

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS

ELONEIDE MENÊSES FRANÇA

ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE SEGURANÇA DA BARRAGEM
CASTANHÃO BASEADA NOS REGISTROS DA INSTRUMENTAÇÃO

FORTALEZA
2008

ELONEIDE MENÊSES FRANÇA

ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE SEGURANÇA DA BARRAGEM
CASTANHÃO BASEADA NOS REGISTROS DA INSTRUMENTAÇÃO

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na área de concentração em Recursos Hídricos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Carísia Carvalho Gomes

FORTALEZA
2008

ELONEIDE MENÊSES FRANÇA

ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE SEGURANÇA DA BARRAGEM
CASTANHÃO BASEADA NOS REGISTROS DA INSTRUMENTAÇÃO

Dissertação submetida à Coordenação do
Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Civil, na área de concentração em Recursos
Hídricos, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil.

Aprovada em 17/03/2008

BANCA EXAMINADORA

Carísia Carvalho Gomes
Profª. Drª. Carísia Carvalho Gomes (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará - UFC


Prof. PhD. Marco Aurélio Holanda de Castro
Universidade Federal do Ceará - UFC


Prof. PhD. Thomas Paul Ballesteros
University of New Hampshire

Aos meus pais, Mavignier e José (*in memorian*),
meus irmãos Marcílio, Neile, Nádia, Denise,
Dayse e Geifa por sempre acreditarem em mim e
ao Ciro por todo amor e incentivo.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A DEUS, por ter me dado forças e me amparado quando precisei.

Aos meus pais “Teixeira” (*in memorian*) e Mavignier, pelo carinho e dedicação.

Aos meus irmãos Marcílio, Neile, Nádia, Denise, Dayse, e Geifa pela torcida e incentivo.

Aos meus sobrinhos João Gabriel, Pedro, Gil, Felipe, Renê, Samuel, Moisés e Davi pela admiração que têm por mim.

A minha tia Teresinha pelo carinho e torcida.

Ao Ciro por todo amor, carinho, incentivo e ajuda.

A Professora Carísia, por ter aceitado ser minha orientadora, pela amizade e toda a ajuda na redação da dissertação.

Aos professores Marco Aurélio Holanda de Castro e Thomas Paul Ballester por aceitarem participar da banca examinadora.

A Universidade Federal do Ceará – UFC e ao Curso de Pós Graduação Engenharia Civil, por proporcionar minha formação profissional.

A Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pela bolsa de estudos concedida.

Ao Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) por ceder os dados para a realização desta pesquisa.

A Engetc por enviar os dados para o desenvolvimento desta pesquisa.

A Engesoft, especialmente ao Engenheiro Valmir Jardim, por ceder informações para realização desta pesquisa.

A Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH), pela disponibilidade para aplicação do modelo utilizado.

Ao engenheiro Walter Martins Ferreira Neto, pela ajuda e disponibilidade.

Aos colegas de curso de pós-graduação, Teresa Raquel, Silvia Helena, Alexandre, Magno, Orleani, Alina, Vanessa, Itarciane, Danilo, Marcus, Charles, e Andréa.

Aos amigos, Paulo Igor e Bruno Tiago pela torcida e apoio.

E a todos que contribuíram direta ou indiretamente para que eu realizasse este trabalho e conseguisse vencer mais essa etapa da minha vida.

Meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

A Barragem Castanhão em Alto Santo, Ceará, necessita de operação e monitoramento constantes, a fim de se acompanhar o seu comportamento e desempenho e verificar se estes estão de acordo com as hipóteses formuladas no projeto e dentro das condições de segurança estabelecidas. Este trabalho tem como objetivo principal a análise dos resultados das medições periódicas obtidas nos piezômetros e drenos de fundação instalados na barragem, além da comparação das vazões de fundação através de simulações de fluxo. Foi realizada uma análise do comportamento das subpressões, plotando-se em diagramas as subpressões de projeto e as medidas com relação aos furos de drenagem onde foram estudadas as vazões de infiltrações, realizando-se comparações entre a literatura existente e as simulações executadas com a aplicação do programa GEOSLOPE (SEEP/W). Os dados utilizados nesta pesquisa são referentes às leituras de 16 piezômetros do tipo Casagrande e de 151 furos de drenagem, aos coeficientes de permeabilidade do solo de fundação, às cotas dos níveis d'água do reservatório e à jusante da barragem. A partir destes dados foram traçados os diagramas de subpressões e estruturada a modelagem para as simulações de fluxo pela fundação. No que concerne às subpressões, a barragem mostrou comportamento satisfatório, apresentando um caso extremo, porém ainda dentro dos limites de segurança do projeto. Com relação às vazões de infiltração, em geral, mostraram-se dentro dos limites aceitáveis, porém o furo de drenagem 111 apresentou vazão acima deste limite, o que deve manter em estado de alerta a equipe de monitoramento. Foram propostos cinco cenários para as simulações, em que a variável principal foi o coeficiente de permeabilidade e onde as vazões calculadas foram comparados com as reais. Constatou-se que em 50% dos casos ocorreram diferenças nestes valores de 0,5 a 1,5, o que deve-se a generalização do coeficiente de permeabilidade adotado.

