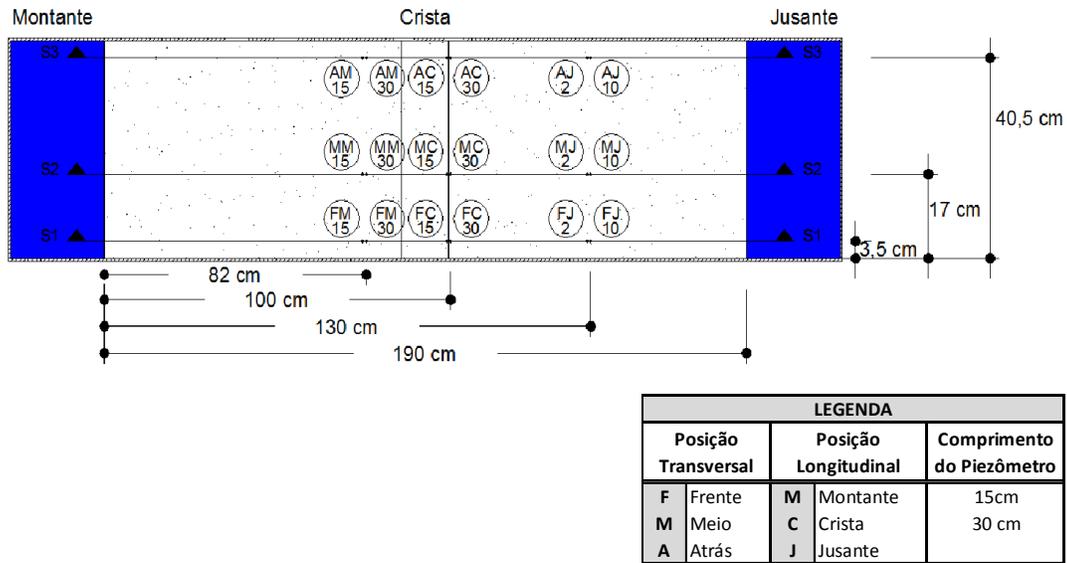


FIGURA 3.13 – Esquema de posicionamento dos piezômetros no interior da barragem e das seções transversais

Para simplificar o estudo do comportamento do fluxo as leituras piezométricas foram analisadas por seções transversais da barragem, sendo S1 a seção na frente do modelo (próximo ao acrílico), S2 no meio do modelo e S3 no fundo, próximo à lateral metálica.

3.3.2 Metodologia do ensaio

O procedimento para a realização da modelagem reduzida consistiu em executar quatro barragens com cada uma simulando um sistema de drenagem interna específica.

A geometria do modelo físico foi primeiramente determinada através da análise de estabilidade utilizando o método numérico. Desta forma as dimensões obtidas para a barragem foram 190 cm de base, 10 cm de crista e 50 cm de altura. Para os drenos franceses foi admitida seção trapezoidal, como recomendada pela literatura, com dimensão de 6 cm (base) x 3 cm (topo) x 3 cm (altura) e comprimento de 50 cm. A Tabela 3.2 apresenta a relação das simulações efetuadas e suas respectivas características.

TABELA 3.2 – Relação das simulações realizadas

Modelo	Dispositivo de drenagem	Espaçamento (S) (cm) *	Área de drenagem (cm ²)
1	Tapete drenante	-	132
2	1 dreno francês	88 cm	13,5
3	2 drenos franceses	44 cm	27
4	3 drenos franceses	22 cm	54

*Este item se refere ao espaçamento simulado entre os drenos

Primeiramente a modelagem consistiu na implantação dos drenos utilizando uma régua para delimitar as suas dimensões. O pedregulho foi então depositado, similarmemente, através do método de chuva de areia utilizando um funil, com uma saída proporcional ao tamanho dos grãos. Em seguida a areia foi depositada, também utilizando um funil, para manter a vazão constante e altura de queda fixada em 12 cm (adotada de acordo com os ensaios realizados). A princípio, o método mostrava-se adequado, mas não satisfatório, pois o processo era muito lento. Buscando otimizar-lo, foi necessário adaptar um pote (tupperware) com vários furos e uma haste em cada canto, que serviu de gabarito, permitindo uma vazão maior e mesma altura de queda, possibilitando o mesmo arranjo uniforme dos grãos. Para a modelagem da inclinação dos taludes foi utilizado um funil, para um melhor controle da vazão.

Antes do início do enchimento do reservatório foi necessário saturar os piezômetros. Por questões técnicas preferiu-se executar este procedimento após a deposição da areia, pois não foi possível manter os mesmos saturados até o final da chuva de areia devido ao fenômeno de sucção. A princípio tentou-se utilizar um permeâmetro que por carga de pressão expulsaria o ar presente no tubo e manteria o mesmo saturado. Contudo, ao desinstalar o equipamento para saturar outro piezômetro, mesmo com a vedação da saída do tubo, novamente o efeito de sucção da areia ocorreu e permitiu a entrada de ar. Por fim, optou-se por manter os piezômetros “saturando” até o final do enchimento do reservatório da barragem, da seguinte maneira: em dois reservatórios (tupperwares) foram feitos furos e adaptados torneiras utilizadas em aquário, pois possibilitam a entrada de água, mas não de ar. Na saída das torneiras foram instalados os piezômetros (Figura 3.14). Com os reservatórios mantidos cheios de água, os instrumentos mantinham-se saturados a

medida que o reservatório da barragem enchia. Quando o nível d'água deste atingisse a altura desejada e o solo estivesse saturado até a altura dos piezômetros, as torneiras eram desligadas e os tubos desconectados das mesmas, mantendo-se assim a saturação dos piezômetros.



FIGURA 3.14 – procedimento utilizado para saturação dos piezômetros

Dando início a percolação da água pelo maciço e extravaso pelos drenos, o dispositivo de descarga de vazão, localizado a jusante, foi aberta e medida a vazão da barragem, por um tempo t , utilizando uma proveta graduada. Após a estabilização do fluxo, as leituras dos piezômetros foram realizadas e o fluxo analisado.

3.4 MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem numérica representa a simulação de um processo físico real, sendo muito útil para a comparação de situações e parâmetros que não são possíveis de se realizar em protótipos, proporcionando maior confiabilidade dos resultados. A validação do modelo computacional foi realizada através da comparação com os resultados obtidos no modelo reduzido.

3.4.1 Características do modelo

As análises paramétricas referentes ao comportamento do fluxo, apresentadas ao longo desta pesquisa, foram realizadas com o auxílio do programa SEEP/W

fornecida pelo grupo GeoStudio. Basicamente, o programa utiliza o método de elementos finitos, cujo conceito é baseado em subdividir uma região em elementos, e descrever o comportamento de cada um separadamente. A interligação destes elementos constitui uma malha, o qual possibilita a determinação do comportamento geral da estrutura.

O programa é simples e permite que seja modelado o movimento da água em materiais saturados e não saturados, além da distribuição de poropressão, tanto em solos quanto em rochas, podendo ainda ser consideradas as propriedades de cada material assim como as condições de contorno do modelo.

3.4.2 Metodologia

A simulação de barragens por meio de análise tridimensional torna-se necessária quando os resultados obtidos de forma bidimensional não representam as situações reais de campo.

A modelagem através do método numérico consistiu em analisar as quatro barragens simuladas no modelo reduzido, descritas anteriormente, e realizar análises paramétricas adicionais que não foram possíveis de ser efetuadas através da modelagem física, variando alguns parâmetros como comprimento dos drenos e espaçamento entre os mesmos. Também foram realizadas simulações comparativas utilizando o sistema de drenos franceses associado a outro tipo de sistema de drenagem. Os resultados obtidos serviram de base para comparação entre os dois tipos de dispositivos de drenagem e avaliação da eficiência dos mesmos.

As características geométricas do maciço foram obtidas através do programa SLOPE/W, o qual possibilitou a análise da estabilidade dos taludes de montante e jusante da barragem, para o estado final de construção. Em seguida deu-se início as análises do fluxo, através do SEEP/W.

As análises de comportamento do fluxo consistiram, primeiramente, em determinar a linha de fluxo da barragem através do método gráfico proposto por Kozeny, mencionado anteriormente, para se ter o conhecimento prévio do posicionamento da linha freática. Em todas as barragens foram feitas três seções longitudinais nas linhas dos piezômetros, com relação ao dreno, como apresentada na Figura 3.15, separando-as em seção da frente (S1), meio (S2) e atrás (S3), de acordo com as nomenclaturas adotadas no modelo reduzido, obtendo-se assim uma suposta linha de fluxo no interior da barragem. Como o método de Kozeny representa uma aproximação, a mesma teve de ser ajustada de acordo com as leituras piezométricas

encontradas no modelo físico. Embora estas seções sejam transversais da barragem, estas foram adotadas como longitudinais, nas análises numéricas desta pesquisa, pois se referem ao posicionamento do dreno. Desta forma, as seções transversais da barragem analisadas no modelo reduzido, correspondem as mesmas seções longitudinais analisadas no modelo numérico.

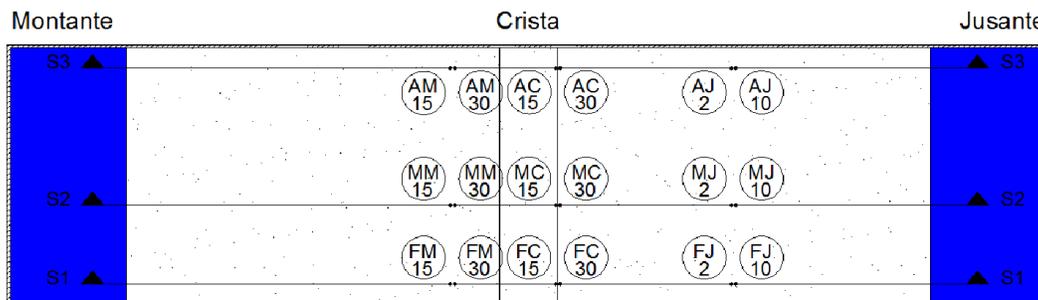


FIGURA 3.15 – Esquema de posicionamento das seções longitudinais

Após a determinação gráfica das linhas de fluxo as barragens foram modeladas através do método numérico. As propriedades adotadas para os materiais foram às mesmas encontradas nos ensaios de caracterização física, e estão descritas na Tabela 3.3.

TABELA 3.3 – Característica adotadas para os materiais

Material	Permeabilidade (k) (cm/s)	Ângulo de atrito (ϕ)	Densidade (γ) (kN/m ³)
Areia	$1,1 \times 10^{-2}$	30°	25
Pedregulho	$2,0 \times 10^0$	34°	24

As análises numéricas foram realizadas dividindo o procedimento em três etapas:

Etapa 1 – Imposição das alturas piezométricas

As barragens foram modeladas impondo as alturas piezométricas como condições de contorno, considerando a relação do coeficiente de permeabilidade horizontal e vertical (k_z / k_x) igual a 1.

Etapa 2 – Determinação da relação k_z / k_x

Nesta etapa não foram impostas as alturas piezométricas nas simulações, com a finalidade de se obter a relação k_z / k_x que melhor adequasse a superfície freática desta com o resultado obtido graficamente, comparando esta análise com a primeira.

Etapa 3 – Análises paramétricas

A partir da relação k_z / k_x obtida na etapa anterior, foram feitas algumas análises paramétricas simulando drenos com diferentes comprimentos, alternando também o espaçamento entre eles, o qual pôde ser possível através da simulação de diferentes larguras de barragem. O objetivo desta análise foi basicamente demonstrar que este tipo de situação pode influenciar significativamente no comportamento do fluxo e verificar a eficiência dos dispositivos de drenagem. A Tabela 3.4 apresenta a relação das análises paramétricas realizadas através do método numérico. Ainda, como a literatura menciona a implantação de drenos franceses associados a outros dispositivos, foram realizadas algumas simulações visando analisar o comportamento do fluxo e avaliar a eficiência da combinação dos sistemas de drenagem.

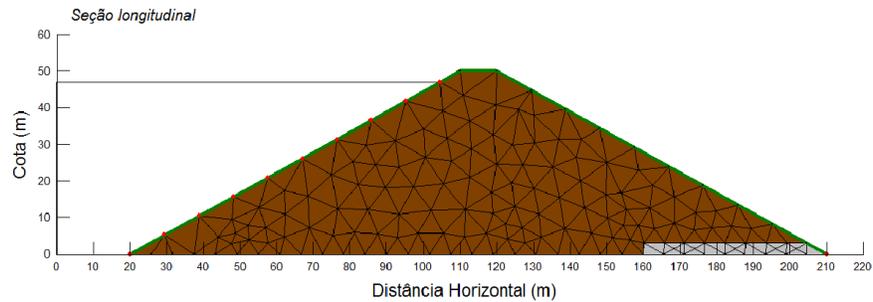
TABELA 3.4 – Parâmetros utilizados para comparação das barragens

L ¹ (cm)	C ² (cm)
44	50
44	70
44	95
72	50
72	70
72	95
100	50
100	70
100	95

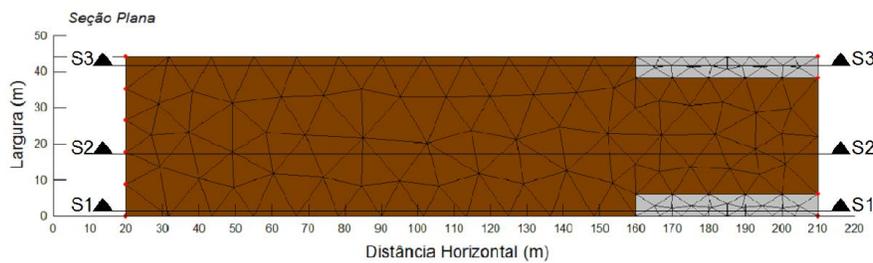
¹ L = largura da barragem; ² C = Comprimento do dreno

O comportamento do fluxo no interior do maciço foi analisado bidimensionalmente através de planos ortogonais (xz , xy e yz). A seção no plano xz corresponde às seções longitudinais da barragem (Figura 3.16 – a), com relação ao

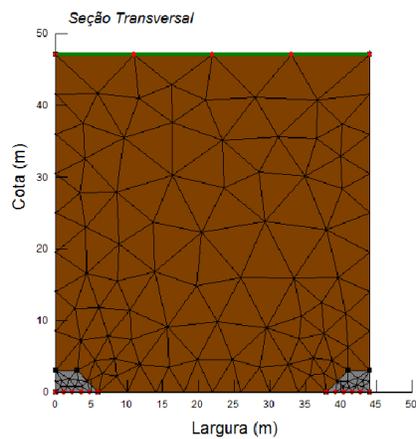
dreno, posicionadas nas linhas dos piezômetros, igualmente para a solução do método gráfico, obtendo-se três seções (S1, S2 e S3), como apresentado na Figura 3.16 (b). A seção no plano xy corresponde à projeção das equipotenciais ao longo da superfície freática no plano horizontal (seção plana) (Figura 3.16 – b). A seção no plano yz representa à projeção das equipotenciais ao longo da superfície freática no plano vertical como apresentado na Figura 3.16 (c). Esta ultima foi adotada como seção transversal, pois se refere a transversal do dreno.



a) Plano ortogonal XZ - seção longitudinal



b) Plano ortogonal XY - Seção plana



c) Plano ortogonal YZ - Seção transversal

FIGURA 3.16 – Seções de análise bidimensional em planos ortogonais

A obtenção das seções plana e transversal é representada na Figura 3.17. As seções representam os pontos de interseção entre as equipotenciais e a superfície freática.

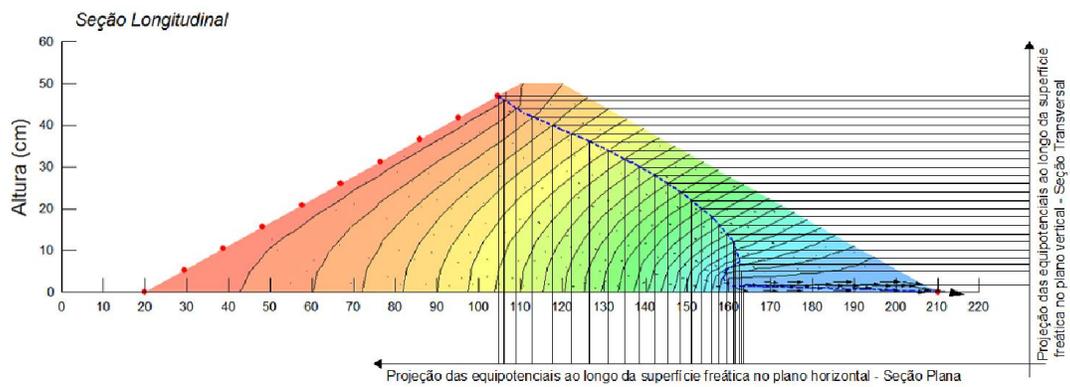


FIGURA 3.17 – Representação da obtenção das seções plana e transversal

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nas modelagens descritas no capítulo anterior e suas respectivas análises. Como o objetivo desta pesquisa é avaliar o comportamento do fluxo percolado através de barragens utilizando drenos franceses, como dispositivo de drenagem, os materiais foram caracterizados e utilizados nas modelagens.

4.1 CARACTERÍSTICAS DO SOLO

4.1.1 Análise granulométrica

Como apresentado no capítulo anterior, a análise granulométrica da areia consistiu na realização do ensaio de peneiramento e sedimentação. Este procedimento foi adotado devido a grande quantidade de material fino presente na areia, o qual necessitava ser caracterizado, pois poderia influenciar significativamente no comportamento do fluxo. O resultado desta análise é apresentado através da curva granulométrica na Figura 4.1.

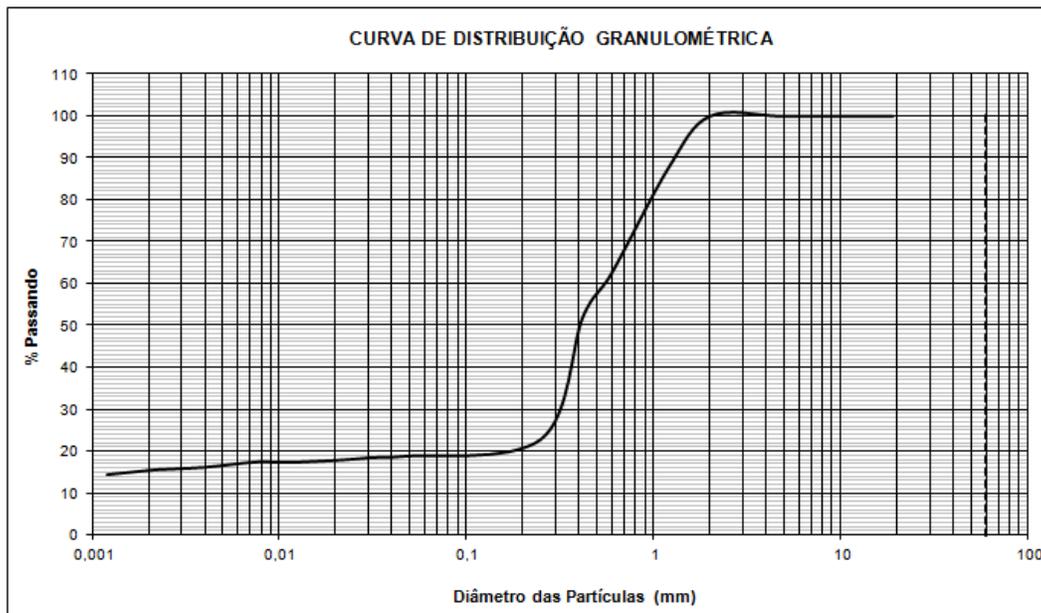


FIGURA 4.1 – Curva de distribuição granulométrica

De acordo com o gráfico, os diâmetros das frações de areia, silte e argila, têm suas porcentagens descritas na tabela a Tabela 4.1, demonstrando que a maior fração é composta por areia, com 79,2%.

TABELA 4.1 – Porcentagem das partículas de solo

AREIA	SILTE	ARGILA
79,20%	5,40%	15,40%

A determinação da granulometria adequada para compor o maciço da barragem e os drenos, foi obtida através do ensaio de permeabilidade.

4.1.2 Permeabilidade

O ensaio teve como objetivo definir o valor do coeficiente de permeabilidade dos materiais que comporiam a barragem e os drenos.

A determinação deste parâmetro consistiu na realização de dois ensaios para a areia, adotando material com granulometria inferior a 2,0 mm. O resultado obtido foi uma condutividade hidráulica média de 1×10^{-2} cm/s.

Para os drenos seria necessário que a permeabilidade obedecesse ao critério de dimensionamento, adotando material que fosse duzentas vezes mais permeável que o solo. Nestas condições, foi realizado um ensaio com pedregulhos de diâmetro variando entre 4,8 mm e 9,5 mm, obtendo-se um coeficiente de $1,1 \times 10^1$ cm/s, o qual apresentou uma permeabilidade mil vezes maior. Sendo este desconsiderado, foram realizados quatro ensaios adotando granulometria entre 2 mm e 4,8 mm, cujos resultados obtiveram uma permeabilidade média de 2×10^0 cm/s, o qual obedecia ao critério desejado. A Tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos para ambos os materiais.

TABELA 4.2 – Resultado dos ensaios de permeabilidade

AREIA ($\phi < 2,0$ mm)		PEDREGULHO ($2,0\text{mm} < \phi < 4,8\text{mm}$)	
Ensaio	k (cm/s)	Ensaio	k (cm/s)
1	1×10^{-2}	1	$2,0 \times 10^0$
2	1×10^{-2}	2	$1,7 \times 10^0$
Média	1×10^{-2}	3	$1,6 \times 10^0$
		4	$2,3 \times 10^0$
		Média	$1,9 \times 10^0$

4.1.3 Compacidade

Nesta pesquisa, como o fluxo pela barragem é governado principalmente pela areia, a compacidade foi determinada somente para este material. Como explicado anteriormente, os índices de vazios foram realizados para fornecer informações referentes à deposição da areia pelo método da chuva de areia. Desta forma não se julgou necessário a determinação deste parâmetro para o pedregulho, visto que a permeabilidade desse é maior que a da areia.

Os ensaios realizados indicaram que o índice de vazios máximo da areia é igual a 0,73 e o mínimo igual a 0,61.

Através da determinação do índice de vazios mínimo foi realizada a calibração da altura da chuva de areia e obtenção do peso específico aparente da mesma. O ensaio para a calibração consistiu na moldagem de três amostras utilizando alturas de queda diferentes, cujo valor médio do peso específico aparente seco obtido é apresentado na Tabela 4.3.

TABELA 4.3 – Avaliação do peso específico em função da altura de queda

Altura de queda (cm)	γ (g/cm ³)
5	1,50
10	1,58
23,5	1,66

O gráfico apresentado na Figura 4.2 mostra a relação entre o peso específico e as diferentes alturas de queda.

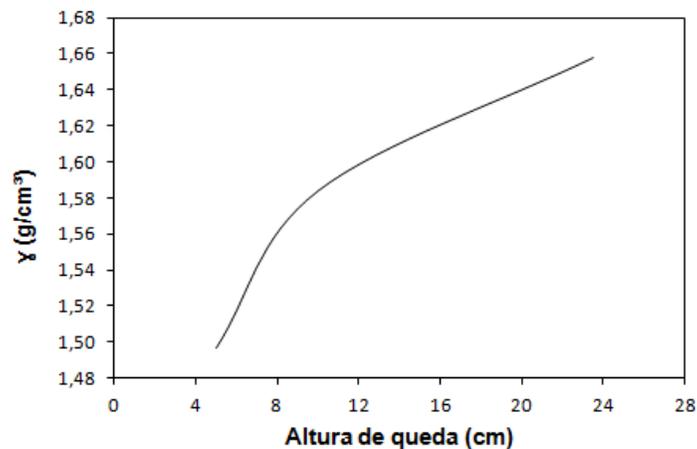


FIGURA 4.2 – Relação de altura de queda e γ

A partir do valor do peso específico médio obtido nos ensaios de índice de vazios mínimo, o qual corresponde a $1,60 \text{ g/cm}^3$, foi adotada uma altura de queda de 12 cm.

4.1.4 Determinação da densidade real dos grãos

Os resultados obtidos para a densidade real dos grãos foram de $2,50 \text{ g/cm}^3$ para a areia e $2,43 \text{ g/cm}^3$ para o pedregulho. Embora os procedimentos dos ensaios tenham sido seguidos, os valores apresentaram-se abaixo do esperado para um material composto por quartzo, o qual possui valor em torno de $2,65 \text{ g/cm}^3$.

4.1.5 Ensaio de cisalhamento direto

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento foram estimados através do ensaio de cisalhamento direto. O ensaio consistiu em moldar três corpos de prova utilizando o método de chuva de areia, com altura de queda de 12 cm, e submetê-los a tensões normais de 20kPa, 40kPa e 80kPa sob condição de saturação. Visto que a areia é um material bastante permeável, a fase de adensamento durou aproximadamente 30 min. Durante a fase de cisalhamento foi adotada uma velocidade de 0,30mm/min, garantindo uma condição totalmente drenada para o cisalhamento.

Embora o procedimento para a realização do ensaio tenha sido seguido, os resultados obtidos demonstraram que o equipamento utilizado estava calibrado com carga inicial de 34kPa. Desta maneira, cargas aplicadas tiveram de ser ajustadas conforme a calibração do equipamento. Neste caso as cargas de 20kPa, 40kPa e 80kPa representam as cargas de 54kPa, 74kPa e 114kPa, respectivamente. A envoltória de resistência obtida é apresentada na Figura 4.3.

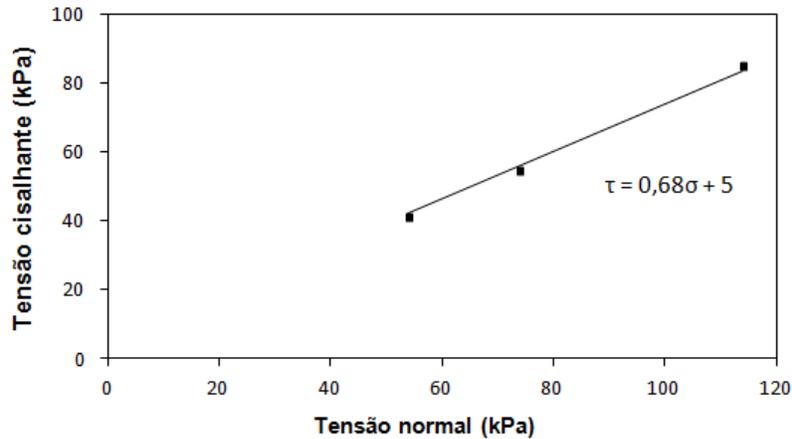


FIGURA 4.3 – Resistência de cisalhamento do solo

Com o ensaio de cisalhamento pode ser obtido o valor do ângulo de atrito da areia da ordem de 34° . Para a determinação do ângulo de atrito do pedregulho não foi realizado o ensaio de cisalhamento. Neste caso, o material foi depositado em uma bandeja e medido o ângulo de atrito conforme a disposição natural dos grãos (Figura 4.4), o qual obteve magnitude de 36° .

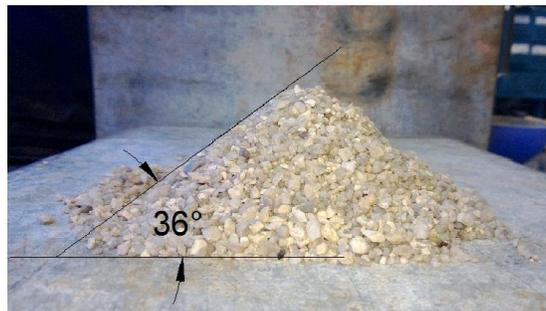


FIGURA 4.4 – Ângulo de atrito do pedregulho

4.1.6 Ensaio de coluna drenante

A curva de retenção de umidade do solo (CRUS) foi determinada através do ensaio de colunas comunicantes. A Figura 4.5 apresenta a CRUS obtida durante o processo de drenagem. De acordo com os resultados encontrados, o valor de entrada de ar foi de aproximadamente 2,5 cm, enquanto que o teor de umidade residual foi de aproximadamente 16%, correspondendo a uma altura capilar de 31,5 cm.

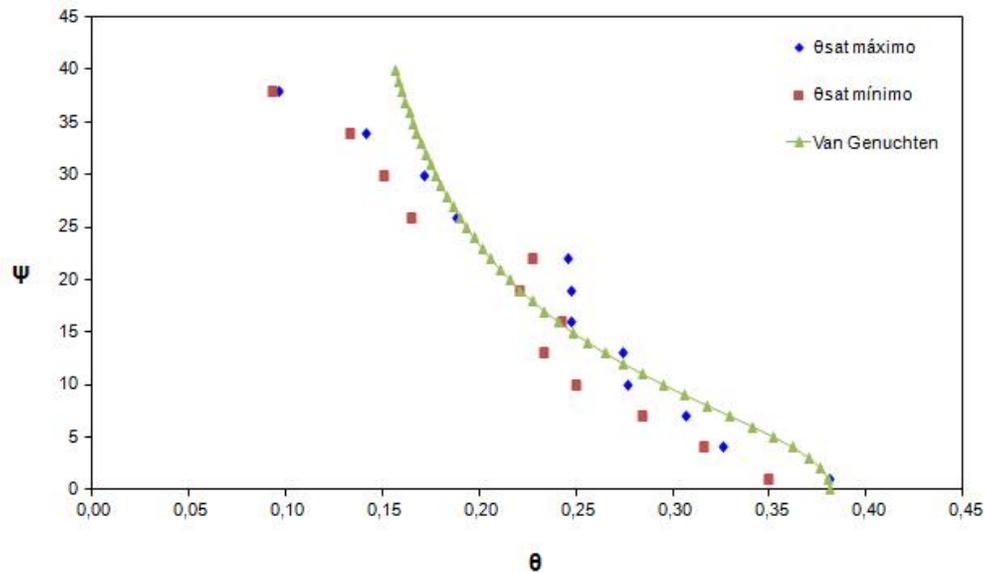


FIGURA 4.5 – Curva de retenção de umidade do solo

4.2 MODELO FÍSICO

A modelagem física reduzida consistiu em construir barragens com areia a fim de simular o comportamento do fluxo utilizando diferentes dispositivos de drenagem interna (Figura 4.6).

Os modelos foram construídos na escala 1:1, cujas dimensões da seção transversal das barragens foram de 1,90m de base, 10 cm de crista e 50 cm de altura. A disposição do material foi realizada através do método de chuva de areia utilizando recipientes dotados de furos, adaptados como funis, mantendo-se uma altura de queda constante de 12 cm, possibilitando a deposição uniforme das camadas do solo.



FIGURA 4.6 – Modelo físico reduzido

4.2.1 Modelo 1 – Barragem com tapete drenante

O modelo físico 1 corresponde a barragem dotada de tapete drenante, cuja dimensão adotada para o dispositivo foi de 50 cm x 44 cm x 3 cm (Figura 4.7 -a). A modelagem consistiu primeiramente em dispor o material drenante uniformemente ao longo da base de jusante da barragem e em seguida depositar a areia, de forma a compor o maciço do modelo.

Efetuada a modelagem da barragem, o reservatório foi preenchido com água até a cota 47 cm, dando-se início a percolação pelo solo (Figura 4.7 - b). Pelo paramento de acrílico foi possível visualizar o avanço do fluxo pelo maciço (Figura 4.7- c), que ocorreu sem indícios de ruptura ou carregamento de material. A saída do fluxo se deu no centro do pé de jusante demonstrando que houve uma carga maior pelo centro da barragem (Figura 4.7 - d). Após a estabilização do fluxo, foram feitas três medições de vazão, o qual apresentou uma média de $3,61 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

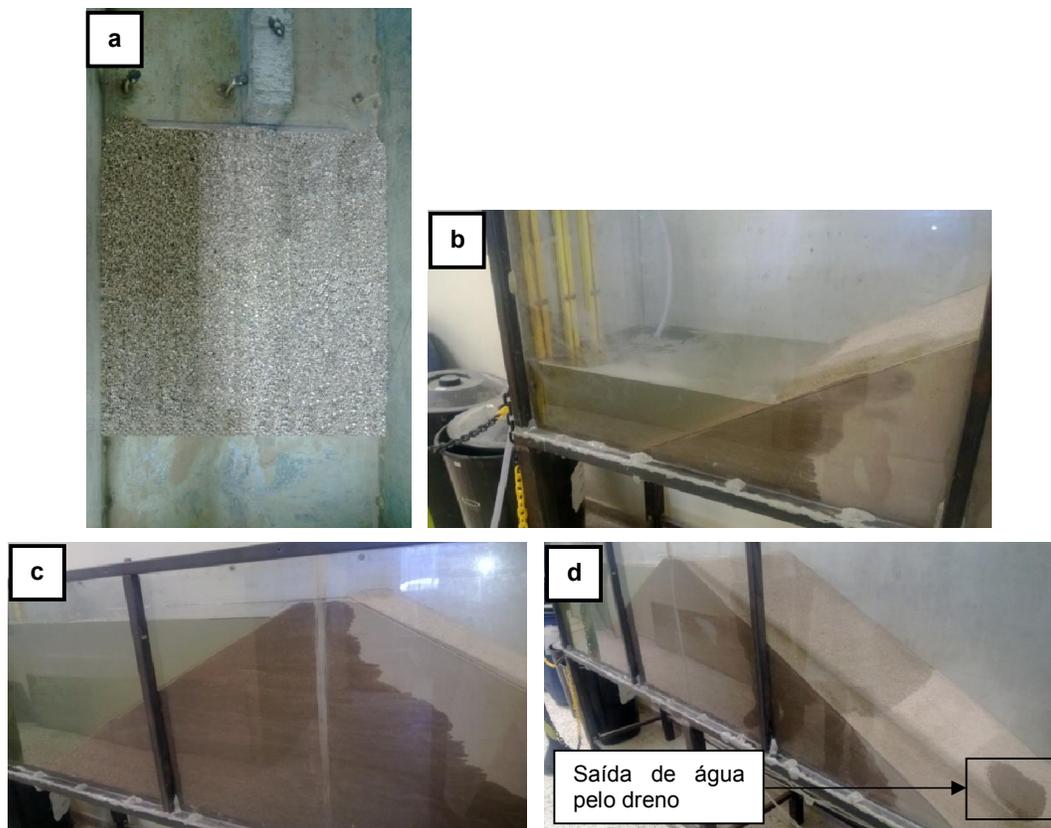


FIGURA 4.7 – Simulação do modelo físico 1: a) disposição do tapete drenante; b) início da percolação pelo maciço; c) fluxo através da barragem; d) saída de água pelo dreno

Através da simulação deste modelo foi possível verificar a eficiência do tapete drenante, quanto à drenagem do fluxo, podendo ser observado que a percolação ocorreu preferencialmente pelo dispositivo e não pelas paredes laterais da caixa. Observando a saída do fluxo, notou-se que, pelo menos, 15 cm de solo foi mantido saturado (Figura 4.10), embora não tenha sido verificado escoamento nesta cota, o que corresponde a uma saturação por efeito de sucção do solo.



FIGURA 4.8 – Drenagem do fluxo pelo tapete drenante, com saturação no pé de jusante da barragem

Em seguida foram feitas 7 leituras dos piezômetros, até a estabilização final do fluxo, sendo a última apresentada na Tabela 4.4. Analisando os dados obtidos é possível observar que houve falha na leitura de alguns piezômetros. O piezômetro MM15 apresentou erro em todas as leituras devido a um vazamento encontrado na junção do mesmo com a chapa metálica, devido a uma falha na vedação, portanto este foi desconsiderado.

TABELA 4.4 – Leitura dos piezômetros do modelo físico 1

Piezômetro	Altura piezométrica (cm)
FM 15	43,50
FM 30	43,50
FC 15	38,00
FC 30	39,60
FJ 2	17,50
FJ 10	16,60
MM 15	ERRO
MM 30	46,70
MC 15	37,80
MC 30	40,20
MJ 2	16,20
MJ 10	16,00
AM 15	45,30
AM 30	46,00
AC 15	37,60
AC 30	39,60
AJ 2	14,60
AJ 10	15,00

Como explicado no Capítulo 3, para facilitar a análise do comportamento do fluxo, as leituras foram analisadas por seções transversais da barragem, seccionadas nas linhas dos piezômetros posicionados nas seções da frente (S1), localizado junto ao acrílico, meio (S2) e atrás (S3), localizado junto à chapa metálica lateral da caixa.

Plotando essas alturas em um gráfico e relacionando-as com as distâncias horizontais do modelo (Figura 4.9), foram obtidas as linhas piezométricas de cada seção transversal. É possível observar que a seção S2 se inicia mais alta que as da S1 e S3, indicando uma maior carga piezométrica no interior do maciço.

Analisando a Figura 4.10, nota-se que os piezômetros locados na crista e os de jusante apresentaram alturas piezométricas muito próximas em todas as seções demonstrando a ocorrência de um fluxo uniforme pelo maciço. Nota-se que as leituras à jusante apresentaram carga total altimétrica de 15 cm, aproximadamente, onde foi verificado saturação, por meio de observação visual do modelo. Após estes últimos piezômetros, o fluxo segue até o final do dreno com carga 0.

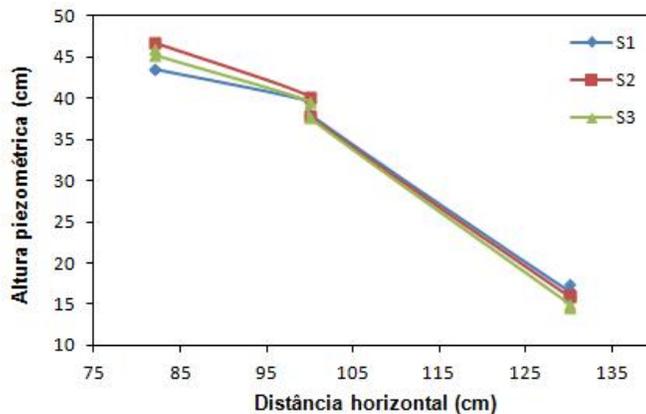


FIGURA 4.9 – Linhas piezométricas nas seções longitudinais do modelo 1

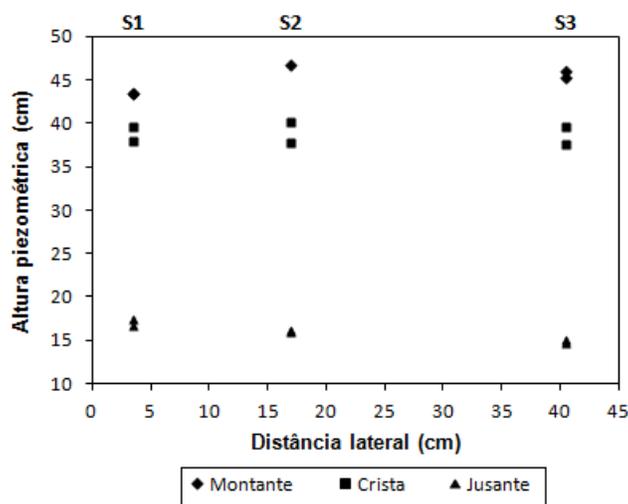


FIGURA 4.10 – Alturas piezométricas na seção transversal do modelo 1

4.2.2 Modelo 2 – Barragem com 1 dreno francês

O modelo físico 2 corresponde a barragem dotada com 1 dreno francês, o qual foi modelado com seção trapezoidal adotando dimensões com 6 cm (base) x 3 cm (topo) x 3 cm (altura) x 50 cm (comprimento) (Figura 4.11 - a). A disposição do material drenante foi realizada ao longo da lateral direita da base de jusante da barragem possibilitando um fluxo linear. O objetivo desta modelagem foi simular o comportamento do fluxo utilizando drenos franceses espaçados a 88 cm.

Similarmente ao primeiro modelo, após a disposição dos materiais, o reservatório foi preenchido com água até a cota 47 cm, iniciando a percolação através do maciço da barragem (Figura 4.11 - b). Este modelo também não apresentou

indícios de ruptura, porem foi observada a ocorrência de uma leve movimentação no talude de jusante, apresentando acumulo de material de aproximadamente 5 mm, próximo ao pé do talude referido (Figura 4.11 - c), mas este não interferiu no andamento do ensaio.

Com relação à funcionalidade do dispositivo, a simulação demonstrou a eficiência do dreno francês, podendo ser observado que a descarga do fluxo se deu preferencialmente pelo dreno. Depois de estabelecido o fluxo, foram feitas três medições de vazão, o qual apresentou uma média de $3,47 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$. Neste caso, devido à área da seção de escoamento ser muito menor, comparado ao primeiro modelo, foi verificado a ocorrência de uma pequena erosão na saída do dreno (Figura 4.11 - d), embora esta não tenha sido significativa.



FIGURA 4.11 – Simulação do modelo físico 2: a) disposição do dreno francês; b) percolação da água pelo maciço; c) leve escorregamento no talude de jusante; d) erosão na saída do dreno

Até a estabilização final do fluxo, foram realizadas 5 leituras dos piezômetros, sendo a última apresentada na Tabela 4.5. Analisando os dados obtidos foi possível verificar a falha de alguns piezômetros. Como no caso anterior o instrumento MM 15 apresentou vazamento, o mesmo teve de ser reparado. Contudo, como a pressão na base da barragem era alta, a água encontrou um caminho preferencial alternativo, que neste modelo, foi a junção da chapa de aço com o piezômetro AM 15, proporcionando a ocorrência de erro nas leituras deste, tendo que ser desconsiderado.

TABELA 4.5 – Leitura dos piezômetros do modelo físico 2

Piezômetro	Altura piezométrica (cm)
FM 15	42,90
FM 30	44,20
FC 15	37,40
FC 30	39,90
FJ 2	24,50
FJ 10	24,10
MM 15	42,70
MM 30	45,30
MC 15	37,40
MC 30	40,00
MJ 2	25,00
MJ 10	29,20
AM 15	ERRO
AM 30	45,50
AC 15	37,40
AC 30	40,30
AJ 2	26,30
AJ 10	25,00

Plotando no gráfico as alturas encontradas (Figura 4.12) foram obtidas as linhas piezométricas de cada seção transversal da barragem. É possível observar que as seções S2 e S3 apresentaram-se mais altas, em relação à seção S1, ao longo de todo o percurso, indicando uma carga altimétrica mais elevada e evidenciando que a distância entre os drenos influencia significativamente no comportamento do fluxo. Nota-se que as leituras obtidas a jusante apresentaram carga altimétrica elevada, em torno de 25 cm.

A Figura 4.13 apresenta as alturas piezométricas a partir de uma visualização lateral das seções transversais da barragem. Desta forma, é possível observar as leituras obtidas à montante, crista e jusante, o qual representam, hipoteticamente, as cargas hidráulicas encontradas no maciço. Através do gráfico nota-se que as cargas

altimétricas diminuem da seção S3 para a S1, indicando a movimentação do fluxo no sentido ao dreno. Esta diferença de carga entre as seções transversais é mais visível nas leituras encontradas nos taludes de montante e jusante, cujas leituras evidenciaram a ocorrência de gradiente hidráulico, garantindo que o escoamento do fluxo foi realizado pelo dispositivo de drenagem.

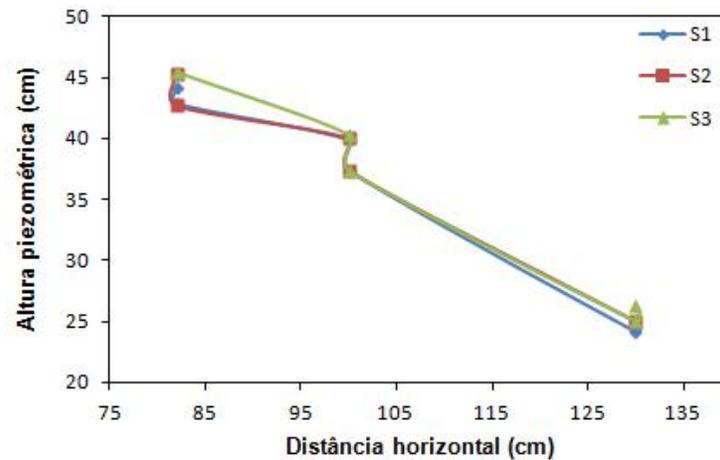


FIGURA 4.12 – Linhas piezométricas nas seções longitudinais do modelo 2

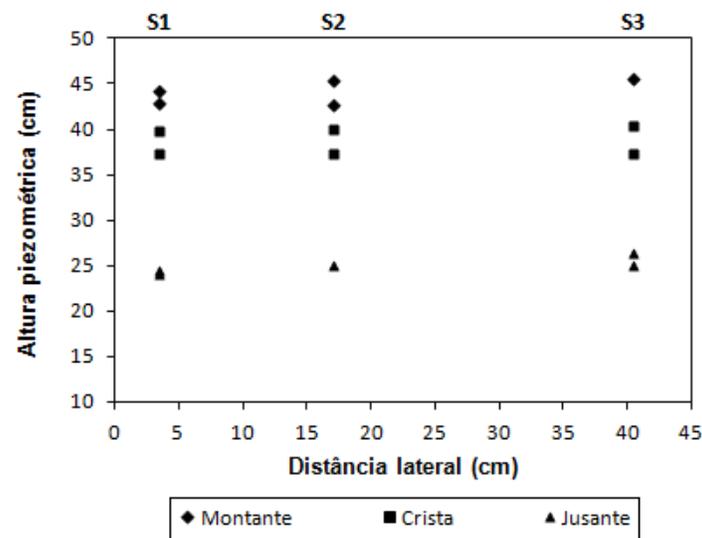


FIGURA 4.13 – Alturas piezométricas na seção transversal do modelo 2

4.2.3 Modelo 3 – Barragem com 2 drenos franceses

A simulação do modelo 3 consistiu em analisar o desempenho do dreno francês alterando seu espaçamento para 44 cm. Porém foram encontrados alguns

problemas durante a execução do procedimento e a modelagem teve de ser efetuada em duas tentativas, as quais serão apresentadas separadamente a seguir.

4.2.3.1 Primeira tentativa

Para a simulação da barragem dotada de drenos franceses, espaçados a 44 cm, foi utilizado uma chapa metálica com a função de reduzir a largura da barragem (Figura 4.14 - a). Esta divisória foi fixada por perfis metálicos que impediriam a flexão da chapa tanto na direção horizontal quanto na vertical.

Após o material drenante e a areia serem depositados o reservatório foi preenchido com água, até a cota 47 cm, dando-se início a percolação pelo solo (Figura 4.14 - b). Contudo, ao perceber que no topo da barragem a água havia encontrado caminho preferencial de percolação pelo acrílico, foi verificado que a chapa havia fletido, permitindo o deslocamento do topo do maciço, de aproximadamente 3 mm, no sentido horizontal (Figura 4.15 - a), proporcionando a ocorrência de pipping no topo da barragem.

Embora a drenagem pelo dreno tenha funcionado perfeitamente (Figura 4.15 - b), o ensaio teve de ser desconsiderado.

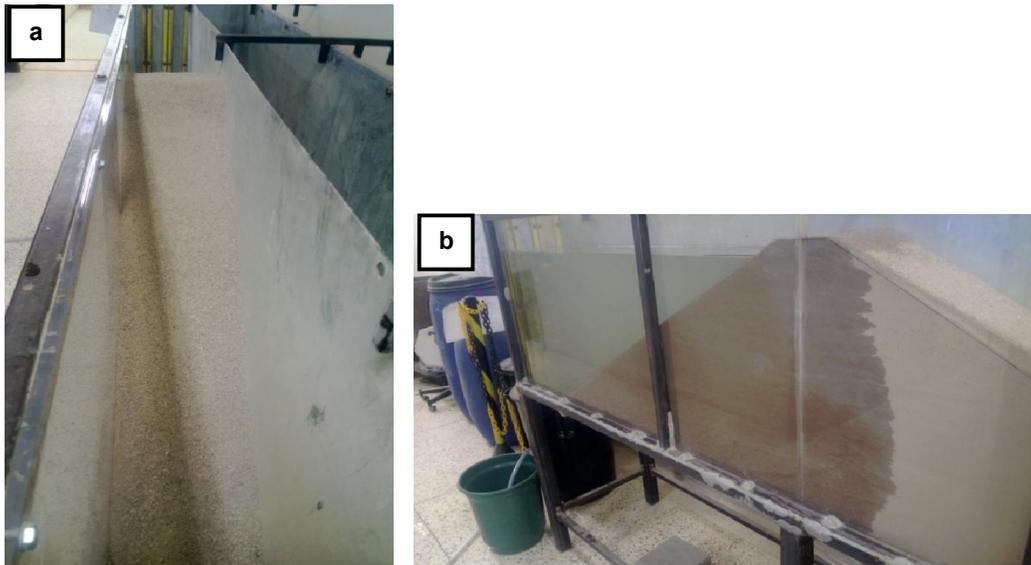


FIGURA 4.14 – Simulação do modelo físico 3: a) divisória metálica para diminuição da largura da barragem; b) percolação da água pelo maciço

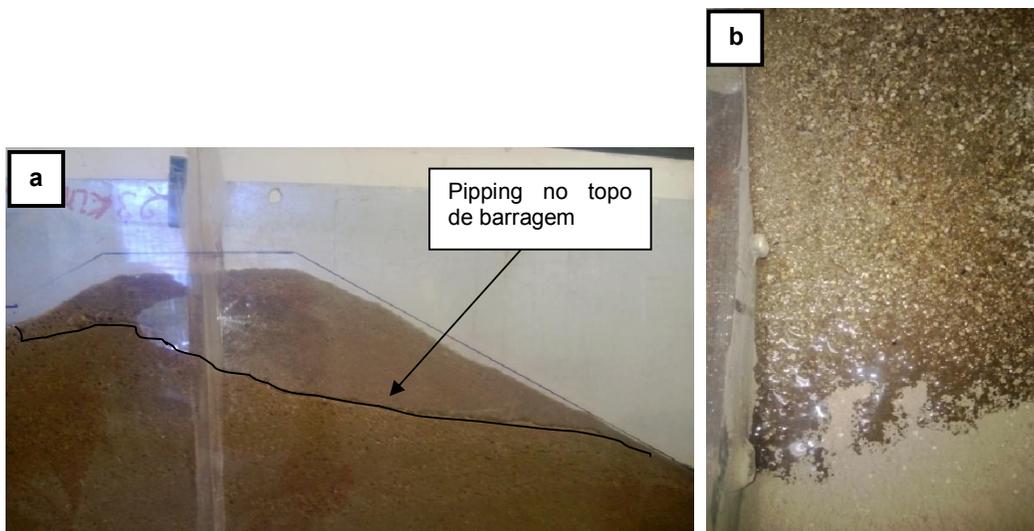


FIGURA 4.15 – Simulação do modelo físico 3: a) Ocorrência de pipping no topo da barragem; b) saída da água pelo dreno

4.2.3.2 Modelo 3 – Segunda tentativa

Após a tentativa de diminuir a largura da barragem, ter falhado, optou-se por manter a largura original do modelo (44 cm) e simular os diferentes espaçamentos a partir da implantação de mais drenos.

O modelo físico 3 corresponde a barragem dotada de 2 dreno francês, os quais foram modelados com seção trapezoidal, adotando dimensões com 6 cm (base) x 3 cm (topo) x 3 cm (altura) x 50 cm (comprimento) (Figura 4.16 - a). A disposição dos materiais drenantes foi realizada ao longo das duas laterais da base de jusante da barragem possibilitando um fluxo linear. O objetivo desta modelagem foi simular o comportamento do fluxo utilizando drenos franceses espaçados a 44 cm.

Após a disposição dos materiais o reservatório foi preenchido com água até a cota 47 cm, iniciando-se a percolação através do solo (Figura 4.16 - b). Com relação à funcionalidade dos dispositivos, os mesmos se mostraram bastante eficientes, podendo ser observado que o escoamento do fluxo ocorreu preferencialmente pelos drenos franceses (Figura 4.16 – c; d). Depois de estabelecido o fluxo foram realizadas cinco medições de vazão, cujo resultado apresentou uma média de $3,50 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$. Similarmente ao segundo modelo, pôde ser observado a ocorrência de uma pequena erosão na saída de ambos os drenos (Figura 4.16 - e), embora esta não tenha sido significativa.



FIGURA 4.16 – Simulação do modelo físico 3: a) disposição dos drenos franceses; b) percolação da água pelo maciço; c) e d) início da saída d'água pelos drenos; e) erosão na saída nos drenos

Até a estabilização final do fluxo, foram realizadas 5 leituras dos piezômetros, sendo a última apresentada na Tabela 4.6. Analisando os dados obtidos foi possível verificar a falha de alguns piezômetros. No caso deste modelo alguns instrumentos também apresentaram vazamento, ocasionando alteração nas leituras como, por exemplo, nos piezômetros MM 15, MC 15 e AM 15, sendo estes desconsiderados. O piezômetro FJ 2, localizado próximo ao dreno direito, iniciou as leituras corretamente, porem bolhas de ar começaram a entrar no tubo e interferiram o monitoramento deste piezômetro.

TABELA 4.6 – Leitura dos piezômetros do modelo físico 3

Piezômetro	Altura piezométrica (cm)
FM 15	46,70
FM 30	44,20
FC 15	41,00
FC 30	39,40
FJ 2	-
FJ 10	20,10
MM 15	ERRO
MM 30	44,90
MC 15	ERRO
MC 30	39,10
MJ 2	26,40
MJ 10	21,50
AM 15	ERRO
AM 30	44,80
AC 15	38,20
AC 30	38,40
AJ 2	17,20
AJ 10	19,30

Plotando no gráfico as alturas encontradas (Figura 4.17) foram obtidas as linhas piezométricas de cada seção transversal do modelo. Pode-se observar que ao longo do percurso o fluxo no interior do maciço apresentou carga altimétrica mais elevada do que nas extremidades, devido a ausência de dispositivo de drenagem nesta posição transversal da barragem, correspondendo a uma altura piezométrica de aproximadamente 25 cm.

A Figura 4.18 apresenta as alturas piezométricas a partir de uma visualização lateral das seções transversais da barragem, representando as leituras obtidas à montante, crista e jusante. Nota-se que nos piezômetros de jusante, o gradiente hidráulico entre as seções S2 e S3 foi maior que entre as seções S2 e S1, indicando que o fluxo escoado pelo dreno à esquerda apresentou carga mais elevada que pelo

da direita. Este fato pode ser identificado pela Figura 4.16 (c – d) em que é possível observar que a percolação ocorreu primeiramente pelo dreno francês da esquerda.

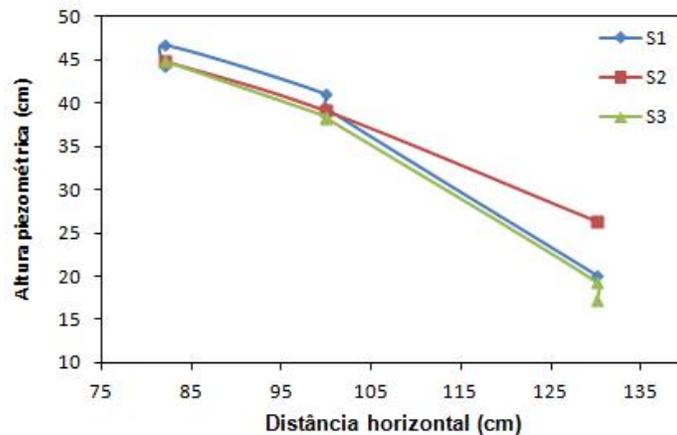


FIGURA 4.17 – Linhas piezométricas nas seções longitudinais do modelo 3

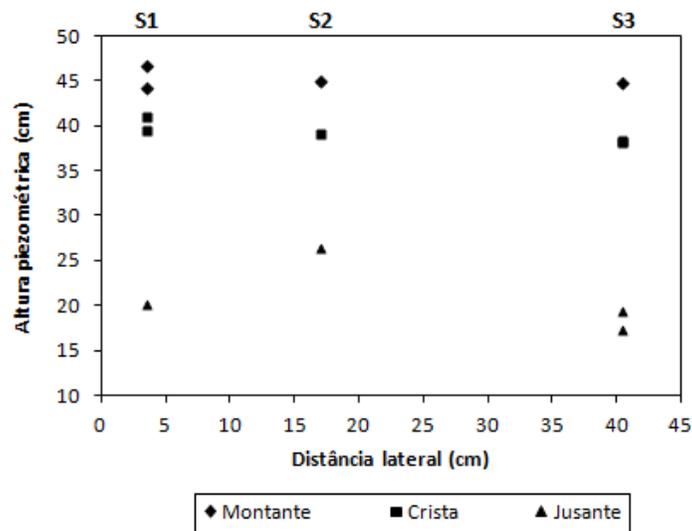


FIGURA 4.18 – Alturas piezométricas na seção transversal do modelo 3

4.2.4 Modelo 4 – Barragem com 3 drenos franceses

O modelo físico 4 corresponde a barragem com 3 dreno franceses, cujo objetivo foi simular o comportamento do fluxo utilizando drenos franceses espaçados a 22 cm. A disposição do material drenante foi realizada ao longo das duas laterais e no meio da base de jusante da barragem, possibilitando um fluxo linear. Neste caso, os dispositivos foram posicionados nas laterais foram modelados com seção trapezoidal de dimensões 6cm (base) x 3cm (topo) x 3cm (altura) x 50cm (comprimento), e o do

meio com seção 12cm (base) x 6cm (topo) x 3cm (altura), como apresentado na Figura 4.19 (a).

Após a disposição dos materiais, o reservatório também foi preenchido com água até a cota 47 cm, iniciando-se a percolação através do solo (Figura 4.19 - b), o qual ocorreu sem indícios de ruptura. Com relação a funcionalidade dos dispositivos, os mesmos se mostraram bastante eficientes, podendo ser observado que o escoamento do fluxo ocorreu inicialmente pelo dreno do meio, em seguida pelo da lateral esquerda e, por ultimo, pelo da direita (Figura 4.19 – c;d). Depois de estabelecido o fluxo foi realizado cinco medições de vazão, cujo resultado apresentou uma média de $3,55 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$. Através da Figura 4.20 pode ser observado que houve erosão nos drenos.



FIGURA 4.19 – Simulação do modelo físico 4: a) disposição dos três drenos franceses; b) percolação da água pelo maciço; c) e d) sequencia preferencial de percolação pelos drenos

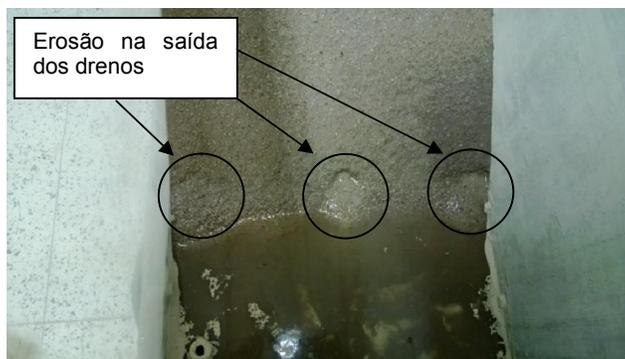


FIGURA 4.20 – Ocorrência de erosão nos drenos

Até a estabilização final do fluxo, foram realizadas 6 leituras dos piezômetros, sendo a última apresentada na Tabela 4.7. De acordo com a tabela foi possível verificar, também, a falha de alguns piezômetros. Similarmente aos modelos anteriores, a vedação de alguns instrumentos apresentou vazamento proporcionando erro nas leituras, como foi o caso dos piezômetros MM 15 e MC 30, os quais tiveram de ser desconsiderados. A leitura obtida no piezômetro AM 30 também foi desconsiderada. Embora não tenha sido verificado qualquer problema que pudesse indicar erro na leitura, a altura piezométrica indicou nível d'água superior ao do reservatório de 47 cm. No caso do piezômetro FJ 2, o mesmo apresentou problemas devido a aparição de bolhas após as primeiras leituras, interferindo a continuação do monitoramento deste.

TABELA 4.7 – Leitura dos piezômetros do modelo físico 4

Piezômetro	Altura piezométrica (cm)
FM 15	44,50
FM 30	42,50
FC 15	37,80
FC 30	39,30
FJ 2	-
FJ 10	18,50
MM 15	ERRO
MM 30	47,00
MC 15	45,90
MC 30	ERRO
MJ 2	17,30
MJ 10	25,00
AM 15	43,40
AM 30	ERRO
AC 15	38,10
AC 30	42,00
AJ 2	16,30
AJ 10	17,20

Plotando no gráfico as alturas encontradas (Figura 4.21) foram obtidas as linhas piezométricas de cada seção transversal da barragem. É possível observar que a linha de fluxo da seção S2 apresentou-se mais elevada em todo o percurso, indicando um aumento de pressão no interior do maciço, enquanto que nas seções externas as cargas hidráulicas se mantiveram mais baixas e muito próximas. Tal fato evidencia que o caminho preferencial do fluxo foi realizado através do maciço e não pelas laterais da caixa.

Analisando a Figura 4.22 nota-se que a diferença de cargas piezométricas entre as seções S2 e S3 foi maior que entre as S3 e S1, indicando que a percolação ocorreu inicialmente pelo dreno do meio, seguido pelo da esquerda e direita, como foi, também, apresentado na Figura 4.19 (c e d).

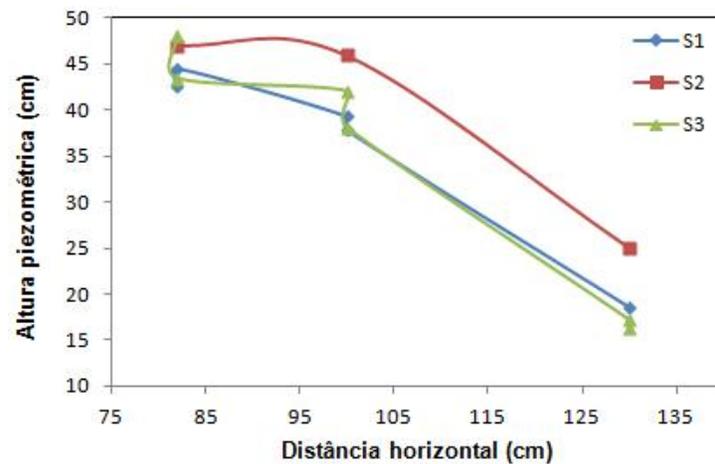


FIGURA 4.21 – Linhas piezométricas nas seções longitudinais do modelo 4

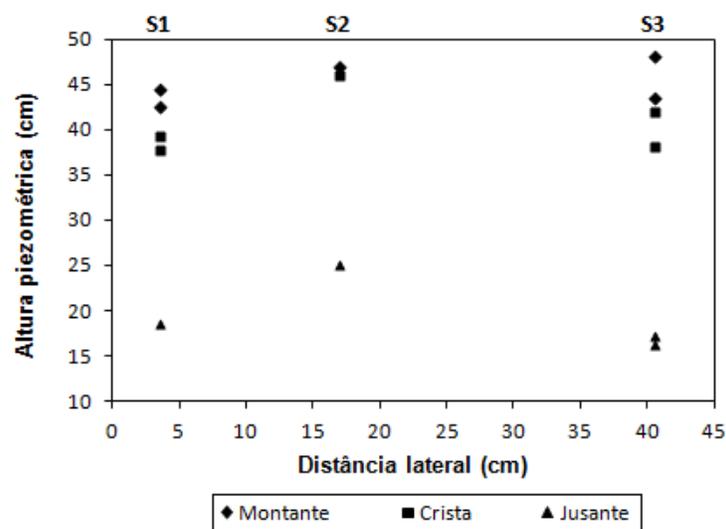


FIGURA 4.22 – Alturas piezométricas na seção transversal do modelo 4

4.2.5 Análise geral dos resultados

A simulação física das barragens, dotadas de tapete drenante e drenos franceses, demonstrou de forma clara as diferenças de comportamento do fluxo encontradas no maciço. Através da análise de cada seção transversal obtida nos modelos verificou-se que as alturas piezométricas foram bastante coerentes com as situações observadas nas modelagens.

Analisando a seção S1 nota-se que, para os piezômetros localizados à montante e na crista, os modelos apresentaram leituras muito próximas. Na medida em que a energia é dissipada no maciço, pode ser observado que a diferença entre as alturas aumenta. Cada altura encontrada nos piezômetros de jusante está relacionado a área de seção dos drenos, onde ocorre o fluxo. Dessa forma, a barragem com 1 dreno francês, que possui menor área de drenagem, apresentou carga maior.

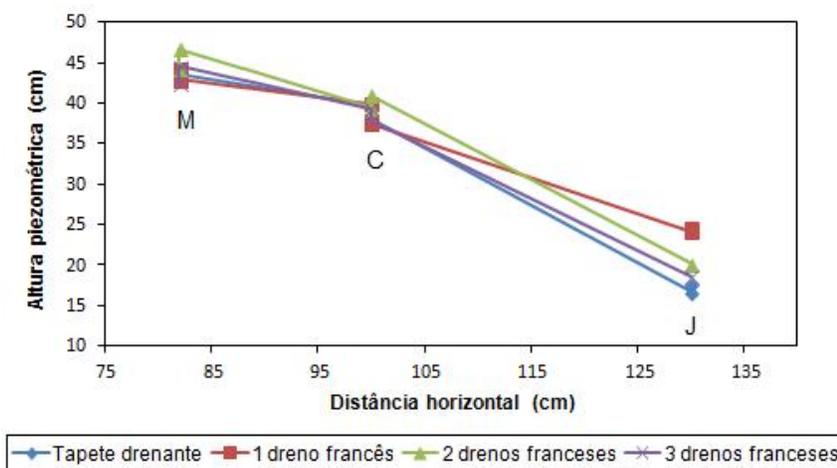


FIGURA 4.23 – Gráfico das linhas piezométricas da seção S1 de cada modelo físico

Analisando a seção S2, é possível observar que os níveis piezométricos são mais elevadas se comparadas aos níveis na seção S1, chegando na posição do drenos com aproximadamente 25 cm, com exceção do modelo que usa tapete drenante. Através desta seção verifica-se que a redução da área de escoamento eleva consideravelmente as cargas altimétricas no interior do maciço.

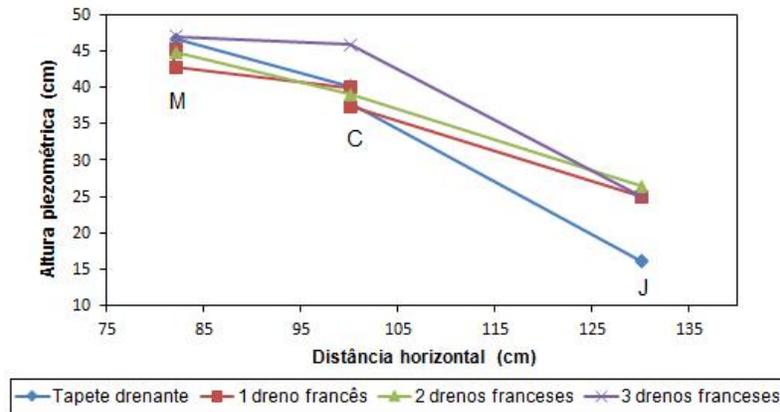


FIGURA 4.24 – Gráfico das linhas piezométricas da seção S2 de cada modelo físico

Analisando a seção S3 observa-se que esta é muito semelhante a S1, isto porque ambas estão localizadas em seções que possuem drenos, com exceção ao modelo com 1 dreno francês. No caso deste, a carga se mostrou elevada, pois deve haver um gradiente hidráulico na direção longitudinal que permite o escoamento do fluxo em direção ao dreno, o qual está localizado na seção S1. No caso das barragens com dois e três drenos o fluxo percolou do centro do maciço para as extremidades, permitindo que as leituras na S1 e S3 sejam muito próximas.

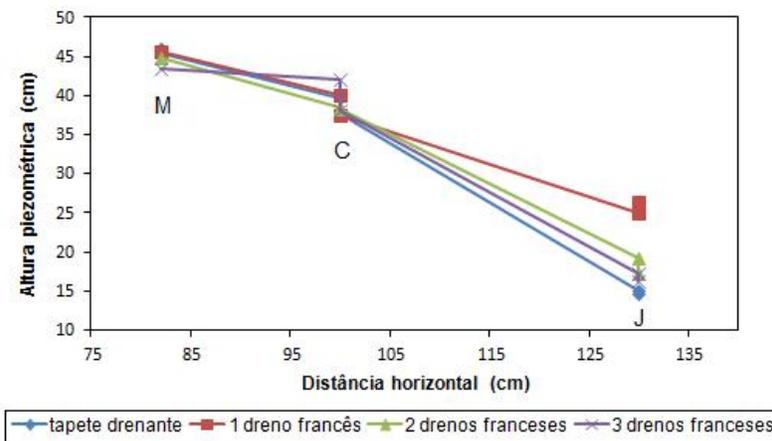


FIGURA 4.25 – Gráfico das linhas piezométricas da seção S3 de cada modelo físico

Como, no modelo dotado de tapete drenante, o fluxo permanece no estado plano, as alterações nas cargas piezométricas encontradas nas três seções são quase imperceptíveis, se comparado com o observado nos demais modelos.

Comparando o funcionamento dos drenos franceses com o tapete drenante, embora os modelos tenham se mostrado muito eficientes no escoamento do fluxo, as cargas hidráulicas apresentaram-se significativamente mais elevadas no talude de

jusante, fato que influencia no valor do fator de segurança em relação à estabilidade de talude.

Os resultados dos modelos que utilizaram drenos franceses com espaçamentos diferentes indicaram que quanto maior for a proximidade entre eles, maior é a dissipação de energia e menores são as cargas hidráulicas no maciço. Analisando os resultados do modelo dotado de um dreno francês, observou-se que as leituras a jusante são mais altas do que nos outros modelos, sendo justificado pela menor área de escoamento e maior espaçamento entre drenos. É possível observar ainda que os drenos no modelo com três drenos franceses, embora tenham apresentado alturas piezométricas elevadas, o comportamento do fluxo se assemelhou ao tapete drenante, principalmente no que se refere a saída do fluxo no dreno, em que ambos, o escoamento se deu pelo meio do talude, justificando novamente a necessidade de um menor espaçamento entre os dispositivos.

No que se refere às vazões encontradas nas simulações pode-se afirmar que quanto mais espaçados os drenos estiverem, menor será a área de escoamento e conseqüentemente menor a vazão. Analisando a relação entre a vazão e a área de escoamento, obtida nos modelos dos drenos franceses, e extrapolando estes, (Figura 4.26) pode-se verificar que a relação é crescente, ou seja, quanto maior for a quantidade de drenos franceses maior será a vazão escoada pela barragem.

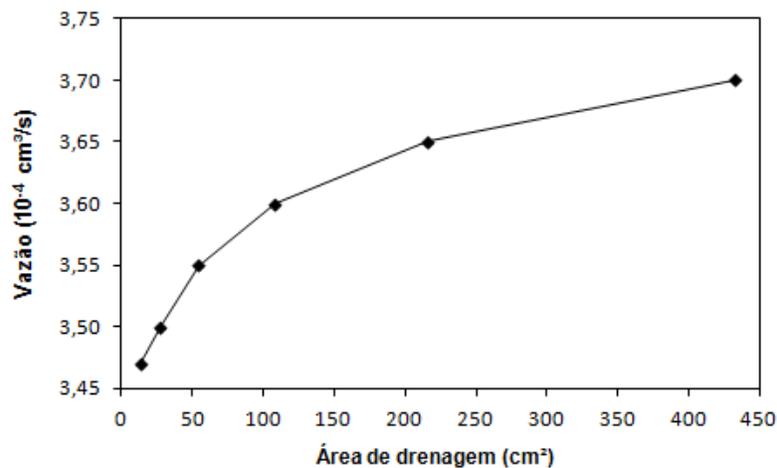


FIGURA 4.26 – Relação entre as vazões e área de escoamento dos drenos

A simulação física dos drenos pôde comprovar a eficiência dos dispositivos. Contudo para um melhor desempenho, pode-se inferir que existe a necessidade de que a seção dos drenos seja adequada e que os drenos não estejam muito espaçados entre si.

4.3 MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico consistiu em avaliar o comportamento do fluxo a partir da implantação de drenos franceses simulando diferentes condições de drenagem que não foram possíveis de ser realizadas na modelagem reduzida.

Inicialmente a geometria típica da barragem foi determinada, através do programa SLOPE/W, buscando definir o fator de segurança adequado. As características admitidas para os materiais estão descritas na Tabela 4.8.

TABELA 4.8 – Características dos materiais

Características	Areia	Pedregulho
Coefficiente de permeabilidade (k) (cm/s)	$1,1 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^0$
Ângulo de atrito (ϕ)	34°	36°

De acordo com as análises realizadas, o fator de segurança estabelecido para o talude de jusante dos modelos foi de 1,376, o qual garante a estabilidade da barragem para inclinação de taludes com 1:1,8, conforme apresentado na Figura 4.27.

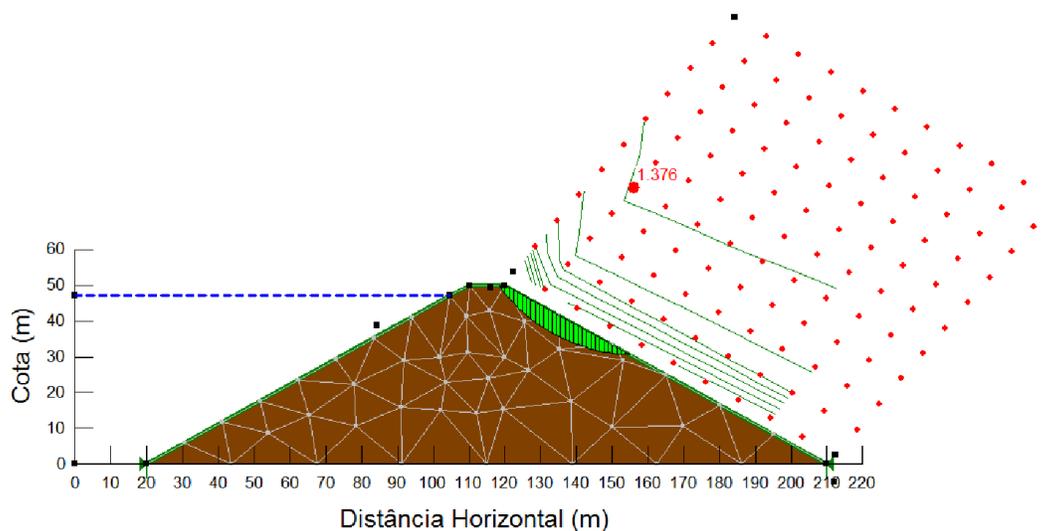


FIGURA 4.27 – Estabilidade do talude de jusante

4.3.1 Condições de contorno

Diante das características apresentadas para a barragem foram determinadas as condições de contorno impostas aos modelos.

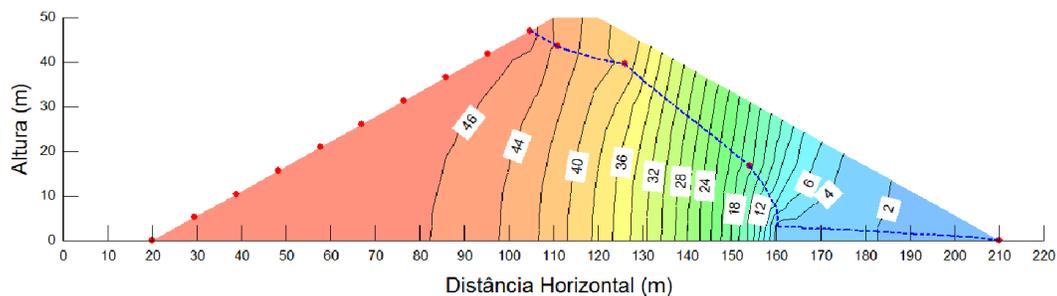
No talude de montante foi aplicada uma carga hidráulica de 47 cm.c.a, do início do talude até a elevação do nível d'água, para representar a carga hidráulica imposta pelo reservatório da barragem.

À jusante do maciço, foi imposta carga hidráulica zero na saída dos drenos, indicando ausência de nível d'água nesta área. Para as seções que representavam a falta de sistema de drenagem, somente foi aplicado condição de contorno à montante.

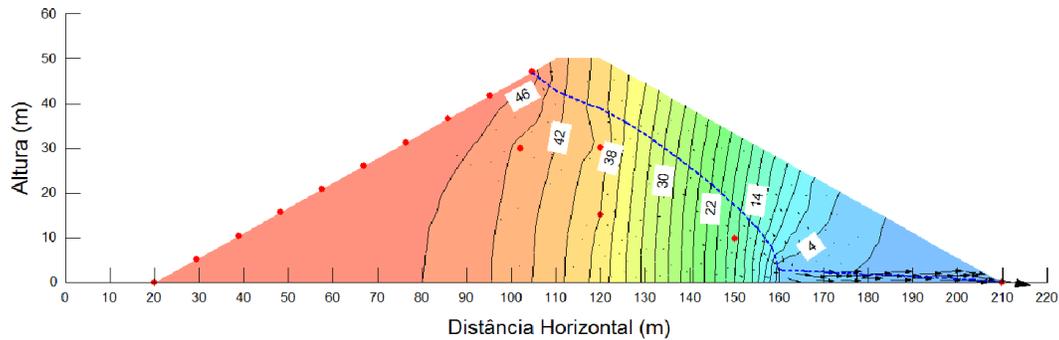
4.3.2 Etapa 1 – Imposição das alturas piezométricas

A primeira etapa da modelagem consistiu em analisar o comportamento do fluxo impondo, como condição de contorno, as alturas piezométricas encontradas na modelagem física, além das mencionadas no item 4.3.1., com a finalidade de validar o modelo reduzido.

Inicialmente as linhas piezométricas foram determinadas através do método gráfico de Kozeny para se ter como base a posição da freática obtida no modelo reduzido. Em seguida a barragem foi modelada no programa SEEP/W considerando, como condição de contorno, a mesma configuração da linha freática encontrada no método gráfico (Figura 4.28 - a). Comparativamente, outra modelagem foi realizada impondo as cargas altimétricas na altura de entrada dos respectivos piezômetros, conforme apresentado Figura 4.28 (b).



a) Linha piezométrica obtida através do método gráfico de Kozeny



b) Linha piezométrica obtida através da imposição das alturas piezométricas

FIGURA 4.28 – Comportamento da linha piezometrica do modelo 1

É possível observar que as freáticas encontradas são muito semelhantes, validando o método gráfico. Em todas as seções dos modelos foi realizada esta comparação e a semelhança entre as linhas piezométricas foram satisfeitas. Desta forma optou-se por considerar, como condição de contorno, a aplicação das cargas altimétricas na altura de entrada dos piezômetros.

As análises de cada modelo foram realizadas através de seções em planos ortogonais (xz , xy e yz), que possibilitaram o estudo do comportamento do fluxo no interior do maciço, em condição permanente de escoamento, proporcionando a visualização do fluxo nas três dimensões. Para esta primeira etapa, foram analisados modelos com as seguintes características:

TABELA 4.9 – Características aplicadas dos modelos

Barragem	C^1 (cm)	S^2 (cm)
1	50	-
2	50	88
3	50	44
4	50	22

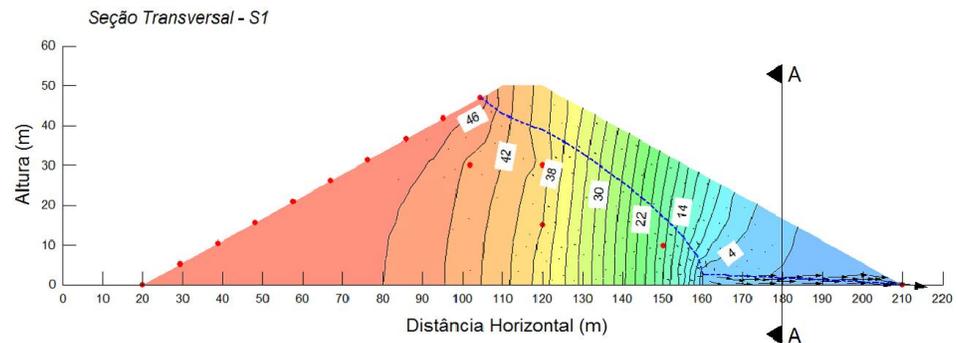
¹ C = Comprimento do dreno; ² S =
Espaçamento entre os drenos

4.3.2.1 Modelo 1 – Barragem com tapete drenante

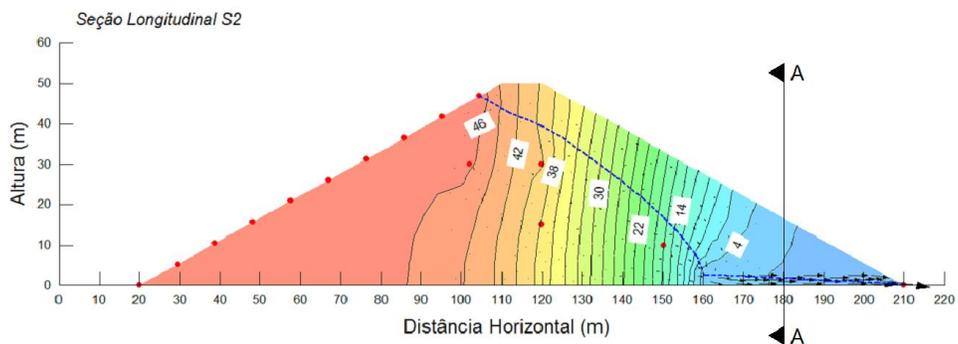
O modelo 1 consistiu em simular a barragem dotada de tapete drenante. Inicialmente o modelo foi seccionado longitudinalmente nas linhas dos piezômetros, obtendo-se a projeção das linhas piezométricas no plano vertical xz , encontradas no

modelo físico, sendo representadas pelas seções S1, S2 e S3 (Figura 4.41), conforme explicado no Capítulo 3.

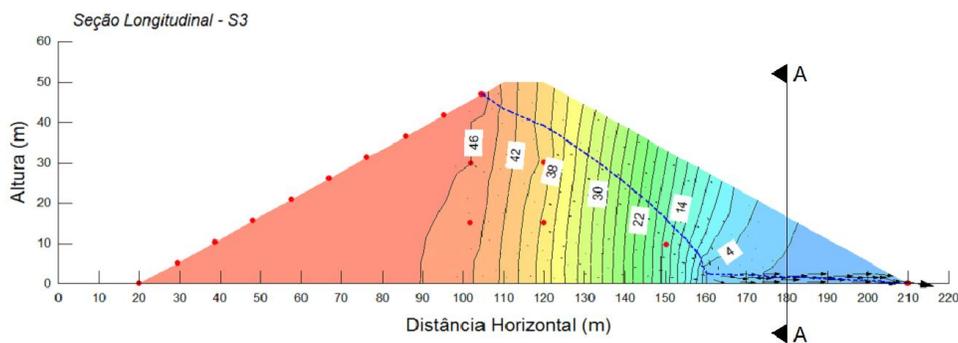
Analisando as seções é possível observar que o comportamento do fluxo é muito similar, apresentando cargas hidráulicas muito aproximadas e demonstrando a homogeneidade da percolação da água através do maciço.



a) Seção longitudinal S1



b) Seção longitudinal S2



c) Seção longitudinal S3

FIGURA 4.29 – Seções longitudinais do modelo 1 com imposição das alturas piezométricas

Projetando as equipotenciais ao longo da superfície freática no plano horizontal xy , o fluxo apresenta configuração muito aproximada da seção mostrada na Figura

4.30. Vale ressaltar que horizontalmente as equipotenciais, na realidade, não são equidistantes como mostra a imagem, mas por uma limitação do programa as mesmas são representadas como se fossem. O objetivo desta seção é demonstrar o comportamento aproximado do fluxo e das cargas hidráulicas e não a posição exata de cada uma.

Através da seção plana nota-se que ao longo de todo o percurso o fluxo ocorreu no estado plano. Este fato permitiu que a vazão fosse escoada de forma homogênea pelo tapete drenante sem elevar a carga no maciço.

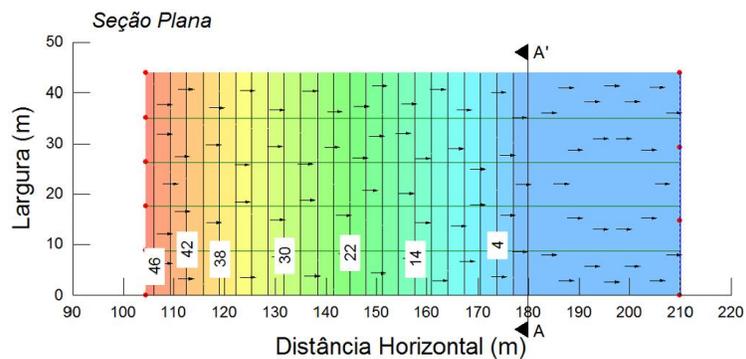


FIGURA 4.30 – Projeção das equipotenciais ao longo da superfície freática no plano horizontal xy do modelo dotado de tapete drenante

Seccionando a barragem transversalmente em AA e AA', foi obtida a seção apresentada na Figura 4.31, representando a projeção do fluxo no plano vertical yz. Através desta seção, o qual também representa uma aproximação, pode ser observado que as equipotenciais são retilíneas, indicando um fluxo no estado plano.

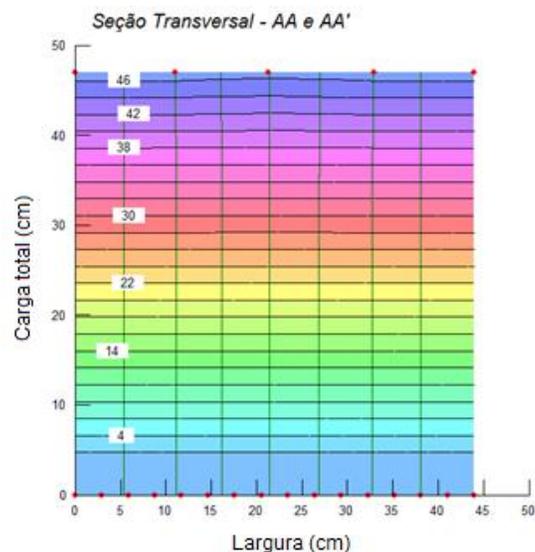


FIGURA 4.31 – Seção transversal da projeção das equipotenciais ao longo da superfície freática no plano vertical yz do modelo dotado de tapete drenante

Analisando graficamente as cargas totais (Figura 4.32), pode ser observado que as três seções apresentaram linhas piezométricas muito similares.

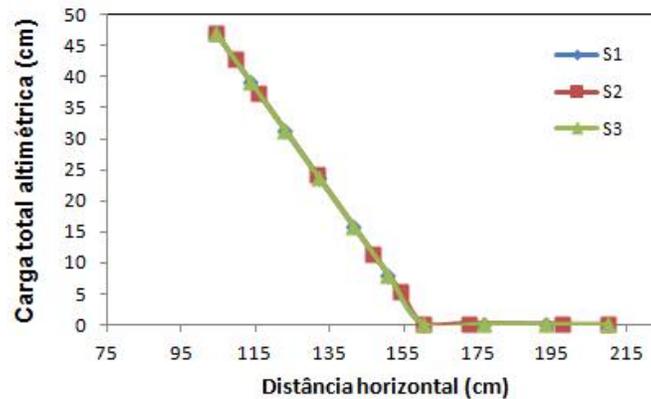


FIGURA 4.32 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 1

As seções apresentadas demonstraram que o emprego de tapete drenante como sistema de drenagem é muito eficiente principalmente no que se refere a posição da linha freática.

4.3.2.2 Modelo 2 – Barragem com 1 dreno francês simulando espaçamento de 88 cm

O modelo 2 consistiu em analisar a barragem dotada de 1 dreno francês, simulando espaçamento de 88 cm entre os drenos. Seccionando longitudinalmente o modelo nas mesmas posições que o anterior foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura 4.33 (a, b e c).

Comparando as seções apresentadas, nota-se que em S1 as cargas hidráulicas foram dissipadas mais rapidamente que nas outras devido a presença do dreno nesta seção. Já as linhas altimétricas apresentadas nas seções S2 e S3 encontram-se em posições bastante elevadas, devido a ausência do sistema de drenagem. Desta forma, pode-se considerar que o fluxo percolado apresentou variação de carga altimétrica ao longo da largura da barragem indicando ocorrência de fluxo no sentido ao dreno.

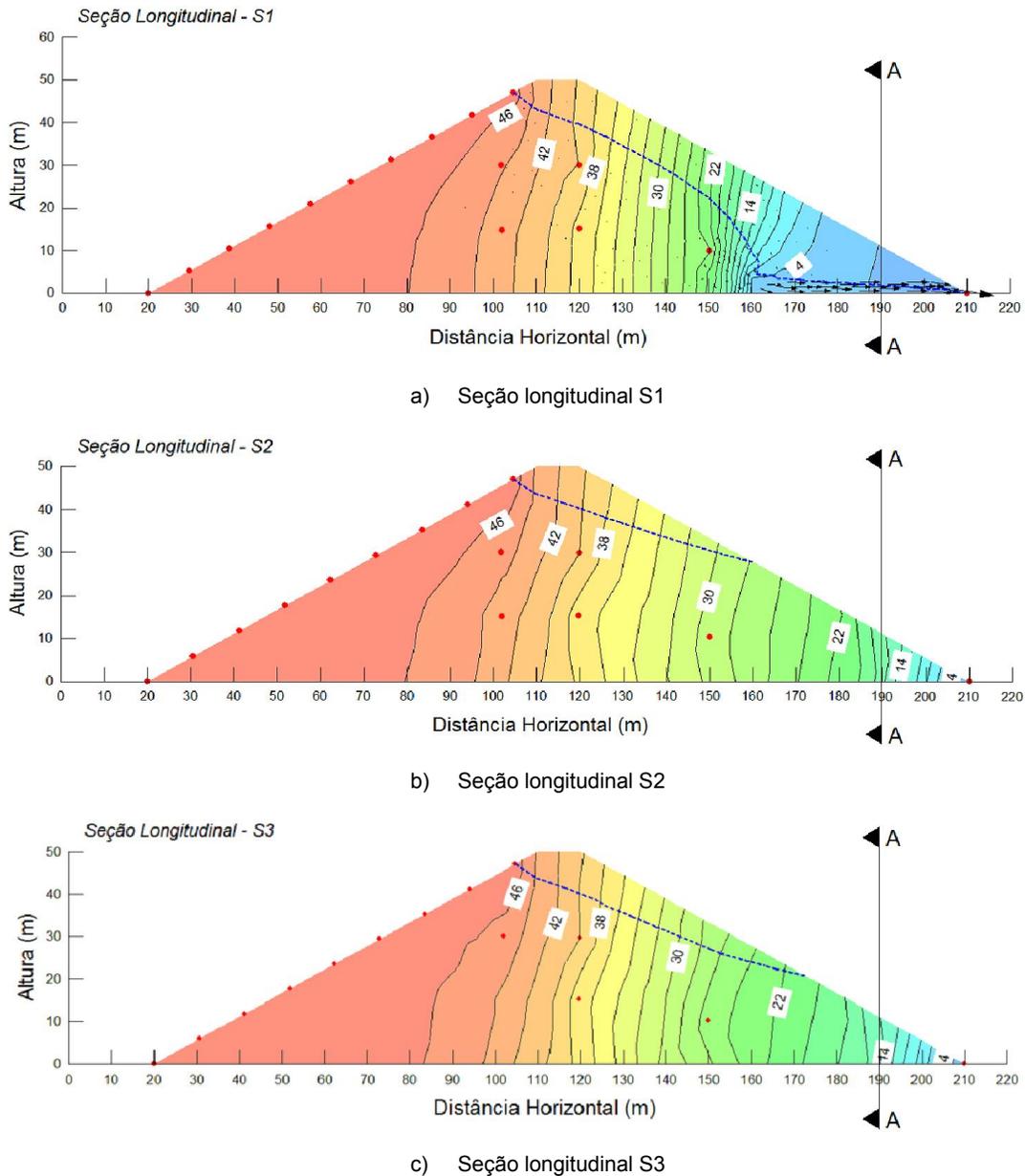


FIGURA 4.33 – Seções longitudinais do modelo 2 com imposição das alturas piezométricas.

A Figura 4.34 demonstra mais claramente o comportamento do fluxo diante a utilização de um único dreno. Neste caso, o escoamento é realizado basicamente pelo dreno francês, porem há ainda uma pequena vazão que percola pelo maciço. Comparando esta simulação com o ocorrido no modelo físico, pode-se dizer que o processo de drenagem ocorrido foi muito semelhante.

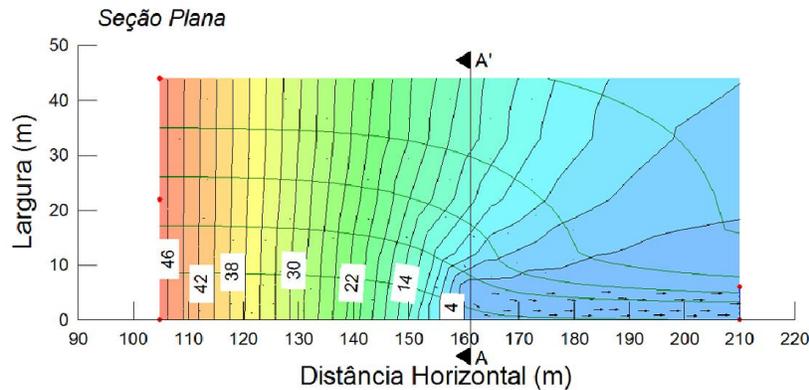


FIGURA 4.34 – Projeção das equipotenciais ao longo da superfície freatica no plano horizontal xy do modelo dotado de um dreno francês

Analisando a seção transversal apresentada na Figura 4.35, pode-se confirmar a ocorrência de percolação de fluxo no sentido ao dreno, o qual pode ser evidenciado pela existência de gradiente hidráulico entre as seções S3 e S1.

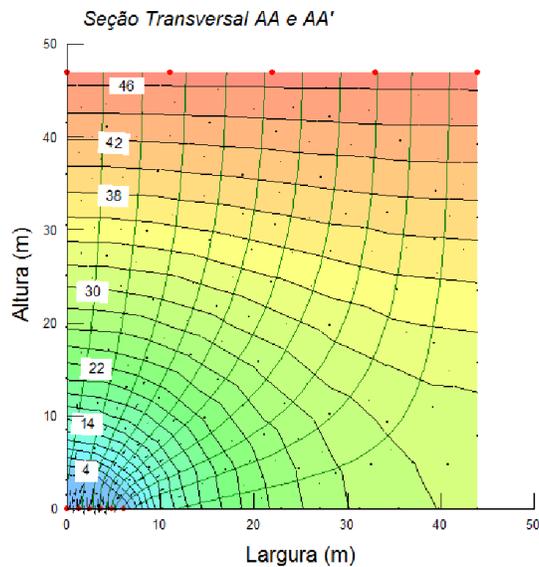


FIGURA 4.35 – Seção transversal da projeção das equipotenciais ao longo da superfície freatica no plano vertical yz do modelo dotado de um dreno francês

Analisando graficamente as cargas obtidas (Figura 4.36), observa-se as diferenças de carga total entre as seções, sendo que a carga mais elevada foi encontrada na S3, seguida pela S2 e finalmente a S1, evidenciando a existência de gradiente hidráulico que permite o escoamento do fluxo no sentido do dreno, localizado a direita da barragem. Nota-se que nas seções que não possuem sistema de drenagem, a água ainda chega ao pé do talude com alguma carga.

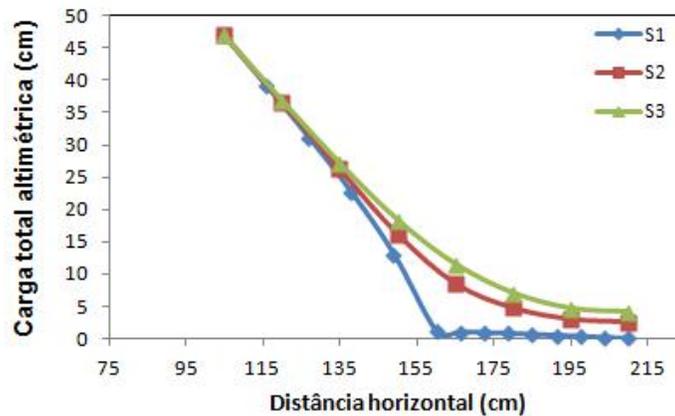


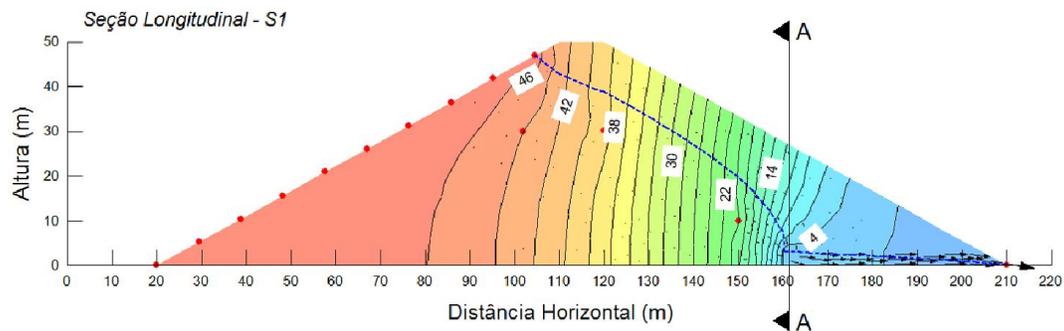
FIGURA 4.36 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 2

A simulação realizada, implantando drenos espaçados a 88 cm, pôde demonstrar a eficiência do dispositivo e validar a modelagem reduzida. Contudo ficou claro que utilização deste espaçamento proporciona a ocorrência de cargas elevadas no maciço, principalmente no pé do talude de jusante.

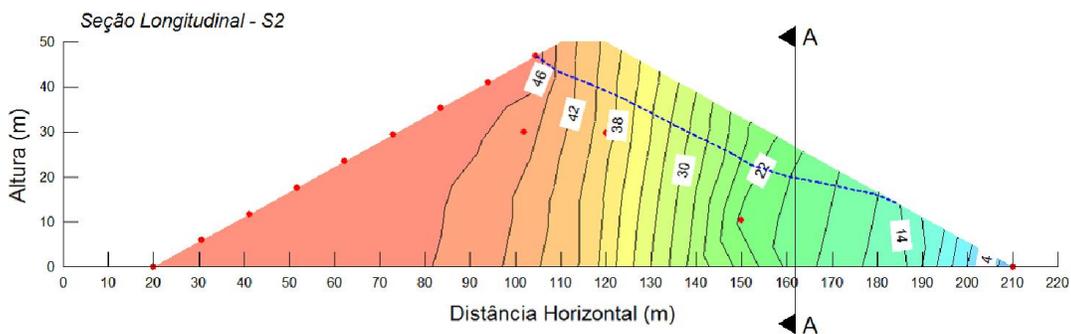
4.3.2.3 Modelo 3 – Barragem com 2 drenos franceses simulando espaçamento de 44 cm

O modelo 3 consistiu em analisar a barragem dotada de 2 drenos franceses, simulando espaçamento de 44 cm. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas nas Figura 4.37 (a, b e c).

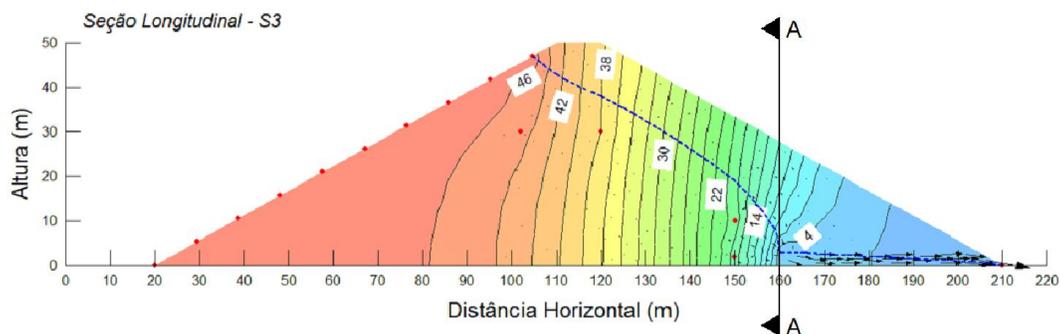
Analisando as seções, nota-se que as linhas freáticas da S1 e S3 são muito aproximadas, apresentando cargas mais baixas que na seção S2. Este fato se deve a existência dos drenos nas extremidades do modelo, os quais reduzem as cargas geradas no maciço. A superfície freática da seção S2 apresentou cargas elevadas chegando ao talude de jusante com aproximadamente 14 cm de carga altimétrica, podendo ser explicado pela inexistência de dreno nesta linha de fluxo.



a) Seção longitudinal S1



b) Seção longitudinal S2



c) Seção longitudinal S3

FIGURA 4.37 – Seções longitudinais do modelo 3 com imposição das alturas piezométricas.

A Figura 4.38 representa o comportamento do fluxo mediante a um menor espaçamento entre os drenos. É possível observar que a maior vazão é escoada pelos drenos. Porém, ainda que com carga muito menor, há um volume pequeno que escoava entre os drenos, através do maciço maciço. No caso deste modelo, verifica-se que a dissipação das cargas é realizada mais rapidamente que no modelo anterior e de forma mais uniforme.

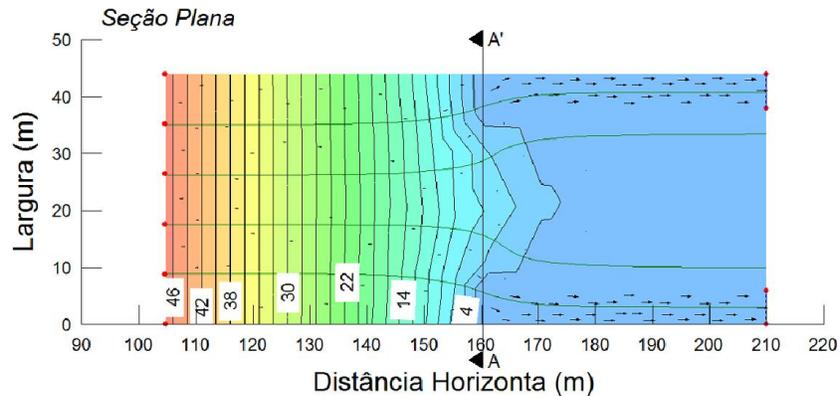


FIGURA 4.38 – Projeção das equipotenciais ao longo da superfície freática no plano horizontal xy do modelo dotado de dois drenos franceses

Essa uniformidade também pode ser observada através da seção transversal (Figura 4.39). É possível verificar a existência de gradiente hidráulico ocorrendo no sentido de ambos os drenos localizados nas extremidades. Comparando os gradientes hidráulicos encontrados neste modelo com o apresentado no modelo com um dreno verifica-se que este é consideravelmente maior, justificando a ocorrência da erosão na saída do dreno encontrado na modelagem física. A análise da seção transversal deste modelo torna visível a simetria do fluxo diante aos dois dispositivos.

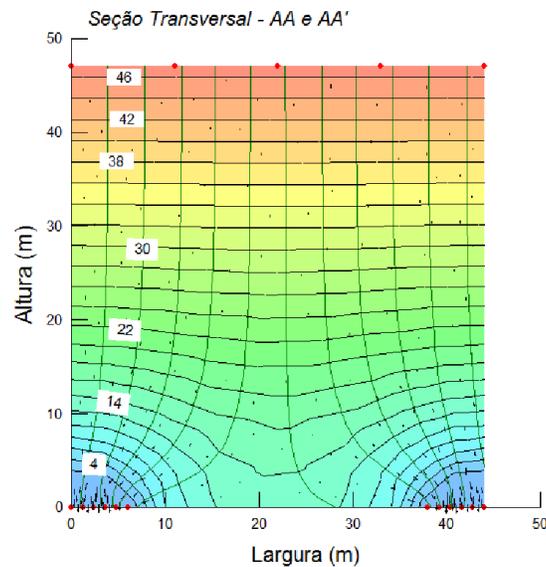


FIGURA 4.39 – Seção transversal da projeção das equipotenciais ao longo da superfície freática no plano vertical yz do modelo dotado de dois drenos franceses

Analisando graficamente as cargas obtidas (Figura 4.40), observa-se a diferença de carga de cada seção. Embora na seção S2 não exista sistema de drenagem na linha de fluxo, a carga total que chega no pé do talude é baixa, o qual

pode ser explicado pela menor distância entre os drenos, possibilitando que as pressões no maciço sejam dissipadas mais facilmente. O fato de as cargas serem mais elevadas na seção central, indica que a existência de gradiente hidráulico proporciona ocorrência de fluxo do centro para as extremidades da barragem.

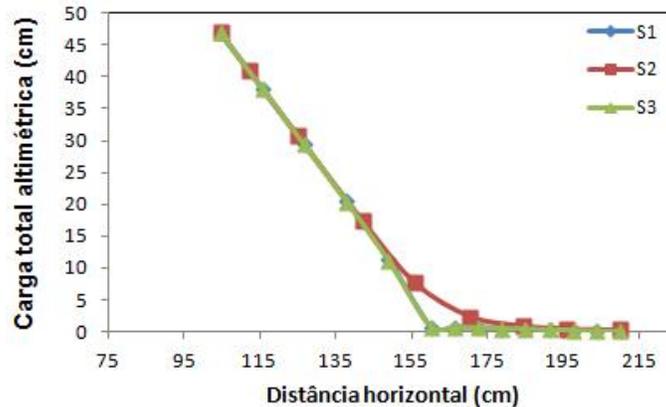


FIGURA 4.40 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 3

4.3.2.4 Modelo 4 – Barragem com 3 drenos franceses simulando espaçamento de 22 cm

O modelo 4 consistiu em analisar a barragem dotada de 3 drenos franceses, simulando espaçamento de 22 cm. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura 4.41 (a, b e c).

Analisando as seções deste modelo pode-se observar que o comportamento do fluxo apresentou algumas diferenças. Nota-se que a seção S2 possui superfície freática em posição mais elevada se comparadas com S1 e S3, indicando aumento de carga no interior do maciço. Este fenômeno pode ser verificado através da simulação do modelo reduzido, cujo escoamento ocorreu inicialmente pelo dreno do meio.

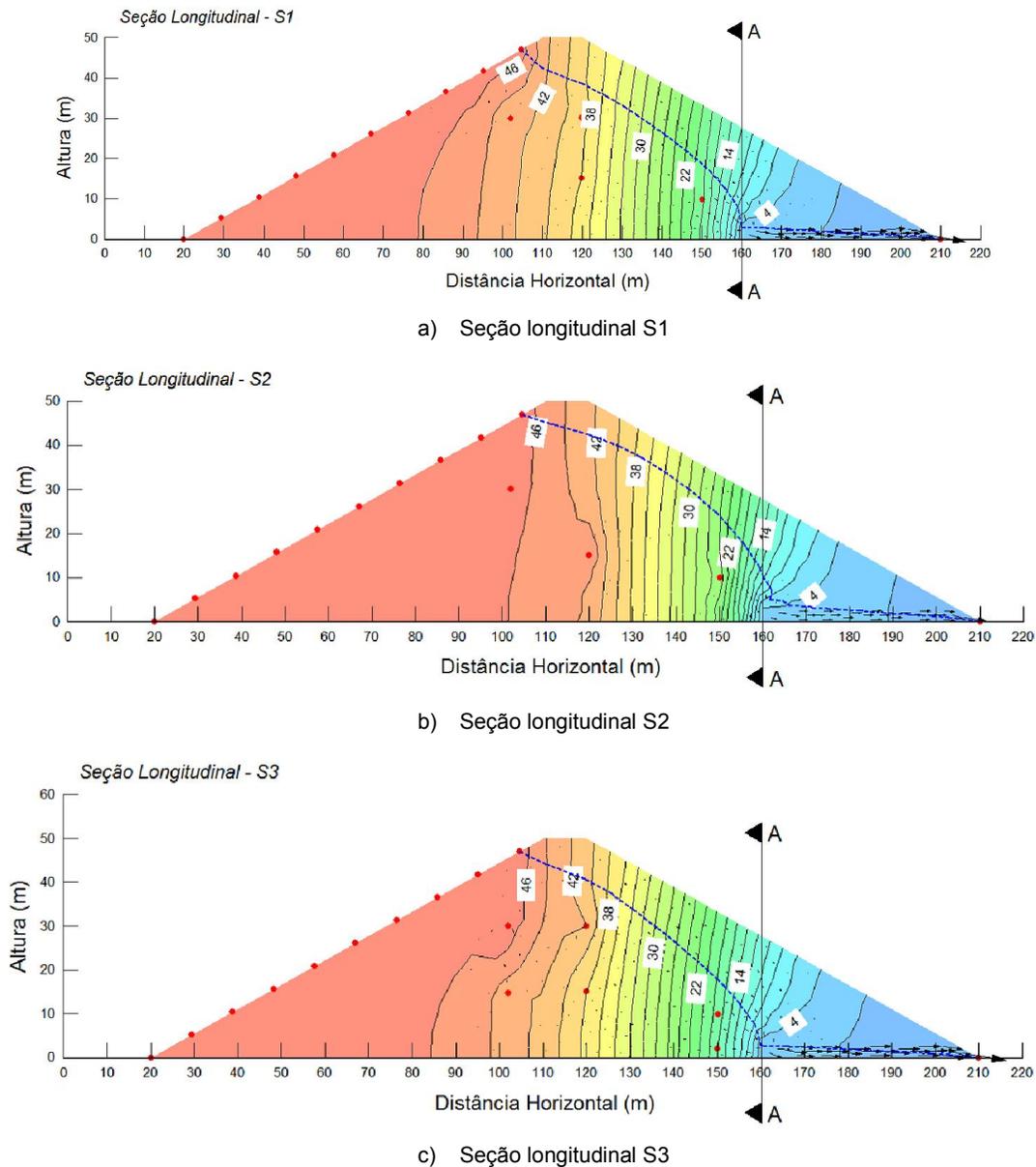


FIGURA 4.41 – Seções longitudinais do modelo 4 com imposição das alturas piezométricas.

A Figura 4.42 representa o comportamento do fluxo mediante a um menor espaçamento entre os drenos se comparado com as modelagens anteriores. No caso deste modelo, verifica-se que a dissipação das cargas é realizada mais rapidamente que nos modelos anteriores e de forma mais uniforme, se assemelhando ao comportamento apresentado pelo modelo do tapete drenante.

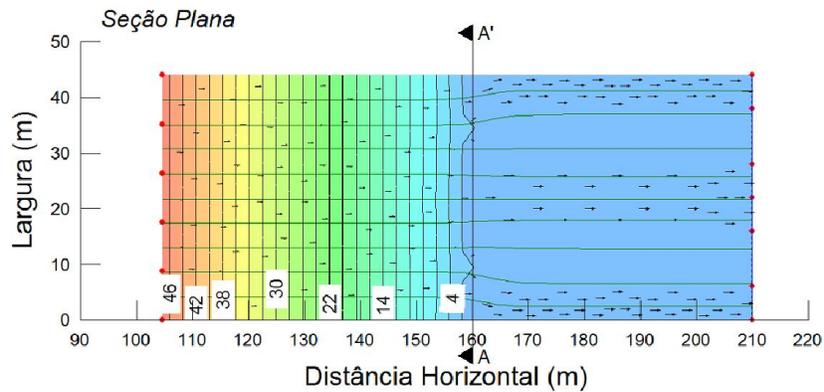


FIGURA 4.42 – Projeção das equipotenciais ao longo da superfície freática no plano horizontal xy do modelo dotado de três drenos franceses

Através da Figura 4.43 pode ser observada a uniformidade do fluxo pelo maciço, o qual se assemelha ao comportamento verificado no modelo com tapete drenante. Similarmente ao modelo com dois drenos, é possível verificar a simetria do fluxo diante ao sistema de drenagem. Desta forma pode-se considerar que, independente do espaçamento, esta simetria sempre ocorrerá entre os dispositivos, porém as cargas apresentadas serão menores conforme o menor espaçamento entre os drenos.

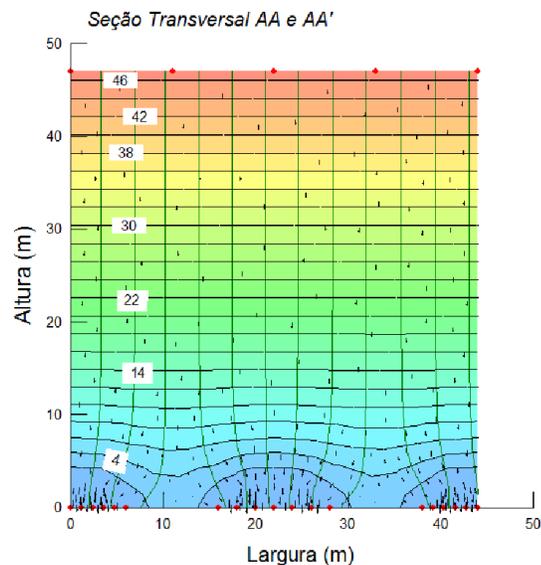


FIGURA 4.43 – Seção transversal da projeção das equipotenciais ao longo da superfície freática no plano vertical yz do modelo dotado de três drenos franceses

Analisando graficamente as cargas obtidas (Figura 4.44), nota-se que, como todas as seções apresentaram dispositivo de drenagem, as dissipações das cargas foi

muito similar, indicando que quanto menor for o espaçamento entre os drenos menores são as cargas totais no maciço.

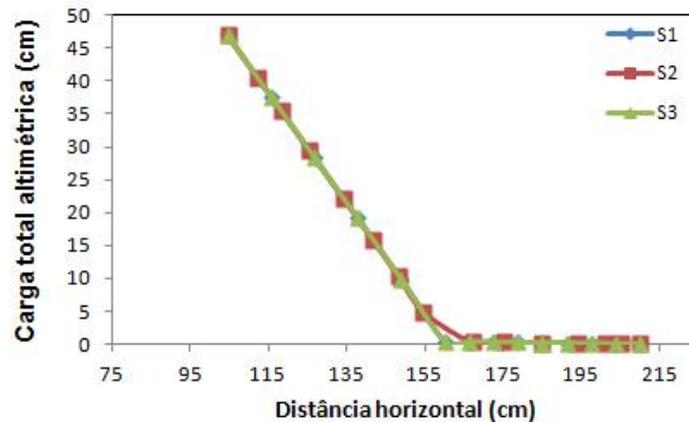


FIGURA 4.44 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 4

4.3.3 Etapas 2 – Determinação de k_z / k_x

Esta etapa consistiu em determinar a relação k_z / k_x que melhor adequasse o comportamento do fluxo dos modelos analisados à configuração inicial encontrada na modelagem física, possibilitando que as análises paramétricas, realizadas posteriormente, obtenham resultados mais reais e confiáveis.

Utilizando a seção apresentada na Figura 4.45 como base de comparação, tem-se o comportamento do fluxo considerando anisotropia igual a 1. Nota-se que a linha freática apresenta carga total elevada.

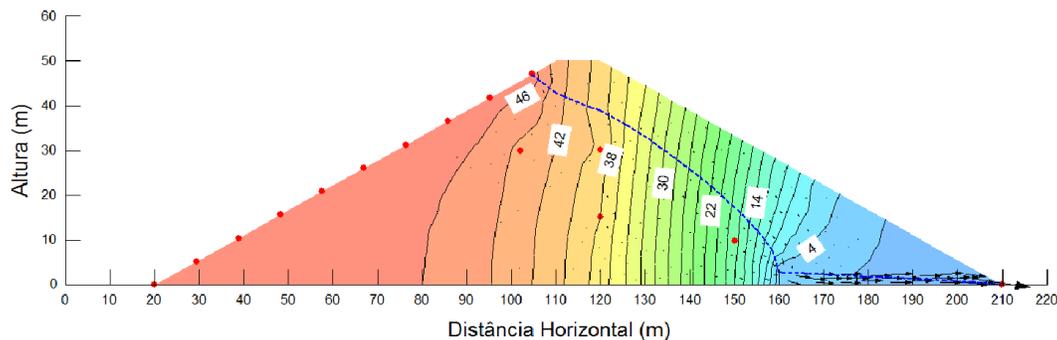


FIGURA 4.45 – Comportamento do fluxo admitindo anisotropia 1

Considerando a análise realizada para uma anisotropia hidráulica igual a 0,8, a rede de fluxo representativa da percolação de água através do maciço é apresentada

na Figura 4.46. Nota-se que a linha freática obtida apresenta carga total mais baixa que a obtida inicialmente.