Palavras-Chave: Segurança de Barragens, instrumentação de barragens, simulação

ABSTRACT

The Castanhão Dam, located in the Alto Santo District in the State of Ceará, requires continuous performance and monitoring ,in order to monitor its behavior and performance and check if these meet with design assumptions and are inside of the acceptable safety conditions. The main objective of this research is to analyze the results of the periodic measurements in piezometers and foundation drains installed in the concrete dam, and comparison of foundation flow with of flow simulations. An analysis of the uplift behavior was performed by plotting design uplift distributions and the resulting seepage flow drainage holes, by make comparisons between the existing literature and the simulations were made using the software GEOSLOPE(SEEP/W). The data used in this work were based upon readings from 16 Casagrande piezometers and 151 drainage holes that measured: the coefficient of permeability of foundation soils and the height of the water level upstream and downstream of the reservoir. From this data the uplift distributions were drawn and the foundation flow simulated. With respect to the uplift, the dam showed satisfactory behavior, with one extreme case that was still inside the project's safety limits. The infiltration flow, in general, was showed inside acceptable limits, however drainage hole 111 exhibited flow above the limits, therefore the monitoring team should be always in state of alert. Five sceneries were proposed for the simulations, where the principal variable was the value of the coefficient of permeability. Four of these five sceneries can be compared with the real data of seepage, however in 50% of the cases, differences in these values from 0,5 to 1,5 due to generalization of the adopted coefficient of permeability.

Keywords: Dam's ranged, instrumentation, simulation

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Elemento infinitesimal	6
Figura 2.2 – Fluxo através do elemento infinitesimal	7
Figura 2.3 – Rede de fluxo pela fundação	9
Figura 2.4: Exemplo de montagem de ensaio em modelo físico para a determinação de redes de fluxo em meios porosos (Laboratório de Geotecnia da Puc-Rio, 1998 <i>apud</i> SOUZA, 2005),	11
Figura 2.5: Exemplo de rede de fluxo obtida por meio de análise com o MEF (SOUZA, 2005)	12
Figura 2.6 – Barragem de Concreto com uma galeria de drenagem e uma linha de drenos. Em que, Hm: Nível d’água à montante, Hj: Nível d’água à jusante, D: profundidade dos drenos, a: espaçamento entre os drenos (adaptado de SILVA FILHO e GAMA, 2003).	15
Figura 2.7 – Forças que atuam na seção típica de uma barragem de concreto (adaptado de MARQUES FILHO E GERALDO, 1998 <i>apud</i> OSAKO, 2002)	21
Figura 2.8 – Distribuição da subpressão sem drenagem na fundação (adaptado de Osako, 2002).	23
Figura 2.9 – Diagrama de subpressão com piso da galeria de drenagem situado acima da cota de jusante do canal do rio (adaptado de USACE, 1995a).	24
Figura 2.10 – Diagrama de subpressão com piso da galeria de drenagem situado abaixo da cota de jusante do canal do rio (adaptado de USACE, 1995a).	25
Figura 2.11 – Critério de subpressão do United States Bureau of Reclamation (adaptado de USACE, 1986).....	26
Figura 2.12 - Piezômetro de Casagrande (ENGETEC, 2005)	31
Figura 2.13 – Esquema de funcionamento do piezômetro hidráulico do tipo inglês instalado na barragem de Três Marias, da Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig), (SILVEIRA, 2006).....	33
Figura 2.14 – Esquema de piezômetro pneumático (DUNNICLIFF, 1988 <i>apud</i> SARÉ, 2003)	34
Figura 2.15 – Piezômetro de Corda Vibrante (MOIA, 2008).....	35
Figura 2.16 – Esquema de piezômetro elétrico (DUNNICLIFF, 1988 <i>apud</i> SARÉ, 2003)....	36
Figura 2.17 – Vertedouro triangular de vazão (SILVEIRA, 2006)	37
Figura 2.18 – Medidor de vazão tipo calha Parshall instalado no túnel de drenagem da Barragem de Água Vermelha (SILVEIRA, 2006)	38
Figura 3.1 – Localização da Barragem Castanhão	41
Figura 3.2 - “Lay-Out” geral da obra	43
Figura 3.3 – Barragem principal.....	45
Figura 3.4 - “Lay-Out” do trecho central da barragem.....	46
Figura 3.5 – Trecho de CCR da Barragem Castanhão	47