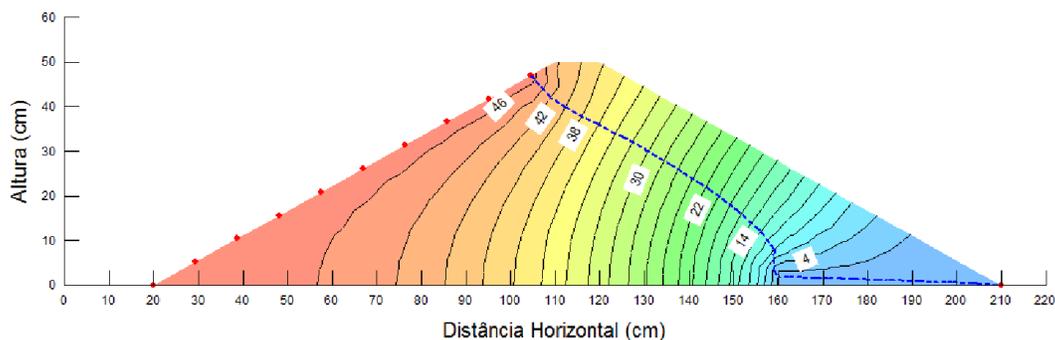


FIGURA 4.46 – Comportamento do fluxo admitindo anisotropia 0,8

Para valores de anisotropia entre 0,7 e 0,4 o comportamento do fluxo apresentou-se muito similar ao de 0,8, portanto não houve a necessidade de serem apresentados.

Considerando uma anisotropia hidráulica igual a 0,3, a rede de fluxo apresentou a configuração mostrada na Figura 4.47. Este valor de anisotropia é considerado como o mais próximo dos valores encontrados na prática. Nota-se que a linha freática obtida apresenta carga total mais elevada e aproximada do modelo base.

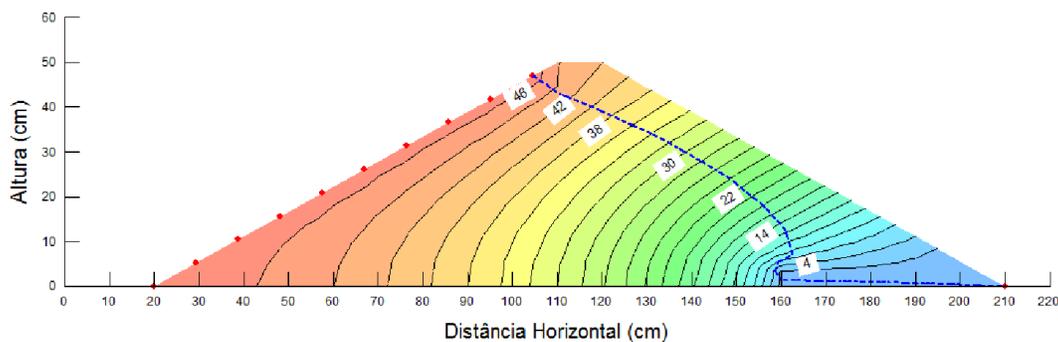


FIGURA 4.47 – Comportamento do fluxo admitindo anisotropia 0,3

Considerando uma anisotropia hidráulica igual a 0,2, a rede de fluxo representativa da percolação de água através do maciço é apresentada na Figura 4.48. Nota-se que a linha freática obtida não apresenta comportamento similar e o resultado das cargas totais encontra-se consideravelmente mais elevadas que a obtida no modelo inicial.

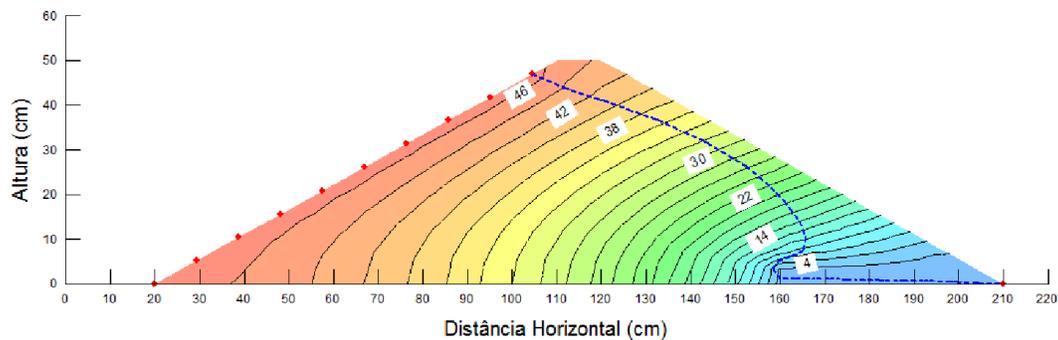


FIGURA 4.48 – Comportamento do fluxo admitindo anisotropia 0,2

Analisando os comportamentos de fluxo encontrados foi adotado valor de anisotropia igual a 0,3, o qual foi considerado mais adequado. Dessa forma, para todos os modelos estudados nas análises paramétricas será admitido relação k_z / k_x igual a 0,3.

4.3.4 Etapas 3 – Análises paramétricas

A fim de se analisar melhor o comportamento do fluxo e validar o funcionamento dos drenos franceses foram realizadas algumas análises paramétricas, os quais serão apresentadas nos subitens a seguir. Para tanto a Tabela 4.10 apresenta a relação dos modelos simulados e de suas respectivas características admitidas para o estudo dos drenos.

TABELA 4.10 – Análises paramétricas realizadas para cada modelo

Barragem	L ¹ (cm)	C ² (cm)	S ³ (cm)
	44	50	-
	44	70	-
	44	95	-
	72	50	-
1	72	70	-
	72	95	-
	100	50	-
	100	70	-
	100	95	-
	44	50	88
	44	70	88
	44	95	88
	72	50	148
2	72	70	148
	72	95	148
	100	50	200
	100	70	200
	100	95	200
	44	50	44
	44	70	44
	44	95	44
	72	50	72
3	72	70	72
	72	95	72
	100	50	100
	100	70	100
	100	95	100
	44	50	22
	44	70	22
	44	95	22
	72	50	36
4	72	70	36
	72	95	36
	100	50	50
	100	70	50
	100	95	50

¹ L = Largura da barragem; ² C = Comprimento do dreno;
³ S = Espaçamento entre os drenos

4.3.4.1 Simulação dos modelos com largura (L) de 44cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) de 50 cm

As simulações realizadas neste item são apresentadas resumidamente na Tabela 4.11, bem como as figuras representativas de cada modelo.

TABELA 4.11 – Análises paramétricas

Barragem	Dispositivo de drenagem	L ¹ (cm)	C ² (cm)	S ³ (cm)	Anexo	Figura
1	Tapete drenante	44	50	-	A	A.1
2	1 dreno francês	44	50	88	A	A.2
3	2 drenos franceses	44	50	44	A	A.3
4	3 drenos franceses	44	50	22	A	A.4

¹ L = Largura da barragem; ² C = Comprimento do dreno; ³ S = Espaçamento entre os drenos

4.3.4.1.1 Modelo 1 – Barragem com tapete drenante

O modelo 1 consistiu em analisar a barragem dotada de tapete drenante. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura A.1 (anexo A). Nota-se que as três seções longitudinais possuem a mesma configuração, devido a presença do sistema de drenagem.

Projetando as linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano horizontal obteve-se a seção plana. Observa-se que o fluxo é homogêneo ao longo do percurso, proporcionando que a dissipação das cargas hidráulicas ocorra igualmente ao longo do maciço e dos dreno.

Da mesma forma, projetando-se as linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano vertical obteve-se a seção transversal, com relação ao dreno. Esta representação mostra, de forma mais clara, a dissipação homogênea das cargas.

A Figura 4.49, representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço, desde a entrada da água no talude de montante até a saída no pé do talude de jusante. Nota-se que em todas as seções o comportamento de dissipação das cargas é similar, apresentando queda de potencial linear até a entrada do dreno, cuja carga é zero. Como o tapete drenante é contínuo ao longo de toda a base de jusante da barragem, pode-se considerar que a percolação de água apresenta mesmo

comportamento através do maciço, sem a elevação de carga total altimétrica em nenhum ponto.

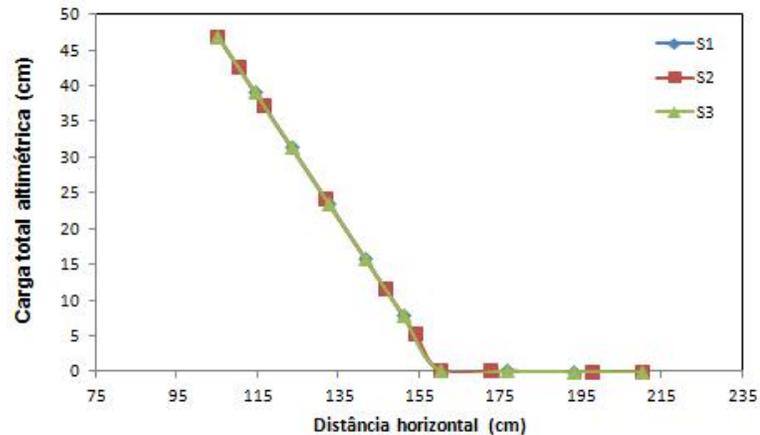


FIGURA 4.49 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 1 para comprimento de dreno igual a 50 cm

4.3.4.1.2 Modelo 2 – Barragem com 1 dreno francês simulando espaçamento (S) de 88 cm

O modelo 2 consistiu em analisar a barragem dotada de um dreno francês, simulando espaçamento de 88 cm entre os drenos. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura A.2 (anexo A). Nota-se que as seções longitudinais demonstraram algumas diferenças significativas. A seção S1 apresentou superfície freática similar à apresentada no modelo com tapete drenante, devido a existência de dispositivo de drenagem. Já nas seções S2 e S3, a ausência deste dispositivo proporcionou uma elevação considerável das cargas hidráulicas. O comportamento do fluxo encontrado nestas duas últimas seções não representa corretamente a situação no interior do maciço, pois o programa desconsidera a existência de um sistema de drenagem ao longo de toda a barragem. Neste caso as cargas hidráulicas encontradas nas seções S2 e S3, que melhor represente esta simulação, são apresentadas na Figura 4.50.

Projetando as linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano horizontal obteve-se a seção plana. Analisando esta seção observa-se que as linhas de fluxo percolam sentido ao dreno, localizado na lateral direita da barragem. Como a simulação desta seção representa a metade da distância entre os drenos é possível

verificar que para um espaçamento de 88 cm a água ainda atinge o pé do talude de jusante com alguma carga hidráulica.

A seção transversal demonstra com mais clareza o comportamento do fluxo. Analisando a seção pode ser observada a existência de gradiente hidráulico, indicando deslocamento de fluxo no interior do maciço sentido ao dreno. Através da representação desta seção verifica-se que o fluxo é escoado, quase totalmente, pelo dreno francês.

A Figura 4.50, representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço, desde a entrada da água no talude de montante até a saída no pé do talude de jusante. Observa-se que para o fluxo mais afastado do sistema de drenagem as cargas totais apresentam-se mais elevadas. Conforme a proximidade com o dreno as mesmas tendem a ser dissipadas mais facilmente pelo dispositivo. Esta diferença de comportamento hidráulico encontrado em cada seção demonstra que o espaçamento entre os drenos proporciona aumento das cargas hidráulicas no interior do maciço.

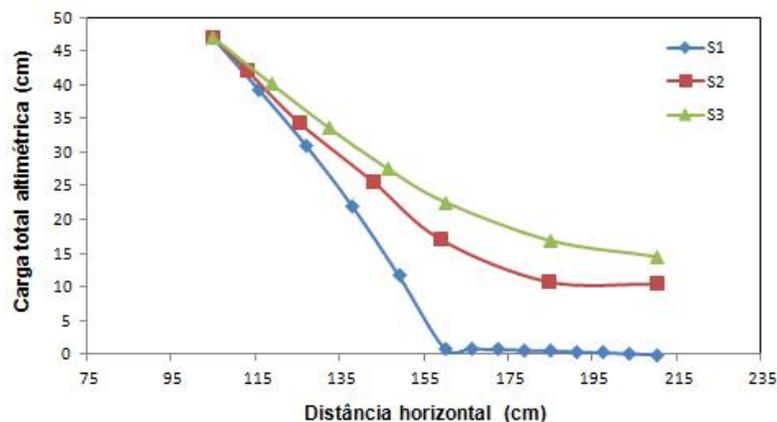


FIGURA 4.50 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 2 para comprimento de dreno igual a 50 cm

4.3.4.1.3 Modelo 3 – Barragem com 2 drenos franceses simulando espaçamento (S) de 44 cm

O modelo 3 consistiu em analisar a barragem dotada de dois drenos franceses, simulando espaçamento de 44 cm entre os drenos. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura A.3 (anexo A). Nota-se que as seções longitudinais demonstraram algumas diferenças significativas. No caso das seções S1 e S3 a

superfície freática apresentou configuração similar devido a existência de dispositivo de drenagem. Já na seção S2 as cargas hidráulicas mostraram-se consideravelmente maiores ao longo do maciço, igualmente à seção S2 obtida no modelo com um dreno, devido à inexistência do mesmo. O comportamento do fluxo encontrado nesta última seção não representa corretamente a situação no interior do maciço, pois o programa desconsidera a existência de um sistema de drenagem ao longo de toda a barragem. Neste caso as cargas hidráulicas encontradas na seção S2, que melhor represente esta simulação, são apresentadas na Figura 4.51.

Analisando a projeção do fluxo na seção plana, observa-se que a drenagem do maciço foi realizada basicamente pelos drenos. Nota-se que o fluxo se divide igualmente entre os dois dispositivos, proporcionando um comportamento de drenagem simétrico ao longo do maciço, característico de sistemas lineares.

Através da projeção apresentada na seção transversal é possível observar mais claramente a simetria do fluxo através do maciço. Nota-se que com a diminuição do espaçamento entre os drenos há um aumento no gradiente hidráulico, indicando que a percolação de água, escoada no sentido aos dispositivos, proporciona maior vazão nos drenos.

A Figura 4.51 representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço, desde a entrada da água no talude de montante até a saída no pé do talude de jusante. No caso deste modelo observa-se que as cargas encontradas nas seções S1 e S3 são similares. Como, na seção S2, não há presença de dispositivo de drenagem, os valores são um pouco mais elevados. Dessa forma pode-se considerar que, se comparado ao espaçamento analisado para a barragem com um dreno, as cargas hidráulicas são menores no interior do maciço.

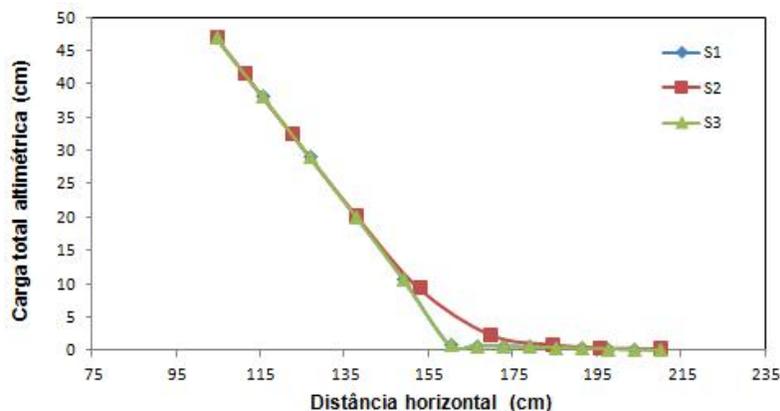


FIGURA 4.51 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 3 para comprimento de dreno igual a 50 cm

4.3.4.1.4 Modelo 4 – Barragem com 3 drenos franceses simulando espaçamento (S) de 22 cm

O modelo 4 consistiu em analisar a barragem dotada de três drenos franceses, simulando espaçamento de 22 cm entre os drenos. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura A.4 (anexo A). Nota-se que as superfícies freáticas apresentam configuração muito similar, devido a presença de sistema de drenagem em todas as seções.

Analisando a projeção do fluxo no plano horizontal, pode-se observar que a percolação de água pelo maciço é realizada de forma mais homogênea, se assemelhando ao comportamento do modelo dotado de tapete drenante. Nesta seção plana nota-se ainda que o fluxo é distribuído igualmente entre os drenos.

Analisando a projeção da superfície freática e das equipotenciais no plano vertical verifica-se o comportamento simétrico desenvolvido pelo fluxo diante a um menor espaçamento entre os drenos. Nota-se que as cargas hidráulicas encontradas no maciço, entre os dispositivos, são menores se comparado com os modelos de drenos mais espaçados.

A Figura 4.52 representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço, desde a entrada da água no talude de montante até a saída no pé do talude de jusante. Nota-se que em todas as seções o comportamento de dissipação das cargas é similar, apresentando queda de potencial linear até a entrada do dreno, cuja carga é zero. Como a drenagem deste modelo é linear pode-se considerar que entre os drenos as cargas são um pouco mais elevadas.

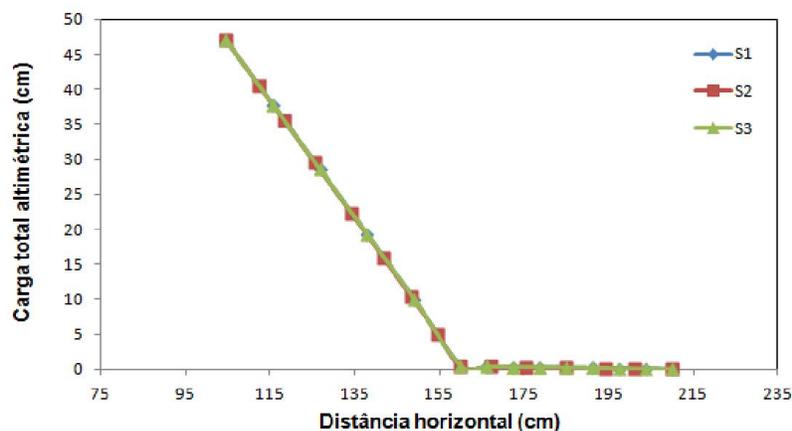


FIGURA 4.52 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 4 para comprimento de dreno igual a 50 cm

4.3.4.2 Modelo com largura (L) de 44cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) de 70cm

As simulações realizadas neste item são apresentadas resumidamente na Tabela 4.12, bem como as figuras representativas de cada modelo.

TABELA 4.12 – Análises paramétricas

Barragem	Dispositivo de drenagem	L ¹ (cm)	C ² (cm)	S ³ (cm)	Anexo	Figura
1	Tapete drenante	44	70	-	B	B.1
2	1 dreno francês	44	70	88	B	B.2
3	2 drenos franceses	44	70	44	B	B.3
4	3 drenos franceses	44	70	22	B	B.4

¹ L = Largura da barragem; ² C = Comprimento do dreno; ³ S = Espaçamento entre os drenos

4.3.4.2.1 Modelo 1 – Barragem com tapete drenante

Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções longitudinais S1, S2 e S3 apresentadas na Figura B.1 (anexo B). Analisando as seções nota-se que as mesmas possuem configuração similar, já que todas consideram a existência de um sistema de drenagem. Como o tapete drenante possui maior comprimento, observa-se que a linha freática é mais baixa, se comparado ao modelo simulando comprimento de dreno de 50 cm. Embora as superfícies freáticas apresentem uma curvatura na entrada do dreno, este fato não ocorre na realidade, mas possibilita que as cargas totais no maciço sejam mais baixas.

Projetando as linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano horizontal obteve-se a seção plana. Observa-se que o fluxo é homogêneo ao longo do percurso, proporcionando que a dissipação das cargas hidráulicas ocorra igualmente ao longo do maciço e do dreno. Com o aumento do comprimento do dispositivo, nota-se que o fluxo é percolado através do maciço mais rapidamente.

Da mesma forma, projetando-se as linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano vertical obteve-se a seção transversal, com relação ao dreno. Esta representação mostra, de forma mais clara, a dissipação homogênea das cargas.

A Figura 4.53, representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Nota-se que em todas as seções o comportamento de dissipação das cargas é similar, apresentando queda de potencial linear até a entrada do dreno, cuja carga é zero. É possível observar que com maior comprimento de dreno as cargas hidráulicas no

maciço são mais baixas e dissipadas mais rapidamente, possibilitando menor grau de saturação no talude de jusante. Como o tapete drenante é contínuo ao longo de toda a base de jusante da barragem, pode-se considerar que a percolação de água apresenta mesmo comportamento através do maciço, sem a elevação de carga total altimétrica em nenhum ponto.

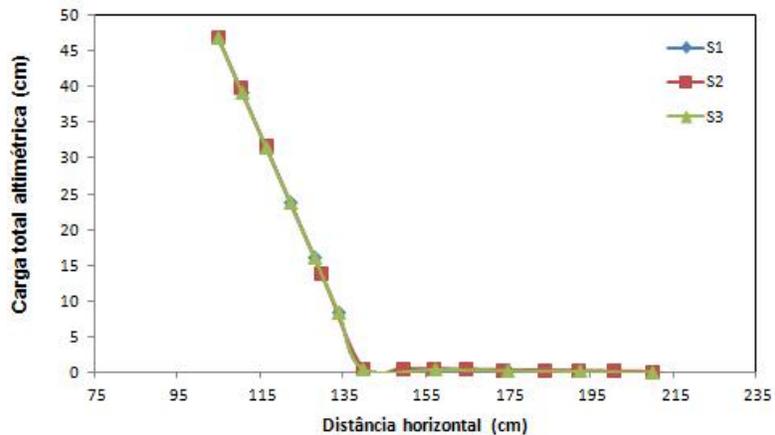


FIGURA 4.53 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 1 para comprimento de dreno igual a 70 cm

4.3.4.2.2 Modelo 2 – Barragem com 1 dreno francês simulando espaçamento (S) de 88 cm

Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções longitudinais S1, S2 e S3 apresentadas na Figura B.2 (anexo B). Analisando as seções pode-se observar que a seção S1, que possui sistema de drenagem, apresenta linha freática mais baixa, se comparado ao modelo simulando comprimento de dreno de 50 cm. Com relação às seções S2 e S3, a ausência do dispositivo de drenagem proporcionou uma elevação considerável das cargas hidráulicas. O comportamento do fluxo encontrado nestas duas últimas seções não representa corretamente a situação no interior do maciço, pois o programa desconsidera a existência de um sistema de drenagem ao longo de toda a barragem. Neste caso as cargas hidráulicas encontradas nas seções S2 e S3, que melhor represente esta simulação, são apresentadas na Figura 4.54.

Analisando a projeção da linha freática no plano horizontal, nota-se que o fluxo percola sentido ao dreno. Porém, o fato de o comprimento do dispositivo ser maior, permite que as cargas sejam dissipadas mais rapidamente, quanto mais próximo o fluxo estiver do dreno. Como a simulação desta seção representa a metade da

distância entre os drenos é possível verificar que para um espaçamento de 88 cm a água ainda atinge o pé do talude de jusante com alguma carga hidráulica.

A seção transversal demonstra com mais clareza o comportamento do fluxo. Analisando a seção pode ser observada a existência de gradiente hidráulico, indicando deslocamento de fluxo no interior do maciço sentido ao dreno. Através da representação desta seção verifica-se que o fluxo é escoado, quase totalmente, pelo dreno francês.

A Figura 4.54, representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Observa-se que para o fluxo mais afastado do sistema de drenagem as cargas totais apresentam-se mais elevadas. Conforme a proximidade com o dreno as mesmas tendem a ser dissipadas mais facilmente pelo dispositivo. Esta diferença de comportamento hidráulico encontrado em cada seção demonstra que o espaçamento entre os drenos proporciona aumento das cargas hidráulicas no interior do maciço. Nota-se ainda que a implantação de um dreno de maior comprimento possibilita a diminuição do trajeto percolado pelo fluxo no interior do maciço, reduzindo a zona de saturação da barragem.

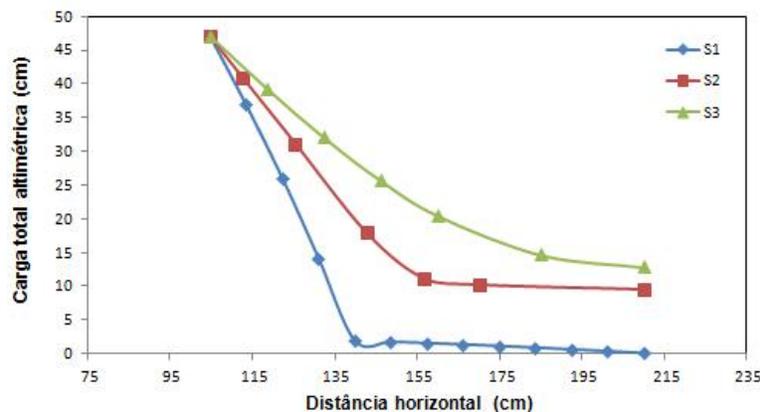


FIGURA 4.54 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 2 para comprimento de dreno igual a 70 cm

4.3.4.2.3 Modelo 3 – Barragem com 2 drenos franceses simulando espaçamento (S) de 44 cm

Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções longitudinais S1, S2 e S3 apresentadas na Figura B.3 (anexo B). Analisando as seções pode-se observar que S1 e S3, que possuem sistema de drenagem, apresentam superfície freática mais baixa, se comparado ao modelo

simulando comprimento de dreno de 50 cm. Com relação a seção S2, a ausência do dispositivo de drenagem proporcionou uma elevação considerável das cargas hidráulicas. O comportamento do fluxo encontrado nesta última seção não representa corretamente a situação no interior do maciço, pois o programa desconsidera a existência de um sistema de drenagem ao longo de toda a barragem. Neste caso as cargas hidráulicas encontradas na seção S2, que melhor represente esta simulação, são apresentadas na Figura 4.55.

Analisando a projeção da linha freática no plano horizontal observar-se que a drenagem foi realizada basicamente pelos drenos. Nota-se que o fluxo se divide igualmente entre os dois dispositivos, proporcionando um comportamento de drenagem simétrico ao longo do maciço. Porém, pode-se observar que a implantação de drenos mais compridos, embora possibilitem que as cargas hidráulicas sejam dissipadas mais rapidamente, a superfície freática, entre os drenos, apresenta carga considerável, sendo gradativamente dissipada e atingindo o pé do talude de jusante com carga zero.

Através da projeção apresentada na seção transversal é possível observar mais claramente a simetria do fluxo através do maciço. Nota-se que com a diminuição do espaçamento entre os drenos há um aumento no gradiente hidráulico, indicando que a percolação de água, escoada no sentido aos dispositivos, proporciona maior vazão nos drenos.

A Figura 4.55, representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Nota-se que as seções S1 e S3 as cargas são similares, apresentando valores mais baixos que na seção S2, em que não há presença de dispositivo de drenagem. Comparando-se os resultados obtidos nesta modelagem com a barragem dotada de um dreno francês pode-se verificar que as cargas hidráulicas no interior do maciço são consideravelmente menores. Com relação ao comportamento da superfície freática observa-se que a simulação de um dreno de maior comprimento possibilita a diminuição do trajeto percolado pelo fluxo no interior do maciço, reduzindo a zona de saturação da barragem.

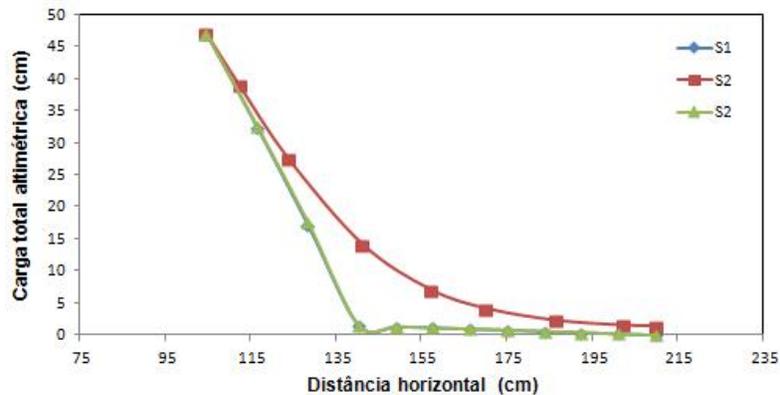


FIGURA 4.55 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 3 para comprimento de dreno igual a 70 cm

4.3.4.2.4 Modelo 4 – Barragem com 3 drenos franceses simulando espaçamento (S) de 22 cm

Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções longitudinais S1, S2 e S3 apresentadas na Figura B.4 (anexo B). Analisando a seção nota-se que as três superfícies freáticas apresentaram o mesmo comportamento, devido à presença do sistema de drenagem. Pode-se observar que a simulação de drenos mais compridos proporcionou o rebaixamento da freática, o qual consequentemente reduziu a região de saturação da barragem.

Através da projeção horizontal da superfície freática, pode-se observar que, devido ao maior comprimento dos drenos, a carga é dissipada mais rapidamente. Nota-se ainda que a percolação apresenta-se em estado mais plano, semelhante ao comportamento do modelo dotado de tapete drenante.

Analisando a seção transversal verifica-se o comportamento simétrico desenvolvido pelo fluxo diante a um menor espaçamento entre os drenos. Nota-se que as cargas hidráulicas encontradas no maciço, entre os dispositivos, são menores se comparado com os modelos de drenos mais espaçados.

A Figura 4.56 representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Nota-se que em todas as seções o comportamento de dissipação das cargas é similar, apresentando queda de potencial linear até a entrada do dreno, cuja carga é zero. Como a drenagem deste modelo é linear pode-se considerar que entre os drenos as cargas são um pouco mais elevadas, conforme apresentado através da seção plana. Com relação ao comportamento da superfície freática observa-se que a simulação de

drenos mais compridos possibilita a diminuição do trajeto percolado pelo fluxo no interior do maciço, reduzindo a zona de saturação da barragem, o qual conseqüentemente mantém o talude de jusante com menor grau de saturação.

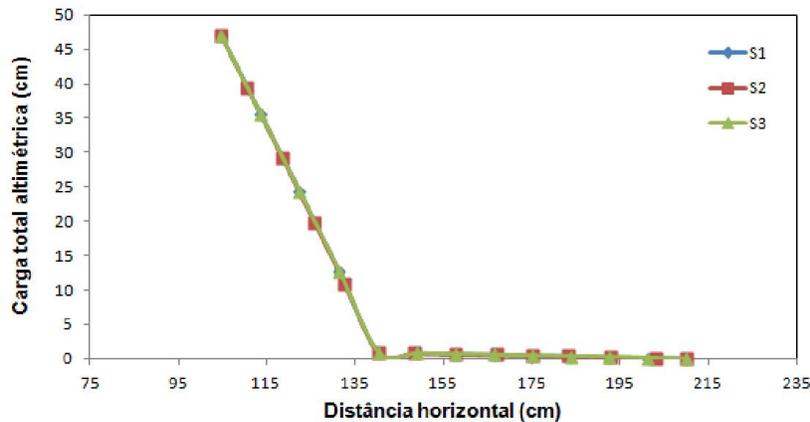


FIGURA 4.56 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 4 para comprimento de dreno igual a 70 cm

4.3.4.3 Modelo com largura (L) de 44 cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) de 95 cm

As simulações realizadas neste item são apresentadas resumidamente na Tabela 4.13, bem como as figuras representativas de cada modelo.

TABELA 4.13 – Análises paramétricas

Barragem	Dispositivo de drenagem	L ¹ (cm)	C ² (cm)	S ³ (cm)	Anexo	Figura
1	Tapete drenante	44	95	-	C	C.1
2	1 dreno francês	44	95	88	C	C.2
3	2 drenos franceses	44	95	44	C	C.3
4	3 drenos franceses	44	95	22	C	C.4

¹ L = Largura da barragem; ² C = Comprimento do dreno; ³ S = Espaçamento entre os drenos

4.3.4.3.1 Modelo 1 – Barragens com tapete drenante

O modelo 1 consistiu em analisar a barragem dotada de tapete drenante. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura C.1 (anexo C). Analisando a seção nota-se que as superfícies freáticas possuem a mesma configuração, já que todas consideram a existência de sistema de drenagem. Como o tapete drenante possui

maior comprimento, observa-se que a linha freática apresentou carga hidráulica consideravelmente mais baixa, se comparada com os modelos simulando comprimento de 50 cm e 70 cm. No entanto, pode-se observar que a entrada do fluxo no dreno se deu a partir da distância horizontal de 150 cm, tornando desnecessário cerca de 35 cm do dreno.

Projetando as linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano horizontal obteve-se a seção plana. Observa-se que o fluxo é uniforme ao longo do percurso, proporcionando que a dissipação das cargas hidráulicas ocorra igualmente ao longo do maciço e do dreno. Com o aumento do comprimento do dispositivo, nota-se que o fluxo é percolado através do maciço mais rapidamente.

Da mesma forma, projetando-se as linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano vertical obteve-se a seção transversal, com relação ao dreno. Esta representação mostra, de forma mais clara, a dissipação homogênea das cargas.

A Figura 4.57, representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Nota-se que em todas as seções a carga hidráulica é dissipada igualmente, apresentando queda de potencial linear até a entrada do dreno, seguindo com carga nula até a saída do dreno. É possível observar que com maior comprimento de dreno as cargas são mais baixas e dissipadas mais rapidamente, possibilitando menor grau de saturação no talude de jusante. Como o tapete drenante é contínuo ao longo de toda a base de jusante da barragem, pode-se considerar que a percolação de água apresenta mesmo comportamento através do maciço, sem a elevação de carga total altimétrica em nenhum ponto.

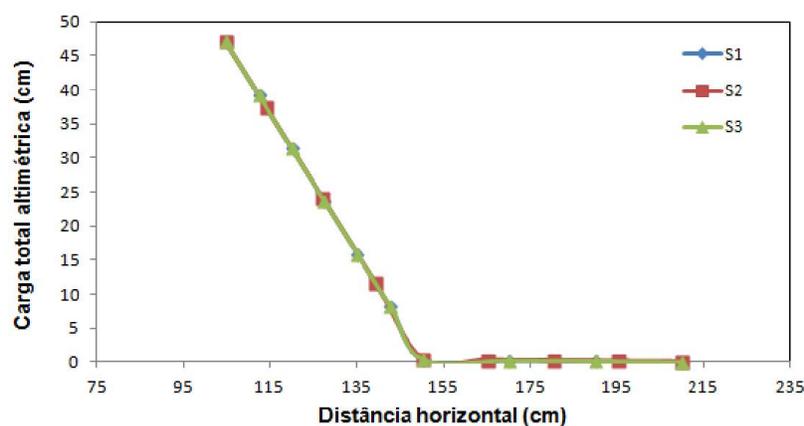


FIGURA 4.57 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 1 para comprimento de dreno igual a 95 cm

4.3.4.3.2 Modelo 2 – Barragem com 1 dreno francês simulando espaçamento (S) de 88 cm

Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções longitudinais S1, S2 e S3 apresentadas na Figura C.2 (anexo C). Analisando as seções nota-se que as mesmas demonstraram algumas diferenças significativas. Pode-se observar que na seção S1 a superfície freática apresentou comportamento similar as seções demonstradas no modelo dotado de tapete drenante, devido a existência de dispositivo de drenagem. No caso deste modelo pôde ser observado que a entrada do fluxo no dreno se deu a partir da distancia horizontal de 150 cm, aproximadamente, tornando desnecessario cerca de 35 cm do dispositivo. Com relação às seções S2 e S3 as superfícies freáticas encontradas no maciço apresentaram-se bastante elevadas, devido a ausência do dispositivo de drenagem. O comportamento do fluxo encontrado nestas duas últimas seções não representa corretamente a situação no interior do maciço, pois o programa desconsidera a existência de um sistema de drenagem ao longo de toda a barragem. Neste caso as cargas hidráulicas encontradas nas seções S2 e S3, que melhor represente esta simulação, são apresentadas na Figura 4.58.

Analisando a projeção da linha freática no plano horizontal, nota-se que o fluxo percola sentido ao sistema de drenagem. Embora o dreno tenha maior comprimento, a projeção considera o ponto de entrada do fluxo no dispositivo, que neste caso ocorre na distância de 150 cm, aproximadamente. Observa-se que a dissipação das cargas é realizada mais rapidamente, quanto mais próximo do dreno o fluxo estiver, podendo ser verificado que na lateral oposta ao dreno, às cargas são mais elevadas na base do talude de jusante.

Analisando a projeção da superfície freática no plano vertical verifica-se a existência de gradiente hidráulico, indicando deslocamento de fluxo no interior do maciço sentido ao dreno.

A Figura 4.58, representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Observa-se que quanto mais afastado do dreno o fluxo estiver, maiores são as cargas hidráulicas que chegam ao pé do talude de jusante. A ocorrência de cargas muito elevadas na base de jusante podem comprometer a estabilidade da barragem. Observa-se que para o fluxo mais afastado do dreno francês as cargas totais apresentam-se mais elevadas. Conforme a proximidade com o dreno as mesmas tendem a ser dissipadas mais facilmente pelo dispositivo. Esta diferença de

comportamento hidráulico encontrado em cada seção demonstra que o espaçamento entre os drenos proporciona aumento das cargas hidráulicas no interior do maciço. Nota-se ainda que a implantação de um dreno de maior comprimento possibilita a diminuição do trajeto percolado pelo fluxo no interior do maciço, reduzindo a zona de saturação da barragem.

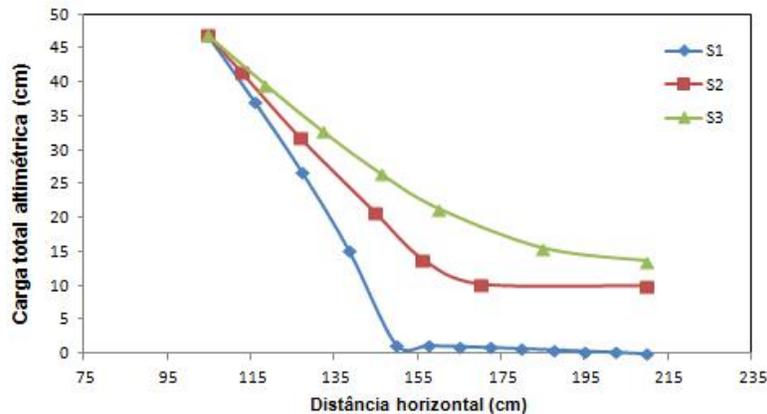


FIGURA 4.58 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 2 para comprimento de dreno igual a 95 cm

4.3.4.3.3 Modelo 3 – Barragem com 2 drenos franceses simulando espaçamento (S) de 44 cm

Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções longitudinais S1, S2 e S3 apresentadas na Figura C.3 (anexo C). Analisando as seções pode-se observar que nas seções S1 e S3 a superfície freática apresentou comportamento similar, devido a presença do sistema de drenagem. Nota-se que as cargas encontradas são significativamente mais baixas, se comparado aos modelos simulando comprimento menores de dreno. No caso deste modelo também pôde ser observado que a entrada do fluxo no dreno se deu a partir da distancia horizontal de 150 cm, aproximadamente, tornando desnecessario cerca de 35 cm do dispositivo. Com relação a seção S2, a ausência do dispositivo de drenagem proporcionou uma elevação considerável das cargas hidráulicas. O comportamento do fluxo encontrado nesta última seção não representa corretamente a situação no interior do maciço, pois o programa desconsidera a existência de um sistema de drenagem ao longo de toda a barragem. Neste caso as cargas hidráulicas encontradas na seção S2, que melhor represente esta simulação, são apresentadas na Figura 4.59.

Projetando a superfície freática na seção plana nota-se que o fluxo se divide igualmente entre os dois dispositivos, proporcionando um comportamento de drenagem simétrico ao longo do maciço. Embora o dreno tenha maior comprimento, a projeção considera a entrada do fluxo, no dreno, na distância 150 cm. Neste caso a representação da dissipação das cargas se assemelha ao ocorrido no modelo com comprimento de dreno de 70 cm, em que a superfície freática, entre os drenos, apresenta carga considerável, sendo gradativamente dissipada e atingindo o pé do talude de jusante com carga zero.

Através da projeção apresentada na seção transversal é possível observar mais claramente a simetria do fluxo através do maciço. Nota-se que com a diminuição do espaçamento entre os drenos há um aumento no gradiente hidráulico, indicando que a percolação de água, escoada no sentido aos dispositivos, proporciona maior vazão nos drenos.

A Figura 4.59 representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. No caso deste modelo observa-se que as cargas encontradas nas seções S1 e S3 são similares, apresentando superfície freática valores mais baixa que na seção S2, em que não há presença de dispositivo de drenagem. Dessa forma pode-se considerar que, se comparado ao espaçamento analisado para a barragem com um dreno, as cargas hidráulicas são menores no interior do maciço. Com relação ao comprimento dos drenos, nota-se que a simulação de 95 cm, também, possibilita a diminuição do trajeto percolado pelo fluxo no interior do maciço, reduzindo a zona de saturação da barragem.

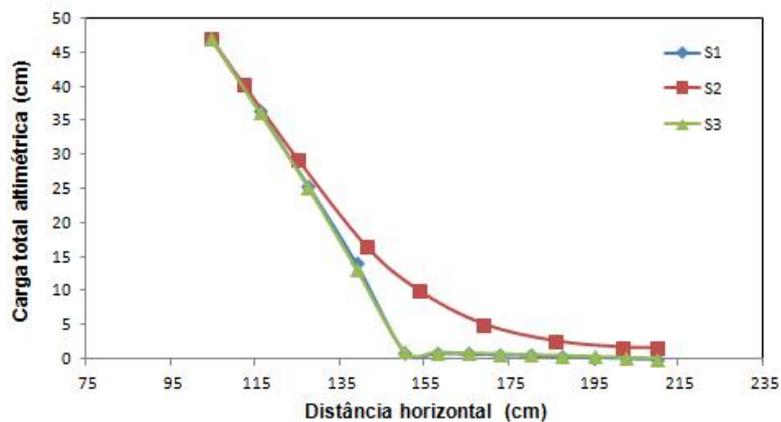


FIGURA 4.59 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 3 para comprimento de dreno igual a 95 cm

4.3.4.3.4 Modelo 4 – Barragem com 3 drenos franceses simulando espaçamento (S) de 22 cm

Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções longitudinais S1, S2 e S3 apresentadas na Figura C.4 (anexo C). Analisando a seção nota-se que as três superfícies freáticas desenvolvem o mesmo comportamento, já que todas consideram a existência de um sistema de drenagem. Para a simulação do comprimento de 95 cm dos drenos, pôde ser verificado, também neste modelo, que o início do fluxo no dreno se deu a partir da distância horizontal de 150 cm, tornando desnecessário cerca de 35 metros do dreno. Devido os drenos possuem maior comprimento, observa-se que a linha freática apresenta cargas mais baixas, proporcionando a redução da região de saturação da barragem.

Através da projeção horizontal da superfície freática, pode-se observar que, devido ao maior comprimento dos drenos, a carga é dissipada mais rapidamente. Nota-se ainda que a percolação apresenta-se em estado mais plano, semelhante ao comportamento do modelo dotado de tapete drenante.

Analisando a seção transversal verifica-se o comportamento simétrico desenvolvido pelo fluxo diante a um menor espaçamento entre os drenos. Nota-se que as cargas hidráulicas encontradas no maciço, entre os dispositivos, são menores se comparado com os modelos de drenos mais espaçados.

A Figura 4.60 representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Nota-se que em todas as seções o comportamento de dissipação das cargas é similar, apresentando queda de potencial linear até a entrada do dreno, seguindo com carga zero até o final do talude de jusante. Como a drenagem deste modelo é linear pode-se considerar que entre os drenos as cargas são um pouco mais elevadas, conforme apresentado através da seção plana. Com relação ao comportamento da superfície freática observa-se que a simulação de drenos mais compridos possibilita a diminuição do trajeto percolado pelo fluxo no interior do maciço, reduzindo a zona de saturação da barragem, o qual conseqüentemente mantém o talude de jusante com menor grau de saturação.

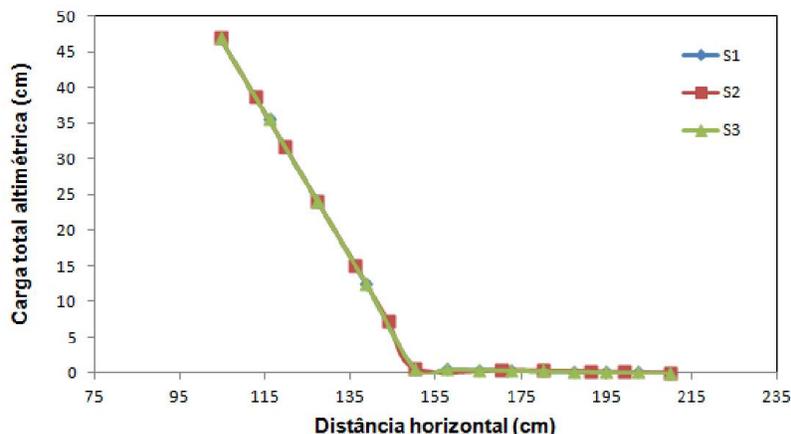


FIGURA 4.60 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 4 para comprimento de dreno igual a 95 cm

4.3.4.4 Modelo com largura (L) de 72 cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) de 50 cm

As simulações realizadas neste item são apresentadas resumidamente na Tabela 4.14, bem como as figuras representativas de cada modelo.

TABELA 4.14 – Análises paramétricas

Barragem	Dispositivo de drenagem	L ¹ (cm)	C ² (cm)	S ³ (cm)	Anexo	Figura
1	Tapete drenante	72	50	-	D	D.1
2	1 dreno francês	72	50	144	D	D.2
3	2 drenos franceses	72	50	72	D	D.3
4	3 drenos franceses	72	50	36	D	D.4

¹ L = Largura da barragem; ² C = Comprimento do dreno; ³ S = Espaçamento entre os drenos

4.3.4.4.1 Modelo 1 – Barragens com tapete drenante

O modelo 1 consistiu em analisar a barragem dotada de tapete drenante. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura D.1 (anexo D). Analisando as seções nota-se que as três superfícies freáticas encontradas apresentaram o mesmo comportamento, devido a presença do sistema de drenagem. Como a seção longitudinal desconsidera a largura da barragem, a freática encontra-se na mesma posição que para a largura de 44 cm, com as cargas hidráulicas sendo dissipadas uniformemente através do tapete drenante.

Projetando as linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano horizontal obteve-se a seção plana. Observa-se que, apesar da largura da barragem ser maior, o fluxo se mantém uniforme ao longo do percurso, proporcionando que a dissipação das cargas hidráulicas ocorra igualmente ao longo do maciço e do dreno.

Da mesma forma, projetando-se as linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano vertical obteve-se a seção transversal, com relação ao dreno. Esta representação mostra, de forma mais clara, a dissipação homogênea das cargas.

A Figura 4.61 representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço, desde a entrada da água no talude de montante até a saída no pé do talude de jusante. Nota-se que em todas as seções o comportamento de dissipação das cargas é similar, apresentando queda de potencial linear até a entrada do dreno, seguindo com carga zero até a saída, no pé do talude de jusante. Como o tapete drenante é contínuo ao longo de toda a base de jusante da barragem, pode-se considerar que a percolação de água apresenta mesmo comportamento através do maciço, sem a elevação de carga total altimétrica em nenhum ponto.

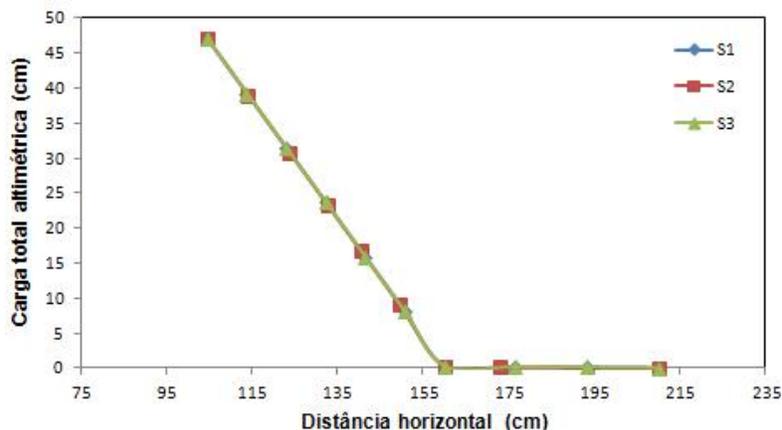


FIGURA 4.61 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 1 para comprimento de dreno igual a 50 cm

4.3.4.4.2 Modelo 2 – Barragem com 1 dreno francês, simulando espaçamento de 144 cm

O modelo 2 consistiu em analisar a barragem dotada de um dreno francês, simulando espaçamento de 144 cm entre os drenos. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura D.2 (anexo D). A seção S1 apresentou superfície freática similar à apresentada no modelo com tapete drenante, devido a existência de

dispositivo de drenagem. Já nas seções S2 e S3, a ausência deste dispositivo proporcionou uma elevação considerável das cargas hidráulicas. O comportamento do fluxo encontrado nestas duas últimas seções não representa corretamente a situação no interior do maciço, pois o programa desconsidera a existência de um sistema de drenagem ao longo de toda a barragem. Neste caso as cargas hidráulicas encontradas nas seções S2 e S3, que melhor represente esta simulação, são apresentadas na Figura 4.62.

Projetando as linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano horizontal obteve-se a seção plana. Analisando esta seção observa-se que o fluxo percola sentido ao dreno. Nota-se que para a simulação de um espaçamento maior entre os drenos, as cargas hidráulicas geradas no maciço são consideravelmente maiores quanto mais afastado o fluxo estiver do dreno.

A seção transversal demonstra com mais clareza o comportamento do fluxo. Analisando a seção pode ser observada que a preferência de escoamento da água ocorre através do dreno, embora o espaçamento seja maior. Este deslocamento do fluxo no interior do maciço, sentido ao dreno, ocorre devido a existência de gradiente hidráulico no interior do maciço. É possível observar ainda que o fluxo atinge o pé do talude de jusante com magnitude de carga significativa.

A Figura 4.62, representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Observa-se que para o fluxo mais afastado do sistema de drenagem as cargas totais apresentam-se mais elevadas. Conforme a proximidade com o dreno as mesmas tendem a ser dissipadas mais facilmente pelo dispositivo. Nota-se que este modelo, em comparação com a simulação do modelo com dreno espaçado a 88 cm, as cargas são consideravelmente mais elevadas. A diferença de comportamento hidráulico encontrada em cada seção demonstra que o espaçamento entre os drenos influencia para o aumento das cargas hidráulicas no interior do maciço.

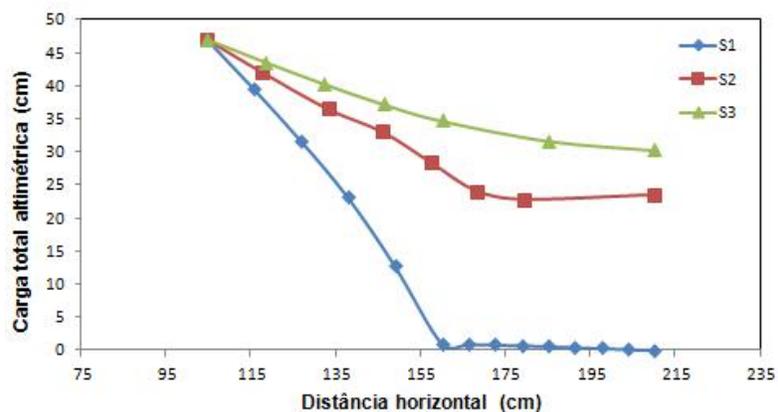


FIGURA 4.62 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 2 para comprimento de dreno igual a 50 cm

4.3.4.4.3 Modelo 3 – Barragem com 2 drenos franceses, simulando espaçamento de 72 cm

O modelo 3 consistiu em analisar a barragem dotada de dois drenos franceses, simulando espaçamento de 72 cm entre os drenos. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura D.3 (anexo D). Nota-se que as seções longitudinais demonstraram algumas diferenças significativas. No caso das seções S1 e S3 a superfície freática apresentou configuração similar devido a existência de dispositivo de drenagem. Já na seção S2 as cargas hidráulicas mostraram-se consideravelmente maiores ao longo do maciço, igualmente à seção S2 obtida no modelo com um dreno, devido à inexistência do mesmo. O comportamento do fluxo encontrado nesta última seção não representa corretamente a situação no interior do maciço, pois o programa desconsidera a existência de um sistema de drenagem ao longo de toda a barragem. Neste caso as cargas hidráulicas encontradas na seção S2, que melhor represente esta simulação, são apresentadas na Figura 4.63.

Projetando as linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano horizontal obteve-se a seção plana. Comparando este modelo ao outro simulando espaçamento de 44 cm, observa-se que as cargas hidráulicas no interior do maciço são bastante elevadas. É possível verificar ainda que o fluxo atinge o talude de jusante com carga considerável. Como o fluxo se divide igualmente entre os dois dispositivos, nota-se que o comportamento de drenagem é simétrico ao longo do maciço, característico de sistemas lineares.

Através da projeção apresentada na seção transversal é possível observar mais claramente a simetria do fluxo através do maciço. Nota-se que com a diminuição do espaçamento entre os drenos, se comparado com o modelo simulando espaçamento de 144 cm, há um aumento no gradiente hidráulico, indicando que a percolação de água, escoada no sentido aos dispositivos, proporciona maior vazão nos drenos.

A Figura 4.63, representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. No caso deste modelo observa-se que as cargas encontradas nas seções S1 e S3 são similares. Como, na seção S2, não há presença de dispositivo de drenagem, as cargas hidráulicas são consideravelmente mais elevadas. A ocorrência de superfície freática alta, conforme demonstrado pela seção no interior do maciço, proporciona

maior grau de saturação ao talude de jusante, podendo colocar em risco a estabilidade da estrutura.

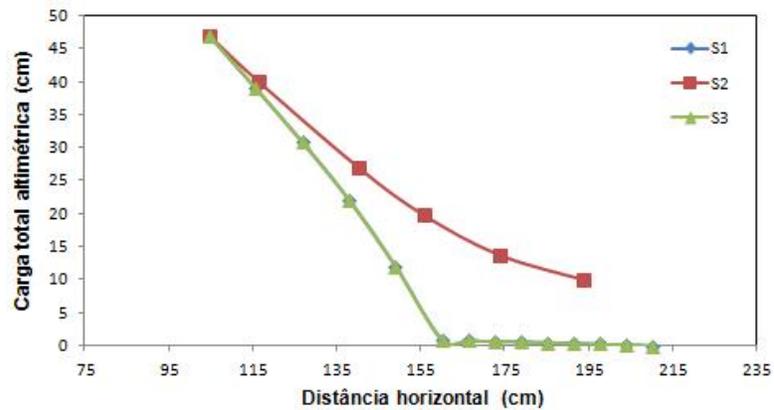


FIGURA 4.63 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 3 para comprimento de dreno igual a 50 cm

4.3.4.4.4 Modelo 4 – Barragem com 3 drenos franceses, simulando espaçamento de 36 cm

O modelo 4 consistiu em analisar a barragem dotada de três drenos franceses, simulando espaçamento de 36 cm entre os drenos. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura D.4 (anexo D). Nota-se que as superfícies freáticas apresentaram comportamento similar, devido a presença de sistema de drenagem em todas as seções.

Analisando a projeção do fluxo no plano horizontal (seção plana), pode-se observar que a percolação de água pelo maciço é realizada de forma mais homogênea, se assemelhando ao comportamento do modelo dotado de tapete drenante. Nesta seção plana nota-se ainda que o fluxo é distribuído igualmente entre os drenos. É possível observar que entre os dispositivos de drenagem as cargas hidráulicas ainda são um pouco elevadas. Dessa forma verifica-se que para um espaçamento como este, diferentemente dos modelos com um ou dois drenos, as cargas são dissipadas pelos dispositivos, indicando que quanto menor o espaçamento, menores são as cargas geradas no interior do maciço.

Analisando a projeção da superfície freática e das equipotenciais no plano vertical verifica-se o comportamento simétrico desenvolvido pelo fluxo diante a um menor espaçamento entre os drenos. Nota-se que as cargas hidráulicas encontradas

no maciço, entre os dispositivos, são menores se comparado com os modelos de drenos mais espaçados.

A Figura 4.64 representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Nota-se que em todas as seções o comportamento de dissipação das cargas é similar, apresentando queda de potencial linear até a entrada do dreno, seguindo com carga zero até a saída no pé do talude de jusante. Como a drenagem deste modelo é linear pode-se considerar que entre os drenos as cargas são um pouco mais elevadas.

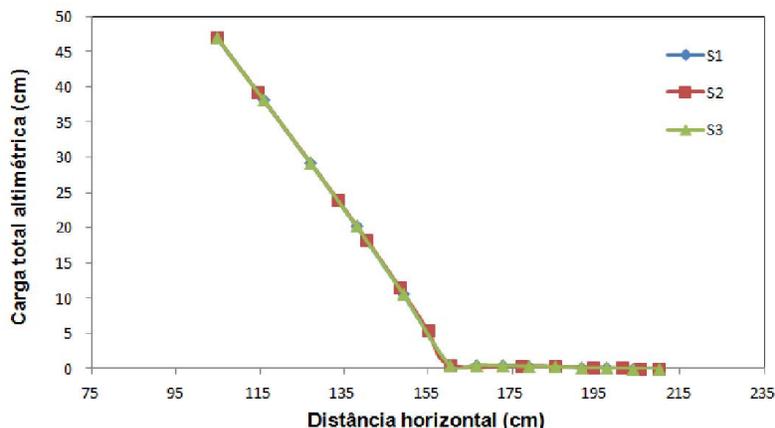


FIGURA 4.64 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 4 para comprimento de dreno igual a 50 cm

4.3.4.5 Modelo com largura (L) de 72 cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) de 70 cm

As simulações realizadas neste item são apresentadas resumidamente na Tabela 4.15, bem como as figuras representativas de cada modelo.

TABELA 4.15 – Análises paramétricas

Barragem	Dispositivo de drenagem	L ¹ (cm)	C ² (cm)	S ³ (cm)	Anexo	Figura
1	Tapete drenante	72	70	-	E	E.1
2	1 dreno francês	72	70	144	E	E.2
3	2 drenos franceses	72	70	72	E	E.3
4	3 drenos franceses	72	70	36	E	E.4

¹ L = Largura da barragem; ² C = Comprimento do dreno; ³ S = Espaçamento entre os drenos

4.3.4.5.1 Modelo 1 – Barragens com tapete drenante

O modelo 1 consistiu em analisar a barragem dotada de tapete drenante. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura E.1 (anexo E). Analisando as seções nota-se que as mesmas possuem configuração similar, já que todas consideram a existência de um sistema de drenagem. Como o tapete drenante possui maior comprimento, observa-se que a linha freática é mais baixa, se comparado ao modelo simulando comprimento de dreno de 50 cm. Embora as superfícies freáticas apresentem uma curvatura na entrada do dreno, este fato não ocorre na realidade, mas possibilita que as cargas totais no maciço sejam mais baixas.

Projetando as linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano horizontal obteve-se a seção plana. Comparando este modelo com os anteriores simulando menor largura, observa-se que o comportamento do fluxo em barragem dotada de tapete drenante é o mesmo, apresentando fluxo uniforme ao longo do percurso. A utilização deste dispositivo possibilita que a dissipação das cargas hidráulicas ocorram igualmente ao longo do maciço e do dreno. Com o aumento do comprimento do sistema de drenagem, nota-se que percolação da água através do maciço ocorre mais rapidamente.

Da mesma forma, projetando-se as linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano vertical obteve-se a seção transversal, com relação ao dreno. Esta representação mostra, de forma mais clara, a dissipação homogênea das cargas.

A Figura 4.65, representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Nota-se que em todas as seções o comportamento de dissipação das cargas é similar, apresentando queda de potencial linear até a entrada do dreno, seguindo com carga zero até a saída no pé do talude de jusante. É possível observar que com maior comprimento de dreno as cargas hidráulicas no maciço são mais baixas e dissipadas mais rapidamente, possibilitando menor grau de saturação no talude de jusante. Como o tapete drenante é contínuo ao longo de toda a base de jusante da barragem, pode-se considerar que a percolação de água apresenta mesmo comportamento através do maciço, sem a elevação de carga total altimétrica em nenhum ponto.

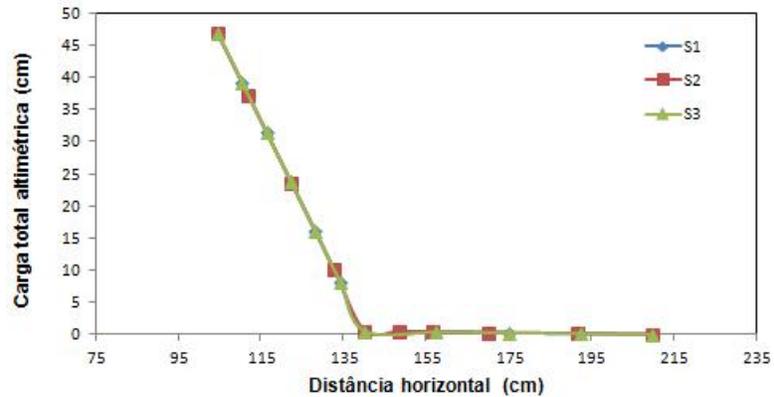


FIGURA 4.65 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 1 para comprimento de dreno igual a 70 cm

4.3.4.5.2 Modelo 2 – Barragem com 1 dreno francês, simulando espaçamento de 144 cm

O modelo 2 consistiu em analisar a barragem dotada de um dreno francês, simulando espaçamento de 144 cm entre os drenos. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura E.2 (anexo E). Analisando as seções pode-se observar que a S1 apresentou superfície freática mais baixa, devido a existência do dispositivo de drenagem. Porém nota-se que as seções S2 e S3 apresentaram freáticas consideravelmente elevadas devido à ausência deste dispositivo. O comportamento do fluxo encontrado nestas duas últimas seções não representa corretamente a situação no interior do maciço, pois o programa desconsidera a existência de um sistema de drenagem ao longo de toda a barragem. Neste caso as cargas hidráulicas encontradas nas seções S2 e S3, que melhor represente esta simulação, são apresentadas na Figura 4.66.

Analisando a projeção da linha freática no plano horizontal (seção plana), nota-se esta diferença altimétrica das superfícies freáticas indica a ocorrência de percolação do fluxo sentido ao dreno. Neste caso quanto maior for o espaçamento entre os drenos maiores serão as cargas desenvolvidas no interior do maciço e conseqüentemente a elevação da freática. No entanto, como a simulação deste modelo considera a implantação de dispositivo de maior comprimento, pode-se observar que as cargas são dissipadas mais rapidamente, quanto mais próximo do dreno o fluxo estiver, embora o fluxo ainda atinja o pé do talude de jusante com carga hidráulica elevada.

A seção transversal demonstra com mais clareza o comportamento do fluxo. Analisando a seção pode ser observada a existência de gradiente hidráulico, indicando deslocamento de fluxo no interior do maciço sentido ao dreno. Através desta representação verifica-se que o fluxo é escoado, quase totalmente, pelo dreno francês.

A Figura 4.66, representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Observa-se que para o fluxo mais afastado do sistema de drenagem as cargas totais apresentam-se mais elevadas. Conforme a proximidade com o dreno as mesmas tendem a ser dissipadas mais facilmente pelo dispositivo. Esta diferença de comportamento hidráulico encontrado em cada seção demonstra que o espaçamento entre os drenos proporciona aumento das cargas hidráulicas no interior do maciço. Nota-se ainda que a implantação de um dreno de maior comprimento possibilita a diminuição do trajeto percolado pelo fluxo no interior do maciço, reduzindo a zona de saturação da barragem.

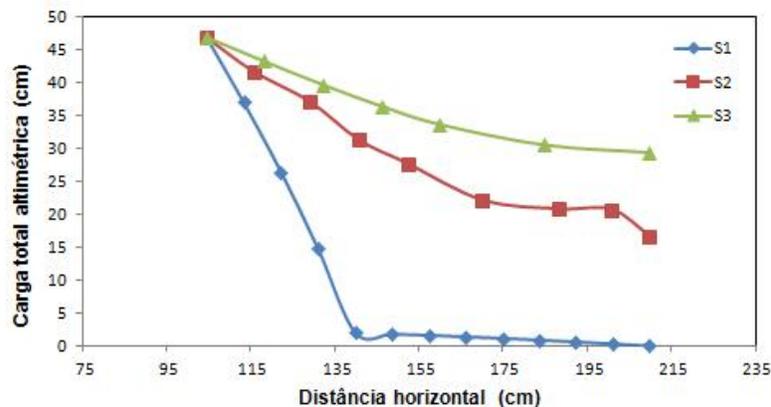


FIGURA 4.66 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 2 para comprimento de dreno igual a 70 cm

4.3.4.5.3 Modelo 3 – Barragem com 2 drenos franceses, simulando espaçamento de 72 cm

O modelo 3 consistiu em analisar a barragem dotada de dois drenos franceses, simulando espaçamento de 72 cm entre os drenos. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura E.3 (anexo E). Nota-se que as seções longitudinais demonstraram algumas diferenças significativas. No caso das seções S1 e S3 a superfície freática apresentou configuração similar devido à existência de dispositivo de drenagem. Como este modelo simula comprimento de dreno de 70 cm, nota-se que

a freática demonstrou cargas mais baixas, se comparado ao modelo dotado de drenos franceses de 50 cm, indicando que a implantação de drenos mais longos auxiliam na dissipação das cargas. No caso da seção S2 as cargas hidráulicas mostraram-se consideravelmente maiores ao longo do percurso, igualmente à seção S2 obtida no modelo com um dreno, devido à inexistência do mesmo. O comportamento do fluxo encontrado nesta última seção não representa corretamente a situação no interior do maciço, pois o programa desconsidera a existência de um sistema de drenagem ao longo de toda a barragem. Neste caso as cargas hidráulicas encontradas na seção S2, que melhor represente esta simulação, são apresentadas na Figura 4.67.

Analisando a projeção da linha freática no plano horizontal (seção plana) nota-se que o fluxo se divide igualmente entre os dois dispositivos, proporcionando um comportamento de drenagem simétrico ao longo do maciço. Porém pode-se observar que, embora o espaçamento entre os drenos seja menor, as cargas hidráulicas encontradas entre os dispositivos apresentaram-se bastante elevadas, atingindo o pé do talude de jusante com carga acima de zero. Dessa forma, nota-se que a simulação de drenos mais longos, neste caso, não foram suficientes para dissipar totalmente as cargas no interior do maciço.

Analisando a projeção da linha freática no plano vertical (seção transversal) é possível observar mais claramente a simetria do fluxo através do maciço. Nota-se que com a diminuição do espaçamento entre os drenos, se comparado com o modelo simulando espaçamento de 144 cm, há um aumento no gradiente hidráulico, indicando que o fluxo escoou sentido a ambos os dispositivos.

A Figura 4.67, representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Nota-se que nas seções S1 e S3 a configuração de dissipação das cargas é similar, apresentando valores mais baixos que na seção S2, em que não há presença de dispositivo de drenagem. Comparando-se os resultados obtidos nesta modelagem com a barragem dotada de um dreno francês pode-se verificar que as cargas hidráulicas no interior do maciço são consideravelmente menores. Porém, nota-se que, embora o espaçamento seja menor e o dreno mais longo, as cargas totais encontradas no interior do maciço ainda são altas, indicando que não houve a dissipação total da energia através dos drenos franceses. Com relação ao comportamento da superfície freática, obtida para as seções em que há sistema de drenagem, observa-se que a simulação de um dreno de maior comprimento possibilita a diminuição do trajeto percolado pelo fluxo no interior do maciço, reduzindo a zona de saturação.

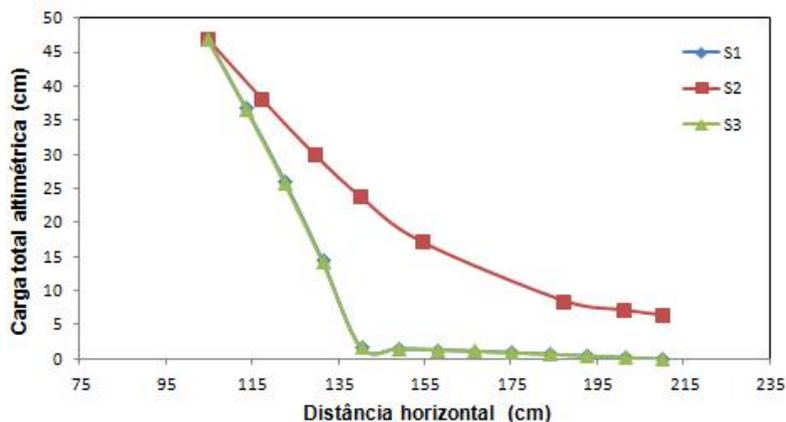


FIGURA 4.67 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 3 para comprimento de dreno igual a 70 cm

4.3.4.5.4 Modelo 4 – Barragem com 3 drenos franceses, simulando espaçamento de 36 cm

O modelo 4 consistiu em analisar a barragem dotada de três drenos franceses. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura E.4 (anexo E). Nota-se que as superfícies freáticas apresentaram comportamento similar, devido à presença de sistema de drenagem em todas as seções. Embora as superfícies freáticas apresentem uma curvatura na entrada do dreno, este fato não ocorre na realidade, mas possibilita que as cargas totais no maciço sejam mais baixas.

Analisando a projeção do fluxo no plano horizontal (seção plana), pode-se observar que a percolação apresenta-se em estado mais plano, semelhante ao comportamento encontrado no modelo dotado de tapete drenante. Nota-se que o fluxo é distribuído igualmente entre os drenos proporcionando um comportamento de drenagem simétrico ao longo do maciço. É possível observar que com o aumento do comprimento do dreno e redução do espaçamento entre os sistemas de drenagem as cargas hidráulicas encontradas no maciço foram muito menores do que as encontradas nos modelos dotados de um e dois drenos franceses, indicando que quanto menor o espaçamento, menores são as cargas geradas no interior do maciço.

Analisando a projeção da superfície freática e das equipotenciais no plano vertical (seção transversal) verifica-se o comportamento simétrico desenvolvido pelo fluxo diante a um menor espaçamento entre os drenos. Nota-se que as cargas

hidráulicas encontradas no maciço, entre os dispositivos, são menores se comparado com os modelos de drenos mais espaçados.

A Figura 4.68 representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Nota-se que em todas as seções o comportamento de dissipação das cargas é similar, apresentando queda de potencial linear até a entrada do dreno, seguindo com carga zero até a saída no pé do talude de jusante. Como a drenagem deste modelo é linear pode-se considerar que entre os drenos as cargas são um pouco mais elevadas. Com relação ao comportamento da superfície freática observa-se que a simulação de drenos mais compridos possibilita a diminuição do trajeto percolado pelo fluxo no interior do maciço, reduzindo a zona de saturação da barragem, o qual conseqüentemente mantém o talude de jusante com menor grau de saturação.

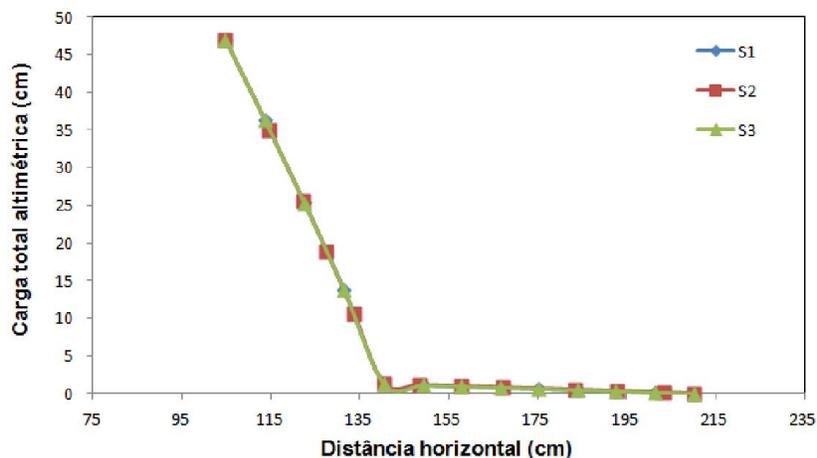


FIGURA 4.68 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 4 para comprimento de dreno igual a 70 cm

4.3.4.6 Modelo com largura (L) de 72 cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) de 95 cm

As simulações realizadas neste item são apresentadas resumidamente na Tabela 4.16, bem como as figuras representativas de cada modelo.

TABELA 4.16 – Análises paramétricas

Barragem	Dispositivo de drenagem	L ¹ (cm)	C ² (cm)	S ³ (cm)	Anexo	Figura
1	Tapete drenante	72	95	-	F	F.1
2	1 dreno francês	72	95	144	F	F.2
3	2 drenos franceses	72	95	72	F	F.3
4	3 drenos franceses	72	95	36	F	F.4

¹ L = Largura da barragem; ² C = Comprimento do dreno; ³ S = Espaçamento entre os drenos

4.3.4.6.1 Modelo 1 – Barragens com tapete drenante

O modelo 1 consistiu em analisar a barragem dotada de tapete drenante. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura F.1 (anexo F). Analisando a seção nota-se que as superfícies freáticas possuem a mesma configuração, já que todas consideram a existência de sistema de drenagem. Como o tapete drenante possui maior comprimento, observa-se que a linha freática apresentou carga hidráulica consideravelmente mais baixa, se comparada com os modelos simulando comprimento de 50 cm e 70 cm. No entanto, pode-se observar que a entrada do fluxo no dreno se deu a partir da distância horizontal de 150 cm, tornando desnecessário cerca de 35 cm do dreno.

Projetando as linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano horizontal obteve-se a seção plana. Observa-se que o fluxo é uniforme ao longo do percurso, proporcionando que a dissipação das cargas hidráulicas ocorra igualmente ao longo do maciço e do dreno. Neste caso nota-se que o aumento da largura não influenciou no comportamento do fluxo. Com o aumento do comprimento do dispositivo, nota-se que o fluxo é percolado através do maciço mais rapidamente.

Da mesma forma, projetando-se as linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano vertical obteve-se a seção transversal, com relação ao dreno. Esta representação mostra, de forma mais clara, a dissipação homogênea das cargas.

A Figura 4.69, representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Nota-se que em todas as seções a carga hidráulica é dissipada igualmente, apresentando queda de potencial linear até a entrada do dreno, seguindo com carga nula até a saída do dreno. É possível observar que com maior comprimento de dreno

as cargas são mais baixas e dissipadas mais rapidamente, possibilitando menor grau de saturação no talude de jusante. Como o tapete drenante é contínuo ao longo de toda a base de jusante da barragem, pode-se considerar que a percolação de água apresenta mesmo comportamento através do maciço, sem a elevação de carga total altimétrica em nenhum ponto.

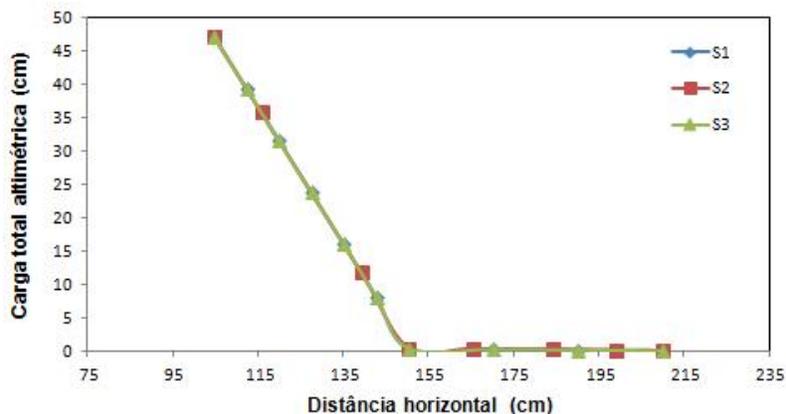


FIGURA 4.69 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 1 para comprimento de dreno igual a 95 cm

4.3.4.6.2 Modelo 2 – Barragem com 1 dreno francês, simulando espaçamento de 144 cm

O modelo 2 consistiu em analisar a barragem dotada de um dreno francês. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções longitudinais S1, S2 e S3 apresentadas na Figura F.2 (anexo F). Analisando as seções nota-se que as mesmas demonstraram algumas diferenças significativas. Pode-se observar que na seção S1 a superfície freática apresentou-se mais baixa, se comparada aos modelos dotados de drenos franceses de 50 cm e 70 cm de comprimento, devido a existência de dispositivo de drenagem. No caso deste modelo pôde ser observado que a entrada do fluxo no dreno se deu a partir da distância horizontal de 150 cm, aproximadamente, tornando desnecessário cerca de 35 cm do dispositivo. Com relação às seções S2 e S3 as superfícies freáticas encontradas no maciço apresentaram-se bastante elevadas, devido a ausência do dispositivo de drenagem. O comportamento do fluxo encontrado nestas duas últimas seções não representa corretamente a situação no interior do maciço, pois o programa desconsidera a existência de um sistema de drenagem ao longo de toda a barragem. Neste caso as cargas hidráulicas encontradas nas seções S2 e S3, que melhor represente esta simulação, são apresentadas na Figura 4.70.

Analisando a projeção da linha freática no plano horizontal (seção plana), nota-se que esta diferença altimétrica das superfícies freáticas indica a ocorrência de percolação do fluxo sentido ao dreno. Neste caso quanto maior for o espaçamento entre os drenos maiores serão as cargas desenvolvidas no interior do maciço e conseqüentemente a elevação da freática. Embora este modelo simule dreno mais comprido, a projeção considera o ponto de entrada do fluxo no dispositivo, que neste caso ocorre na distância de 150 cm, aproximadamente. Observa-se que a dissipação das cargas é realizada mais rapidamente, quanto mais próximo do dreno o fluxo estiver, podendo ser verificado que na lateral oposta ao dreno, às cargas são mais elevadas na base do talude de jusante.

A seção transversal demonstra com mais clareza o comportamento do fluxo. Analisando a seção pode ser observada que a preferência de escoamento da água ocorre através do dreno, embora o espaçamento seja maior. Nota-se a existência de gradiente hidráulico, indicando deslocamento de fluxo no interior do maciço sentido ao dreno. Através desta representação verifica-se que o fluxo é escoado, quase totalmente, pelo dreno francês.

A Figura 4.70, representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Observa-se que para o fluxo mais afastado do sistema de drenagem as cargas totais apresentam-se mais elevadas. Conforme a proximidade com o dreno as mesmas tendem a ser dissipadas mais facilmente pelo dispositivo. Esta diferença de comportamento hidráulico encontrado em cada seção demonstra que o espaçamento entre os drenos proporciona aumento das cargas hidráulicas no interior do maciço. Nota-se ainda que a implantação de um dreno de maior comprimento possibilita a diminuição do trajeto percolado pelo fluxo no interior do maciço, reduzindo a zona de saturação da barragem.

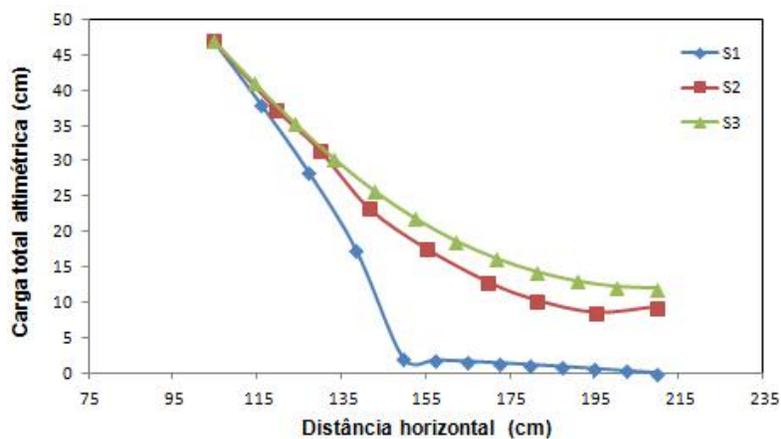


FIGURA 4.70 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 2 para comprimento de dreno igual a 95 cm

4.3.4.6.3 Modelo 3 – Barragem com 2 drenos franceses, simulando espaçamento de 72 cm

Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções longitudinais S1, S2 e S3 apresentadas na Figura F.3 (anexo F). Analisando as seções pode-se observar que nas seções S1 e S3 a superfície freática apresentou comportamento similar, devido a presença do sistema de drenagem. Nota-se que as cargas encontradas são significativamente mais baixas, se comparado aos modelos simulando comprimento menores de dreno. No caso deste modelo também pôde ser observado que a entrada do fluxo no dreno se deu a partir da distancia horizontal de 150 cm, aproximadamente, tornando desnecessario cerca de 35 cm do dispositivo. Com relação a seção S2, a ausência do dispositivo de drenagem proporcionou uma elevação considerável das cargas hidráulicas. O comportamento do fluxo encontrado nesta última seção não representa corretamente a situação no interior do maciço, pois o programa desconsidera a existência de um sistema de drenagem ao longo de toda a barragem. Neste caso as cargas hidráulicas encontradas na seção S2, que melhor represente esta simulação, são apresentadas na Figura 4.71.

Analisando a projeção da linha freática no plano horizontal (seção plana) nota-se que o fluxo se divide igualmente entre os dois dispositivos, proporcionando um comportamento de drenagem simétrico ao longo do maciço. Embora o dreno seja mais longo, a projeção considera a entrada do fluxo, no dreno, na distância 150 cm. Neste caso a representação da dissipação das cargas se assemelha ao ocorrido no modelo com comprimento de dreno de 70 cm. Pode-se observar que, embora o dreno seja mais longo e o espaçamento entre os eles seja menor, as cargas hidráulicas encontradas entre os dispositivos apresentaram-se bastante elevadas, atingindo o pé do talude de jusante com carga acima de zero. Dessa forma, nota-se que a simulação de drenos mais longos, neste caso, não foram suficientes para dissipar totalmente as cargas no interior do maciço.

Através da projeção apresentada na seção transversal é possível observar mais claramente a simetria do fluxo através do maciço. Nota-se que com a diminuição do espaçamento entre os drenos, se comparado com o modelo simulando espaçamento de 144 cm, há um aumento no gradiente hidráulico, indicando que o fluxo escoou sentido a ambos os dispositivos.

A Figura 4.71, representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Nota-se que nas seções S1 e S3 a configuração de dissipação das cargas é similar,

apresentando superfície freática mais baixa que na seção S2, em que não há presença de dispositivo de drenagem. Comparando-se os resultados obtidos nesta modelagem com a barragem dotada de um dreno francês pode-se verificar que as cargas hidráulicas no interior do maciço são consideravelmente menores. Porém, nota-se que, embora o espaçamento seja menor e o dreno mais longo, as cargas totais encontradas no interior do maciço ainda são altas, indicando que não houve a dissipação total da energia através dos drenos franceses. Com relação ao comportamento da superfície freática, obtida para as seções em que há sistema de drenagem, observa-se que a simulação de um dreno de maior comprimento possibilita a diminuição do trajeto percolado pelo fluxo no interior do maciço, reduzindo a zona de saturação.

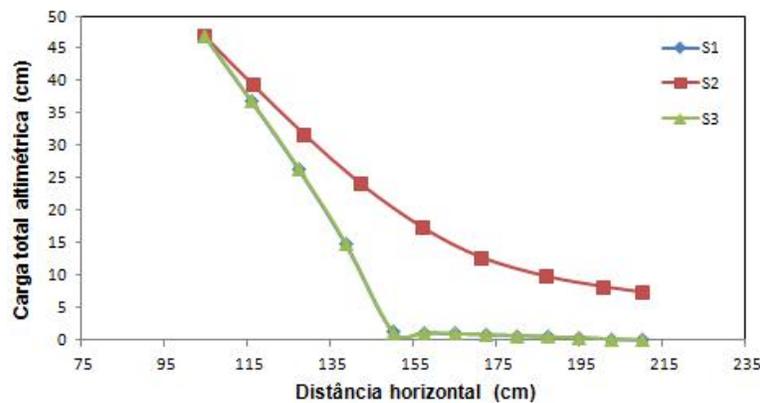


FIGURA 4.71 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 3 para comprimento de dreno igual a 95 cm

4.3.4.6.4 Modelo 4 – Barragem com 3 drenos franceses, simulando espaçamento de 36 cm

O modelo 4 consistiu em analisar a barragem dotada de três drenos franceses. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura F.4 (anexo F). Nota-se que as superfícies freáticas apresentaram comportamento similar, devido à presença de sistema de drenagem em todas as seções. Para a simulação do comprimento de 95 cm dos drenos, pôde ser verificado neste modelo, que o início do fluxo no dreno se deu a partir da distância horizontal de 150 cm, tornando desnecessário cerca de 35 metros do dreno. Devido os drenos possuem maior comprimento, observa-se que a linha freática apresenta cargas mais baixas, proporcionando a redução da região de saturação da barragem.

Analisando a projeção do fluxo no plano horizontal (seção plana), pode-se observar que a percolação apresenta-se em estado mais plano, semelhante ao comportamento encontrado no modelo dotado de tapete drenante. Nota-se que o fluxo é distribuído igualmente entre os drenos proporcionando um comportamento de drenagem simétrico ao longo do maciço. Embora o dreno tenha maior comprimento, a projeção considera o ponto de entrada do fluxo no dispositivo, que neste caso ocorre na distância de 150 cm, aproximadamente. Nesta simulação a representação da dissipação das cargas se assemelha ao ocorrido no modelo com comprimento de dreno de 70 cm, em que a superfície freática apresenta carga hidráulica entre os drenos, sendo gradativamente dissipada pelo maciço e atingindo o pé do talude de jusante com carga zero. Dessa forma é possível observar que com o aumento do comprimento do dreno e redução do espaçamento entre os sistemas de drenagem as cargas hidráulicas encontradas no maciço foram muito menores do que as encontradas nos modelos dotados de drenos franceses menos espaçados, indicando que quanto menor o espaçamento, menores são as cargas geradas no interior do maciço.

Analisando a projeção da superfície freática e das equipotenciais no plano vertical (seção transversal) verifica-se o comportamento simétrico desenvolvido pelo fluxo diante a um menor espaçamento entre os drenos. Nota-se que as cargas hidráulicas encontradas no maciço, entre os dispositivos, são menores se comparado com os modelos de drenos mais espaçados.

A Figura 4.68 representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Nota-se que em todas as seções o comportamento de dissipação das cargas é similar, apresentando queda de potencial linear até a entrada do dreno, seguindo com carga zero até a saída no pé do talude de jusante. Como a drenagem deste modelo é linear pode-se considerar que entre os drenos as cargas são um pouco mais elevadas. Com relação ao comportamento da superfície freática observa-se que a simulação de drenos mais compridos possibilitou a diminuição do trajeto percolado pelo fluxo no interior do maciço, reduzindo a zona de saturação da barragem, o qual conseqüentemente mantém o talude de jusante com menor grau de saturação.

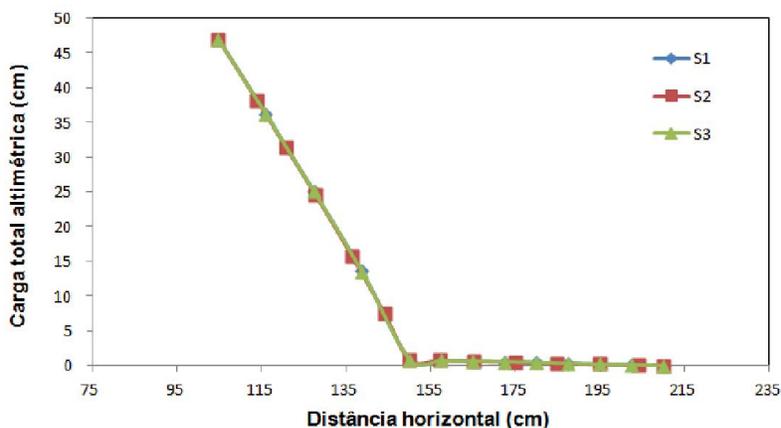


FIGURA 4.72 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 4 para comprimento de dreno igual a 95 cm

4.3.4.7 Barragem com largura (L) de 100 cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) de 50 cm

As simulações realizadas neste item são apresentadas resumidamente na Tabela 4.17, bem como as figuras representativas de cada modelo.

TABELA 4.17 – Análises paramétrica

Barragem	Dispositivo de drenagem	L ¹ (cm)	C ² (cm)	S ³ (cm)	Anexo	Figura
1	Tapete drenante	100	50	-	G	G.1
2	1 dreno francês	100	50	200	G	G.2 e G.2.1
3	2 drenos franceses	100	50	100	G	G.3 e G.3.1
4	3 drenos franceses	100	50	50	G	G.4

¹ L = Largura da barragem; ² C = Comprimento do dreno; ³ S = Espaçamento entre os drenos

4.3.4.7.1 Modelo 1 – Barragens com tapete drenante

O modelo 1 consistiu em analisar a barragem dotada de tapete drenante. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura G.1 (anexo G). Analisando as seções nota-se que as três superfícies freáticas encontradas apresentaram o mesmo comportamento, devido a presença do sistema de drenagem. Como a seção longitudinal desconsidera a largura da barragem, a freática encontra-se na mesma posição que para as larguras de 44 cm e 72 cm, com as cargas hidráulicas sendo dissipadas uniformemente através do tapete drenante.

Projetando as linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano horizontal obteve-se a seção plana. Observa-se que, apesar da largura da barragem ser maior, o fluxo se mantém uniforme ao longo do percurso, proporcionando que a dissipação das cargas hidráulicas ocorra igualmente ao longo do maciço e do dreno.

Da mesma forma, projetando-se as linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano vertical obteve-se a seção transversal, com relação ao dreno. Esta representação mostra, de forma mais clara, a dissipação homogênea das cargas.

A Figura 4.73 representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Nota-se que em todas as seções o comportamento de dissipação das cargas é similar, apresentando queda de potencial linear até a entrada do dreno, seguindo com carga zero até a saída do pé do talude de jusante. Como o tapete drenante é contínuo ao longo de toda a base de jusante da barragem, pode-se considerar que a percolação de água apresenta mesmo comportamento através do maciço, sem a elevação de carga total altimétrica em nenhum ponto.

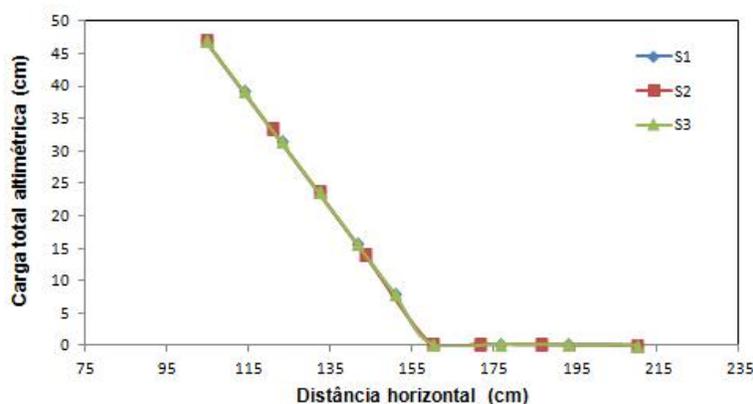


FIGURA 4.73 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 1 para comprimento de dreno igual a 50 cm

4.3.4.7.2 Modelo 2 – Barragem com 1 dreno francês, simulando espaçamento de 200 cm

O modelo 2 consistiu em analisar a barragem dotada de um dreno francês, simulando espaçamento de 200 cm entre os drenos. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura G.2 (anexo G). A seção S1 apresentou superfície freática similar às obtidas no modelo dotado de tapete drenante, devido a existência de dispositivo de drenagem. Já nas seções S2 e S3, a ausência deste dispositivo proporcionou uma elevação considerável das cargas hidráulicas. O comportamento do

fluxo encontrado nestas duas últimas seções não representa corretamente a situação no interior do maciço, pois o programa desconsidera a existência de um sistema de drenagem ao longo de toda a barragem. Neste caso as cargas hidráulicas encontradas nas seções S2 e S3, que melhor represente esta simulação, são apresentadas na Figura 4.74.

Projetando as linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano horizontal obteve-se a seção plana (Figura G.2). Analisando esta seção nota-se que a diferença altimétrica das superfícies freáticas encontradas nas seções longitudinais indica a ocorrência de percolação do fluxo sentido ao dreno. Observa-se que quanto maior for o espaçamento entre os drenos maiores serão as cargas desenvolvidas no interior do maciço e, conseqüentemente, maior será a elevação da freática. Comparando este modelo com os outros, simulando menor largura, pode-se observar que as cargas hidráulicas que atingem o pé do talude de jusante são significativamente maiores, as quais podem colocar em risco a estabilidade da estrutura.

Analisando a projeção da linha freática no plano vertical (seção transversal) (Figura G.2.1) pode ser observada a existência de gradiente hidráulico, indicando deslocamento de fluxo no interior do maciço sentido ao dreno, embora o espaçamento entre os drenos seja consideravelmente maior. Através desta representação verifica-se que o fluxo é escoado, quase totalmente, pelo dreno francês.

A Figura 4.74, representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Observa-se que para o fluxo mais afastado do sistema de drenagem as cargas totais apresentam-se mais elevadas. Nota-se que na seção S3 a carga aproxima-se do nível d'água do reservatório. Conforme a proximidade com o dreno as mesmas tendem a ser dissipadas pelo dispositivo. Comparando-se este modelo com as simulações realizadas para drenos espaçados a 88 cm e 144 cm, as cargas são consideravelmente mais elevadas. A diferença de comportamento hidráulico encontrada em cada seção demonstra que o espaçamento entre os drenos influencia para o aumento das cargas hidráulicas no interior do maciço.

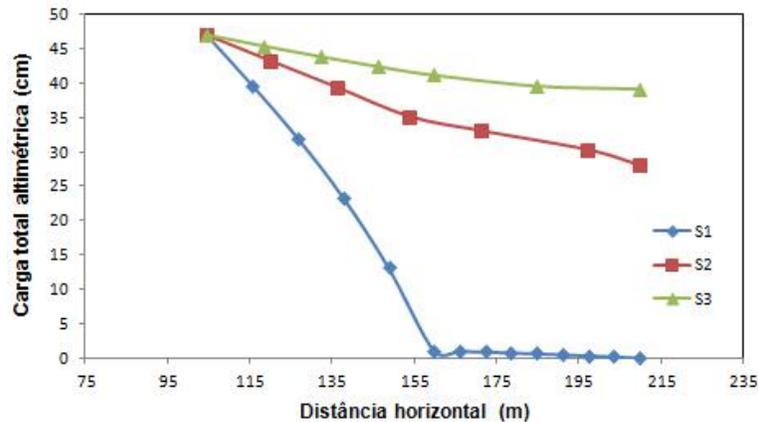


FIGURA 4.74 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 2 para comprimento de dreno igual a 50 cm

4.3.4.7.3 Modelo 3 – Barragem com 2 drenos franceses, simulando espaçamento de 100 cm

O modelo 3 consistiu em analisar a barragem dotada de dois drenos franceses, simulando espaçamento de 100 cm entre os drenos. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura G.3 (anexo G). Nota-se que as seções longitudinais demonstraram algumas diferenças significativas. No caso das seções S1 e S3 a superfície freática apresentou configuração similar devido a existência de dispositivo de drenagem. Já na seção S2 as cargas hidráulicas mostraram-se consideravelmente maiores ao longo do maciço, igualmente à seção S2 obtida no modelo com um dreno, devido à inexistência do mesmo. O comportamento do fluxo encontrado nesta última seção não representa corretamente a situação no interior do maciço, pois o programa desconsidera a existência de um sistema de drenagem ao longo de toda a barragem. Neste caso as cargas hidráulicas encontradas na seção S2, que melhor represente esta simulação, são apresentadas na Figura 4.75.

Projetando as linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano horizontal obteve-se a seção plana (Figura G.3). Comparando este modelo aos outros simulando espaçamento de 44 cm e 72 cm, observa-se que as cargas hidráulicas no interior do maciço são bastante elevadas, indicando que o aumento do espaçamento entre os drenos eleva as cargas, reduzindo a eficiência dos dispositivos e prejudicando a estabilidade da estrutura, pois possibilita que o fluxo ainda atinja o talude de jusante com carga considerável. Como o fluxo se divide igualmente entre os dois dispositivos,

nota-se que o comportamento de drenagem é simétrico ao longo do maciço, característico de sistemas lineares.

Através da projeção apresentada na seção transversal (Figura G.3.1) é possível observar mais claramente a simetria do fluxo através do maciço. Nota-se que com a diminuição do espaçamento entre os drenos, se comparado com o modelo simulando espaçamento de 200 cm, há um aumento no gradiente hidráulico, indicando que a percolação de água, escoada no sentido aos dispositivos, proporciona maior vazão nos drenos.

A Figura 4.75, representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. No caso deste modelo observa-se que as cargas encontradas nas seções S1 e S3 são similares. Como, na seção S2, não há presença de dispositivo de drenagem, as cargas hidráulicas são consideravelmente mais elevadas, se comparado ao modelo simulando espaçamento de 72 cm entre os drenos. A ocorrência de superfície freática alta, conforme demonstrado pela seção no interior do maciço, proporciona maior grau de saturação ao talude de jusante, podendo colocar em risco a estabilidade da estrutura.

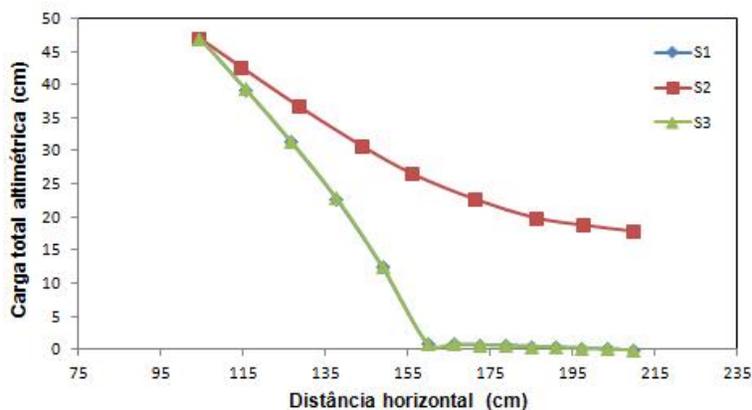


FIGURA 4.75 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 3 para comprimento de dreno igual a 50 cm

4.3.4.7.4 Modelo 4 – Barragem com 3 drenos franceses, simulando espaçamento de 50 cm

O modelo 4 consistiu em analisar a barragem dotada de três drenos franceses. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura G.4 (anexo G). Nota-se que as

superfícies freáticas apresentaram comportamento similar, devido a presença de sistema de drenagem em todas as seções.

Analisando a projeção do fluxo no plano horizontal (seção plana), pode-se observar que a percolação de água pelo maciço é realizada de forma mais homogênea. Nota-se ainda que o fluxo é distribuído igualmente entre os drenos demonstrando fluxo simétrico ao longo do maciço, característico de sistemas lineares. É possível observar que entre os drenos as cargas hidráulicas ainda são elevadas indicando que para um espaçamento como este é necessário que os drenos franceses sejam mais longos, para que haja melhor dissipação das cargas ao longo do maciço.

Projetando-se as linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano vertical obteve-se a seção transversal, com relação ao dreno. É possível observar mais claramente a simetria do fluxo através do maciço. Nota-se que com a diminuição do espaçamento entre os drenos houve a redução da carga hidráulica, se comparado com os modelos simulando espaçamentos de 200 cm e 100 cm, embora, entre os drenos, o fluxo ainda chegue ao pé do talude de jusante com alguma carga.

A Figura 4.76 representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Nota-se que em todas as seções o comportamento de dissipação das cargas é similar, apresentando queda de potencial linear até a entrada do dreno, seguindo com carga zero até a saída no pé do talude de jusante. Como a drenagem deste modelo é linear pode-se considerar que entre os drenos as cargas são um pouco mais elevadas.

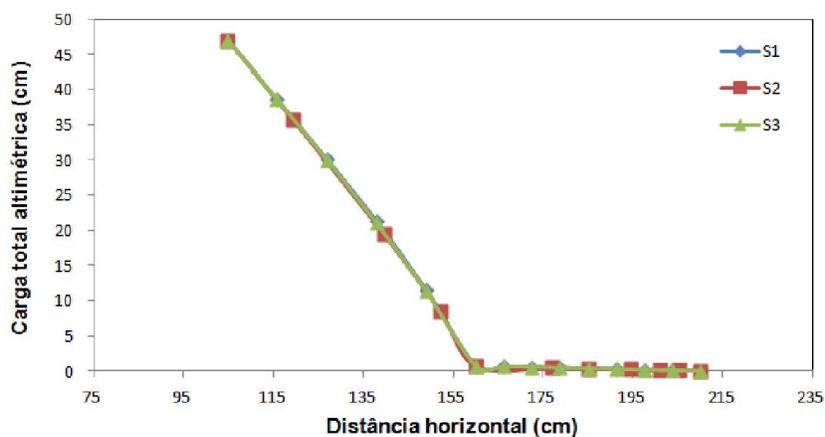


FIGURA 4.76 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 4 para comprimento de dreno igual a 50 cm

4.3.4.8 Modelo com largura (L) de 100 cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) de 70 cm

As simulações realizadas neste item são apresentadas resumidamente na Tabela 4.18, bem como as figuras representativas de cada modelo.

TABELA 4.18 – Análises paramétricas

Barragem	Dispositivo de drenagem	L ¹ (cm)	C ² (cm)	S ³ (cm)	Anexo	Figura
1	Tapete drenante	100	70	-	H	H.1
2	1 dreno francês	100	70	200	H	H.2 e H.2.1
3	2 drenos franceses	100	70	100	H	H.3 e H.3.1
4	3 drenos franceses	100	70	50	H	H.4

¹ L = Largura da barragem; ² C = Comprimento do dreno; ³ S = Espaçamento entre os drenos

4.3.4.8.1 Modelo 1 – Barragens com tapete drenante

Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura H.1 (anexo H). Analisando as seções nota-se que as mesmas possuem configuração similar, já que todas consideram a existência de um sistema de drenagem. Como o tapete drenante possui maior comprimento, observa-se que a linha freática é mais baixa, se comparado ao modelo simulando comprimento de dreno de 50 cm, possibilitando que a área da zona saturada na barragem seja menor e conseqüentemente mantenha o talude de jusante com menor grau de saturação.

Projetando as linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano horizontal obteve-se a seção plana. Comparando este modelo com os anteriores simulando menor largura, observa-se que o comportamento do fluxo em barragem dotada de tapete drenante é o mesmo, apresentando fluxo uniforme ao longo do percurso. A utilização deste dispositivo possibilita que a dissipação das cargas hidráulicas ocorram igualmente ao longo do maciço e do dreno. Com o aumento do comprimento do sistema de drenagem, nota-se que percolação da água através do maciço ocorre mais rapidamente.

Da mesma forma, projetando-se as linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano vertical obteve-se a seção transversal, com relação ao dreno. Esta representação mostra, de forma mais clara, a dissipação homogênea das cargas.

A Figura 4.77, representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Nota-se que em todas as seções o comportamento de dissipação das cargas é similar, apresentando queda de potencial linear até a entrada do dreno, seguindo com carga zero até a saída no pé do talude de jusante. É possível observar que com maior comprimento de dreno as cargas hidráulicas no maciço são mais baixas e dissipadas mais rapidamente, possibilitando menor grau de saturação no talude de jusante. Como o tapete drenante é contínuo ao longo de toda a base de jusante da barragem, pode-se considerar que a percolação de água apresenta mesmo comportamento através do maciço, sem a elevação de carga total altimétrica em nenhum ponto.

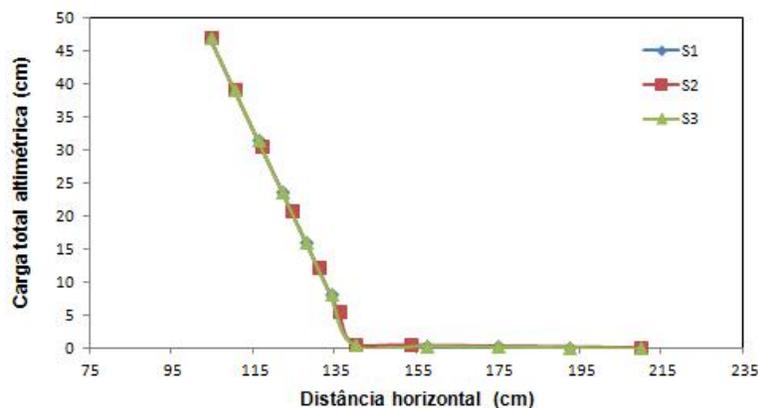


FIGURA 4.77 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 1 para comprimento de dreno igual a 70 cm

4.3.4.8.2 Modelo 2 – Barragem com 1 dreno francês, simulando espaçamento de 200 cm

O modelo 2 consistiu em analisar a barragem dotada de um dreno francês, simulando espaçamento de 200 cm entre os drenos. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura H.2 (anexo H). Analisando as seções pode-se observar que a S1 apresentou superfície freática mais baixa, se comparada ao modelo dotado de dreno francês de 50 cm de comprimento, devido a existência do dispositivo de drenagem. Porém nota-se que as seções S2 e S3 apresentaram freáticas consideravelmente elevadas devido à ausência deste dispositivo. O comportamento do fluxo encontrado nestas duas últimas seções não representa corretamente a situação no interior do maciço, pois o programa desconsidera a existência de um sistema de

drenagem ao longo de toda a barragem. Neste caso as cargas hidráulicas encontradas nas seções S2 e S3, que melhor represente esta simulação, são apresentadas na Figura 4.78.

Projetando as linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano horizontal obteve-se a seção plana (Figura H.2). Analisando esta seção nota-se que a diferença altimétrica das superfícies freáticas, encontradas nas seções longitudinais, indica a ocorrência de percolação do fluxo sentido ao dreno. Observa-se que quanto maior for o espaçamento entre os drenos maiores serão as cargas desenvolvidas no interior do maciço e conseqüentemente maior será a elevação da freática. No entanto, como a simulação deste modelo considera a implantação de dispositivo de maior comprimento, pode-se observar que as cargas são dissipadas mais rapidamente, quanto mais próximo do dreno o fluxo estiver, embora o fluxo ainda atinja o pé do talude de jusante com carga hidráulica elevada.

A seção transversal (Figura H.2.1) demonstra com mais clareza o comportamento do fluxo. Analisando a seção pode ser observada a existência de gradiente hidráulico, indicando deslocamento de fluxo no interior do maciço sentido ao dreno. Através desta representação verifica-se que o fluxo é escoado, quase totalmente, pelo dreno francês. Através da representação desta seção verifica-se que o fluxo atinge o pé do talude de jusante com cargas hidráulicas bastante elevadas.

A Figura 4.78, representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Observa-se que para o fluxo mais afastado do sistema de drenagem as cargas totais apresentam-se mais elevadas. Conforme a proximidade com o dreno as mesmas tendem a ser dissipadas mais facilmente pelo dispositivo. Esta diferença de comportamento hidráulico encontrado em cada seção demonstra que o espaçamento entre os drenos proporciona aumento das cargas hidráulicas no interior do maciço.

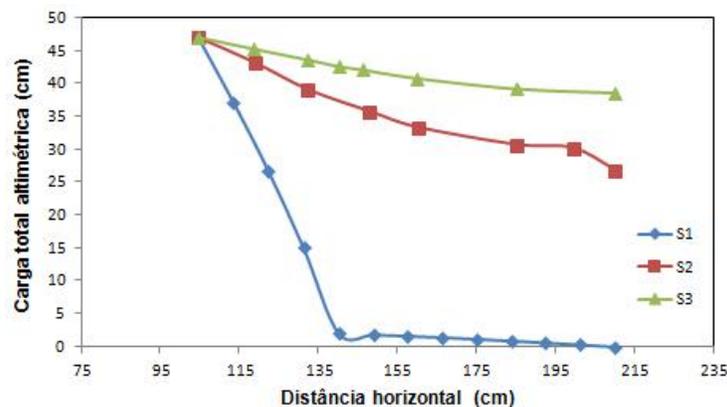


FIGURA 4.78 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 2 para comprimento de dreno igual a 70 cm

4.3.4.8.3 Modelo 3 – Barragem com 2 drenos franceses, simulando espaçamento de 100 cm

O modelo 3 consistiu em analisar a barragem dotada de dois drenos franceses, simulando espaçamento de 100 cm entre os drenos. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura H.3 (anexo H). Nota-se que as seções longitudinais demonstraram algumas diferenças significativas. No caso das seções S1 e S3 a superfície freática apresentou configuração similar devido à existência de dispositivo de drenagem. Como este modelo simula comprimento de dreno de 70 cm, nota-se que a freática demonstrou cargas mais baixas, se comparado ao modelo dotado de drenos franceses de 50 cm, indicando que a implantação de drenos mais longos auxiliam na dissipação das cargas. No caso da seção S2 as cargas hidráulicas mostraram-se consideravelmente maiores ao longo do percurso, igualmente à seção S2 obtida no modelo com um dreno, devido à inexistência do mesmo. O comportamento do fluxo encontrado nesta última seção não representa corretamente a situação no interior do maciço, pois o programa desconsidera a existência de um sistema de drenagem ao longo de toda a barragem. Neste caso as cargas hidráulicas encontradas na seção S2, que melhor represente esta simulação, são apresentadas na Figura 4.79.

Analisando a projeção da linha freática no plano horizontal (seção plana) (Figura H.3) nota-se que o fluxo se divide igualmente entre os dois dispositivos, proporcionando um comportamento de drenagem simétrico ao longo do maciço. Porém pode-se observar que, embora o espaçamento entre os drenos seja menor, as cargas hidráulicas encontradas entre os dispositivos apresentaram-se bastante elevadas, atingindo o pé do talude de jusante com carga muito acima de zero. Dessa forma, nota-se que a simulação de drenos mais longos, neste caso, não foram suficientes para dissipar totalmente as cargas no interior do maciço.

Analisando a projeção da linha freática no plano vertical (seção transversal) (Figura H.3.1) é possível observar mais claramente a simetria do fluxo através do maciço. Nota-se que com a diminuição do espaçamento entre os drenos, se comparado com o modelo simulando espaçamento de 200 cm, há um aumento no gradiente hidráulico, indicando que o fluxo escoou sentido a ambos os dispositivos.

A Figura 4.79, representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Nota-se que nas seções S1 e S3 a configuração de dissipação das cargas é similar,

apresentando valores mais baixos que na seção S2, em que não há presença de dispositivo de drenagem. Comparando-se os resultados obtidos nesta modelagem com a barragem dotada de um dreno francês pode-se verificar que as cargas hidráulicas no interior do maciço são menores. Porém, nota-se que, embora o espaçamento seja menor e o dreno mais longo, as cargas totais encontradas no interior do maciço ainda são altas, indicando que não houve a dissipação total da energia através dos drenos franceses. Com relação ao comportamento da superfície freática, obtida para as seções em que há sistema de drenagem, observa-se que a simulação de um dreno de maior comprimento possibilita a diminuição do trajeto percolado pelo fluxo nas extremidades do maciço.

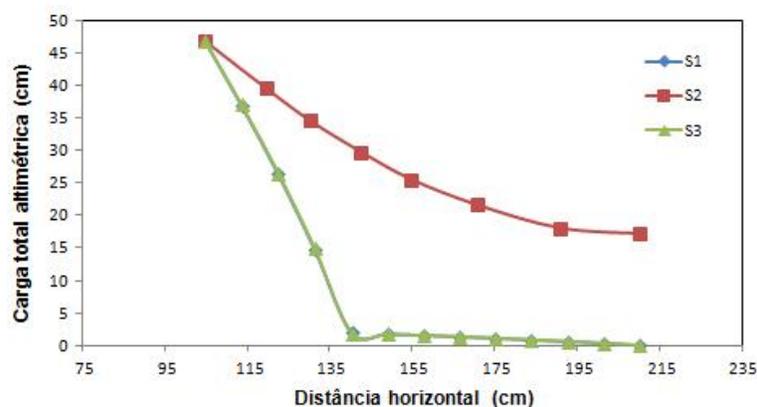


FIGURA 4.79 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 3 para comprimento de dreno igual a 70 cm

4.3.4.8.4 Modelo 4 – Barragem com 3 drenos franceses, simulando espaçamento de 50 cm

O modelo 4 consistiu em analisar a barragem dotada de três drenos franceses. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura E.4 (anexo E). Nota-se que as superfícies freáticas apresentaram comportamento similar, devido à presença de sistema de drenagem em todas as seções. Embora as superfícies freáticas apresentem uma curvatura na entrada do dreno, este fato não ocorre na realidade, mas possibilita que as cargas totais no maciço sejam mais baixas.

Analisando a projeção do fluxo no plano horizontal (seção plana), pode-se observar que a percolação apresenta-se em estado mais plano, semelhante ao comportamento encontrado no modelo dotado de tapete drenante. Nota-se que o fluxo é distribuído igualmente entre os drenos proporcionando um comportamento de

drenagem simétrico ao longo do maciço. É possível observar que com o aumento do comprimento do dreno e redução do espaçamento entre os sistemas de drenagem as cargas hidráulicas encontradas no maciço foram muito menores do que as encontradas nos modelos dotados de um e dois drenos franceses, indicando que quanto menor o espaçamento, menores são as cargas geradas no interior do maciço.

Analisando a projeção da superfície freática e das equipotenciais no plano vertical (seção transversal) verifica-se o comportamento simétrico desenvolvido pelo fluxo diante a um menor espaçamento entre os drenos. Nota-se que as cargas hidráulicas encontradas no maciço, entre os dispositivos, são consideravelmente menores se comparado com o modelo de drenos mais espaçados.

A Figura 4.80 representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Nota-se que em todas as seções o comportamento de dissipação das cargas é similar, apresentando queda de potencial linear até a entrada do dreno, seguindo com carga zero até a saída no pé do talude de jusante. Como a drenagem deste modelo é linear pode-se considerar que entre os drenos as cargas são um pouco mais elevadas, conforme representada através da seção plana. Com relação ao comportamento da superfície freática observa-se que a simulação de drenos mais compridos possibilita a diminuição do trajeto percolado pelo fluxo no interior do maciço, reduzindo a zona de saturação da barragem, o qual conseqüentemente mantém o talude de jusante com menor grau de saturação.

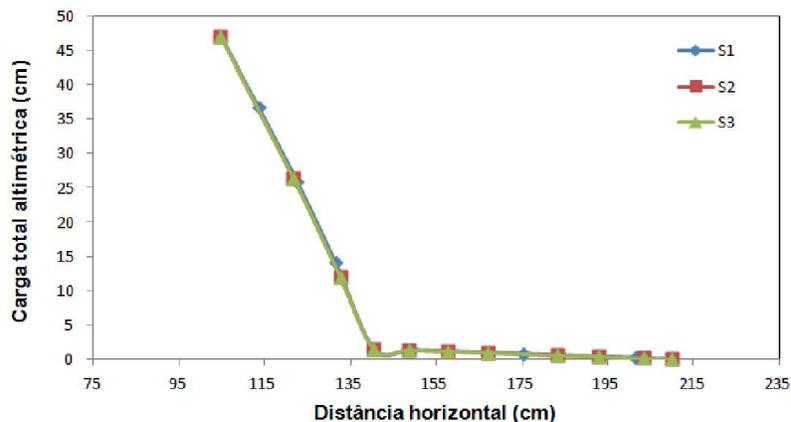


FIGURA 4.80 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 4 para comprimento de dreno igual a 70 cm

4.3.4.9 Barragem com largura (L) de 100 cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) de 95 cm

As simulações realizadas neste item são apresentadas resumidamente na Tabela 4.19, bem como as figuras representativas de cada modelo.

TABELA 4.19 – Análises paramétricas

Barragem	Dispositivo de drenagem	L ¹ (cm)	C ² (cm)	S ³ (cm)	Anexo	Figura
1	Tapete drenante	100	95	-	I	I.1
2	1 dreno francês	100	95	200	I	I.2 e I.2.1
3	2 drenos franceses	100	95	100	I	I.3 e I.3.1
4	3 drenos franceses	100	95	50	I	I.4

¹ L = Largura da barragem; ² C = Comprimento do dreno; ³ S = Espaçamento entre os drenos

4.3.4.9.1 Modelo 1 – Barragens com tapete drenante

O modelo 1 consistiu em analisar a barragem dotada de tapete drenante. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura I.1 (anexo I). Analisando a seção nota-se que as superfícies freáticas possuem a mesma configuração, já que todas consideram a existência de sistema de drenagem. Como o tapete drenante possui maior comprimento, observa-se que a linha freática apresentou carga hidráulica consideravelmente mais baixa, se comparada com os modelos simulando comprimento de 50 cm e 70 cm. No entanto, pode-se observar que a entrada do fluxo no dreno se deu a partir da distância horizontal de 150 cm, tornando desnecessário cerca de 35 cm do dreno.