Figura 3.6 – Seção transversal da Barragem: trecho de CCR	47
Figura 3.7 – Vertedouro da Barragem Castanhão	49
Figura 3.8 – Torre de comando da tomada d’água da Barragem Castanhão.....	49
Figura 3.9 – Vista do rebaixamento do lençol freático durante as escavações do Paleo Canal52	
Figura 3.10 – Piezômetro de Tipo Casagrande Modificado (SILVEIRA, 2006)	54
Figura 3.12 – Galeria de drenagem da fundação, com localização de piezômetros a montante e à jusante.....	56
Figura 3.13 - Leitura do nível d’água nos piezômetros com sensor luminoso.....	56
Figura 3.14 – Seção da Galeria de drenagem, indicando a localização dos furos de drenagem (ENGESOFT, 2000c)	57
Figura 3.15 – Galeria de drenagem, localização dos acessos de saída das canaletas de drenagem (ENGESOFT, 2000c).....	58
Figura 3.16 – Vista dos Acessos 1, 2 e 3 com a localização das canaletas de saída do fluxo (ENGESOFT, 2000c).	59
Figura 3.17 – Medição das vazões totais.....	59
Figura 3.18 – Medição das vazões individuais.....	60
Figura 4.1 – Piezômetro do Tipo Casagrande, instalado na Barragem Castanhão (ENGETEC, 2005).....	62
Figura 4.2 – Exemplo de diagrama de subpressões medidas e plotadas	65
Figura 4.3 – Exemplo de diagrama de subpressões de projeto.....	66
Figura 4.4 – Sobreposições dos Diagramas de Subpressões medidas e de projeto	67
Figura 4.5 – Barragem de Concreto, com nível de água à jusante abaixo do nível do piso da galeria de drenagem.....	69
Figura 4.6 – Localização das sondagens na fundação do maciço de CCR, (ENGESOFT, 2000b).....	70
Figura 4.7 – Perfil de sondagem SM-4E (estaca 16), (ENGESOFT, 2000b).....	71
Figura 4.8 – Discretização da malha de elementos finitos para três camadas de solo na fundação e condições de contorno do problema da Seção 21.	75
Figura 4.9 – Discretização da malha de elementos finitos da Seção 06, para a fundação no caso de uma única camada de solo.	77
Figura 4.10 – Gráficos do Coeficientes de Permeabilidade (m/s) versus Pressão (m).....	79
Figura 4.11 - Localização dos furos de drenagem e drenos na galeria do maciço em CCR (ENGESOFT, 2000c)	82
Figura 5.1 – Diagramas de subpressões medidas e de projeto – (a) Estaca 06 (janeiro de 2005), (b) Estaca 16 (junho de 2005)	85
Figura 5.2 - Diagrama de subpressões medidas e de projeto – Estaca 31 (janeiro de 2004)....	85
Figura 5.3 – Gráfico das cotas do nível d’água do reservatório da Barragem Castanhão referente aos anos de 2004 e 2005.....	87