Analisando a projeção da superfície freática no plano horizontal. Observa-se que o fluxo é uniforme ao longo do percurso, proporcionando que a dissipação das cargas hidráulicas ocorra igualmente ao longo do maciço e do dreno. Neste caso nota-se que o aumento da largura não influenciou no comportamento do fluxo. Com o aumento do comprimento do dispositivo, nota-se que o fluxo é percolado através do maciço mais rapidamente.

Da mesma forma, projetando-se as linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano vertical obteve-se a seção transversal, com relação ao dreno. Esta representação mostra, de forma mais clara, a dissipação homogênea das cargas.

A Figura 4.81, representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Nota-se que em todas as seções a carga hidráulica é dissipada igualmente, apresentando queda de potencial linear até a entrada do dreno, seguindo com carga nula até a saída do dreno. É possível observar que com maior comprimento de dreno as cargas são mais baixas e dissipadas mais rapidamente, possibilitando menor grau de saturação no talude de jusante. Como o tapete drenante é contínuo ao longo de toda a base de jusante da barragem, pode-se considerar que a percolação de água apresenta mesmo comportamento através do maciço, sem a elevação de carga total altimétrica em nenhum ponto.

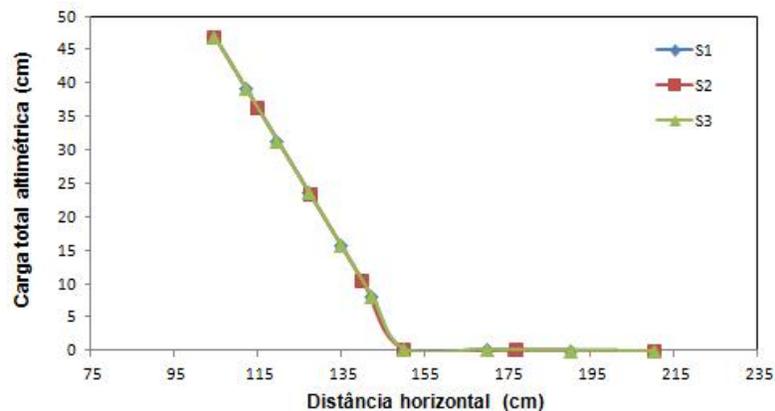


FIGURA 4.81 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 1 para comprimento de dreno igual a 95 cm

4.3.4.9.2 Modelo 2 – Barragem com 1 dreno francês, simulando espaçamento de 200 cm entre drenos

O modelo 2 consistiu em analisar a barragem dotada de um dreno francês. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções longitudinais S1, S2 e S3 apresentadas na Figura I.2 (anexo I). Analisando as seções nota-se que as mesmas demonstraram algumas diferenças significativas. Pode-se observar que na seção S1 a superfície freática apresentou-se mais baixa, se comparada aos modelos dotados de drenos franceses de 50 cm e 70 cm de comprimento, devido a existência de dispositivo de drenagem. No caso deste modelo pôde ser observado que a entrada do fluxo no dreno se deu a partir da distância horizontal de 150 cm, tornando desnecessário cerca de 35 cm do dispositivo. Com relação às seções S2 e S3 as superfícies freáticas encontradas no maciço apresentaram-se bastante elevadas, devido a ausência do dispositivo de drenagem. O comportamento do fluxo encontrado nestas duas últimas seções não representa

corretamente a situação no interior do maciço, pois o programa desconsidera a existência de um sistema de drenagem ao longo de toda a barragem. Neste caso as cargas hidráulicas encontradas nas seções S2 e S3, que melhor represente esta simulação, são apresentadas na Figura 4.82.

Analisando a projeção da linha freática no plano horizontal (seção plana) (Figura 1.2), nota-se que esta diferença altimétrica das superfícies freáticas indica a ocorrência de percolação do fluxo sentido ao dreno. Neste caso quanto maior for o espaçamento entre os drenos maiores serão as cargas desenvolvidas no interior do maciço e conseqüentemente a elevação da freática. Embora este modelo simule dreno mais comprido, a projeção considera o ponto de entrada do fluxo no dispositivo, que neste caso ocorre na distância de 150 cm, aproximadamente. Observa-se que a dissipação das cargas é realizada mais rapidamente, quanto mais próximo do dreno o fluxo estiver, podendo ser verificado que na lateral oposta ao dreno, às cargas são mais elevadas na base do talude de jusante.

A seção transversal (Figura 1.2.1) demonstra com mais clareza o comportamento do fluxo. Analisando a seção pode ser observada que a preferência de escoamento da água ocorre através do dreno, embora o espaçamento seja maior. Nota-se a existência de gradiente hidráulico, indicando deslocamento de fluxo no interior do maciço sentido ao dreno. Através desta representação verifica-se que o fluxo é escoado, quase totalmente, pelo dreno francês.

A Figura 4.82, representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Observa-se que para o fluxo mais afastado do sistema de drenagem as cargas totais apresentam-se mais elevadas. Conforme a proximidade com o dreno as mesmas tendem a ser dissipadas mais facilmente pelo dispositivo. Esta diferença de comportamento hidráulico encontrado em cada seção demonstra que o espaçamento entre os drenos proporciona aumento das cargas hidráulicas no interior do maciço. Nota-se que em situações de drenos muito afastados, como apresentado nesta simulação, a implantação de um sistema de drenagem mais comprido, representa-se insuficiente para dissipar as cargas hidráulicas geradas.

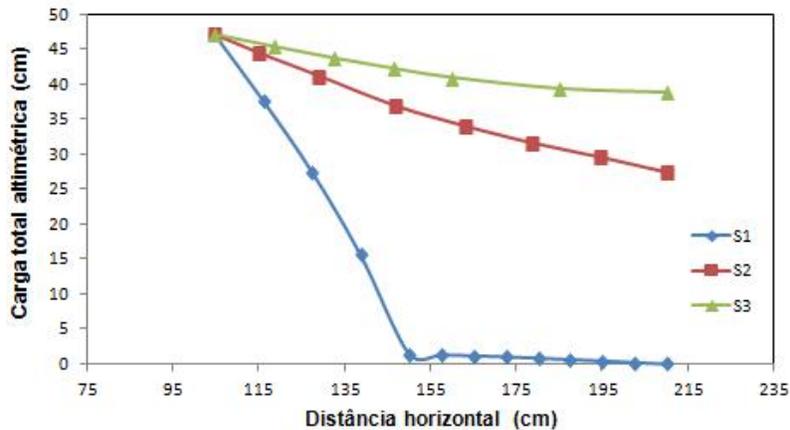


FIGURA 4.82 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 2 para comprimento de dreno igual a 95 cm

4.3.4.9.3 Modelo 3 – Barragem com 2 drenos franceses, simulando espaçamento de 100 cm

Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções longitudinais S1, S2 e S3 apresentadas na Figura I.3 (anexo I). Analisando as seções pode-se observar que nas seções S1 e S3 a superfície freática apresentou comportamento similar, devido a presença do sistema de drenagem. Nota-se que as cargas encontradas são significativamente mais baixas, se comparado aos modelos simulando comprimento menores de dreno. No caso deste modelo também pôde ser observado que a entrada do fluxo no dreno se deu a partir da distancia horizontal de 150 cm, aproximadamente, tornando desnecessario cerca de 35 cm do dispositivo. Com relação a seção S2, a ausência do dispositivo de drenagem proporcionou uma elevação considerável das cargas hidráulicas. O comportamento do fluxo encontrado nesta última seção não representa corretamente a situação no interior do maciço, pois o programa desconsidera a existência de um sistema de drenagem ao longo de toda a barragem. Neste caso as cargas hidráulicas encontradas na seção S2, que melhor represente esta simulação, são apresentadas na Figura 4.83.

Analisando a projeção da linha freática no plano horizontal (seção plana) (Figura I.3.1) nota-se que o fluxo se divide igualmente entre os dois dispositivos, proporcionando um comportamento de drenagem simétrico ao longo do maciço. Embora o dreno seja mais longo, a projeção considera a entrada do fluxo, no dreno, na distância 150 cm. Neste caso a representação da dissipação das cargas se assemelha ao ocorrido no modelo com comprimento de dreno de 70 cm. Pode-se

observar que, embora o dreno seja mais longo e o espaçamento entre eles seja menor, as cargas hidráulicas encontradas entre os dispositivos apresentaram-se bastante elevadas, atingindo o pé do talude de jusante com carga acima de zero. Dessa forma, nota-se que a simulação de drenos mais longos, neste caso, não foram suficientes para dissipar totalmente as cargas no interior do maciço.

Através da projeção apresentada na seção transversal é possível observar mais claramente a simetria do fluxo através do maciço. Nota-se que com a diminuição do espaçamento entre os drenos, se comparado com o modelo simulando espaçamento de 200 cm, há um aumento no gradiente hidráulico, indicando que o fluxo escoou sentido a ambos os dispositivos.

A Figura 4.83, representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Nota-se que nas seções S1 e S3 a configuração de dissipação das cargas é similar, apresentando superfície freática mais baixa que na seção S2, em que não há presença de dispositivo de drenagem. Comparando-se os resultados obtidos nesta modelagem com a barragem dotada de um dreno francês pode-se verificar que as cargas hidráulicas no interior do maciço são consideravelmente menores. Porém, nota-se que, embora o espaçamento seja menor e o dreno mais longo, as cargas totais encontradas no interior do maciço ainda são altas, indicando que não houve a dissipação total da energia através dos drenos franceses. Com relação ao comportamento da superfície freática, obtida para as seções em que há sistema de drenagem, observa-se que a simulação de um dreno de maior comprimento possibilita a diminuição do trajeto percolado pelo fluxo no interior do maciço, reduzindo a zona de saturação.

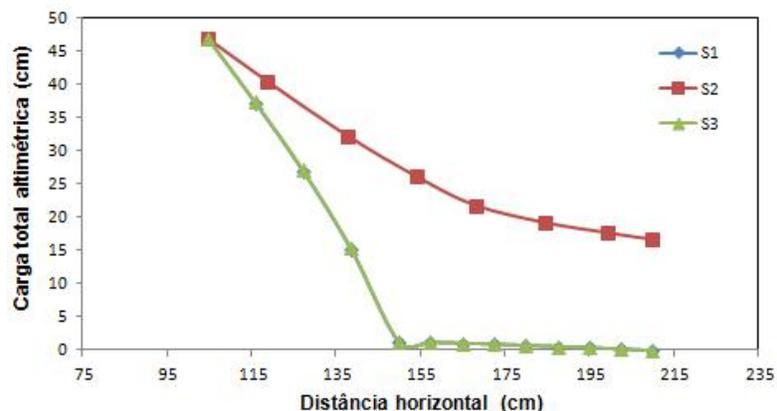


FIGURA 4.83 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 3 para comprimento de dreno igual a 95 cm

4.3.4.9.4 Modelo 4 – Barragem com 3 drenos franceses, simulando espaçamento de 50 cm

O modelo 4 consistiu em analisar a barragem dotada de três drenos franceses. Seccionando longitudinalmente o modelo nas posições dos piezômetros, foram obtidas as seções S1, S2 e S3 apresentadas na Figura I.4 (anexo I). Nota-se que as superfícies freáticas apresentaram comportamento similar, devido à presença de sistema de drenagem em todas as seções. Para a simulação do comprimento de 95 cm dos drenos, pôde ser verificado neste modelo, que o início do fluxo no dreno se deu a partir da distância horizontal de 150 cm, tornando desnecessário cerca de 35 metros do dreno. Devido os drenos possuem maior comprimento, observa-se que a linha freática apresenta cargas mais baixas, proporcionando a redução da região de saturação da barragem.

Analisando a projeção do fluxo no plano horizontal (seção plana), pode-se observar que a percolação apresenta-se em estado mais plano, semelhante ao comportamento encontrado no modelo dotado de tapete drenante. Nota-se que o fluxo é distribuído igualmente entre os drenos proporcionando um comportamento de drenagem simétrico ao longo do maciço. Embora o dreno tenha maior comprimento, a projeção considera o ponto de entrada do fluxo no dispositivo, que neste caso ocorre na distância de 150 cm, sendo neste caso admitido dreno de 60 cm de comprimento. Nota-se que a carga hidráulica entre os drenos, apresenta-se maior que nos modelos simulando comprimento de dreno de 50 cm e 70 cm, sendo gradativamente dissipada pelo maciço e atingindo o pé do talude de jusante com carga acima de zero. Dessa forma é possível observar que com o aumento do comprimento do dreno e redução do espaçamento entre os sistemas de drenagem as cargas hidráulicas encontradas no maciço foram menores do que as encontradas nos modelos dotados de drenos franceses menos espaçados, indicando que quanto menor o espaçamento, menores são as cargas geradas no interior do maciço.

Analisando a projeção da superfície freática e das equipotenciais no plano vertical (seção transversal) verifica-se o comportamento simétrico desenvolvido pelo fluxo diante a um menor espaçamento entre os drenos. Nota-se que as cargas hidráulicas encontradas no maciço, entre os dispositivos, são menores se comparado com os modelos de drenos mais espaçados.

A Figura 4.84 representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Nota-se que em todas as seções o comportamento de dissipação das cargas é similar,

apresentando queda de potencial linear até a entrada do dreno, seguindo com carga zero até a saída no pé do talude de jusante. Como a drenagem deste modelo é linear pode-se considerar que entre os drenos as cargas são um pouco mais elevadas. Com relação ao comportamento da superfície freática observa-se que a simulação de drenos mais compridos possibilitou a diminuição do trajeto percolado pelo fluxo no interior do maciço, reduzindo a zona de saturação da barragem, o qual conseqüentemente mantém o talude de jusante com menor grau de saturação.

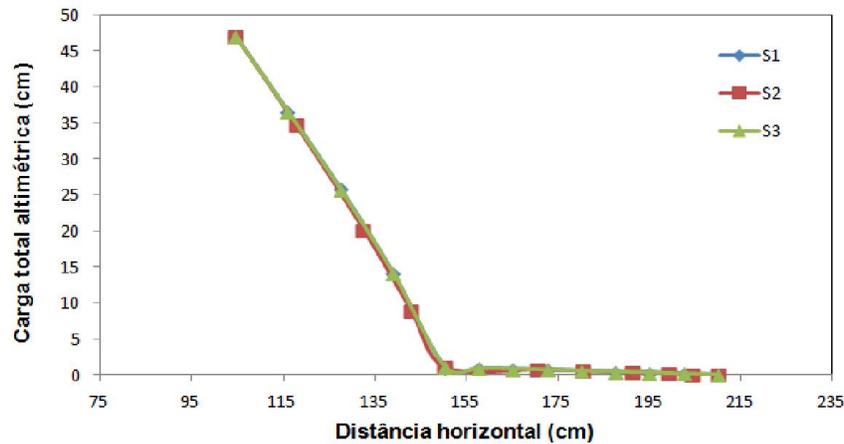


FIGURA 4.84 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo 4 para comprimento de dreno igual a 95 cm

4.3.4.10 Análise geral dos resultados

4.3.4.10.1 Modelo 1 – Barragem com tapete drenante

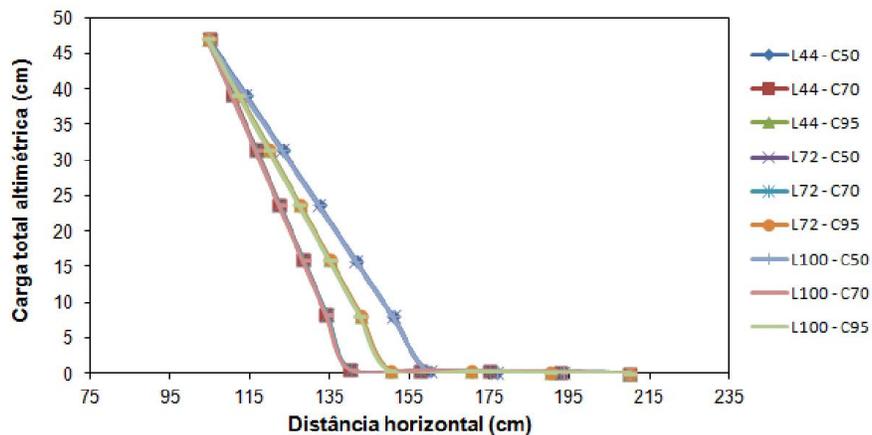
Através das soluções numéricas apresentadas, puderam ser verificadas as cargas hidráulicas totais encontradas nas barragens. Em todos os casos foi possível observar o comportamento do fluxo percolado, o qual ocorreu uniformemente ao longo de todo o maciço.

A fim de se analisar o comportamento do fluxo de cada modelo, os resultados obtidos nas modelagens com tapete drenante foram analisados por seções, seguindo os mesmos parâmetros do item anterior.

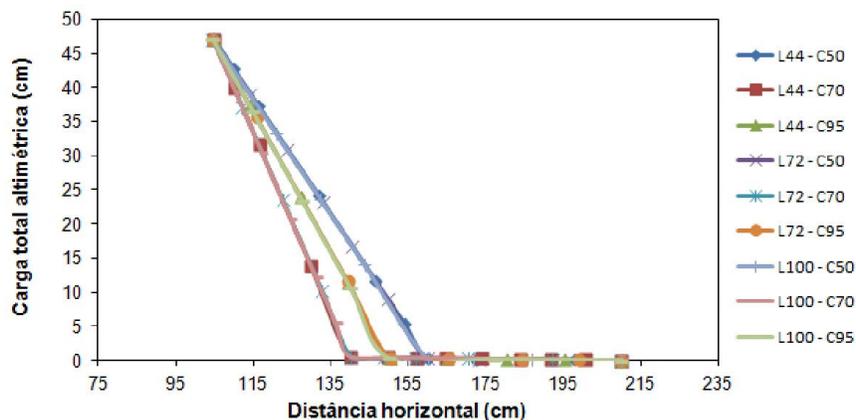
Analisando as seções mostradas na Figura 4.85 pode-se observar que, para cada modelo, S1, S2 e S3 apresentaram a mesma configuração, verificando-se que o comportamento do fluxo ao longo do maciço foi o mesmo. O fato do tapete drenante

ser um dispositivo contínuo e plano ao longo da base de jusante da barragem, proporcionou ocorrência de fluxo uniforme através do maciço.

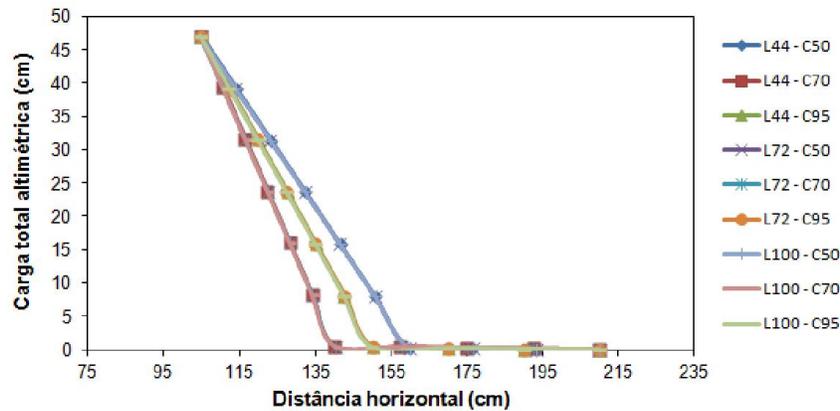
Nota-se que para um mesmo comprimento de dreno as cargas totais encontradas foram similares, independente da largura do dispositivo de drenagem, apresentando queda de potencial linear até a entrada do dreno, seguindo com carga nula até a saída no pé do talude de jusante. Neste caso, fazendo uma comparação entre os resultados obtidos para os diferentes comprimentos de drenos, pode-se observar que para os dispositivos mais longos a superfície freática sofreu rebaixamento, possibilitando que as cargas hidráulicas fossem dissipadas de forma mais rápida. Como a simulação para dreno de 95 cm de comprimento foi verificado que a entrada do fluxo no dreno se deu a partir da distância horizontal de 150 cm, pode-se observar que as cargas encontradas apresentaram valor intermediário aos drenos de 50 cm e 70 cm. A ocorrência desta situação permitiu concluir que a implantação de drenos com mais de 70 cm são desnecessários indicando um gasto excessivo de material.



a) Cargas totais obtidas na seção S1



b) Cargas totais obtidas na seção S2



c) Cargas totais obtidas na seção S3

FIGURA 4.85 – Cargas totais para a barragem dotada de tapete drenante

A Figura 4.86 representa a configuração transversal típica do fluxo encontrado no interior do maciço das barragens simuladas para as diferentes larguras de tapete drenante. Os valores das cargas totais foram obtidos através da projeção das linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano vertical (seções transversais) de cada modelo. Neste caso os pontos do gráfico representam as cargas que interceptam o eixo da largura, na altura zero. Dessa forma as cargas apresentadas foram as mais baixas, com o objetivo de, somente, analisar o comportamento geral do fluxo na barragem mediante as diferentes larguras simuladas.

Pode-se observar que para as barragens dotadas de tapete drenante a largura do dispositivo não influenciou no comportamento de dissipação das cargas hidráulicas, possibilitando que o fluxo se mantivesse sempre uniforme ao longo do maciço. Como o tapete drenante é contínuo na base de jusante, em todo o trecho drenante pode-se esperar que as cargas tenham magnitude zero, o qual representa que não houve gradiente hidráulico atuando transversalmente ao dreno.

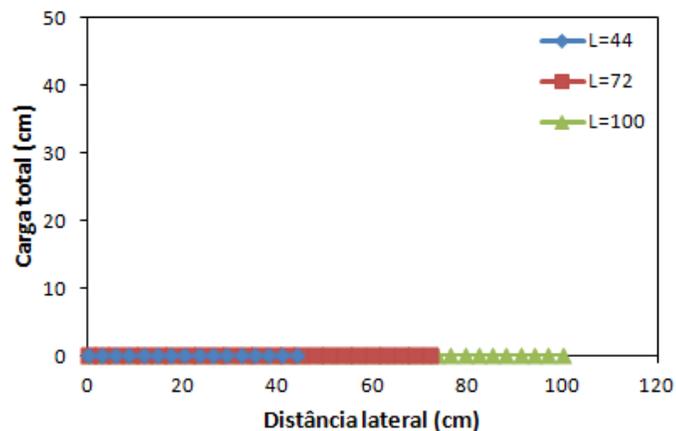


FIGURA 4.86 – Seção transversal das cargas totais para a barragem com tapete drenante

A simulação dos modelos de barragem utilizando tapete drenante pôde demonstrar a eficiência do dispositivo diante as situações simuladas. Pode-se observar que não houve elevação excessiva de carga hidráulica em nenhum ponto da barragem indicando uniformidade na percolação do fluxo. Com relação aos comprimentos de drenos avaliados, verificou-se que quanto maior o dispositivo, menor será a elevação da superfície freática, possibilitando menor grau de saturação no talude de jusante. Contudo o tapete drenante com 95 cm se mostrou desnecessário, podendo-se concluir que um dreno com mais de 70 cm não influencia no comportamento do fluxo.

4.3.4.10.2 Modelo 2 – Barragem com 1 dreno francês

O modelo de barragem dotado de um dreno francês considerou a posição do dispositivo na lateral direita da base de jusante. As análises paramétricas realizadas para este modelo foram consideradas como críticas, pois a implantação de único dreno francês permitiu a simulação dos maiores espaçamentos entre dispositivos.

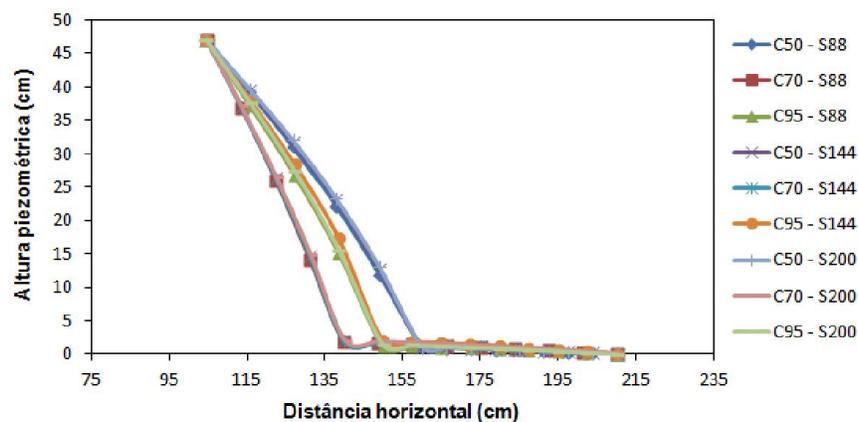
Através das soluções numéricas apresentadas, puderam ser verificadas as cargas hidráulicas totais encontradas nas barragens. Dessa forma, como objetivo de analisar o comportamento do fluxo de cada modelo, os resultados obtidos nas modelagens com dreno francês foram analisados por seções, seguindo os mesmos parâmetros do item anterior.

Conforme as seções mostradas na Figura 4.87 pode-se observar que, para cada modelo, S1, S2 e S3 apresentaram configurações bastante diferentes. Analisando a seção S1 observa-se que o comportamento do fluxo foi muito similar ao modelo dotado de tapete drenante, devido a presença do dispositivo de drenagem, apresentando valores de cargas muito aproximadas. Nota-se que para um mesmo comprimento de dreno as cargas totais encontradas foram similares, independente da largura do dispositivo de drenagem, apresentando queda de potencial linear até a entrada do dreno, seguindo com carga nula até a saída no pé do talude de jusante. Neste caso, fazendo uma comparação entre os resultados obtidos para os diferentes comprimentos de drenos, pode-se observar que para os dispositivos mais longos a superfície freática sofreu rebaixamento, possibilitando que as cargas hidráulicas fossem dissipadas de forma mais rápida. Como a simulação para dreno de 95 cm de comprimento foi verificado que a entrada do fluxo no dreno se deu a partir da distância horizontal de 150 cm, pode-se observar que as cargas encontradas apresentaram

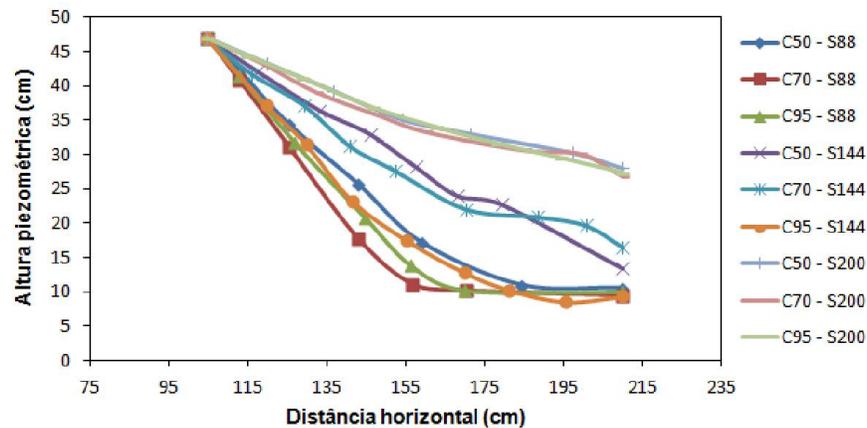
valor intermediário aos drenos de 50 cm e 70 cm. A ocorrência desta situação permitiu concluir que a implantação de drenos com mais de 70 cm são desnecessários indicando um gasto excessivo de material.

Analisando a seção S2, nota-se que as cargas no interior do maciço aumentaram significativamente conforme o aumento do espaçamento simulado. Observa-se que para o espaçamento de 200 cm, a superfície freática apresenta carga total bastante elevada, enquanto que para o espaçamento de 88 cm as cargas se mostraram mais baixas. Com relação ao comprimento do dreno, é possível observar que drenos mais longos proporcionaram a dissipação mais rápida das cargas e, conseqüentemente, o rebaixamento da superfície freática. Porém nota-se que para drenos de 95 cm de comprimento os resultados demonstraram valores de carga total intermediários aos drenos de 50 cm e 70 cm de comprimento indicando novamente que a implantação de drenos com mais de 70 cm são desnecessários. Um caso particular pode ser verificado para o dreno de 95 cm, espaçado a 144 cm. Observa-se que a configuração da curva se assemelha aos drenos espaçados a 88 cm, indicando que para este determinado espaçamento, a implantação de um dreno mais longo pode reduzir consideravelmente as cargas totais encontradas no maciço.

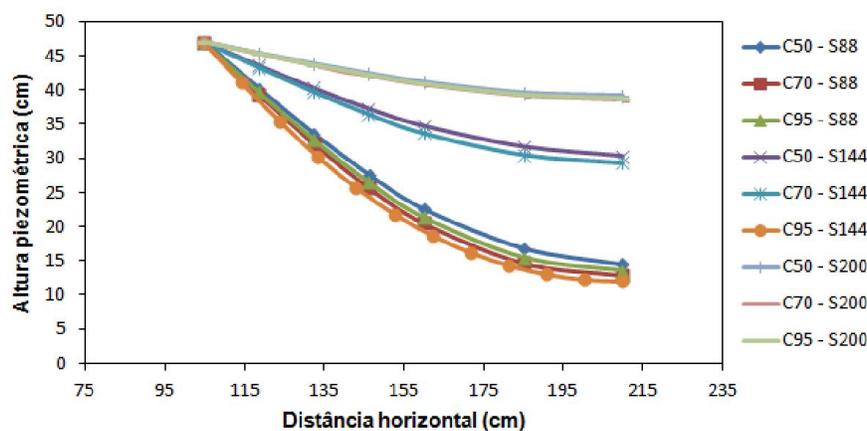
Analisando a seção S3 e comparando-a com as seções anteriores, observa-se que as superfícies freáticas foram mais elevadas, sendo que para um espaçamento de 200 cm as cargas hidráulicas obtidas se aproximaram do nível do reservatório. Esta diferença de comportamento hidráulico encontrado em cada seção demonstra que o aumento do espaçamento entre os drenos proporciona elevação considerável das cargas hidráulicas no interior do maciço. Da mesma forma como na seção S2, o aumento do comprimento dos drenos ocasionou o rebaixamento da freática.



a) Cargas totais obtidas na seção S1



b) Cargas totais obtidas na seção S2



c) Cargas totais obtidas na seção S3

FIGURA 4.87 – Cargas totais para a barragem com um dreno francês

A Figura 4.88 representa a configuração transversal típica do fluxo encontrado no interior do maciço das barragens simuladas para os diferentes espaçamentos entre os drenos franceses. Os valores das cargas totais foram obtidos através da projeção das linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano vertical (seções transversais) de cada modelo. Neste caso os pontos do gráfico representam as cargas que interceptam o eixo da largura, na altura zero. Dessa forma as cargas apresentadas foram as mais baixas, com o objetivo de, somente, analisar o comportamento geral do fluxo na barragem mediante as diferentes larguras simuladas.

Através do gráfico observa-se que com o aumento do espaçamento entre os drenos as cargas aumentaram significativamente. Nas três situações simuladas, as cargas apresentaram magnitude zero na posição do dreno, aumentando gradativamente conforme o espaçamento. Como os modelos de um dreno francês

simulam a metade do espaçamento entre dois dispositivos nota-se que a elevação das cargas representam um comportamento de fluxo simétrico indicando que a percolação da água entre os drenos escoam preferencialmente sentido aos sistemas de drenagem.

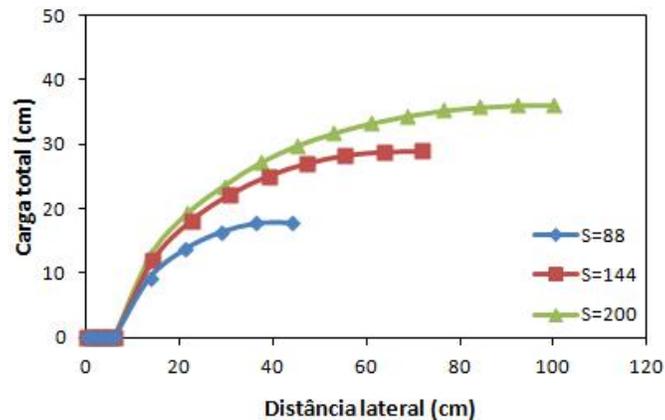


FIGURA 4.88 – Seção transversal das cargas totais para a barragem com um dreno francês

O comportamento do fluxo mediante a implantação de um dreno francês demonstrou com clareza que o espaçamento influencia significativamente na elevação das cargas totais no interior da barragem, proporcionando conseqüentemente, a elevação da superfície freática. Quanto mais afastados os drenos franceses estiverem maior será a zona de saturação de barragem e maior o risco de ruptura da estrutura. Em todos os casos simulando drenos mais longos, embora as cargas tenham sido reduzidas, os efeitos não apresentaram-se tão significativos, ou seja, para drenos muito espaçados a implantação de drenos de maior comprimento não ocasionaram a redução das cargas no maciço de forma satisfatória.

4.3.4.10.3 Modelo 3 – Barragem com 2 drenos franceses

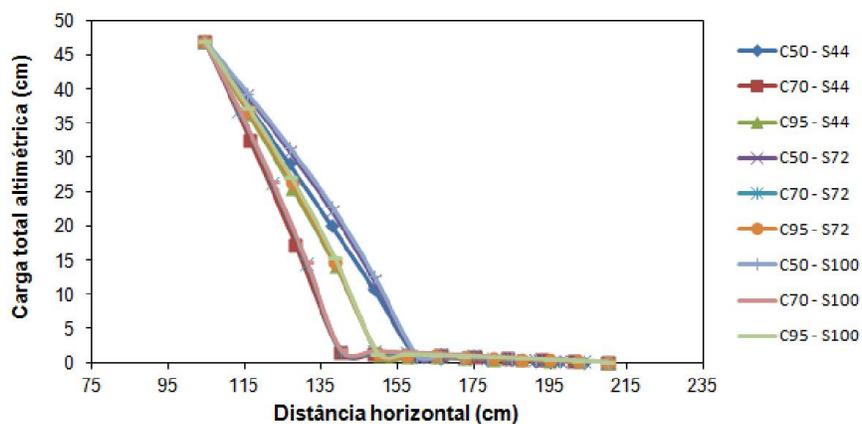
O modelo de barragem dotado de dois drenos franceses considerou a posição dos dispositivos em ambas as laterais da base de jusante, mantendo somente o meio sem dispositivo de drenagem.

Através das soluções numéricas apresentadas, puderam ser verificadas as cargas hidráulicas totais encontradas nas barragens. Dessa forma, como objetivo de analisar o comportamento do fluxo de cada modelo, os resultados obtidos nas modelagens com dois drenos franceses foram analisados por seções, seguindo os mesmos parâmetros do item anterior.

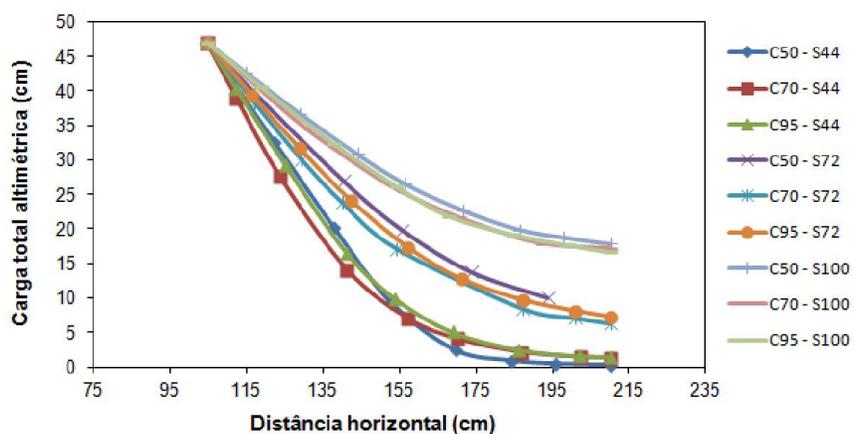
Conforme as seções mostradas na Figura 4.89 pode-se observar que, para cada modelo, S1 e S3 apresentaram configurações diferentes de S2. Analisando as seções S1 e S3 observa-se que o comportamento do fluxo foi muito similar ao modelo dotado de tapete drenante, devido a presença do dispositivo de drenagem, apresentando valores de cargas muito aproximadas. Nota-se que para um mesmo comprimento de dreno as cargas totais encontradas foram similares, independente da largura do dispositivo de drenagem, apresentando queda de potencial linear até a entrada do dreno, seguindo com carga nula até a saída no pé do talude de jusante. Neste caso, fazendo uma comparação entre os resultados obtidos para os diferentes comprimentos de drenos, pode-se observar que para os dispositivos mais longos a superfície freática sofreu rebaixamento, possibilitando que as cargas hidráulicas fossem dissipadas de forma mais rápida. Como a simulação para dreno de 95 cm de comprimento foi verificado que a entrada do fluxo no dreno se deu a partir da distância horizontal de 150 cm, pode-se observar que as cargas encontradas apresentaram valor intermediário aos drenos de 50 cm e 70 cm. A ocorrência desta situação permitiu concluir que a implantação de drenos com mais de 70 cm são desnecessários indicando um gasto excessivo de material.

Analisando a seção S2, nota-se que as cargas no interior do maciço aumentaram significativamente conforme o aumento do espaçamento simulado. Observa-se que para o espaçamento de 100 cm, a superfície freática apresentou carga total elevada, enquanto que para o espaçamento de 44 cm as cargas mostraram-se mais baixas. Ainda assim, se comparado com os resultados obtidos no modelo dotado de um dreno, esta apresentou cargas de menor magnitude, indicando que drenos menos espaçados geram menor carga total no maciço.

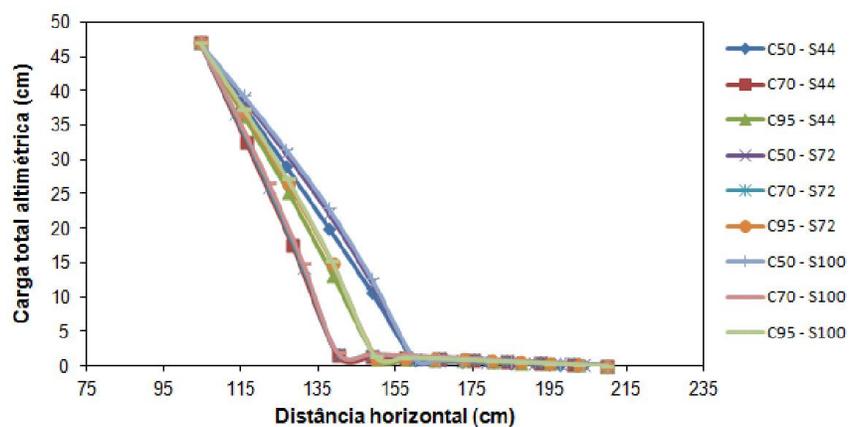
Com relação ao comprimento do dreno, é possível observar que drenos mais longos proporcionaram a dissipação mais rápida das cargas e, conseqüentemente, o rebaixamento da superfície freática. Porém nota-se que para drenos de 95 cm de comprimento os resultados demonstraram valores de carga total intermediários aos drenos de 50 cm e 70 cm de comprimento indicando novamente que a implantação de drenos com mais de 70 cm são desnecessários.



a) Cargas totais obtidas na seção S1



b) Cargas totais obtidas na seção S2



c) Cargas totais obtidas na seção S3

FIGURA 4.89 – Cargas totais para a barragem com dois drenos franceses

A Figura 4.90 representa a configuração transversal típica do fluxo encontrado no interior do maciço das barragens simuladas para os diferentes espaçamentos entre

os drenos franceses. Os valores das cargas totais foram obtidos através da projeção das linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano vertical (seções transversais) de cada modelo. Neste caso os pontos do gráfico representam as cargas que interceptam o eixo da largura, na altura zero. Dessa forma as cargas apresentadas foram as mais baixas, com o objetivo de, somente, analisar o comportamento geral do fluxo na barragem mediante as diferentes larguras simuladas.

Através do gráfico observa-se que com o aumento do espaçamento entre os drenos as cargas aumentaram significativamente. Nas três situações simuladas, as cargas apresentaram magnitude zero nas posições dos drenos, aumentando gradativamente conforme o espaçamento. Neste caso, como foram simulados dois drenos franceses, ficou mais visível o comportamento simétrico do fluxo. Nota-se que a percolação da água se divide igualmente entre os dispositivos de drenagem. Dessa forma pode-se observar que quanto menor o espaçamento entre os drenos franceses, menor é a altura da superfície freática no interior do maciço e conseqüentemente menor o risco de ruptura da estrutura.

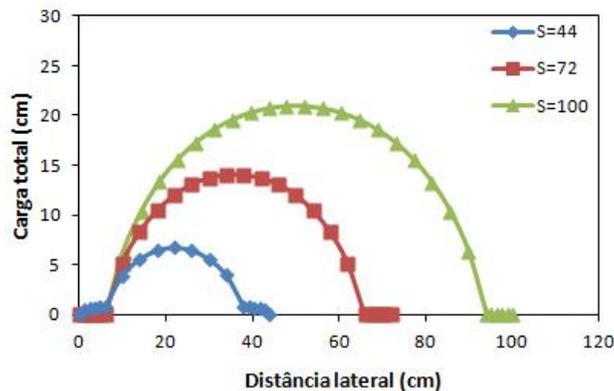


FIGURA 4.90 – Seção transversal das cargas totais para a barragem com dois drenos franceses

O comportamento do fluxo mediante a implantação de dois drenos franceses demonstrou que o espaçamento influencia significativamente na elevação das cargas totais no interior da barragem, proporcionando conseqüentemente, a elevação da superfície freática. Em todos os casos simulando drenos mais longos, embora as cargas tenham sido reduzidas, os efeitos não apresentaram-se tão significativos, ou seja, para drenos muito espaçados a implantação de drenos de maior comprimento não ocasionaram a redução das cargas no maciço de forma satisfatória.

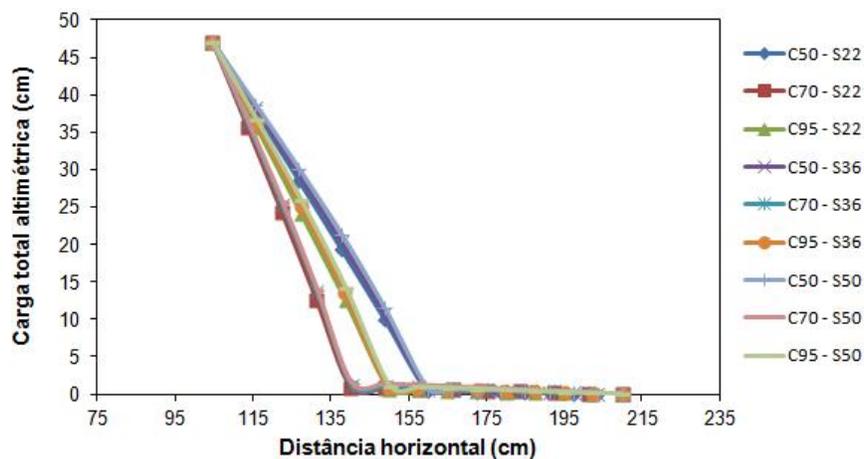
4.3.4.10.4 Modelo 4 – Barragem com 3 drenos franceses

O modelo de barragem dotado de três drenos franceses considerou a posição dos dispositivos em ambas as laterais e no meio da base de jusante. As análises paramétricas realizadas para este modelo foram consideradas como as mais aceitáveis, pois a implantação dos três dispositivos de drenagem permitiu a simulação de um dos menores espaçamentos entre dispositivos.

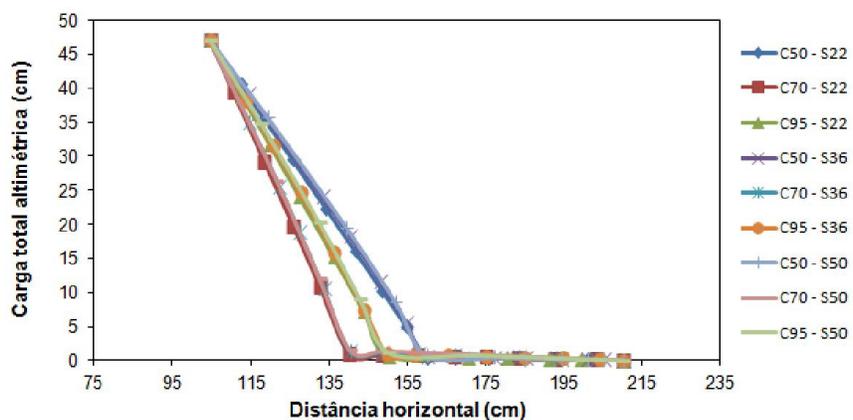
Através das soluções numéricas apresentadas, puderam ser verificadas as cargas hidráulicas totais encontradas nas barragens. Dessa forma, com o objetivo de analisar o comportamento do fluxo de cada modelo, os resultados obtidos nas modelagens com três drenos franceses foram analisados por seções, seguindo os mesmos parâmetros do item anterior.

De acordo com as seções mostradas na Figura 4.91 pode-se observar que, para cada modelo, S1, S2 e S3 apresentaram a mesma configuração, devido a presença de sistema de drenagem nas respectivas seções. Analisando os resultados obtidos nos gráficos observa-se que o comportamento do fluxo foi muito similar ao modelo dotado de tapete drenante, apresentando valores de carga total muito aproximadas. Nota-se que para um mesmo comprimento de dreno as cargas totais encontradas foram similares, independente da largura do dispositivo de drenagem, apresentando queda de potencial linear até a entrada do dreno, seguindo com carga nula até a saída no pé do talude de jusante. Como os drenos franceses são sistemas de drenagem lineares, pode-se considerar que entre os dispositivos a superfície freática é mais elevada.

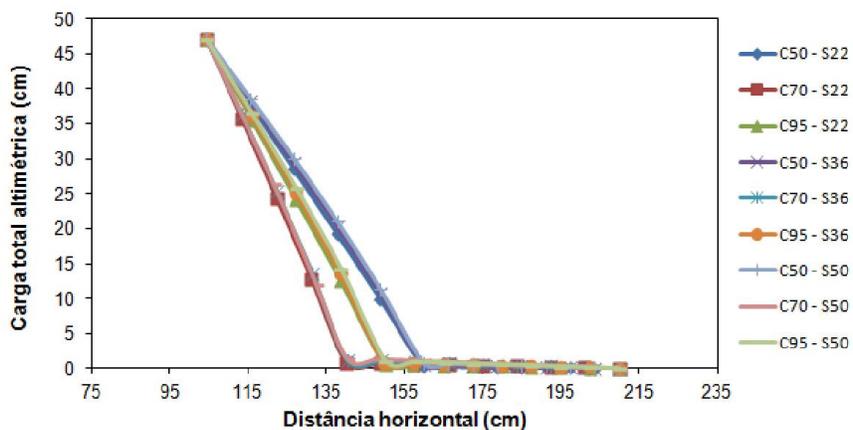
Fazendo uma comparação entre os resultados obtidos para os diferentes comprimentos de drenos, nota-se que para os dispositivos mais longos a superfície freática sofreu rebaixamento, possibilitando que as cargas hidráulicas fossem dissipadas de forma mais rápida. Como a simulação para dreno de 95 cm de comprimento foi verificado que a entrada do fluxo no dreno se deu a partir da distância horizontal de 150 cm, pode-se observar que as cargas encontradas apresentaram valor intermediário aos drenos de 50 cm e 70 cm. A ocorrência desta situação permitiu concluir que a implantação de drenos com mais de 70 cm são desnecessários indicando um gasto excessivo de material.



a) Cargas totais obtidas na seção S1



b) Cargas totais obtidas na seção S2



c) Cargas totais obtidas na seção S3

FIGURA 4.91 – Cargas totais para a barragem com três drenos franceses

A Figura 4.92 representa a configuração transversal típica do fluxo encontrado no interior do maciço das barragens simuladas para os diferentes espaçamentos entre

os drenos franceses. Os valores das cargas totais foram obtidos através da projeção das linhas equipotenciais ao longo da superfície freática no plano vertical (seções transversais) de cada modelo. Neste caso os pontos do gráfico representam as cargas que interceptam o eixo da largura, na altura zero. Dessa forma as cargas apresentadas foram as mais baixas, com o objetivo de, somente, analisar o comportamento geral do fluxo na barragem mediante as diferentes larguras simuladas.

Através do gráfico observa-se que com o aumento do espaçamento entre os drenos, as cargas aumentaram significativamente. Observa-se que quanto mais afastados os dispositivos, maiores foram as cargas hidráulicas encontradas do modelo. Ainda assim, comparando-se com os outros modelos simulando um e dois drenos franceses, este indicou a ocorrência das menores cargas. Neste caso também ficou visível o comportamento simétrico do fluxo. Nota-se que a percolação da água se divide igualmente entre os dispositivos de drenagem. Dessa forma pode-se observar que quanto menor o espaçamento entre os drenos, menor é a altura da superfície freática no interior do maciço e conseqüentemente menor o risco de ruptura da estrutura.

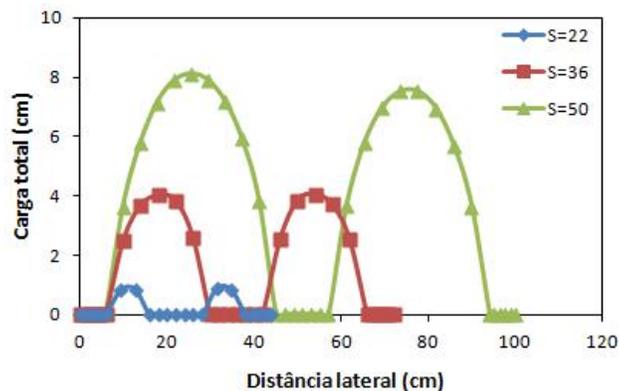


FIGURA 4.92 – Seção transversal das cargas totais para a barragem com três drenos franceses

A simulação dos modelos de barragem utilizando drenos franceses pôde demonstrar a eficiência do dispositivo diante as situações simuladas. O comportamento do fluxo mediante a implantação de três drenos franceses também demonstrou que o espaçamento influencia significativamente na elevação das cargas totais no interior da barragem, proporcionando conseqüentemente, a elevação da superfície freática conforme o afastamento dos drenos.

Com relação aos comprimentos de drenos avaliados, verificou-se que quanto maior o dispositivo, menor será a elevação da superfície freática, possibilitando menor

grau de saturação no talude de jusante. Contudo os drenos franceses com 95 cm se mostraram desnecessário, podendo-se concluir que drenos com mais de 70 cm não influenciam no comportamento do fluxo.

4.3.4.11 Análises comparativas

Conforme o que foi apresentado na revisão de literatura algumas barragens utilizam a combinação dos drenos franceses com outros sistemas de drenagem. Como o objetivo da pesquisa se refere à análise do comportamento do fluxo mediante a implantação deste dispositivo foram realizados algumas simulações associando este ao dreno vertical e ao tapete drenante.

4.3.4.11.1 Associação de drenos franceses com dreno vertical

A simulação deste modelo consistiu em implantar dois drenos franceses nas laterais direita e esquerda da barragem aliados a um dreno vertical localizado na distância de 120 cm, com altura de 47 cm, coincidindo com cota do nível do reservatório. Como visto anteriormente, drenos franceses maiores do que 70 cm se fazem desnecessários, mas por questões práticas os mesmos foram simulados com 90 cm, já que um maior comprimento não interfere no resultado. As características adotadas para o material utilizado para o dreno vertical foram as mesmas que as do dreno francês.

A Figura 4.93 apresenta os resultados obtidos na simulação deste modelo. Nota-se, através da seção longitudinal, que a superfície freática sofreu um rebaixamento reduzindo consideravelmente a zona saturada da barragem. É possível observar, na seção plana, que o dreno vertical permite que o fluxo seja distribuído igualmente entre os drenos franceses, mas ainda possibilita que o fluxo percole com baixa carga hidráulica através do maciço, entre os drenos. Essa ocorrência ficou mais visível na seção transversal.

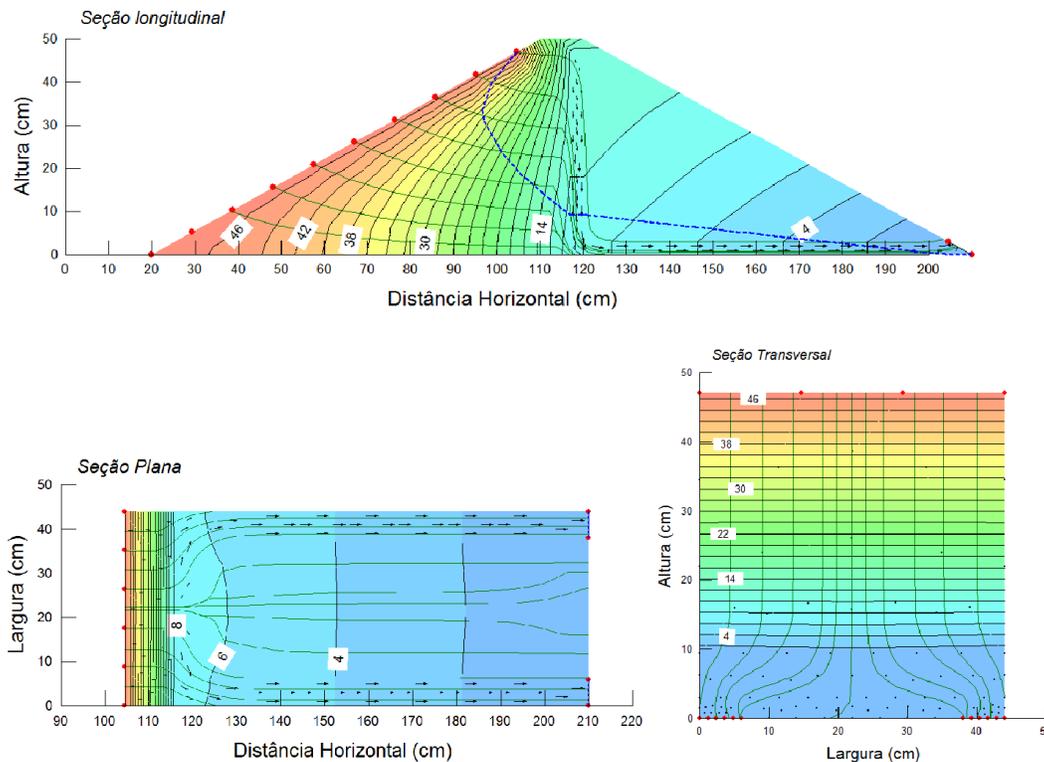


FIGURA 4.93 – Seções do modelo dotado de drenos franceses associados à dreno vertical: a) seção longitudinal; b) seção plana; c) seção transversal

A Figura 4.94 representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Nota-se que em todas as seções a dissipação das cargas foi similar, indicando que o dreno vertical regularizou as cargas no interior do maciço, diferentemente do que ocorreu com o modelo utilizando somente drenos franceses, o qual apresentou cargas bastante elevadas, conforme o afastamento dos drenos.

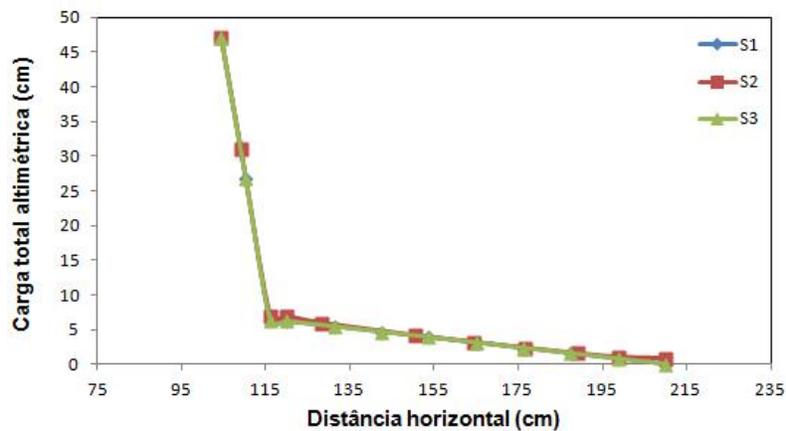


FIGURA 4.94 – Grafico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo com dois drenos franceses associados ao dreno vertical

Através da representação transversal do comportamento do fluxo (Figura 4.95) é possível fazer uma comparação entre este modelo, utilizando a combinação dos dois sistemas de drenagem mencionados, e a simulação do modelo utilizando dois drenos, espaçados a 44 cm. Para o primeiro caso, nota-se que o comportamento do fluxo apresentou uma pequena elevação nas cargas, o qual não foi possível de visualizar no gráfico anterior. Nota-se que as diferenças entre as cargas encontradas são bastante significativas, indicando que a implantação de um dreno vertical auxilia na redução das cargas no interior do maciço, possibilitando que a superfície freática seja rebaixada e consequentemente diminua o risco de ruptura da estrutura. Dessa forma os drenos franceses podem ser implantados com um espaçamento maior entre eles e manter, ainda, as cargas hidráulicas baixas.

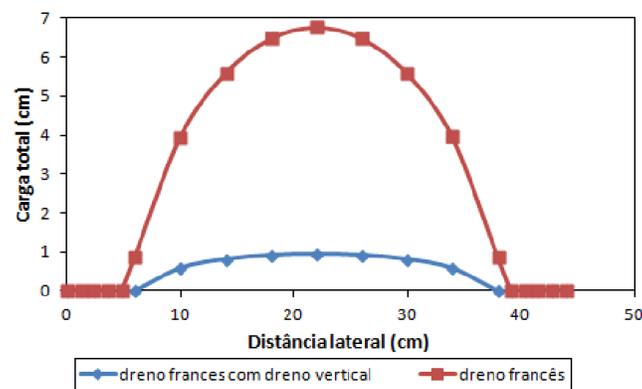


FIGURA 4.95 – Seção transversal das cargas totais para a barragem utilizando a combinação de drenos franceses com dreno vertical e para o modelo dotado de dois drenos franceses

4.3.4.11.2 Associação de drenos franceses com tapete drenante

A simulação deste modelo consistiu em implantar dois drenos franceses nas laterais da barragem e um tapete drenante entre eles. As características físicas adotadas para este último foram as mesmas que as do dreno francês, com exceção da permeabilidade, o qual admitiu-se que deveria possuir um coeficiente maior do que o da barragem e menor do dos drenos franceses. Dessa forma foi adotado coeficiente de permeabilidade de 5×10^{-1} cm /s.

A Figura 4.96 apresenta os resultados obtidos na simulação deste modelo. Através das seções longitudinais nota-se que, como a permeabilidade do tapete drenante é um pouco menor, a superfície freática é mais elevada no interior da barragem do que nas laterais. Ainda assim, o fluxo chega ao pé do talude de jusante com carga nula. De acordo com as seções plana e transversal pode-se observar que a

percolação ocorre uniformemente ao longo da barragem, cujo comportamento se assemelha ao modelo dotado de tapete drenante. Nota-se que a drenagem ocorre preferencialmente pelos drens franceses, mas a combinação com o tapete drenante auxilia na redução das cargas, indicando também a redução da zona saturada da barragem.

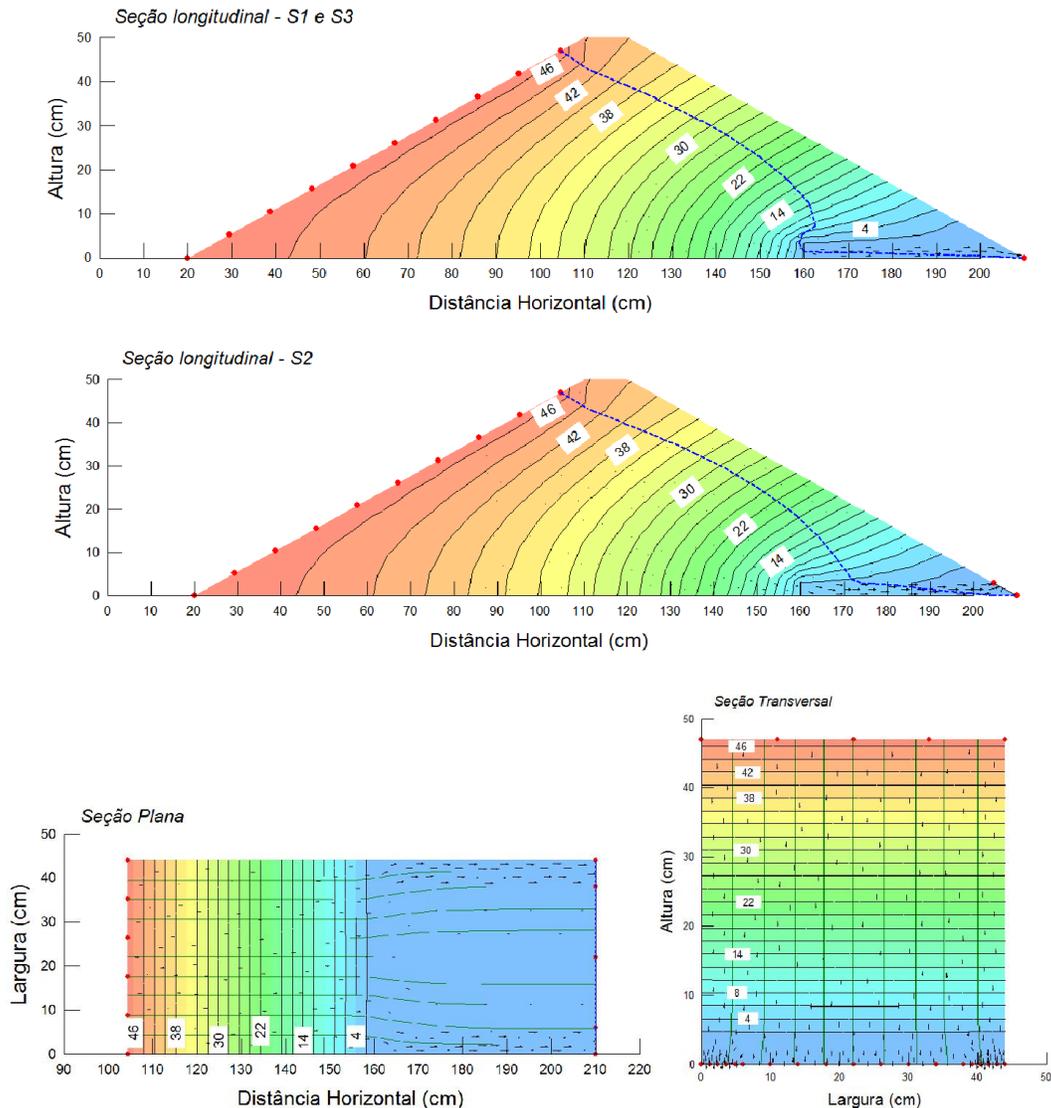


FIGURA 4.96 – Seções do modelo dotado de drens franceses associados à tapete drenante: a) e b) seções longitudinais; c) seção plana; d) seção transversal

A Figura 4.97 representa graficamente as cargas totais obtidas no maciço. Nota-se que nas seções laterais (S1 e S2) a dissipação das cargas foi similar. A seção S2 apresentou elevação um pouco antes da entrada do dreno, devido a diferença de permeabilidade entre os dois dispositivos. A associação destes dois sistemas de drenagem proporcionou redução das cargas no interior do maciço, diferentemente do

que ocorreu com o modelo utilizando somente drenos franceses, o qual apresentou cargas bastante elevadas, conforme o afastamento dos drenos.

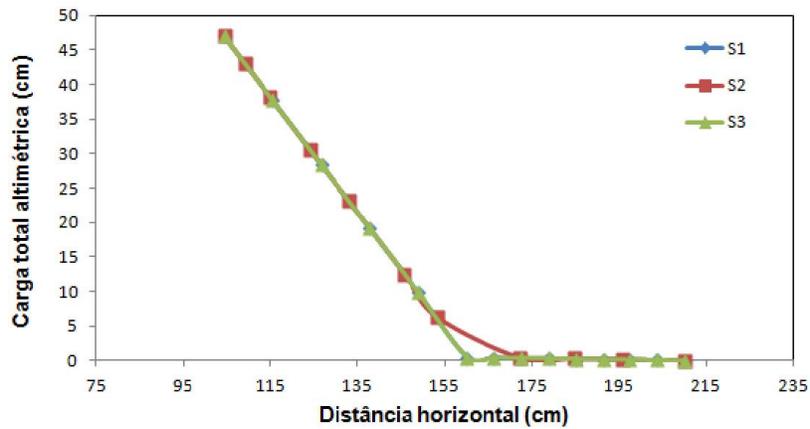


FIGURA 4.97 – Gráfico das cargas totais apresentadas nas seções S1, S2 e S3 do modelo com dois drenos franceses associados ao tapete drenante

Através da representação transversal do comportamento do fluxo (Figura 4.98) é possível fazer uma comparação entre este modelo, utilizando a combinação dos dois sistemas de drenagem mencionados, e a simulação do modelo utilizando dois drenos, espaçados a 44 cm. Para o primeiro caso, nota-se que o fluxo percolado pelo maciço é uniforme e atinge o pé do talude de jusante com carga nula, igualmente ao modelo dotado somente de tapete drenante. Nota-se que as diferenças entre as cargas encontradas são bastante significativas, indicando que a implantação de um tapete drenante auxilia na redução das cargas no interior do maciço, possibilitando que a superfície freática seja rebaixada e conseqüentemente diminua o risco de ruptura da estrutura. Da mesma forma como apresentado no modelo simulando a combinação anterior, os drenos franceses podem ser implantados com um espaçamento maior entre eles e manter as cargas hidráulicas baixas.

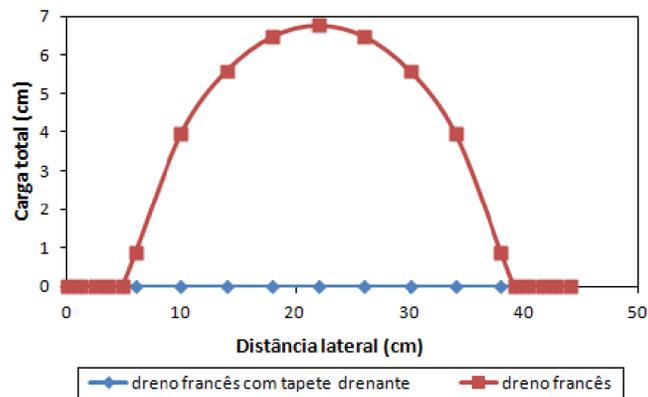


FIGURA 4.98 – Seção transversal das cargas totais para a barragem utilizando a combinação de drenos franceses com tapete drenante e para o modelo dotado de dois drenos franceses

4.3.5 Discussão

As análises realizadas puderam evidenciar a eficiência tanto dos drenos franceses como do tapete drenante. As simulações mostraram que a posição dos drenos franceses bem como o seu comprimento representam um fator relevante para a determinação da funcionalidade destes dispositivos, bem como garantir a estabilidade da estrutura.

Através das simulações pôde-se verificar que os modelos dotados de drenos franceses menos espaçados obtiveram melhor resultado, apresentando cargas hidráulicas consideravelmente mais baixas, mantendo o talude de jusante com grau de saturação menor. A Figura 4.99 representa a configuração transversal do fluxo mediante aos espaçamentos entre os drenos franceses analisados. Como o comportamento do fluxo entre os drenos é simétrico o gráfico apresenta somente os resultados obtidos para um dispositivo, ou seja, metade da drenagem entre dois drenos.

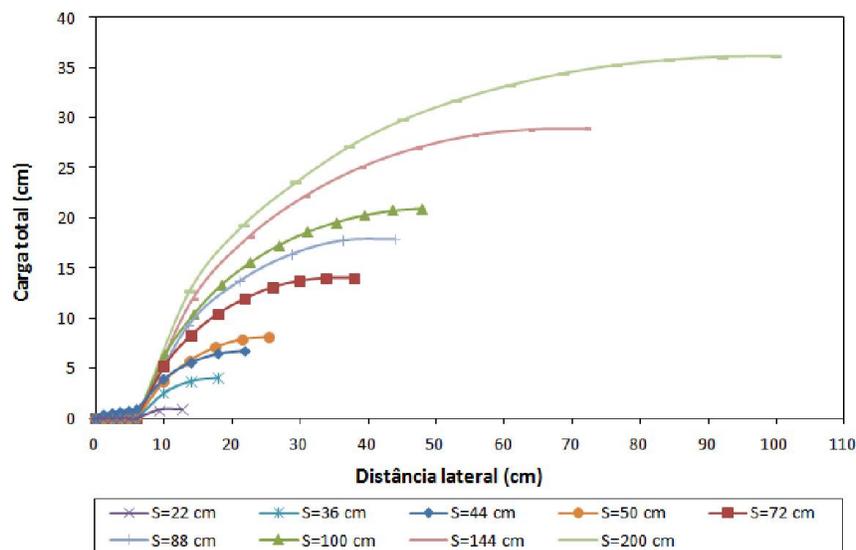


FIGURA 4.99 – Seção transversal das cargas totais para a barragem simulando os diferentes espaçamentos entre os drenos franceses

Nota-se que quanto maior for o espaçamento entre os sistemas de drenagem, maiores serão as cargas geradas no maciço. É possível observar que o comportamento do fluxo obtido para a simulação de 22 cm foi muito próximo à simulação da barragem dotada de tapete drenante, apresentando percolação em estado mais plano ao longo do maciço. A implantação de drenos franceses espaçados

a 200 cm mostrou-se inviável visto que as cargas totais apresentaram-se bastante elevadas, indicando superfície freática muito alta. Tanto o modelo físico quanto o modelo numérico apresentaram as mesmas características. Neste caso, nem mesmo a implantação de drenos mais longos seria suficiente para atenuar as cargas hidráulicas no maciço. Situações como esta inviabilizam a utilização deste dispositivo, pois não há confiabilidade.

Com relação ao comprimento dos drenos avaliados, ficou claro que dispositivos mais longos permitem que a dissipação das cargas seja realizada mais rapidamente ocasionando o rebaixamento da superfície freática no interior do maciço. Contudo drenos maiores do que 70 cm não demonstraram alteração no comportamento do fluxo.

Como o tapete drenante representa o dispositivo mais usualmente empregado em barragens a implantação dos drenos franceses deve ser realizada de forma que as cargas geradas no maciço e o comportamento do fluxo sejam similares as situações encontradas no primeiro. Dessa forma pode-se dizer que o espaçamento entre os drenos deve ser o menor possível, o qual corresponde a uma maior área de escoamento, para que não haja elevação da superfície freática que possa causar risco à estrutura.

A combinação de drenos franceses com outros sistemas de drenagem demonstrou-se uma alternativa eficiente, reduzindo consideravelmente as cargas no interior do maciço e conseqüentemente a zona de saturação da barragem. Esta associação possibilita que os drenos franceses sejam implantados com maior espaçamento.

5 CONCLUSÃO

Este estudo contemplou a execução de modelos físicos reduzidos e realização de análises numéricas, a fim de avaliar a eficiência de drenos franceses. Dos resultados obtidos no estudo, pode-se tecer as seguintes conclusões:

- As análises realizadas através do modelo reduzido e método numérico se mostraram bastante satisfatórias, em que o mesmo comportamento simulado no modelo físico foi obtido também pelas análises numéricas.

- Os modelos físicos reduzidos se mostraram viáveis e úteis no entendimento do fluxo tridimensional em barragens dotadas de drenos franceses.

- Em função de dificuldades encontradas para se realizar análises tridimensionais de percolação, optou-se por realizar análises bidimensionais em três planos ortogonais. Essa técnica permitiu obter, com razoável aproximação, a superfície freática tridimensional no interior do maciço da barragem.

- Comparando o funcionamento dos drenos franceses com o tapete drenante contínuo, pode-se concluir que ambos são eficientes sob o ponto de vista de drenagem, porém, o tapete mantém as cargas no maciço, mais baixas.

- A análise realizada com três drenos franceses foi a que indicou maior semelhança com o tapete drenante, justamente pelo fato de o espaçamento entre os drenos ser menor, mantendo as cargas hidráulicas mais baixas que as observadas no modelo com um dreno.

- Ambos os modelos (físico e numérico) evidenciaram a eficiência do dreno francês, que podem funcionar de modo satisfatório desde que adequadamente dimensionados. Neste caso as análises paramétricas se mostraram muito úteis, demonstrando os diferentes comportamentos do fluxo mediante aos diferentes espaçamentos entre os drenos e os seus comprimentos.

- Com a simulação de diferentes comprimentos de drenos pôde ser verificado que a implantação de dispositivos mais longos auxilia na dissipação das cargas hidráulicas. Dessa forma, quanto maior o comprimento mais baixa é a posição da superfície freática. Contudo, as análises demonstraram que o uso não se consegue ganho de desempenho se forem usados drenos com comprimentos maiores que 40% da base da barragem.

- Para melhor eficiência dos drenos franceses há necessidade de usar espaçamentos limitados entre drenos ou de aumentar a área de escoamento do dreno, para limitar as cargas no maciço a valores desejáveis.

- Ao se dimensionar drenos franceses, recomenda-se que a área total em planta dos drenos seja entre 20% e 40% da área correspondente à solução com tapete drenante convencional, bem como que a capacidade drenante seja pelo menos igual à do tapete drenante. O aumento da capacidade drenante pode ser obtido pelo uso de materiais mais permeáveis. Dessa forma é possível garantir a ocorrência de cargas de baixa magnitude.

- Os espaçamentos recomendados para os drenos franceses, tais que garantam que a superfície freática obtenha elevação aproximada à desenvolvida pelo tapete drenante, é da ordem de 40 a 70% da altura da barragem.

- As combinações de drenos franceses com dreno vertical ou com tapete drenante se mostraram bastante eficientes apresentando cargas muito mais baixas do que os modelos utilizando somente dreno francês. Neste caso pode-se concluir que a associação de dois dispositivos de drenagem permite que os drenos franceses sejam locados com maior espaçamento entre si.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros propõe-se:

- Repetição das análises numéricas com modelos tridimensionais;
- Avaliar, em modelos físicos reduzidos e modelos numéricos, o comportamento de uma barragem dotada de drenos franceses transversais, com um dreno linear longitudinal interligando os drenos transversais;
- Compilar as informações obtidas neste e em futuros estudos objetivando criar uma metodologia de dimensionamento de drenos franceses que seja de fácil utilização, não demandando o uso de programas de análise de fluxo.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: **Análise Granulométrica de Solos**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12004: **Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos**. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12051: **Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13292: **Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante**. Rio de Janeiro, 1995.

BRAZ, M. G. **A relação do fenômeno de ruptura hidráulica em maciços de barragens de terra e o mau funcionamento de vertedores do tipo poço**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS-1377: Compaction Test for Granular Soils**. London, 1979.

CASAGRANDE, A. **Seepage through dams: Contribution to soil mechanics**. Boston: Society of civilEngineers, 1940.

CEDERGREN, H.R. **Seepage, drainage and flow nets**. 3ª edição. New York: Ed. Jonh Wiley & Sons, 1989.

COREY, R.B. **Hydraulic properties of porous media**. Hydrol Paper. Colorado State Unversity, 1964.

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

DAS, B.M. **Fundamentos de Engenharia geotécnica**. 6ª Ed norte-americana São Paulo: Ed. Thomson Learning, 2007.

DELGADO, C.W.C., **Desenvolvimento de um equipamento para o estudo da permeabilidade efetiva em meios multifásicos**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil – PUC - RJ, 2000.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 093: Densidade Real dos Grãos**. 1994.

FELL, R; MACGREGOR, P.;STAPLEDON, D.;BELL, G. **Geotechnical Engineering of dams**. London: Ed. Taybrand and Francis Group, 2005.

FREDLUND, D.G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. New York: Ed. Jonh Wiley & Sons, 1993.

FREDLUND, D.G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994.

FREEZE, R.A. **Influence of the unsaturated flow domain on seepage through earth dams**. Water resources research, 1971.

FURLAN, G.C. **Avaliação da influencia de um agente repelente sobre as propriedades mecânicas e hidráulicas de um solo arenoso**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

GAIOTO, N. **Introdução ao projeto de barragens de terra e de enrocamento**. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2003.

GARDNER, W.R. **Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table**. U. S. Department of Agriculture.

GERSCOVICH, D. Estabilidade de taludes. 1ª edição. São Paulo: Oficina de textos, 2012.

GONÇALVES, A.D. **Uma análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

GUIMARÃES, L. M. **Desenvolvimento de um permeâmetro para a determinação da condutividade hidráulica saturada e não saturada de solos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

GUIZELINI, A.P. **Estudo do comportamento hidromecânico de solos visando a construção de sistemas de cobertura alternativos para aterros sanitários**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

HUERTAS, J.R.C. **Modelagem numérica de fluxo 3D em meios porosos**. Dissertação de Mestrado. PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2006.

ICOLD. **Embankment dams granular filters and drains**. Boletim 95. 1994.

LAMBE, T.W; WHITMAN, R.V. **Soil Mechanics, SI Version**. 6ª Edição. New York: Ed. John Wiley & Sons, 1979.

LEME, R.F. **Influencia da sucção mátrica nas condições de fluxo e estabilidade de taludes da brragem pesqueiro**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará: Fortaleza, 2009.

LISBOA, R.L. **Determinação da condutividade hidráulica não-saturada de solos residuais com o permeâmetro Guelph e ensaios de laboratorio**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa: Viçosa, 2006.

MARINHO, F.A. **Medição de sucção em solos**. 1997. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO-SATURADOS, 3, 1997. Anais:pp. 373-398.

MASSAD, F. **Obras de Terra - Curso básico de geotecnia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

MIRANDA, S.A. **Análise paramétrica do regime de fluxo numa barragem de terra assente em solos permeáveis. Estudo de caso: PCH Canoa Quebrada.** Dissertação de Mestrado. Escola de Minas, UFPO, Minas Gerais, 2009.

MITCHELL, J.K.; SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior.** 3ª edição. New York: Ed. John Wiley & Sons, 1993.

MUSKAT, M. **The flow of homogeneous fluids through porous media.** 1ª edição. Michigan: McGraw-Hull Book Company, 1946.

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

ORTIGÃO, J.A. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos.** São Paulo: Terratek, 2007.

PACHECO, I.B.; MORITA, L.; MEISMITH, C.J.; SILVA, S.A. **Utilização de dreno francês no sistema de drenagem interna de barragens de terra.** SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 14, 1981, Recife.

PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos.** 1ª edição. São Paulo: Oficina de Textos: 2000.

PIZARRO, M.L. **Simulação de fluxo de água e transporte de solutos na zona não-saturada do solo pelo método do elemento finito adaptativo.** Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2009.

PREVEDELLO, C.L. **Física do solo com problemas resolvidos.** Curitiba: Salesward-Discovery, 1996.

QUINTAS, F.E.G. **Planeamento da construção de barragens de terra.** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto, 2002.

QUISPE, R.J.Q. **Implementação numérica para análise de fluxo transiente 3D em barragens.** Dissertação de Mestrado. PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2008.

REYNA, E. **Modelos analíticos y numéricos para la determinación de infiltración en presas de material suelto, análisis de su uso y sensibilidad.** Tese de Doutorado. Universidade Nacional de Córdoba, Córdoba, 2008.

RIBEIRO, C.C. **Estudos piezométricos e análise de estabilidade de taludes da barragens Bico da Pedra.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto: Ouro Preto, 2006.

ROCHA, G.S. **Desvios de rios para a construção de barragens.** Dissertação de Mestrado. Universidade de São Carlos: São Paulo, 2006.

SARÉ, A.R. **Análise das condições de fluxo na barragem de Curuá-Una, Pará.** Dissertação de Mestrado. PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2003.

SILVA, D.R.P. **Avaliação da contribuição de sistemas de fraturas nas condições de fluxo e estabilidade de encostas.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

TAYLOR, D.W. Fundamentals of soil mechanics. New York: Ed. John Wiley & Sons, 1948.

TERZAGHI, K.; PECK, R.B.; MESRI, G. **Soil mechanics in engineering practice**. 3ª edição. New York: Ed. John Wiley & Sons, 1996.

TODD, D. K. **Groundwater Hydrology**. 3ª edição. New York: Ed. John Wiley e Sons, 2005.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Earth and rock-fill dams – General Design and construction considerations**. Washington, 1994.

ANEXOS DO CAPÍTULO 4

ANEXO A – Modelo de barragem com largura (L) 44 cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) 50 cm

A.1 Modelo 1 – Barragem com tapete drenante

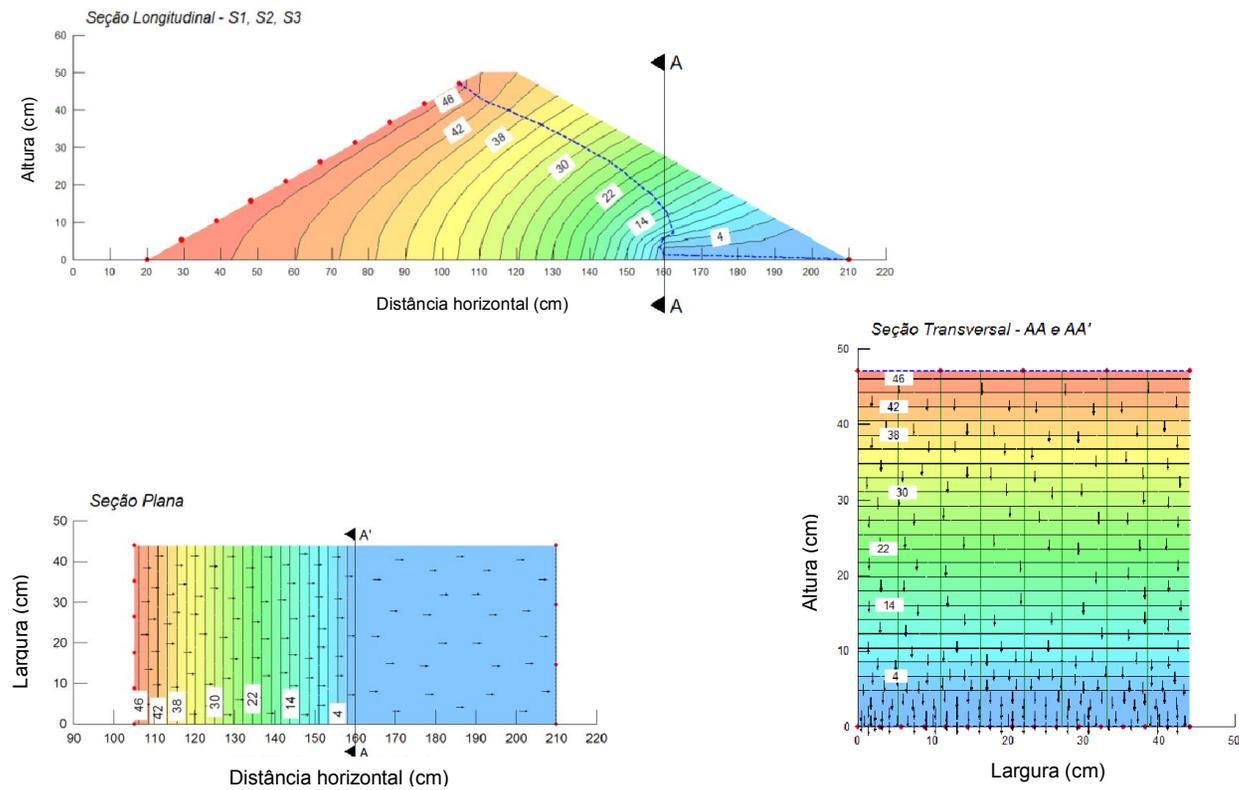


FIGURA A.1 – Seções do modelo 1: barragem com largura de 44 cm dotada de tapete drenante com comprimento de 50 cm

A.2 Modelo 2 – Barragem com 1 dreno francês, simulando espaçamento de 88 cm

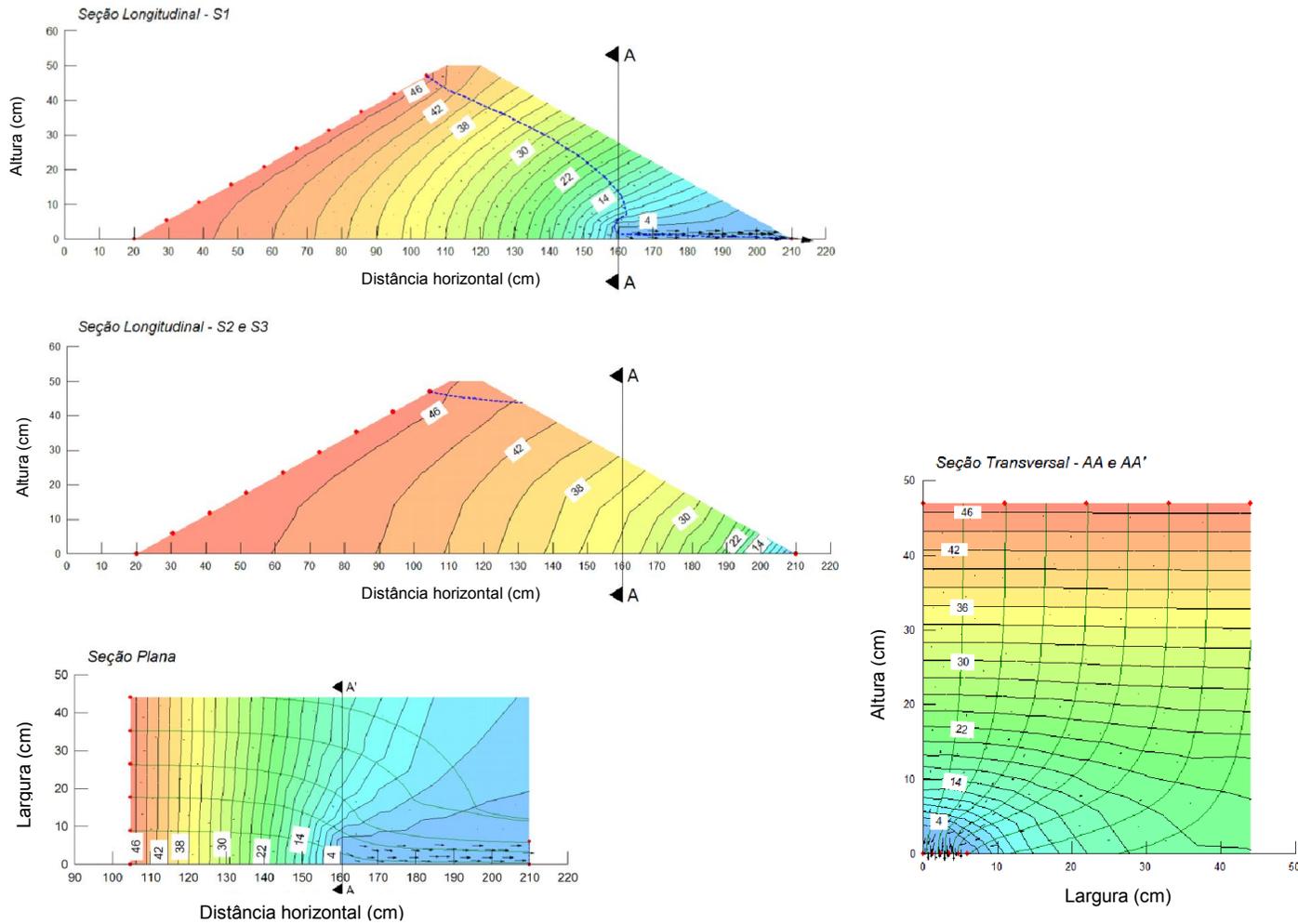


FIGURA A.2 - Seções do modelo 2: barragem com largura de 44 cm dotada de um dreno francês com comprimento de 50 cm

A.3 Modelo 3 – Barragem com 2 drenos franceses, simulando espaçamento de 44 cm

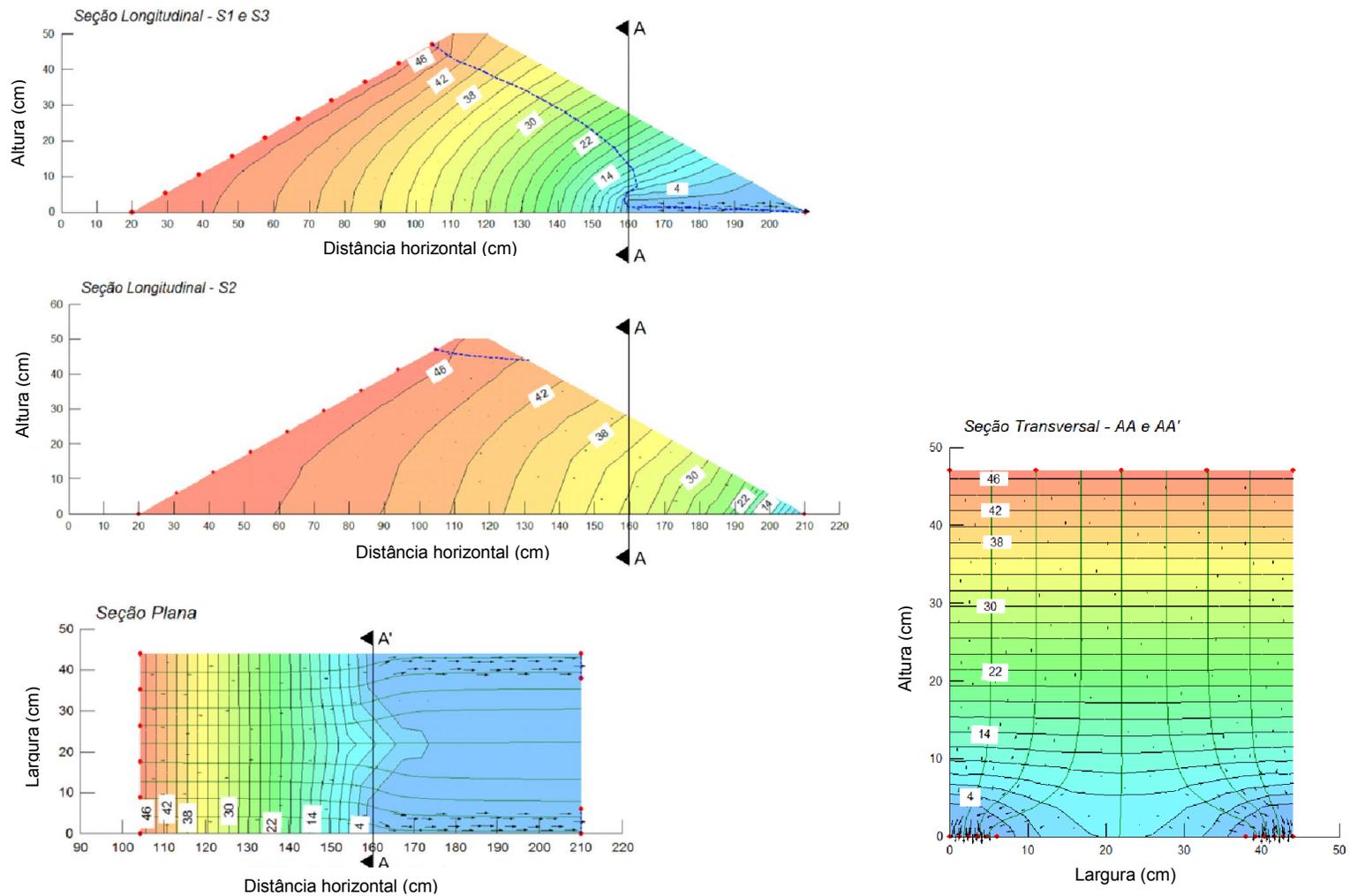


FIGURA A.3 - Seções do modelo 3: barragem com largura de 44 cm dotada de dois drenos franceses com comprimento de 50 cm

A.4 Modelo 4 – Barragem com 3 drenos franceses, simulando espaçamento de 22 cm

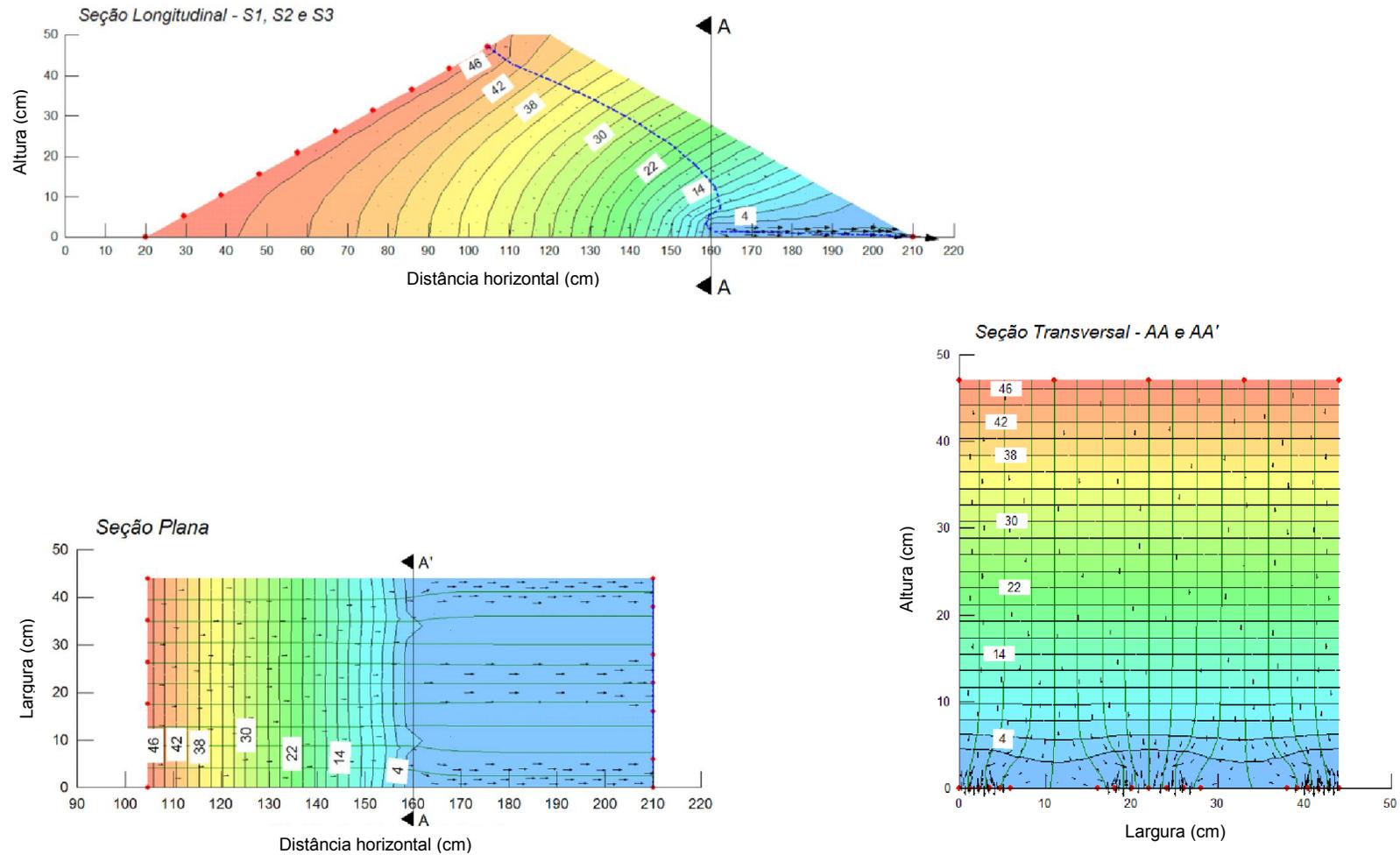


FIGURA A.4 - Seções do modelo 4: barragem com largura de 44 cm dotada de três drenos franceses com comprimento de 50 cm

ANEXO B – Modelo de barragem com largura (L) 44 cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) 70 cm

B.1 Modelo 1 – Barragem com tapete drenante

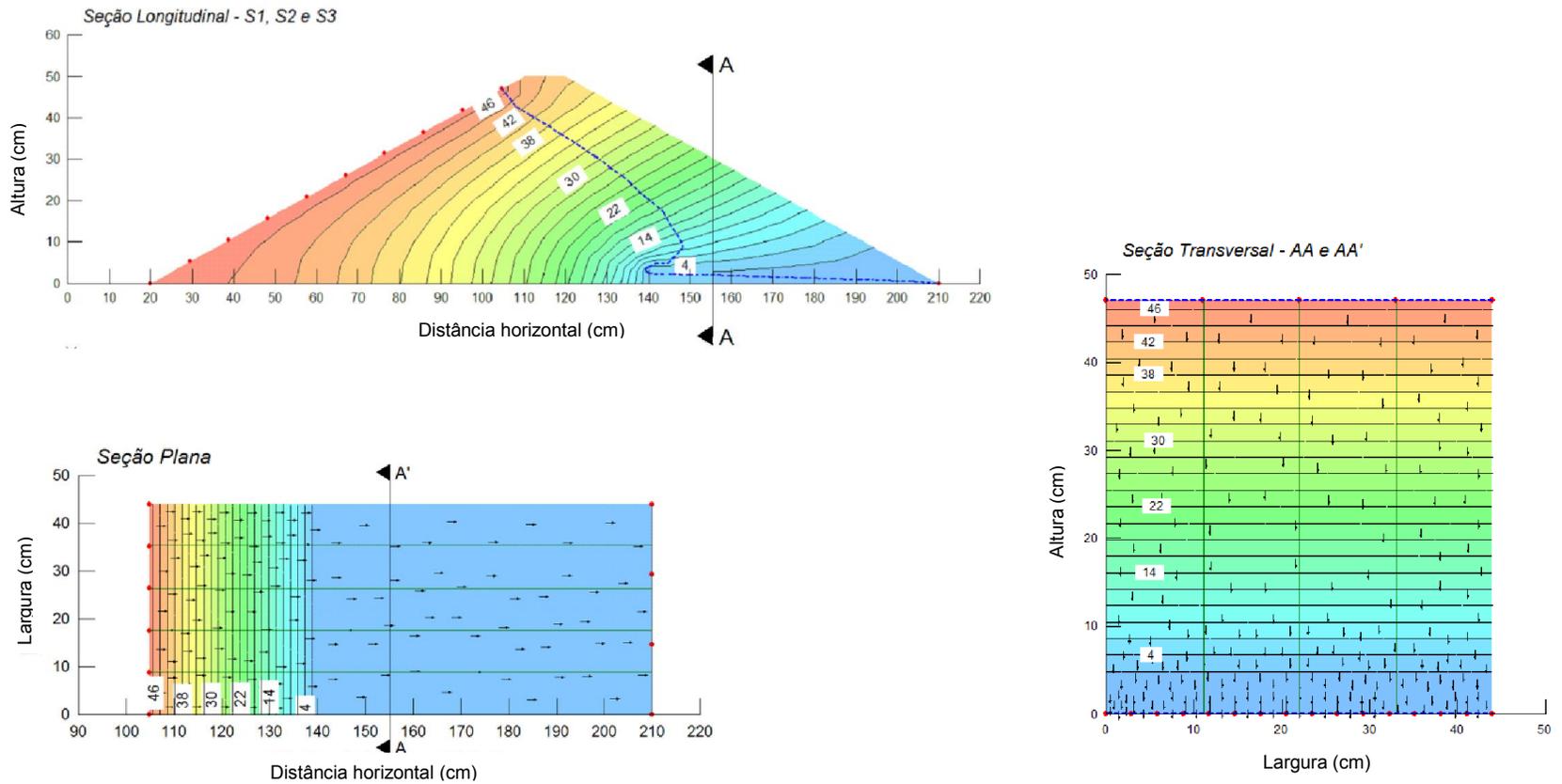


FIGURA B.1 - Seções do modelo 1: barragem com largura de 44 cm dotada de tapete drenante com comprimento de 70 cm

B.2 Modelo 2 – Barragem com 1 dreno francês, simulando espaçamento de 88 cm

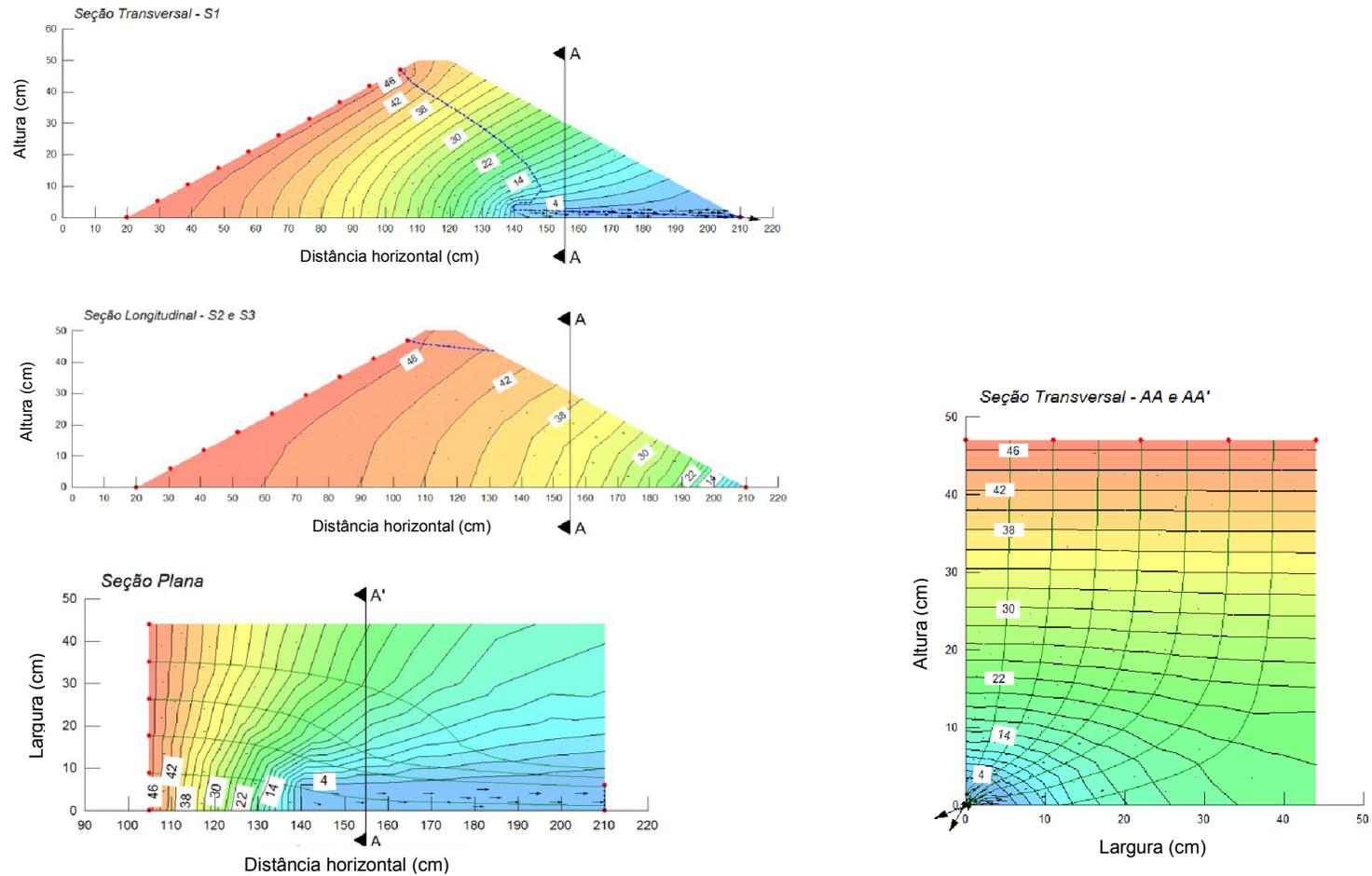


FIGURA B.2 - Seções do modelo 2: barragem com largura de 44 cm dotada de um dreno francês com comprimento de 70 cm

B.3 Modelo 3 – Barragem com 2 drenos franceses, simulando espaçamento de 44 cm

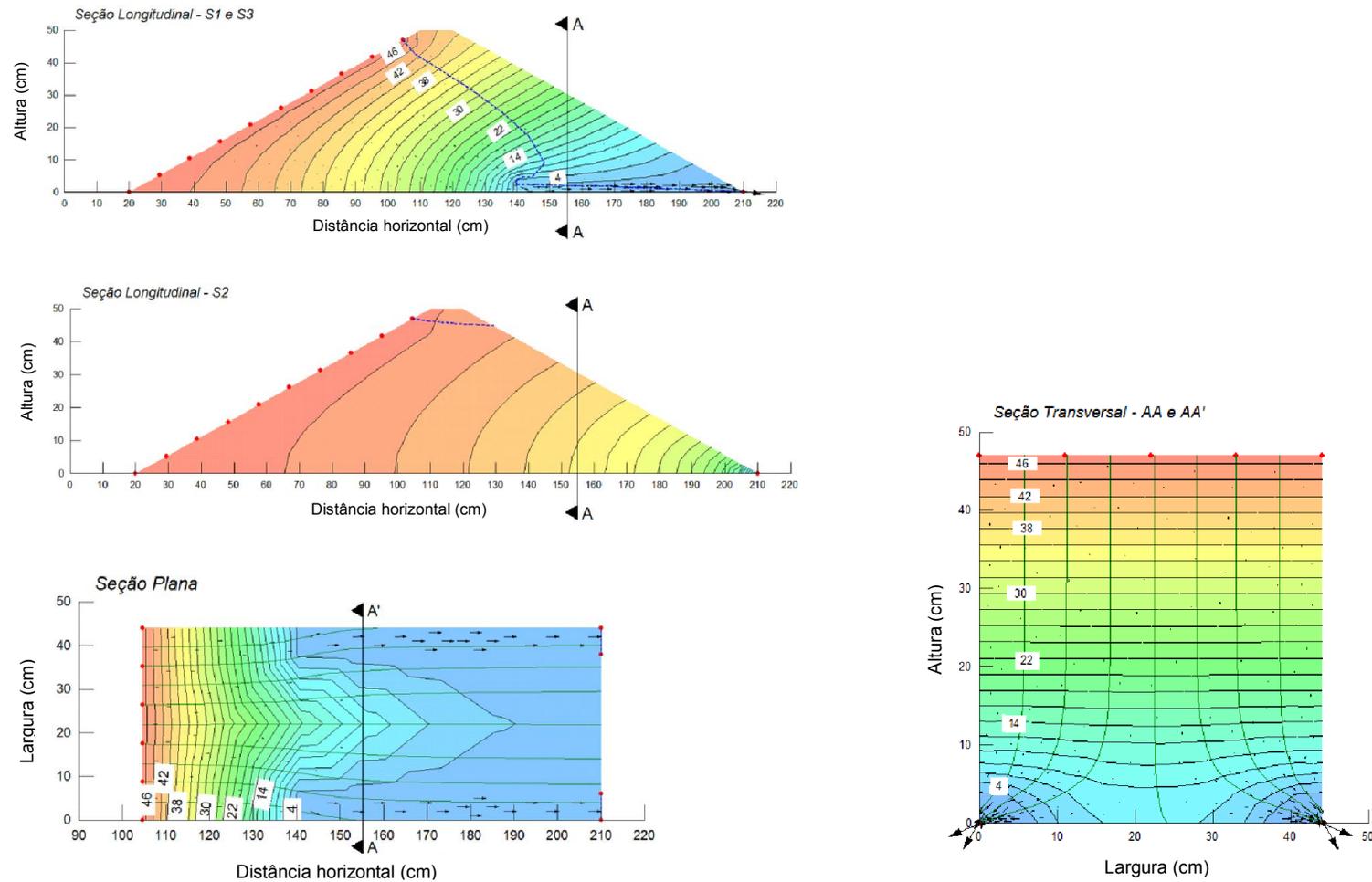


FIGURA B.3 - Seções do modelo 3: barragem com largura de 44 cm dotada de dois drenos franceses com comprimento de 70 cm

B.4 Modelo 4 – Barragem com 3 drenos franceses, simulando espaçamento de 22 cm

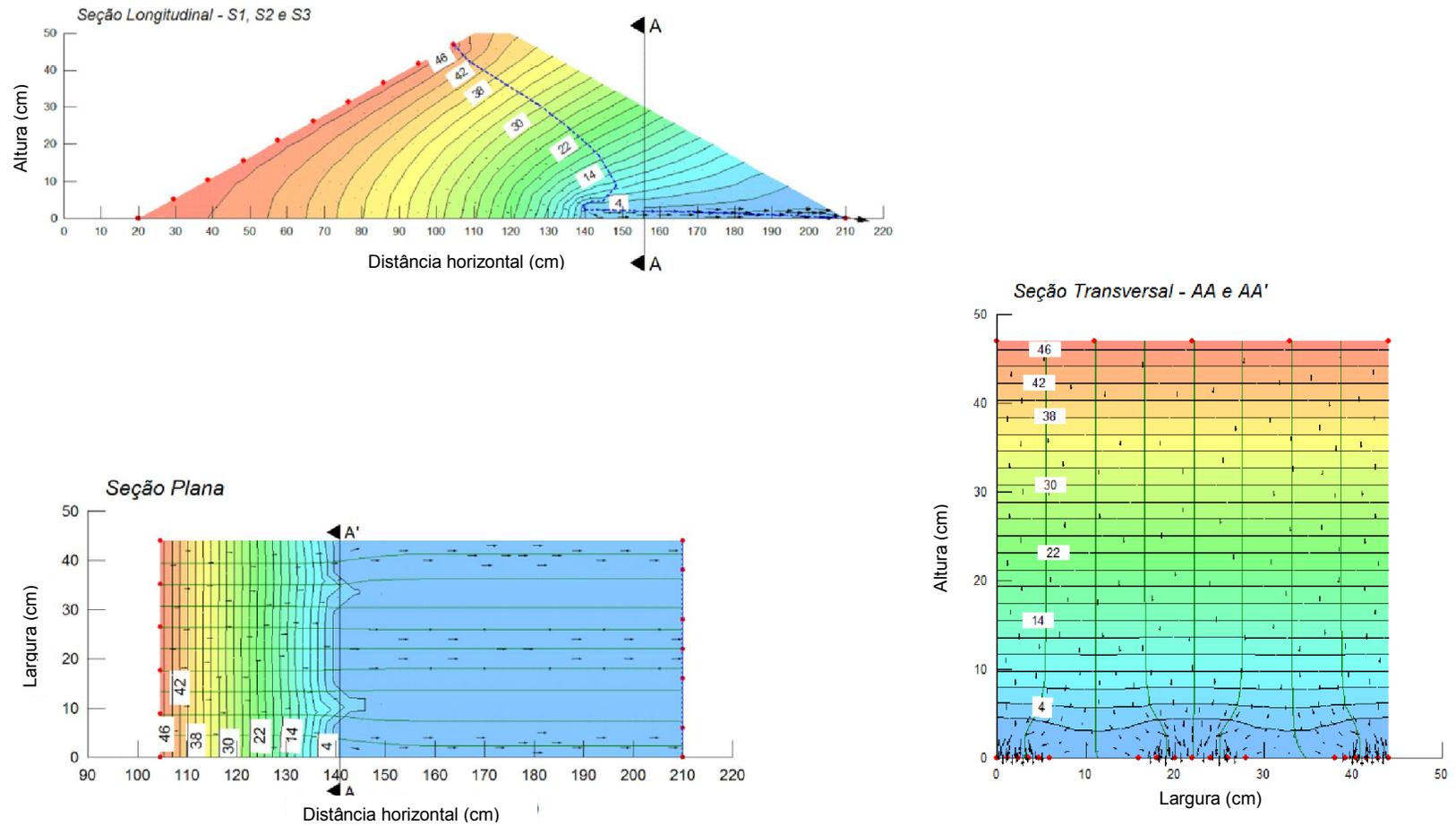


FIGURA B.4 - Seções do modelo 4: barragem com largura de 44 cm dotada de três drenos franceses com comprimento de 70 cm

ANEXO C – Modelo de barragem com largura (L) 44 cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) 95 cm

C.1 Modelo 1 – Barragem com tapete drenante

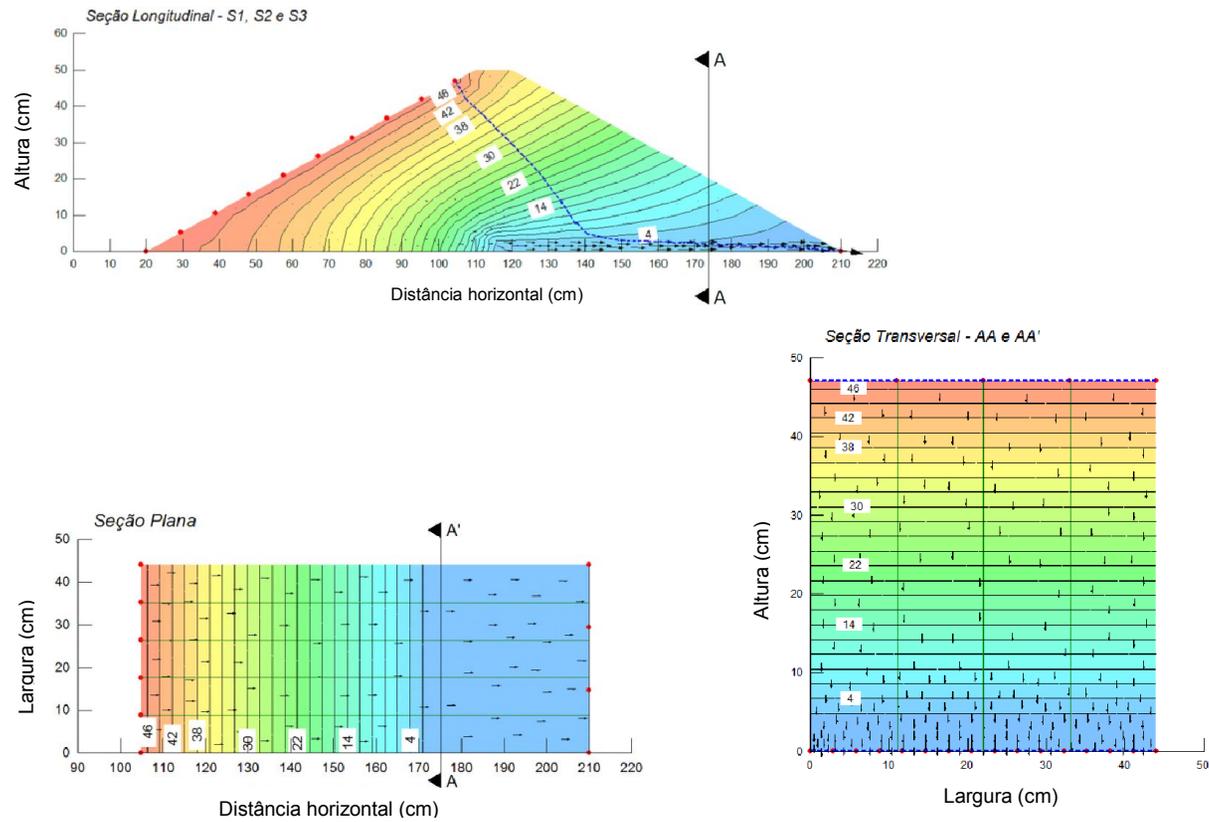


FIGURA C.1 - Seções do modelo 1: barragem com largura de 44 cm dotada de tapete drenante com comprimento de 95 cm