Figura 5.4 - Diagrama de Subpressão medido e de projeto – Seção 26, (a) janeiro de 2004, (b) março de 2004, (c) julho de 2004 e (d) setembro de 2005	89
Figura 5.5 – Detalhes do diagrama de subpressões medidas com comportamento crescente da linha piezométrica nos drenos – (a) Seção 16 – maio de 2004, (b) Seção 06 – abril de 2004 e (c) Seção 21 - julho de 2004.....	90
Figura 5.6 – Comportamento da linha piezométrica quando a drenagem mostra-se ineficiente - furos de drenagem não profundos o suficiente para as condições rochosas (adaptado de Casagrande, 1961)	91
Figura 5.7 - Diagrama de subpressões medidas e de projeto – (a) Seção 26 - fevereiro de 2004, (b) Seção 16 - novembro de 2005.....	92
Figura 5.8 – Localização do Paleo Canal	93
Figura 5.9 – Primeiro cenário de simulação da rede de fluxo referente à Seção 11 em abril de 2004 (vazão em m ³ /s)	97
Figura 5.10 – Segundo cenário de simulação da rede de fluxo na Seção 26 em janeiro de 2005 (vazão em m ³ /s)	99
Figura 5.11 – Terceiro cenário de simulação da rede de fluxo referente à Seção 31 em setembro de 2005 (vazão em m ³ /s).....	102
Figura 5.12 – Quarto cenário de simulação da rede de fluxo referente à Seção 06 em abril de 2004 (vazão em m ³ /s)	103
Figura 5.13 – Quinto cenário de simulação da rede de fluxo referente à Seção 16 em fevereiro de 2005 (vazão em m ³ /s)	104
Figura A1 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de janeiro de 2004 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.....	118
Figura A2 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de fevereiro de 2004 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.....	119
Figura A3 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de março de 2004 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.....	120
Figura A4 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de abril de 2004 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.....	121
Figura A5 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de maio de 2004 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.....	122
Figura A6 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de junho de 2004 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.....	123
Figura A7 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de janeiro de 2005 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.....	124
Figura A8 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de fevereiro de 2005 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.....	125
Figura A9 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de março de 2005 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.....	126
Figura A10 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de abril de 2005 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.....	127

Figura A11 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de maio de 2005 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.....	128
Figura A12 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de junho de 2005 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.....	129
Figura A13 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de agosto de 2005 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.....	130
Figura A14 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de setembro de 2005 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.....	131
Figura A15 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de novembro de 2005 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.....	132
Figura B 1 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004.....	134
Figura B 2 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004.....	135
Figura B 3 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005.....	136
Figura B 4 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005.....	137
Figura B 5 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, setembro de 2005	138
Figura B 6 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004.....	139
Figura B 7 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004.....	140
Figura B 8 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005.....	141
Figura B 9 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005.....	142
Figura B 10 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, setembro de 2005	143
Figura B 11 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004	144
Figura B 12 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) Maio de 2004 e (b) Julho de 2004	145
Figura B 13 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005.....	146
Figura B 14 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) Março de 2005 e (b) Agosto de 2005.....	147
Figura B 15 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, setembro de 2005	148
Figura B 16 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004	149

Figura B 17 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004	150
Figura B 18 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005.....	151
Figura B 19 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005.....	152
Figura B 20 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, setembro de 2005	153
Figura B 21 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004.....	154
Figura B 22 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004	155
Figura B 23 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005.....	156
Figura B 24 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005.....	157
Figura B 25 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, setembro de 2005	158
Figura B 26 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004.....	159
Figura B 27 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004	160
Figura B 28 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005.....	161
Figura B 29 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005.....	162
Figura B 30 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, setembro de 2005	163
Figura B 31 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004.....	164
Figura B 32 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004	165
Figura B 33 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005.....	166
Figura B 34 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005.....	167
Figura B 35 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, setembro de 2005	168
Figura B 36 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004.....	169
Figura B 37 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) Maio de 2004 e (b) Julho de 2004	170

Figura B 38 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) janeiro de 2005 e (b) Fevereiro de 2005	171
Figura B 39 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005	172
Figura B 40 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, setembro de 2005	173
Figura B 41 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004	174
Figura B 42 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004	175
Figura B 43 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005	176
Figura B 44 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005	177
Figura B 45 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, setembro de 2005	178
Figura B 46 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004	179
Figura B 47 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004	180
Figura B 48 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005	181
Figura B 49 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005	182
Figura B 50 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, setembro de 2005	183
Figura B 51 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004	184
Figura B 52 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004	185
Figura B 53 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005	186
Figura B 54 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005	187
Figura B 55 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, setembro de 2005	188
Figura B 56 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004	189
Figura B 57 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004	190
Figura B 58 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005	191