C.2 Modelo 2 – Barragem com 1 dreno francês, simulando espaçamento de 88 cm

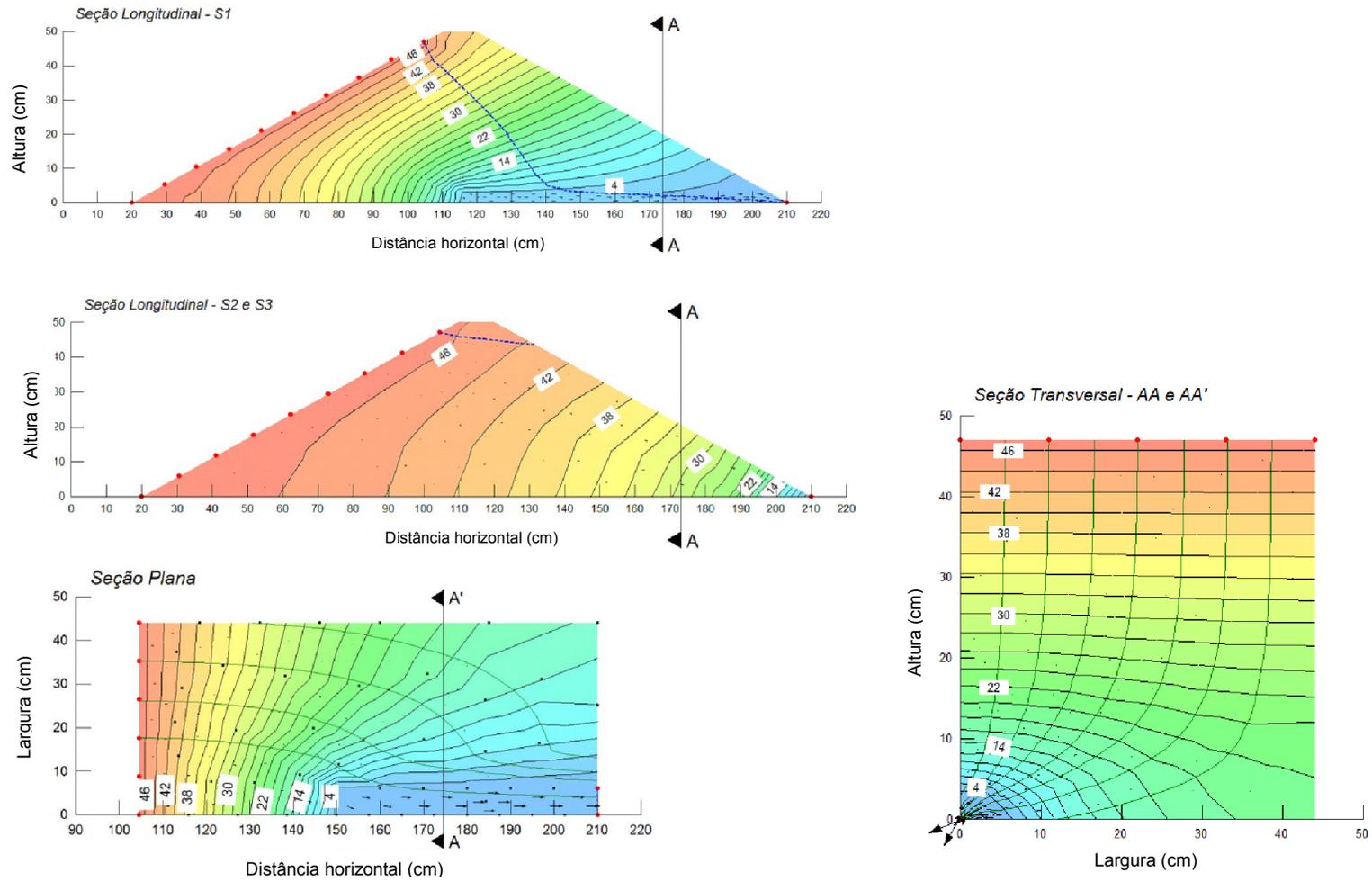


FIGURA C.2 - Seções do modelo 2: barragem com largura de 44 cm dotada de um dreno francês com comprimento de 95 cm

C.3 Modelo 3 – Barragem com 2 drenos franceses, simulando espaçamento de 44 cm

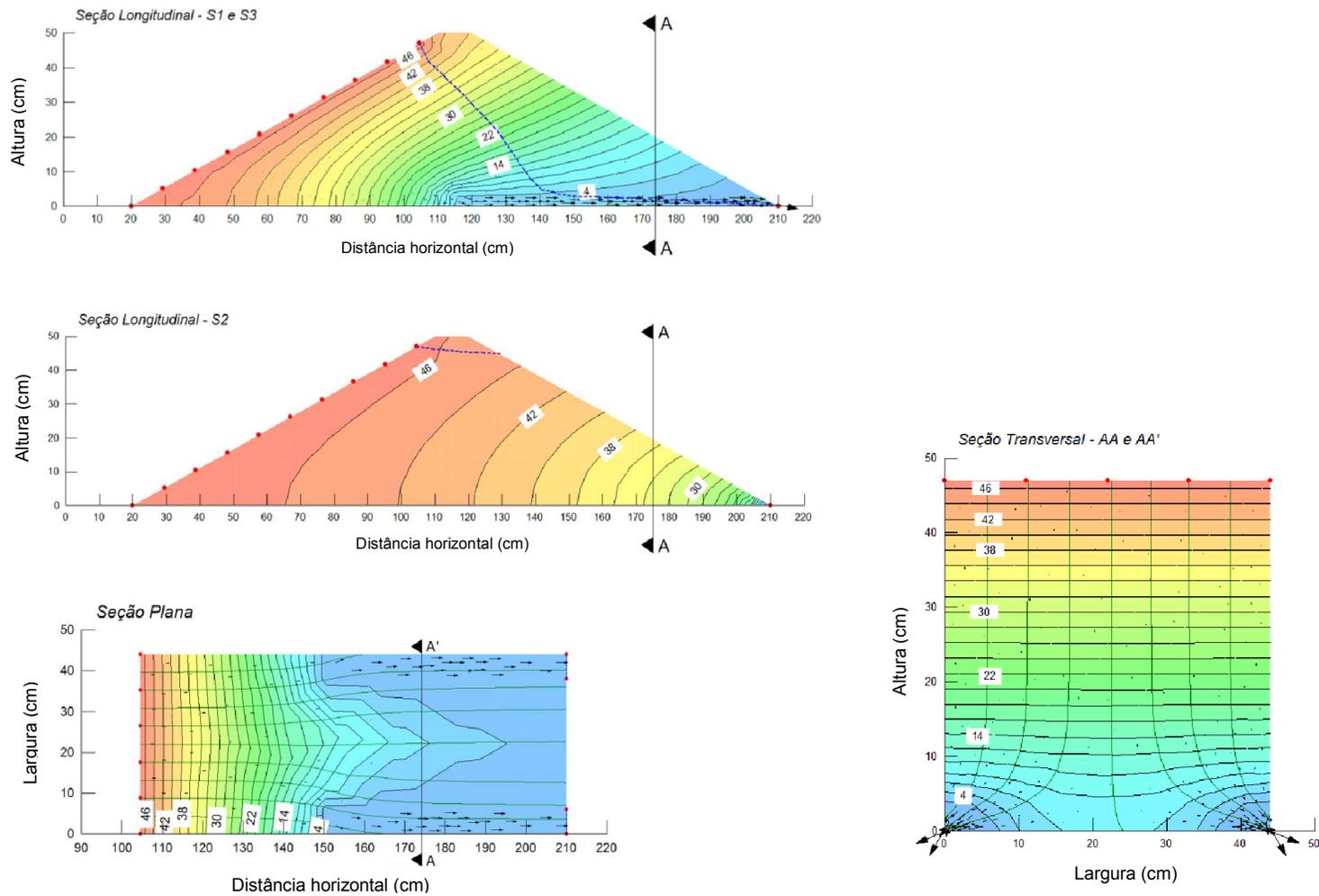


FIGURA C.3 - Seções do modelo 3: barragem com largura de 44 cm dotada de dois drenos franceses com comprimento de 95 cm

C.4 Modelo 4 – Barragem com 3 drenos franceses, simulando espaçamento de 22 cm

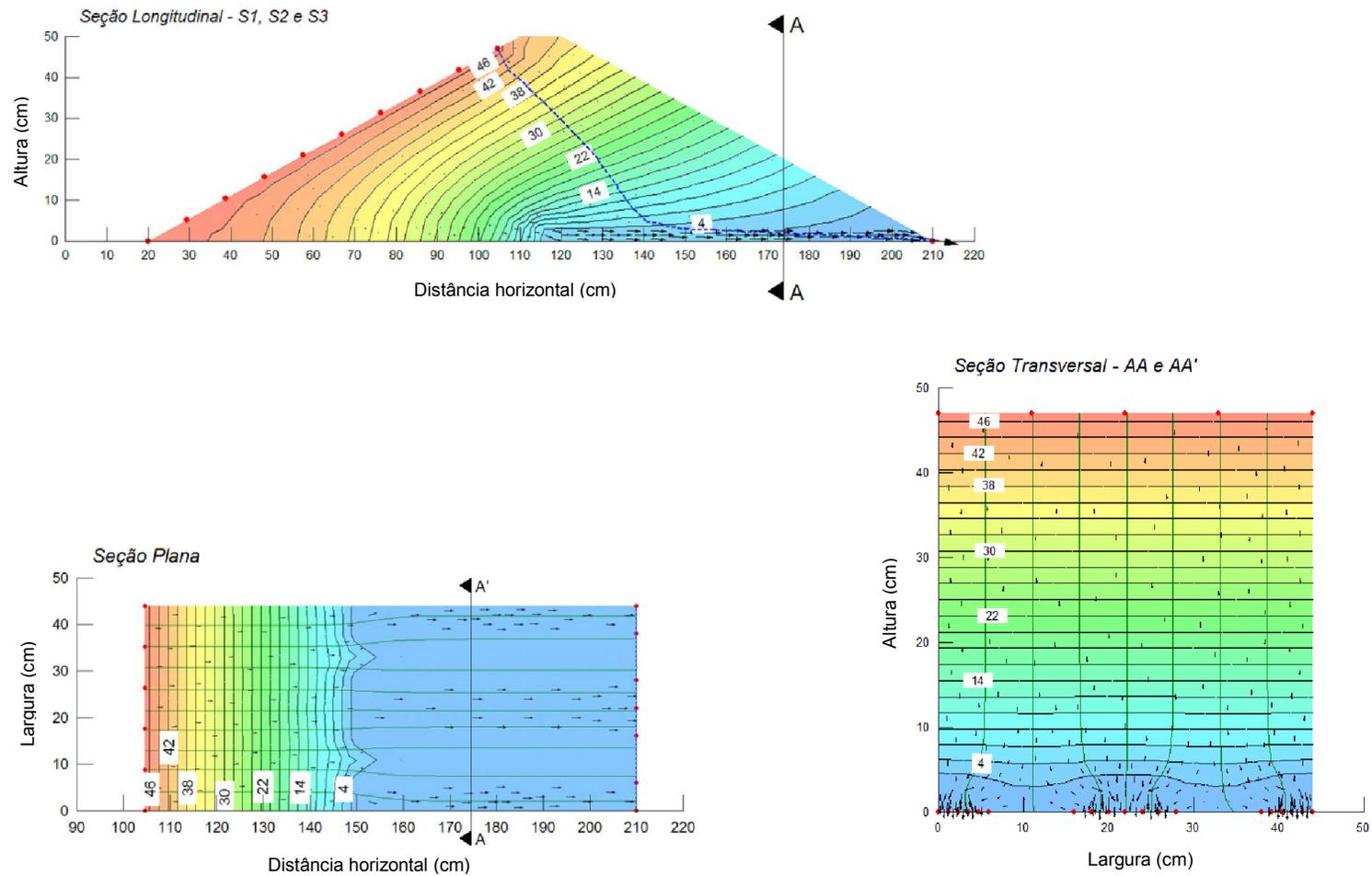


FIGURA C.4 - Seções do modelo 4: barragem com largura de 44 cm dotada de três drenos franceses com comprimento de 95 cm

ANEXO D – Modelo de barragem com largura (L) 72 cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) 50 cm

D.1 Modelo 1 – Barragem com tapete drenante

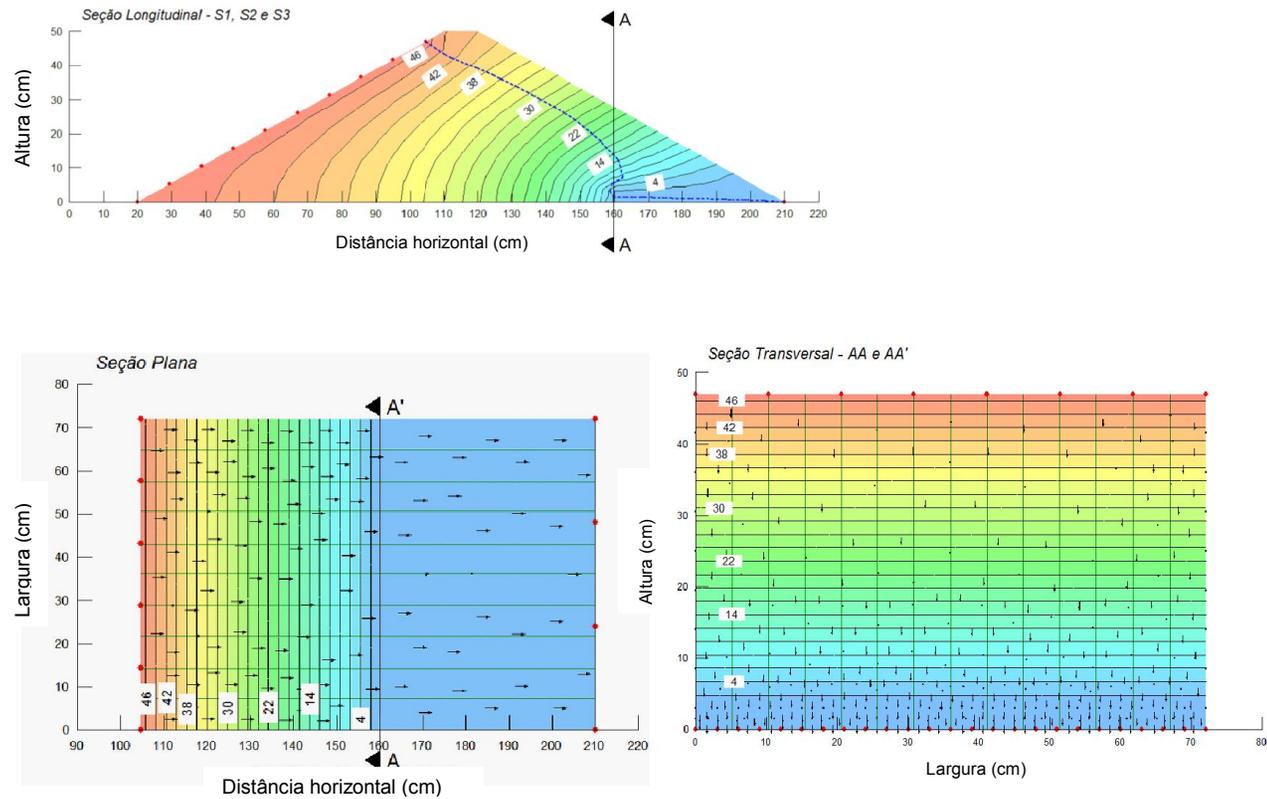


FIGURA D.1 - Seções do modelo 1: barragem com largura de 72 cm dotada de tapete drenante com comprimento de 50 cm

D.2 Modelo 2 – Barragem com 1 dreno francês, simulando espaçamento de 144 cm

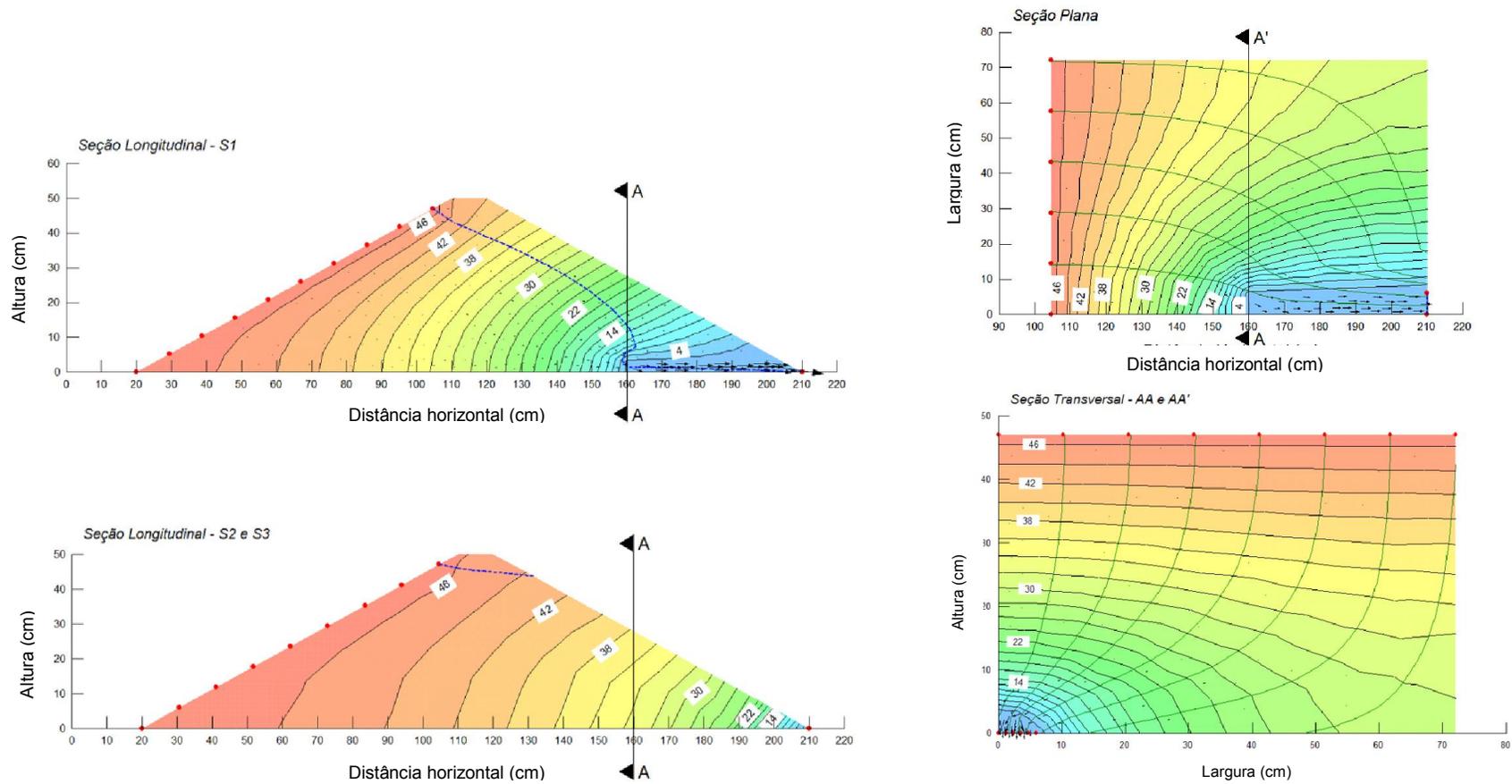


FIGURA D.2 - Seções do modelo 2: barragem com largura de 72 cm dotada de um dreno francês com comprimento de 50 cm

D.3 Modelo 3 – Barragem com 2 drenos franceses, simulando espaçamento de 72 cm

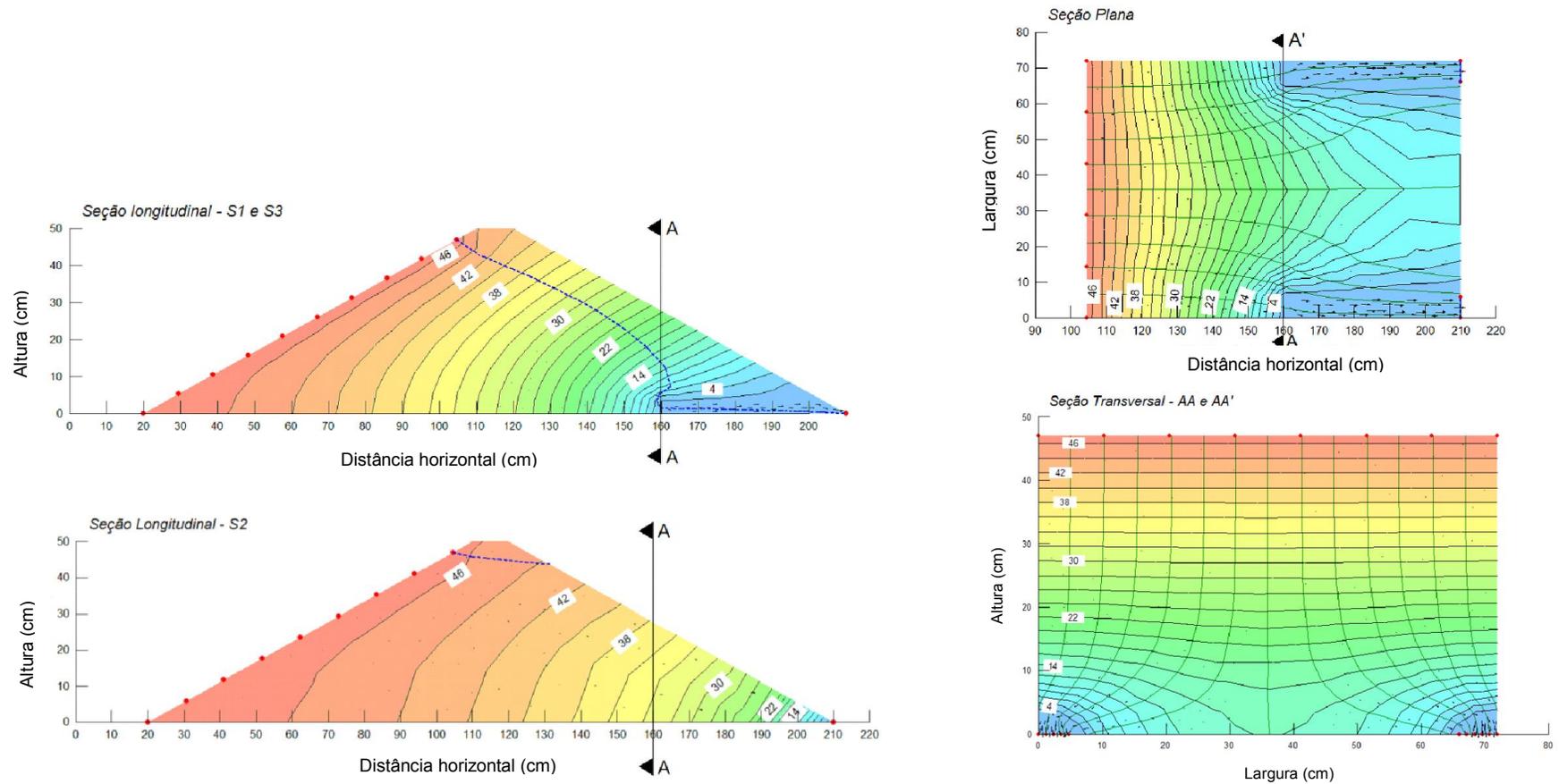


FIGURA D.3 - Seções do modelo 3: barragem com largura de 72 cm dotada de dois drenos franceses com comprimento de 50 cm

D.4 Modelo 4 – Barragem com 3 drenos franceses, simulando espaçamento de 36 cm

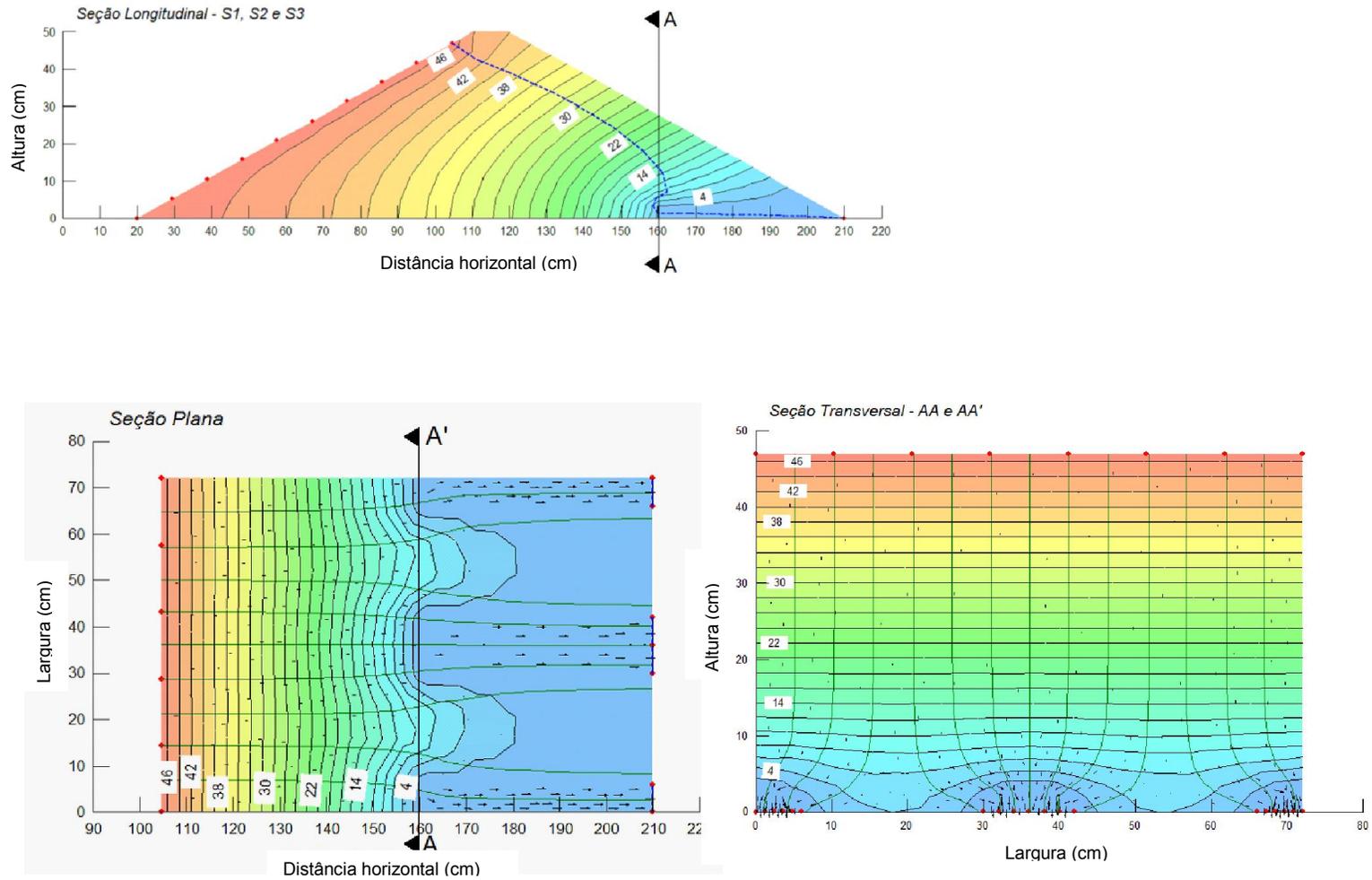


FIGURA D.4 - Seções do modelo 4: barragem com largura de 72 cm dotada de três drenos franceses com comprimento de 50 cm

ANEXO E – Modelo de barragem com largura (L) 72 cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) 70 cm

E.1 Modelo 1 – Barragem com tapete drenante

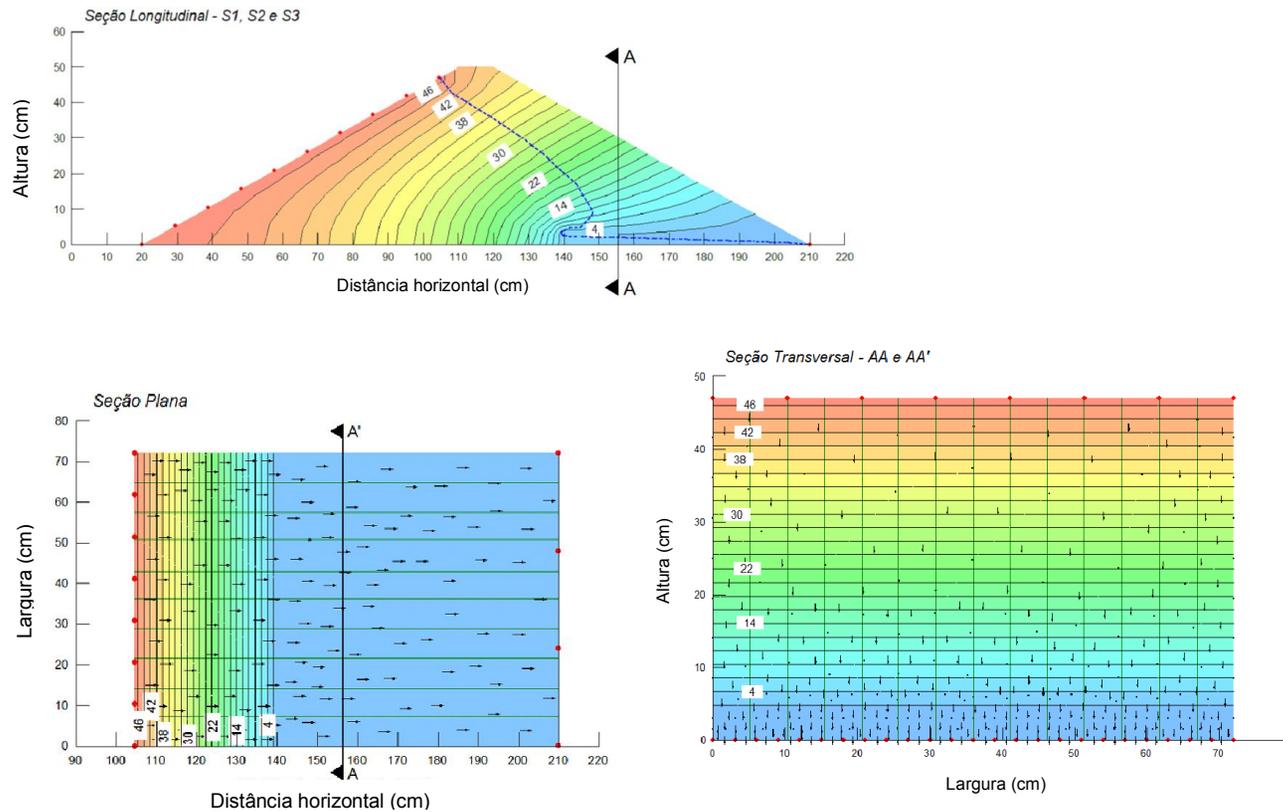


FIGURA E.1 - Seções do modelo 1: barragem com largura de 72 cm dotada de tapete drenante com comprimento de 70 cm

E.2 Modelo 2 – Barragem com 1 dreno francês, simulando espaçamento de 144 cm

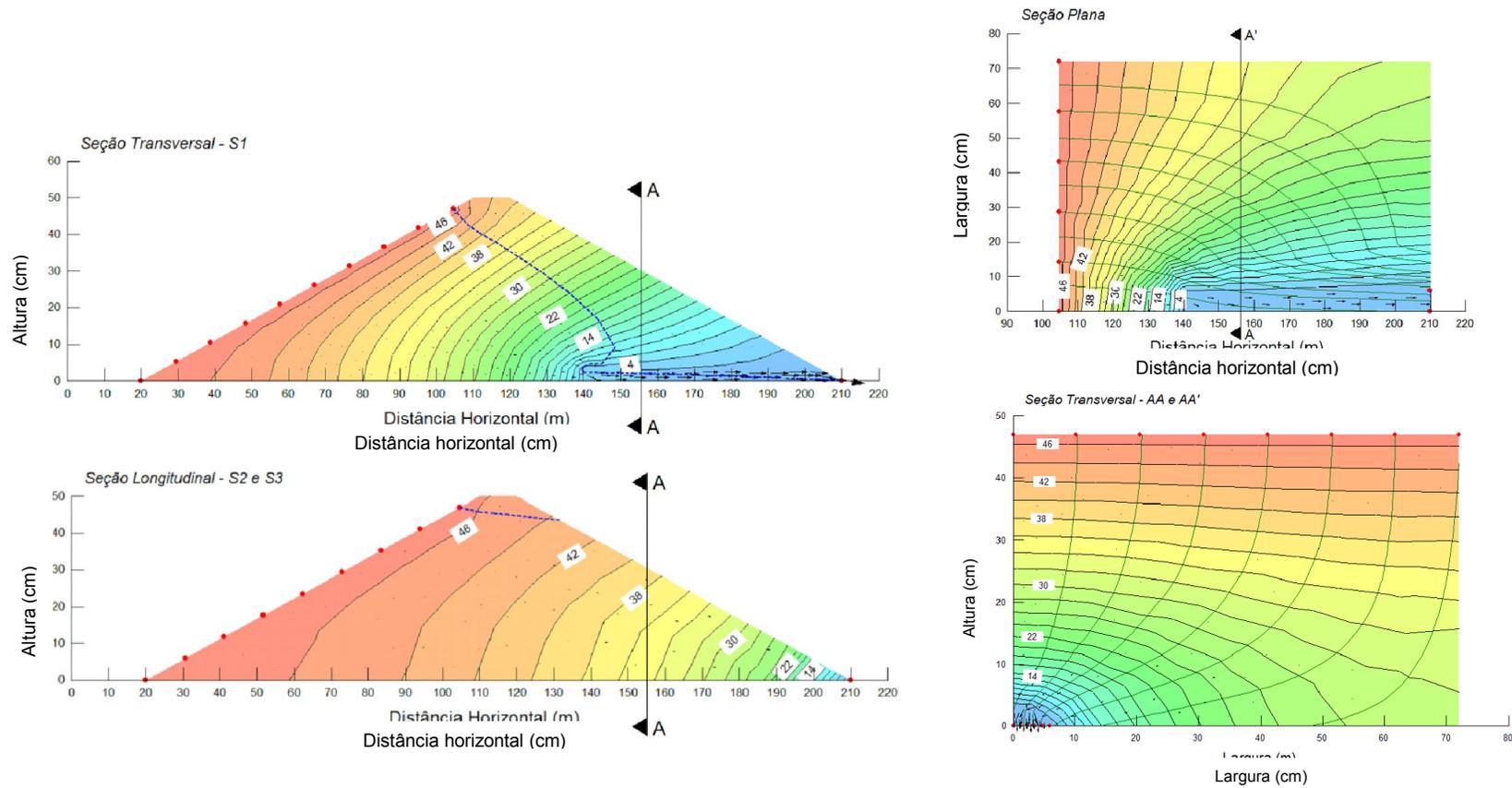


FIGURA E.2 - Seções do modelo 2: barragem com largura de 72 cm dotada de um dreno francês com comprimento de 70 cm

E.3 Modelo 3 – Barragem com 2 drenos franceses, simulando espaçamento de 72 cm

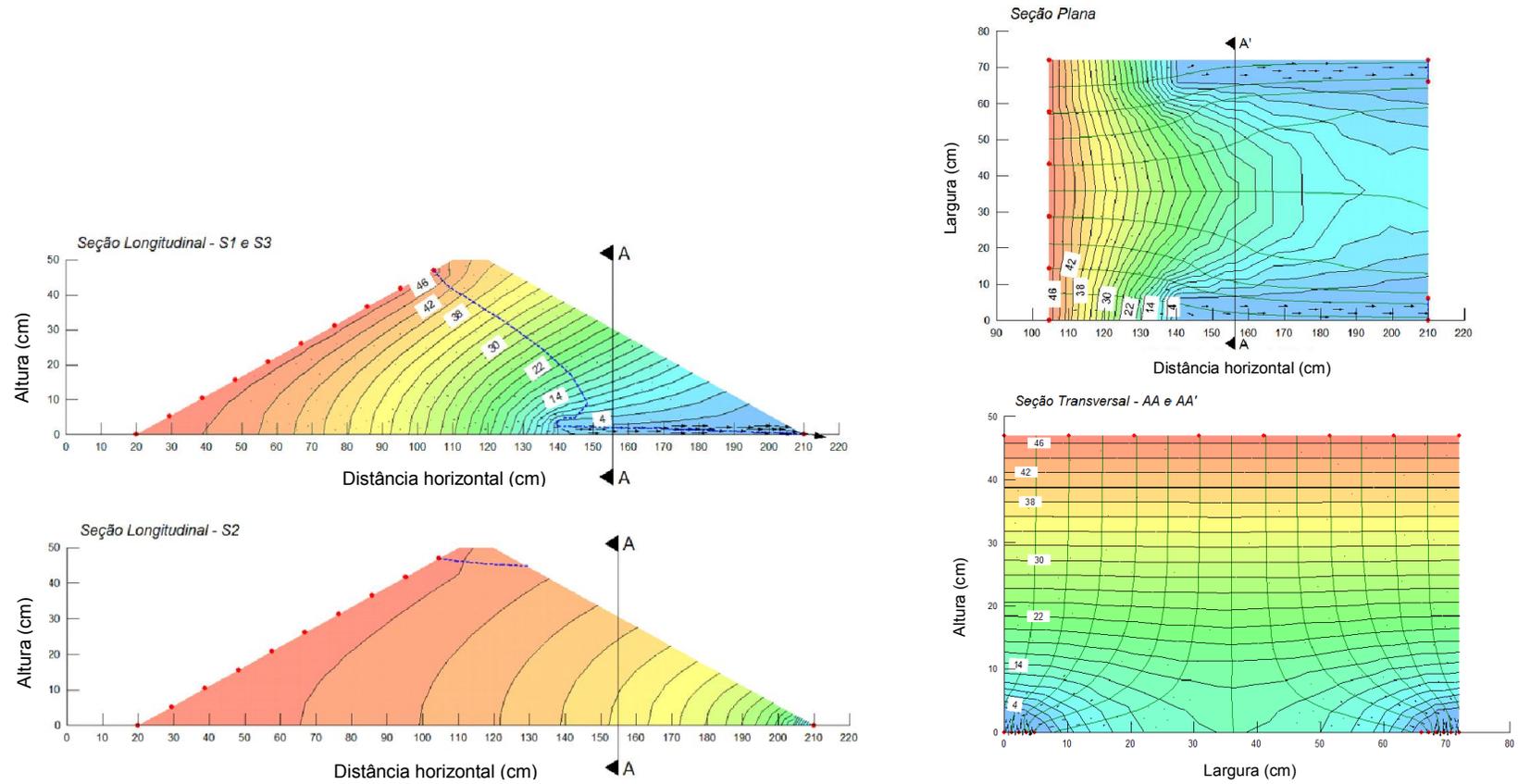


FIGURA E.3 - Seções do modelo 3: barragem com largura de 72 cm dotada de dois drenos franceses com comprimento de 70 cm

E.4 Modelo 4 – Barragem com 3 drenos franceses, simulando espaçamento de 36 cm

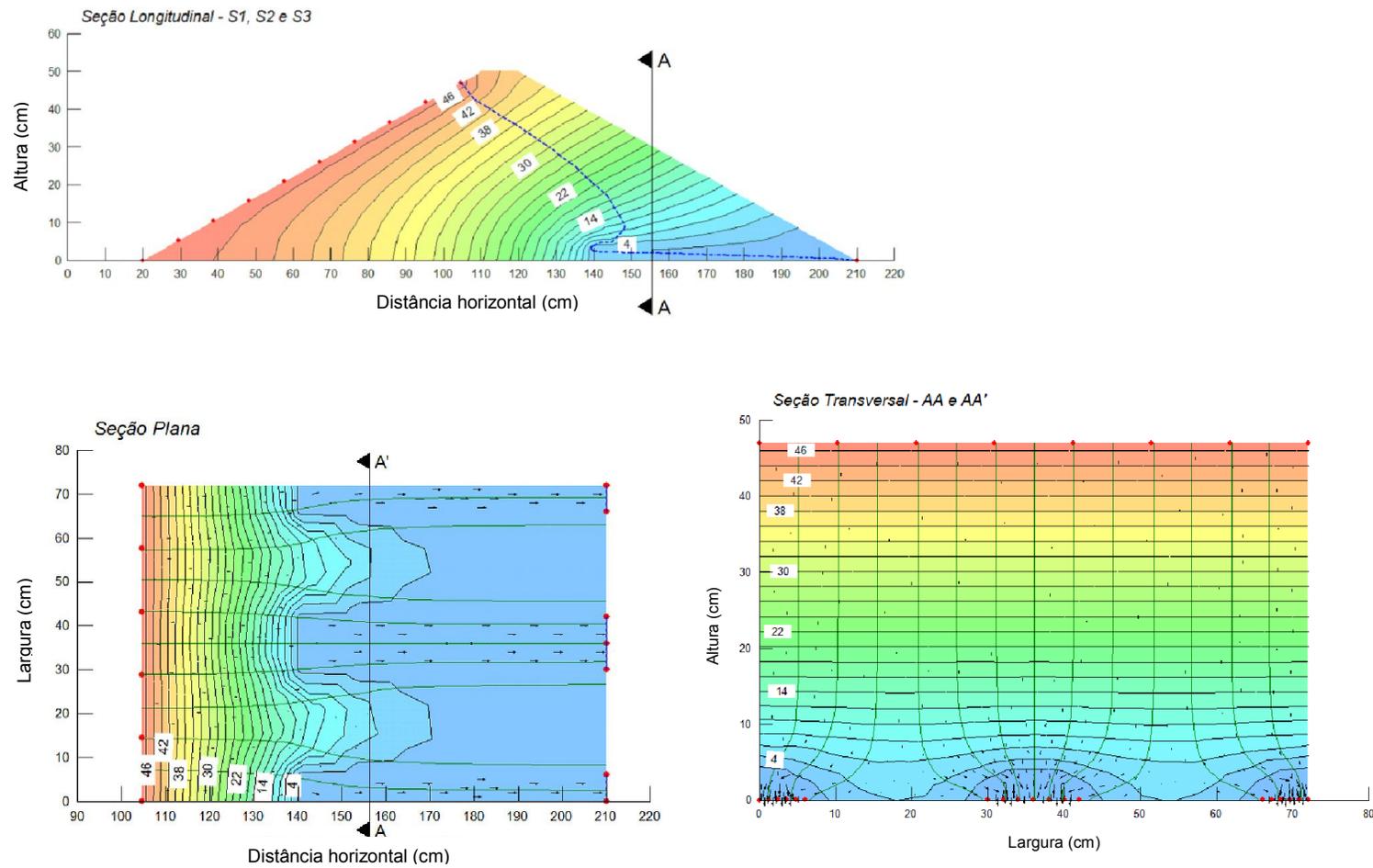


FIGURA E.4 - Seções do modelo 4: barragem com largura de 72 cm dotada de três drenos franceses com comprimento de 70 cm

ANEXO F – Modelo de barragem com largura (L) 72 cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) 95 cm

F.1 Modelo 1 – Barragem com tapete drenante

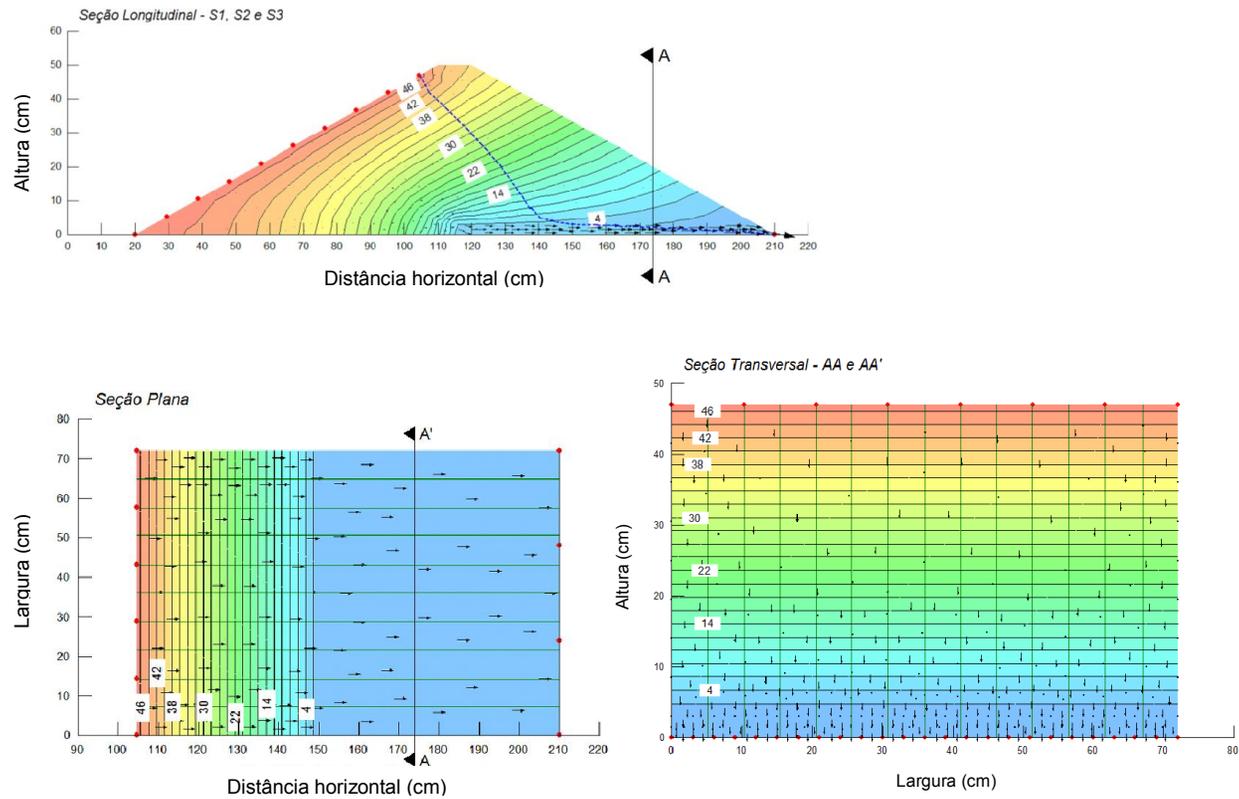


FIGURA F.1 - Seções do modelo 1: barragem com largura de 72 cm dotada de tapete drenante com comprimento de 95 cm

F.2 Modelo 2 – Barragem com 1 dreno francês, simulando espaçamento de 144 cm

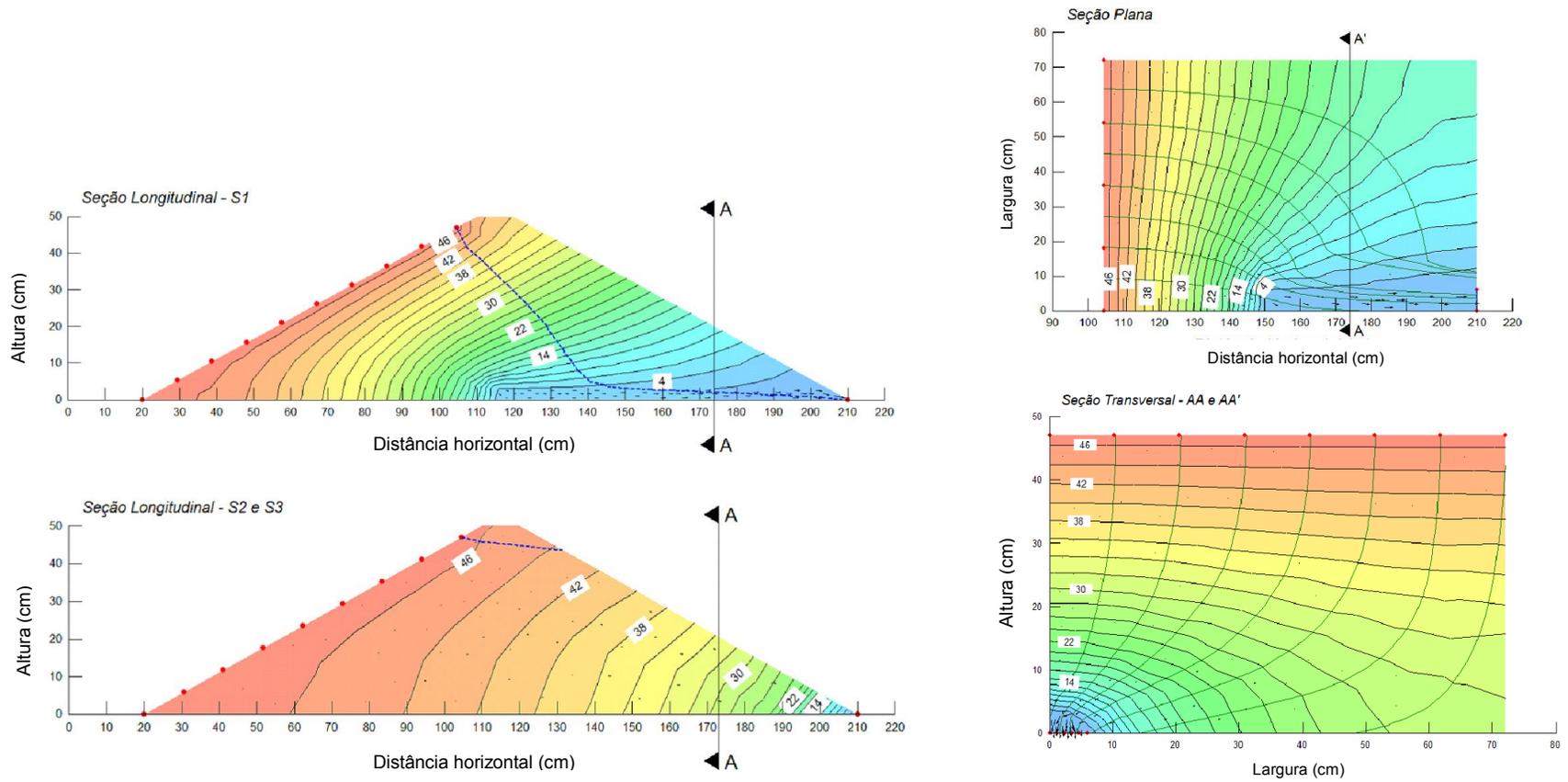


FIGURA F.2 - Seções do modelo 2: barragem com largura de 72 cm dotada de um dreno francês com comprimento de 95 cm

F.3 Modelo 3 – Barragem com 2 drenos franceses, simulando espaçamento de 72 cm

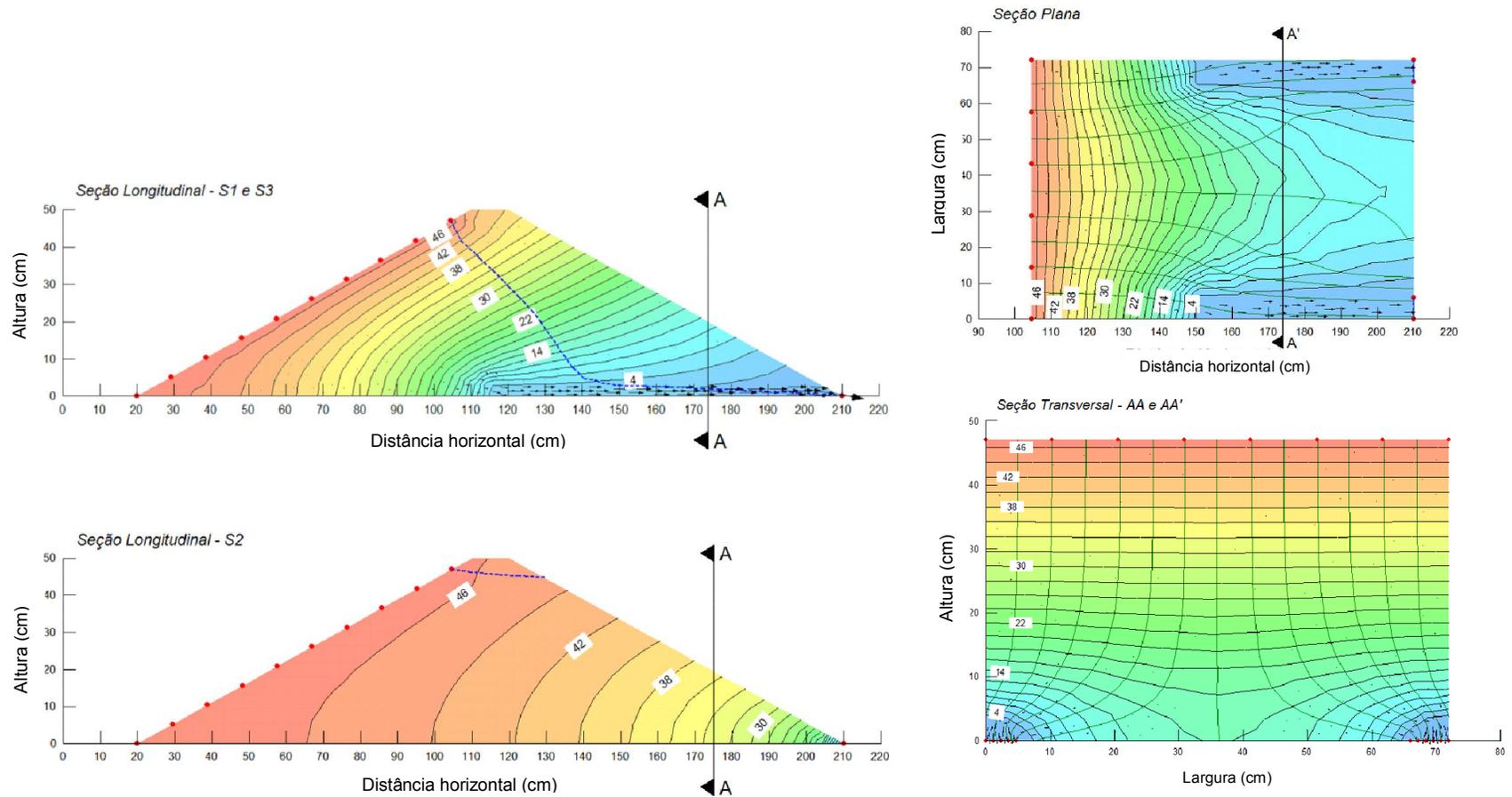


FIGURA F.3 - Seções do modelo 3: barragem com largura de 72 cm dotada de dois drenos franceses com comprimento de 95 cm

F.4 Modelo 4 – Barragem com 3 drenos franceses, simulando espaçamento de 36 cm

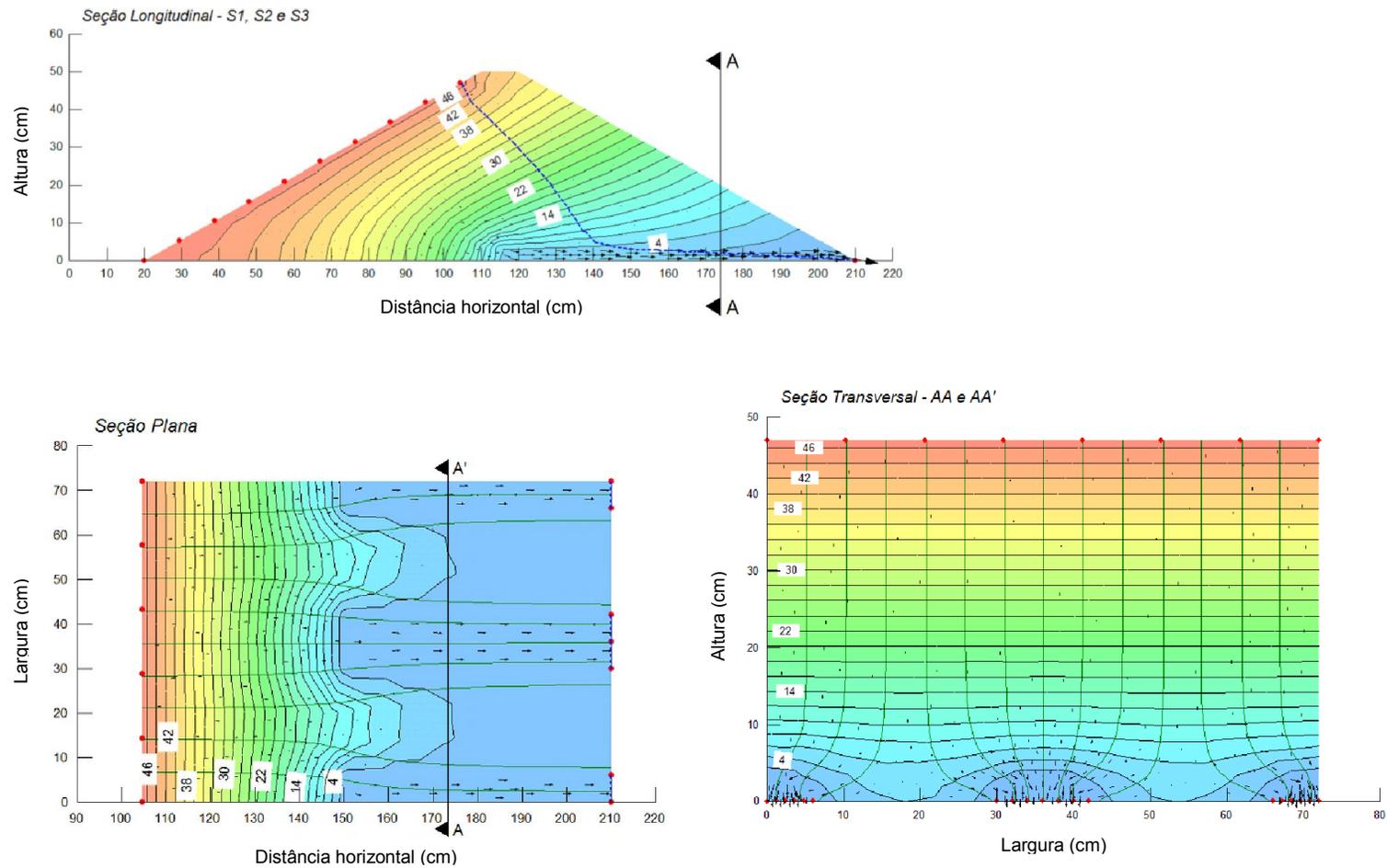


FIGURA F.4 - Seções do modelo 4: barragem com largura de 72 cm dotada de três drenos franceses com comprimento de 95 cm

ANEXO G – Modelo de barragem com largura (L) 100 cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) 50 cm