Figura B 59 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005.....	192
Figura B 60 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, setembro de 2005	193
Figura B 61 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004.....	194
Figura B 62 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004	195
Figura B 63 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005.....	196
Figura B 64 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005.....	197
Figura B 65 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, setembro de 2005	198
Figura B 66 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004.....	199
Figura B 67 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004	200
Figura B 68 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005.....	201
Figura B 69 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005.....	202
Figura B 70 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, setembro de 2005	203
Figura B 71 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004.....	204
Figura B 72 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004	205
Figura B 73 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005.....	206
Figura B 74 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005.....	207
Figura B 75 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, setembro de 2005	208
Figura B 76 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004.....	209
Figura B 77 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004	210
Figura B 78 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005.....	211
Figura B 79 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005.....	212

Figura B 80 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, setembro de 2005	213
Figura B 81 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004.....	214
Figura B 82 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004	215
Figura B 83 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005.....	216
Figura B 84 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005.....	217
Figura B 85 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, setembro de 2005	218
Figura B 86 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004.....	219
Figura B 87 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004	220
Figura B 88 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005.....	221
Figura B 89 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005.....	222
Figura B 90 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, setembro de 2005	223
Figura B 91 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004.....	224
Figura B 92 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004.....	225
Figura B 93 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005.....	226
Figura B 94 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005.....	227
Figura B 95 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, setembro de 2005	228
Figura B 96 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004.....	229
Figura B 97 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004.....	230
Figura B 98 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005.....	231
Figura B 99 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005.....	232
Figura B 100 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, setembro de 2005	233

Figura B 101 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004.....	234
Figura B 102 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004	235
Figura B 103 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005.....	236
Figura B 104 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005.....	237
Figura B 105 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, setembro de 2005	238
Figura B 106 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004.....	239
Figura B 107 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004	240
Figura B 108 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005.....	241
Figura B 109 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005.....	242
Figura B 110 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, setembro de 2005	243
Figura B 111 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004.....	244
Figura B 112 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004	245
Figura B 113 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005.....	246
Figura B 114 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005.....	247
Figura B 115 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, setembro de 2005	248
Figura B 116 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004.....	249
Figura B 117 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004	250
Figura B 118 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005.....	251
Figura B 119 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005.....	252
Figura B 120 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, setembro de 2005	253
Figura B 121 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004.....	254

Figura 122 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004.....	255
Figura B 123 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005.....	256
Figura B 124 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005.....	257
Figura B 125 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, setembro de 2005	258
Figura B 126 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004.....	259
Figura B 127 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004	260
Figura B 128 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005.....	261
Figura B 129 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005.....	262
Figura B 130 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, setembro de 2005	263
Figura B 131 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004.....	264
Figura B 132 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004	265
Figura B 133 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005.....	266
Figura B 134 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005.....	267
Figura B 135 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, setembro de 2005	268
Figura B 136 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004.....	269
Figura B 137 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004	270
Figura B 138 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005.....	271
Figura B 139 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005.....	272
Figura B 140 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, setembro de 2005	273
Figura B 141 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004.....	274
Figura B 142 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004	275

Figura B 143 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005.....	276
Figura B 144 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) Março de 2005 e (b) Agosto de 2005.....	277
Figura B 145 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, setembro de 2005	278
Figura B 146 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004.....	279
Figura B 147 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004	280
Figura B 148 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005.....	281
Figura B 149 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005.....	282
Figura B 150 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, setembro de 2005	283