G.1 Modelo 1 – Barragem com tapete drenante

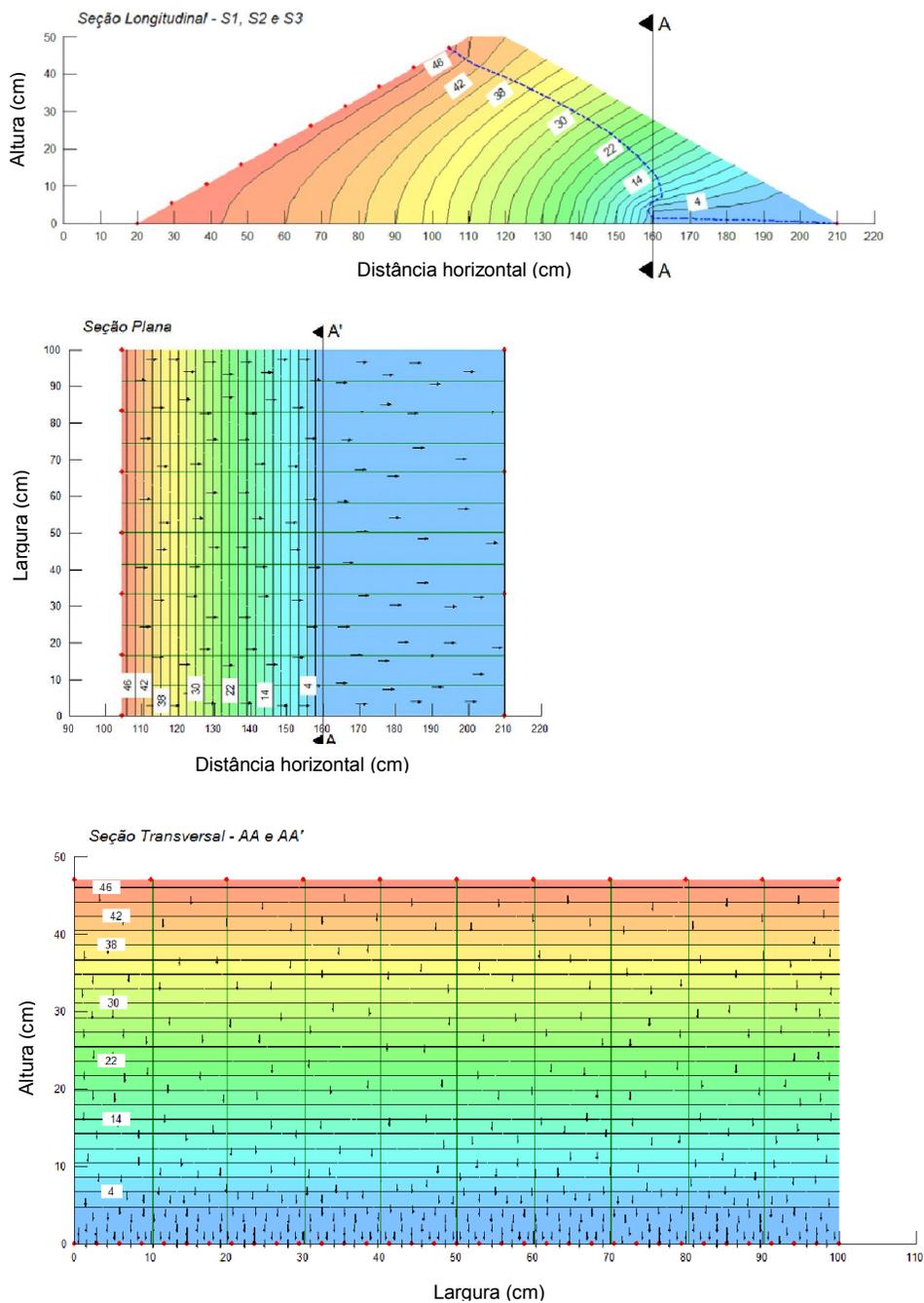


FIGURA G.1 - Seções do modelo 1: barragem com largura de 100 cm dotada de tapete drenante com comprimento de 50 cm

G.2 Modelo 2 – Barragem com 1 dreno francês, simulando espaçamento de 200 cm

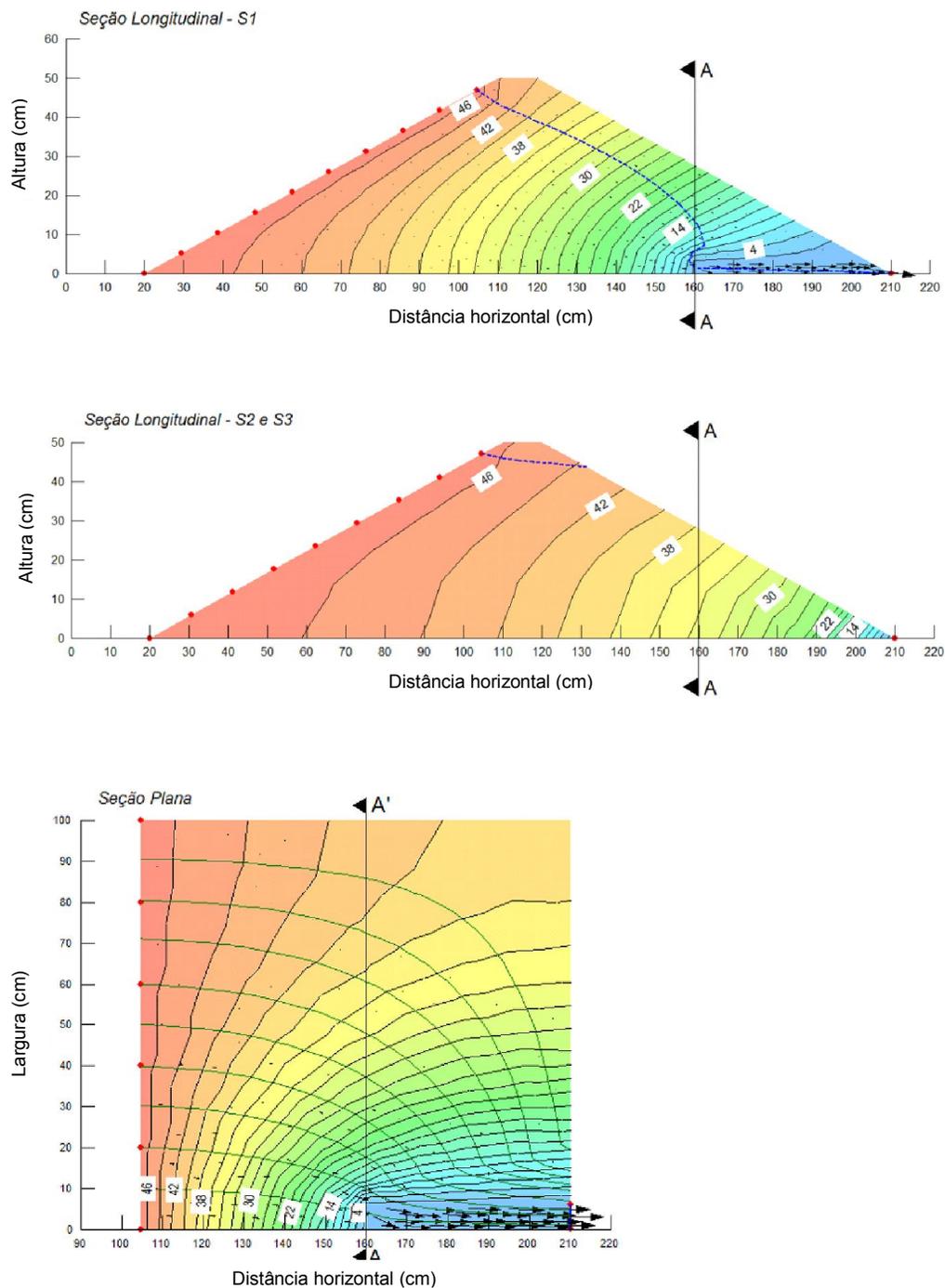


FIGURA G.2 – Seções longitudinal e plana do modelo 2: barragem com largura de 100 cm dotada de um dreno francês com comprimento de 50 cm

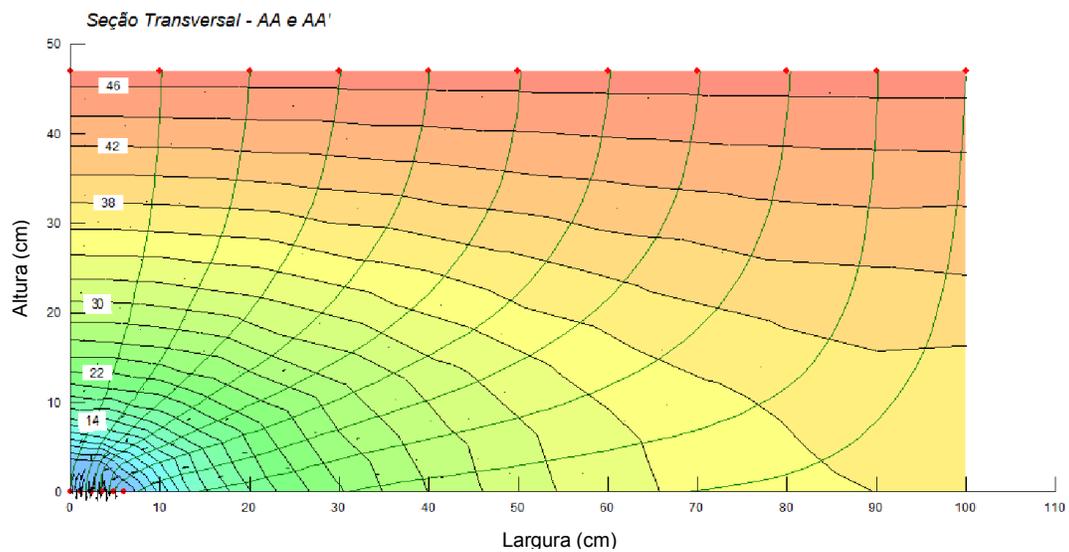


FIGURA G.2.1 – Seção transversal do modelo 2: barragem com largura de 100 cm dotada de um dreno francês com comprimento de 50 cm

G.3 Modelo 2 – Barragem com 2 drenos franceses, simulando espaçamento de 100 cm

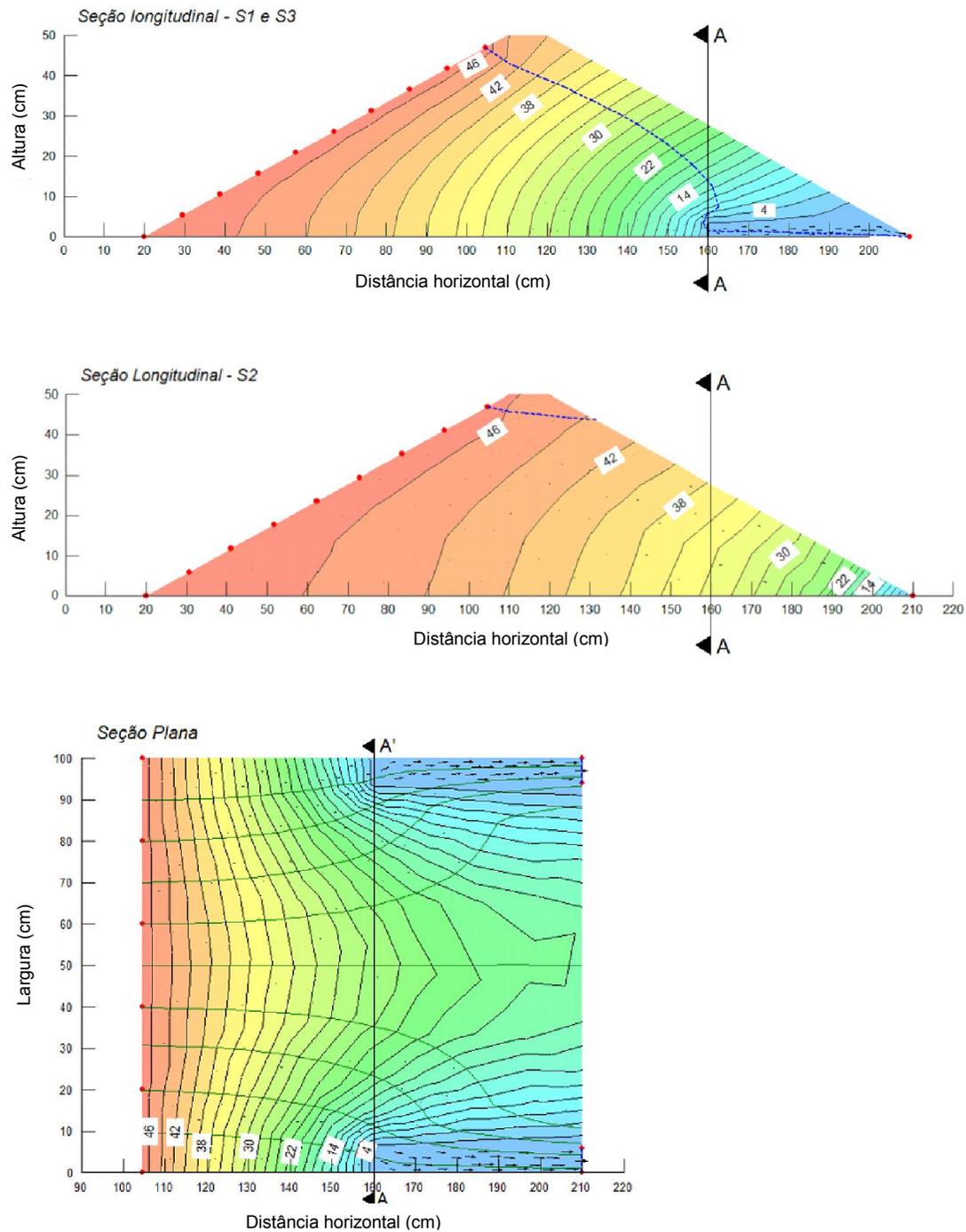


FIGURA G.3 – Seções longitudinal e plana do modelo 3: barragem com largura de 100 cm dotada de dois drenos franceses com comprimento de 50 cm

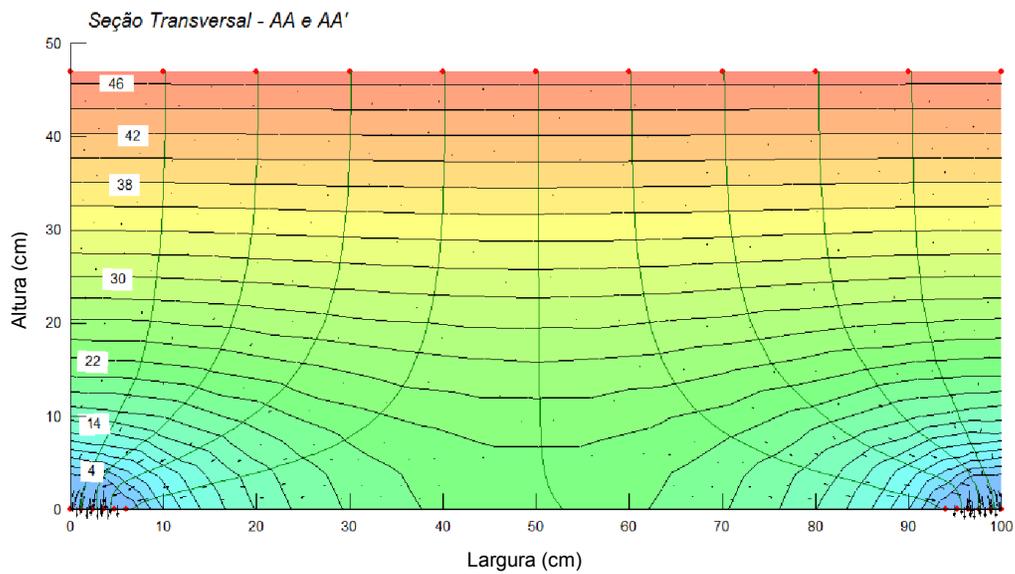


FIGURA G.3.1 – Seção transversal do modelo 3: baragem com largura de 100 cm dotada de dois drenos franceses com comprimento de 50 cm

G.4 Modelo 4 – Barragem com 3 drenos franceses, simulando espaçamento de 50 cm

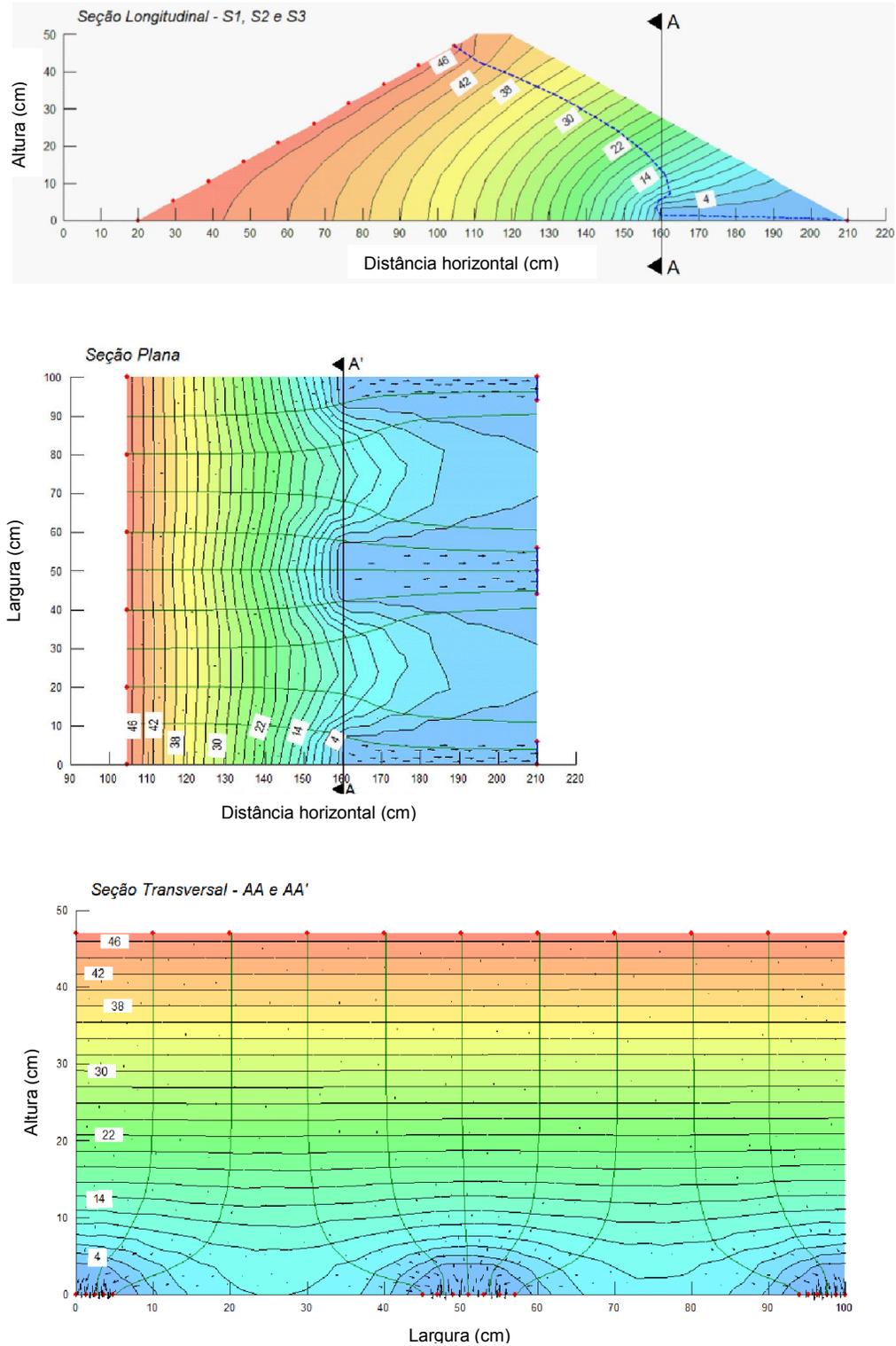


FIGURA G.4 – Seções do modelo 4: barragem com largura de 100 cm dotada de três drenos franceses com comprimento de 50 cm

ANEXO H – Modelo de barragem com largura (L) 100 cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) 70 cm

H.1 Modelo 1 – Barragem com tapete drenante

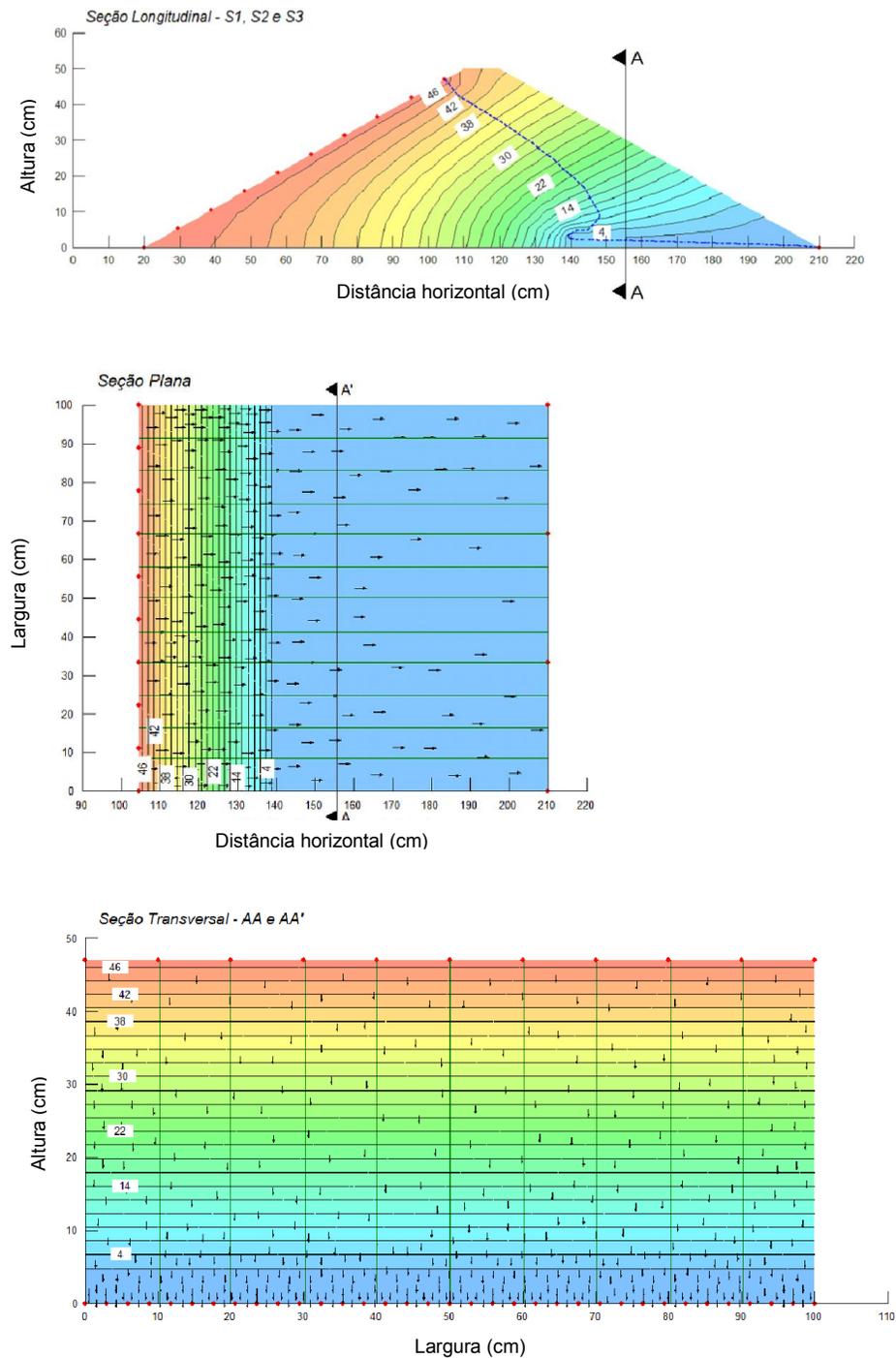


FIGURA H.1 - Seções do modelo 1: barragem com largura de 100 cm dotada de tapete drenante com comprimento de 70 cm

H.2 Modelo 2 – Barragem com 1 dreno francês, simulando espaçamento de 200 cm

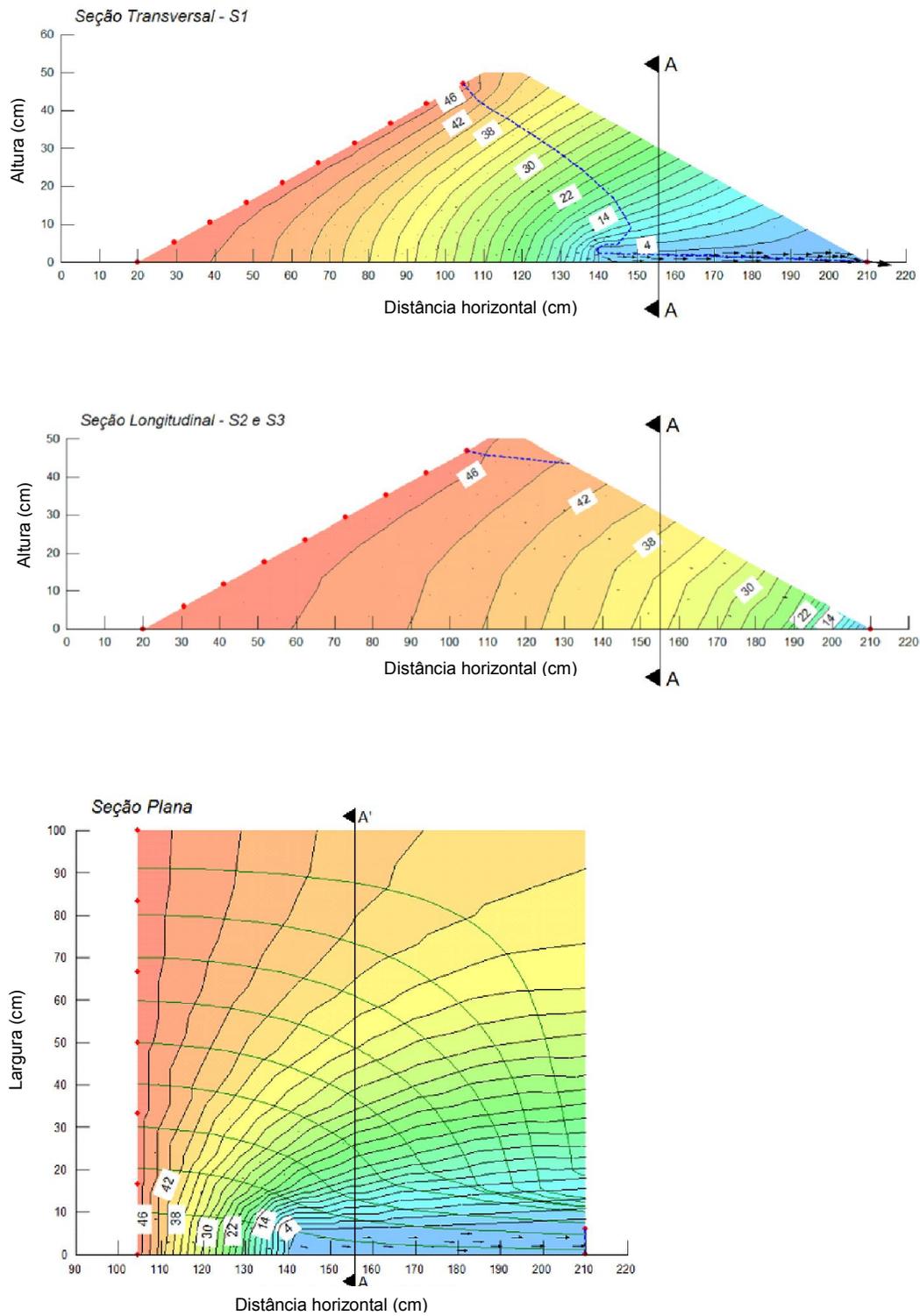


FIGURA H.2 - Seções longitudinal e plana do modelo 2: barragem com largura de 100 cm dotada de um dreno francês com comprimento de 70 cm

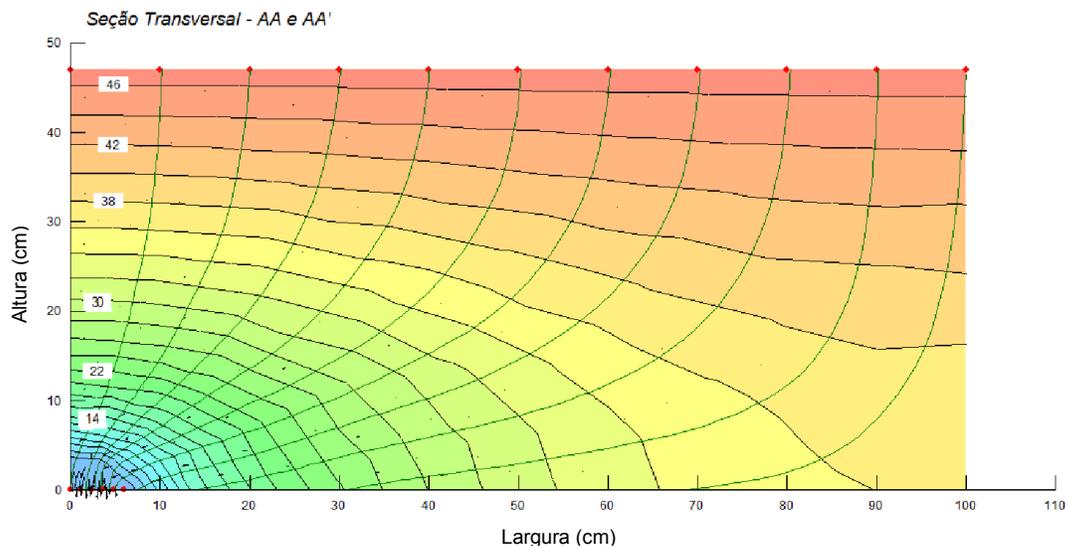


FIGURA H.2.1 - Seção transversal do modelo 2: barragem com largura de 100 cm dotada de um dreno francês com comprimento de 70 cm

H.3 Modelo 3 – Barragem com 2 drenos franceses, simulando espaçamento de 100 cm

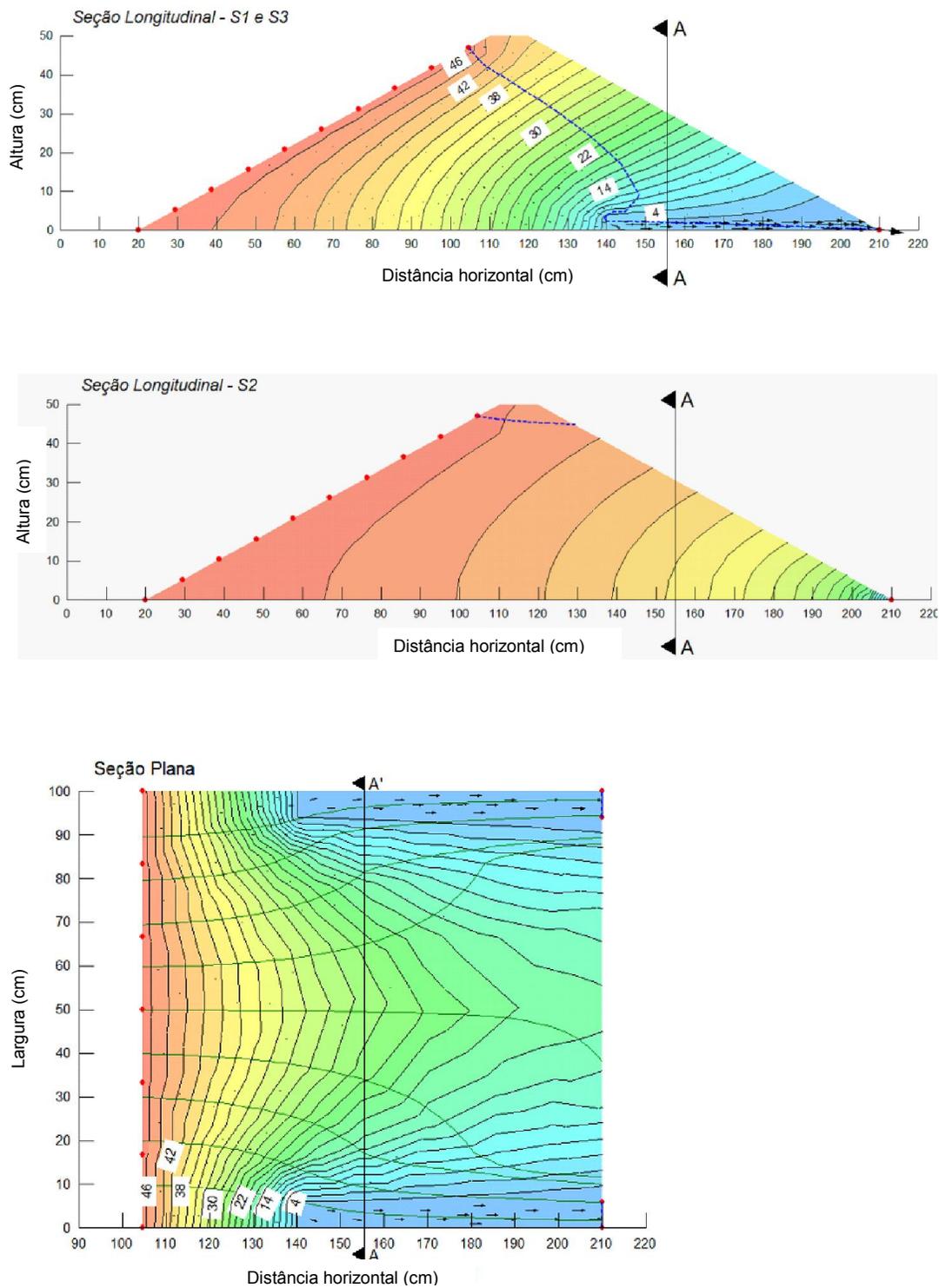


FIGURA H.3 – Seções longitudinal e plana do modelo 3: barragem com largura de 100 cm dotada de dois drenos franceses com comprimento de 70 cm

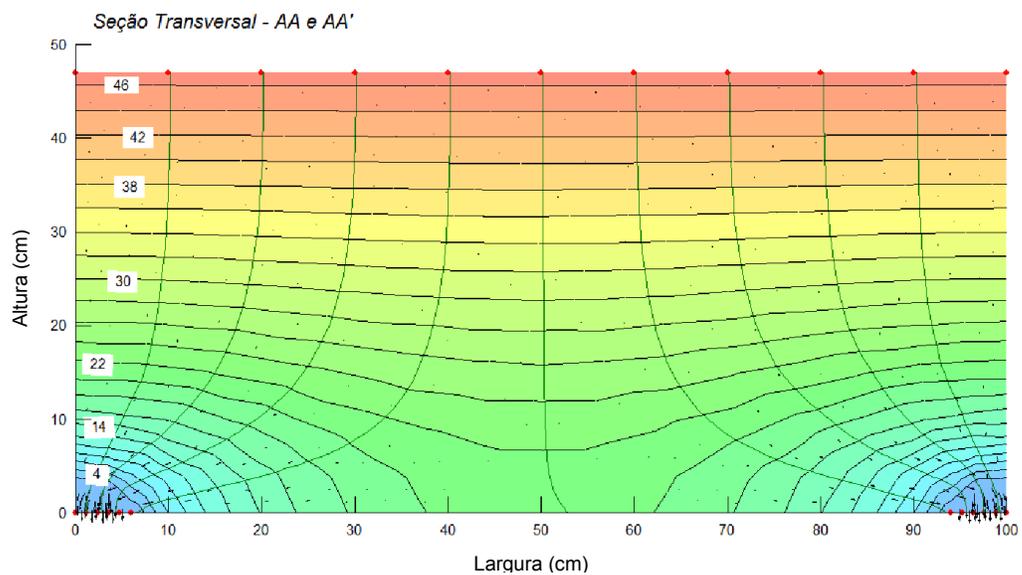


FIGURA H.3.1 – Seção transversal do modelo 3: barragem com largura de 100 cm dotada de dois drenos franceses com comprimento de 70 cm

H.4 Modelo 4 – Barragem com 3 drenos franceses, simulando espaçamento de 50 cm

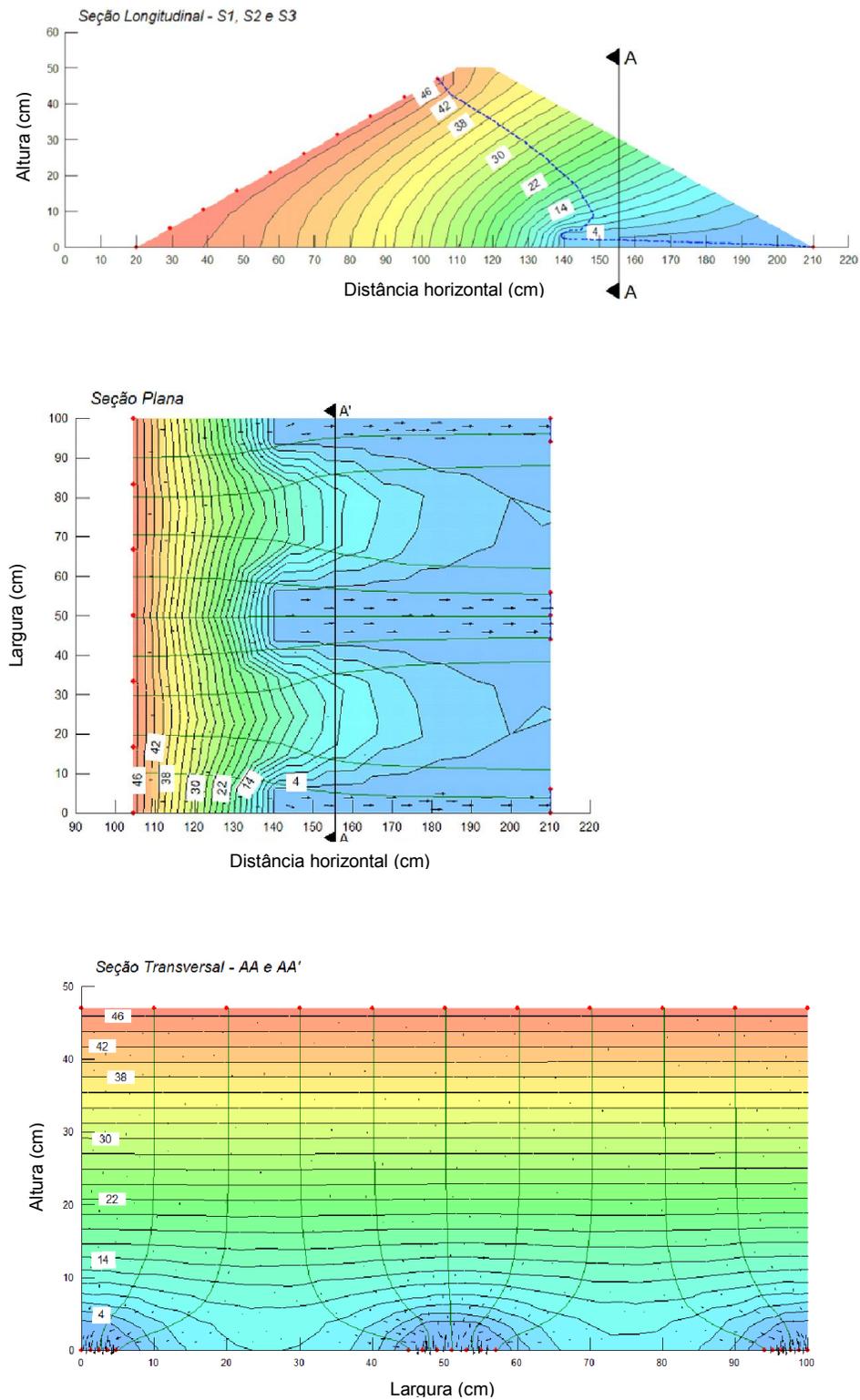


FIGURA H.4 - Seções do modelo 4: barragem com largura de 100 cm dotada de três drenos franceses com comprimento de 70 cm

ANEXO I – Modelo de barragem com largura (L) 100 cm e dispositivos de drenagem com comprimento (C) 95 cm

I.1 Modelo 1 – Barragem com tapete drenante

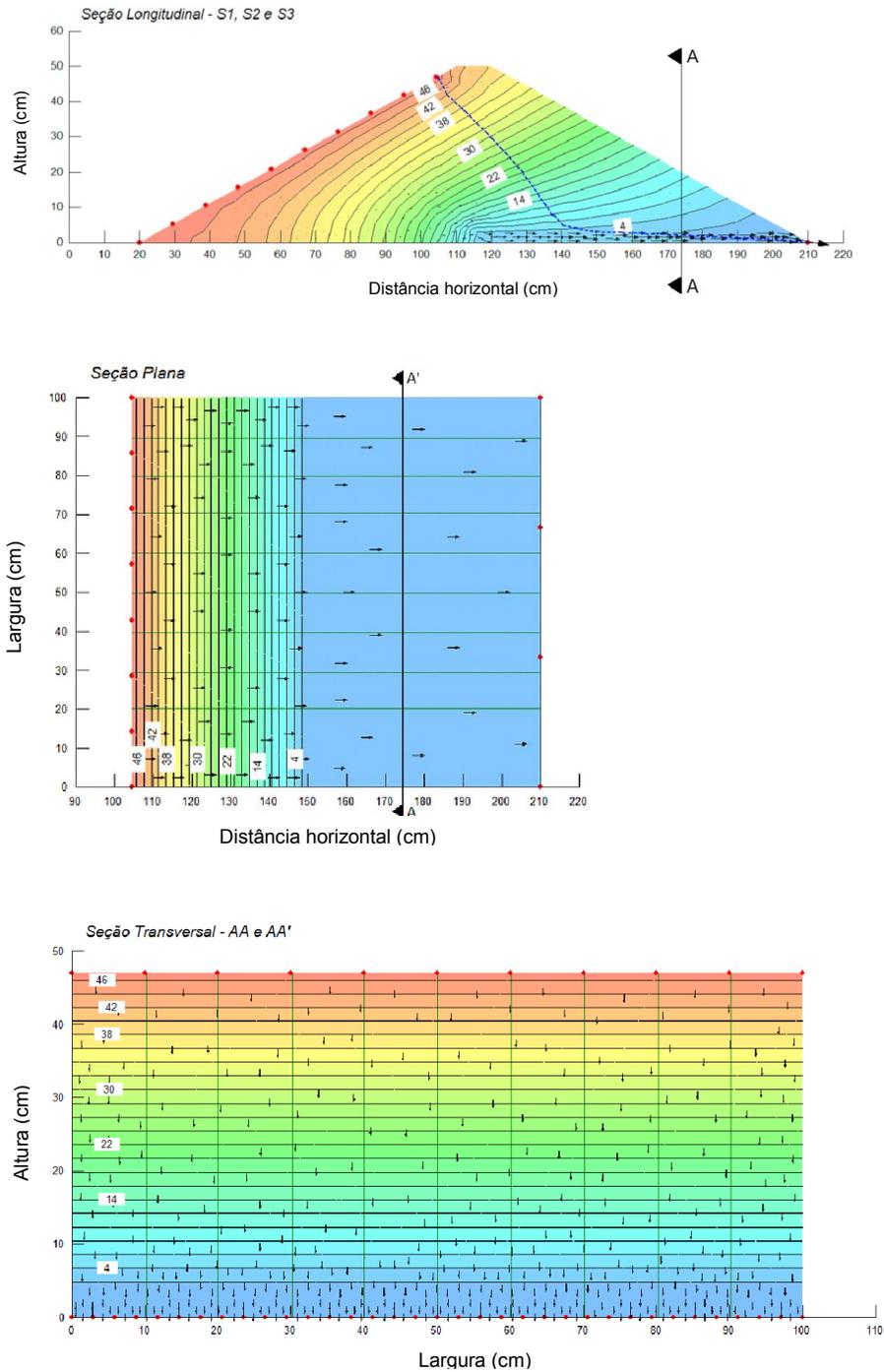


FIGURA I.1 - Seções do modelo 1: barragem com largura de 100 cm dotada de tapete drenante com comprimento de 95 cm

I.2 Modelo 2 – Barragem com 1 dreno francês, simulando espaçamento de 200 cm

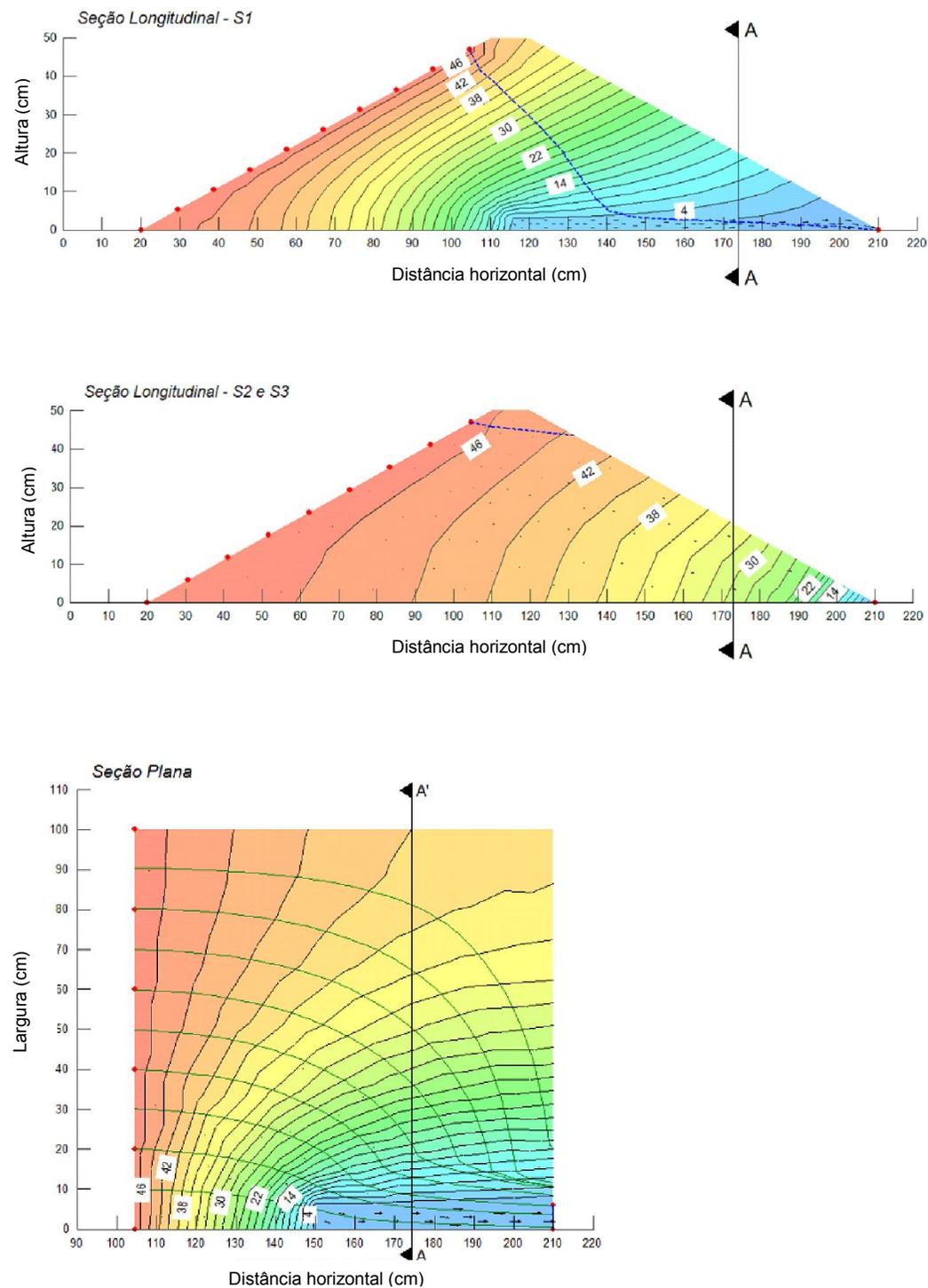


FIGURA I.2 - Seções longitudinal e plana do modelo 2: barragem com largura de 100 cm dotada de um dreno francês com comprimento de 95 cm

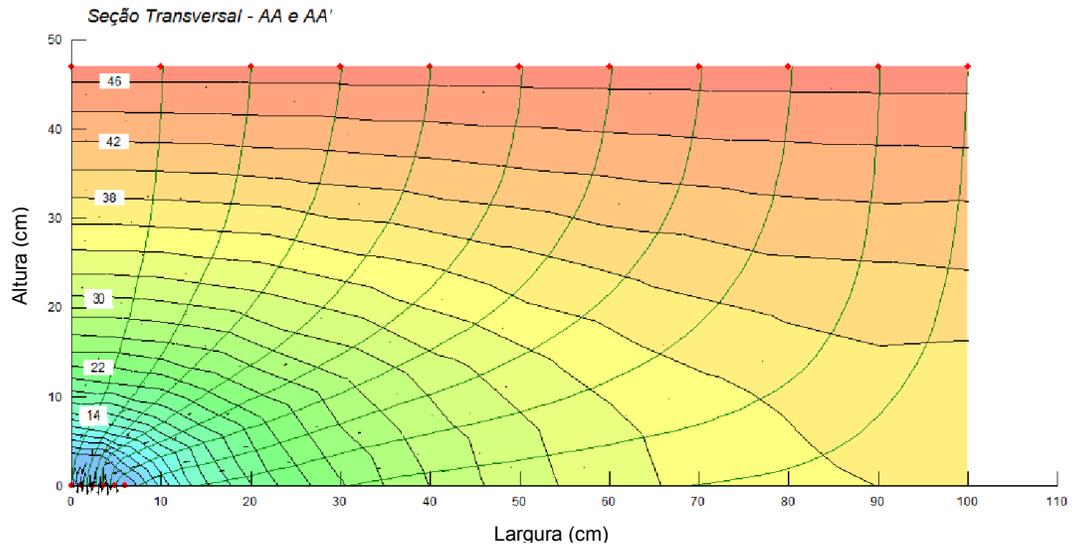


FIGURA I.2.1 - Seção transversal do modelo 2: barragem com largura de 100 cm dotada de um dreno francês com comprimento de 95 cm

I.3 Modelo 3 – Barragem com 2 drenos franceses, simulando espaçamento de 100 cm

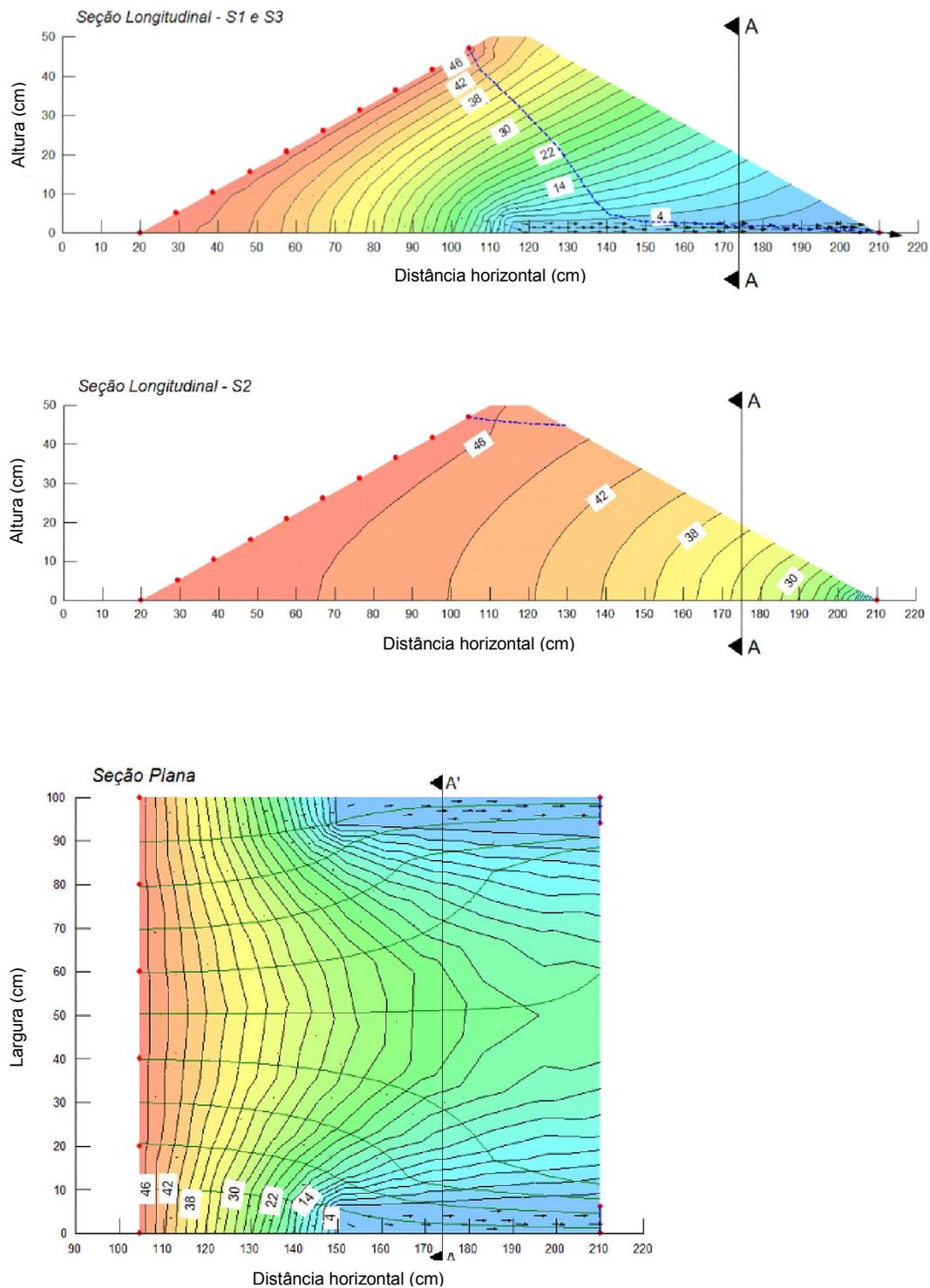


FIGURA I.3 – Seções longitudinal e plana do modelo 3: barragem com largura de 100 cm dotada de dois drenos franceses com comprimento de 95 cm

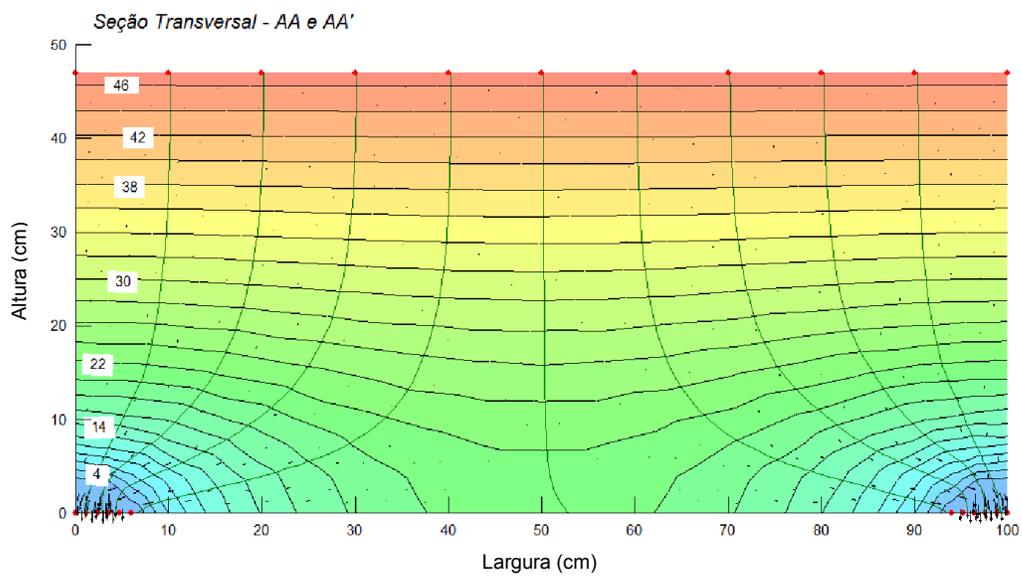


FIGURA I.3.1 – Seção transversal do modelo 3: barragem com largura de 100 cm dotada de dois drenos franceses com comprimento de 95 cm

I.4 Modelo 4 – Barragem com 3 drenos franceses, simulando espaçamento de 50 cm

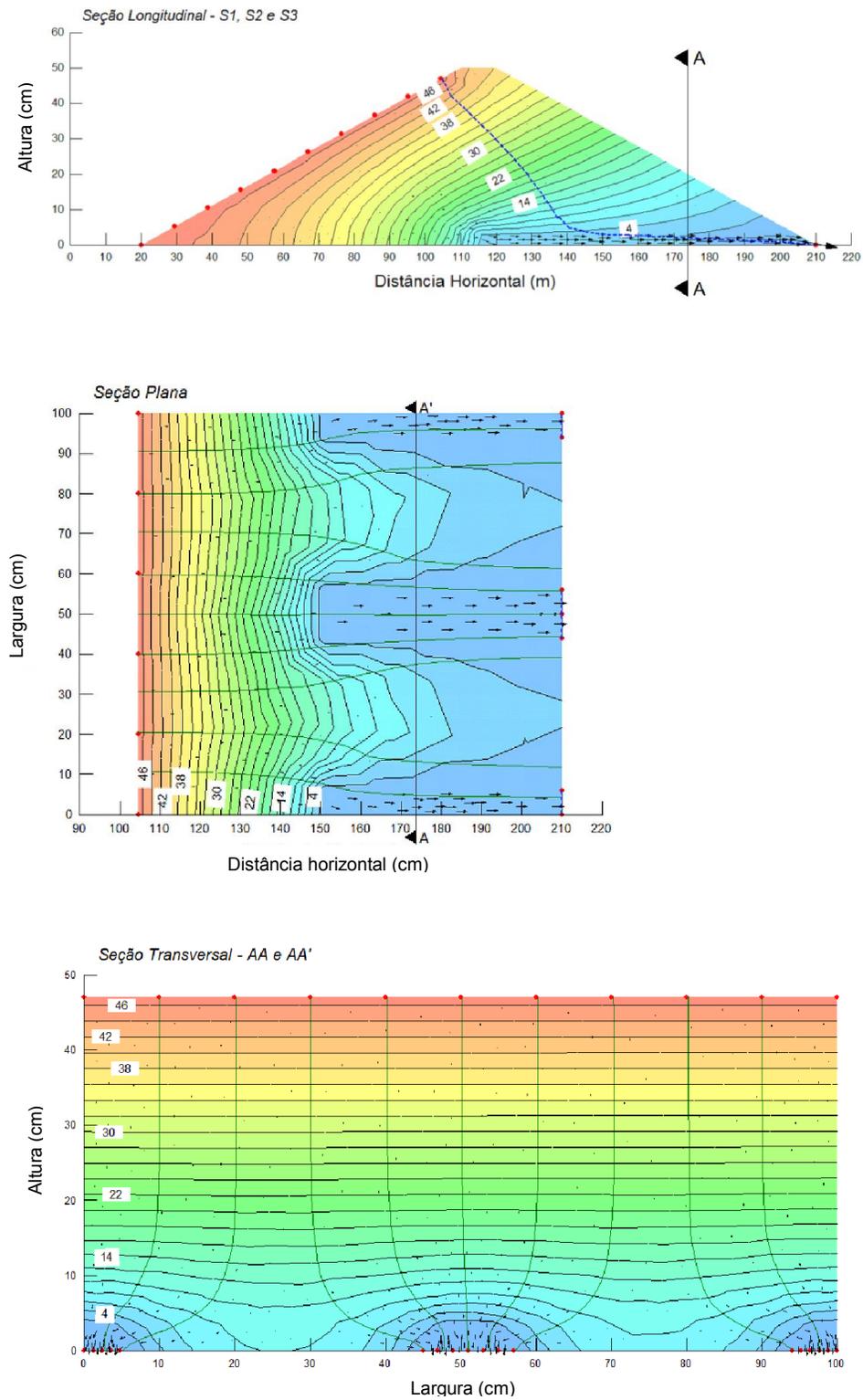


FIGURA I.4 – Seções do modelo 3: barragem com largura de 100 cm dotada de três drenos franceses com comprimento de 95 cm