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Cálculo da Cota do Piezômetro	64
Tabela 4.2 - Cálculo da Cota do Piezômetro	68
Tabela 4.3 – Coeficientes de Permeabilidade média por trecho.....	72
Tabela 4.4 – Condições de contorno de carga total de fluxo à jusante e à montante da barragem	76
Tabela 4.5 – Espessuras e permeabilidades referentes a cada Seção estudada.	78
Tabela 4.6 – Coeficiente de Permeabilidade Equivalente para as Seções 06, 11, 16, 21, 26 e 31	80
 Tabela 5.1 - Dados utilizados para elaboração dos diagramas de subpressões de projeto e reais, para a Estaca 31.....	86
Tabela 5.2 - Vazões nos furos de drenagem da Barragem Castanhão (2004 – 2005)	95
Tabela 5.3 - Vazões do Primeiro Cenário	98
Tabela 5.4 - Vazões do Segundo Cenário	99
Tabela 5.5 - Vazões do Terceiro Cenário	100
Tabela 5.6 - Vazões do Quarto Cenário	100
Tabela 5.7 - Vazões do Quinto Cenário	101
Tabela 5.8 - Leituras de vazões dos drenos de fundação – Caso 1.....	105
Tabela 5.9 - Leituras de vazões dos drenos de fundação – Caso 2.....	106
Tabela 5.10 - Leituras de vazões dos drenos de fundação – Caso 3.....	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CBGB	Comitê Brasileiro de Grandes Barragens
CCR	Concreto Compactado a Rolo
Cesp	Companhia Energética de São Paulo
Cemig	Companhia Energética de Minas Gerais
CPT	Cone Penetration Test
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra a Seca
FERC	Federal Energy Regulatory Comission
ICOLD	Comissão Internacional de Grandes Barragens
MEF	Método dos Elementos Finitos
NA	Nível d' Água
SPT	Standart Penetration Test
USBR	United States Bureau of Reclamation

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área da seção transversal do solo através da qual a água flui
a	abertura das fraturas
b	permeabilidade das fraturas
C	cota do nível d'água no piezômetro
d_h	variação da carga de pressão
d_l	variação do comprimento da trajetória do fluxo
E	drenagem efetiva
e_i	espessura da camada de solo
F	cota do ponto médio do elemento poroso do piezômetro
Hd:	subpressão na linha dos drenos
H_j	altura do nível d'água à jusante
Hm	altura do nível d'água à montante
Hg	altura do piso da galeria de drenagem.
H_1	altura do nível d'água na linha dos drenos;
i	gradiente hidráulico
K	coeficiente de permeabilidade
K_{MR}	permeabilidade do maciço rochoso
k_F	condutividade hidráulica das fraturas
k_M	permeabilidade da matriz rochosa
k_v	coeficiente de permeabilidade perpendicular à estratificação (vertical)
k_i	coeficiente de permeabilidade da camada de solo
L	distância do paramento de montante ao de jusante
P_{AJ}	peso da água sobre o paramento de jusante
P_c	peso do bloco

P_1	pressão hidrostática
Q	vazão
T	intervalo de tempo
U	subpressão
V	volume d'água coletado
X	distância do paramento de montante o dreno
γ	massa específica

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Problema de pesquisa	2
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo Geral	2
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 Guia da dissertação.....	3
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Percolação pela fundação	5
2.1.1 Equação do Fluxo	5
2.1.2 Solução da Equação de Laplace	8
2.1.3 Coeficiente de Permeabilidade	12
2.2 Controle do fluxo pela fundação	13
2.2.1 Cortina de drenagem.....	14
2.2.2 Cortina de Injeções	17
2.2.3 Drenagem X Injeções	18
2.3 Subpressões	19
2.3.1 Controle das subpressões.....	21
2.3.2 Critérios de Projeto	22
2.3.3 Terremotos.....	26
2.4 Instrumentação de Barragens.....	27
2.4.1. Piezômetros	29
2.4.2 Medidores de vazões	36
2.5 Segurança de Barragens.....	39
CAPÍTULO 3 – DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	41
3.1 Projeto Executivo	42
3.1.1 “Lay-Out” geral da obra	43
3.1.2 Ficha Técnica.....	43

3.1.3 Barragem principal	45
3.1.4 Dique Fusível.....	48
3.1.5 Usina Hidrelétrica.....	48
3.1.6 Vertedouro	48
3.1.7 Tomada d'água	48
3.2 Geologia e geotecnica	49
3.2.1 Geologia	49
3.2.3 Geotecnia.....	50
3.2.2 Paleo Canal.....	51
3.3 Instrumentação da Barragem Castanhão	53
3.3.1 Piezômetros de Fundação	53
3.3.2 Drenos de Infiltração da Fundação.....	57
CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA	61
4.1 Medidas de subpressão	61
4.1.1 Seleção dos dados.....	62
4.1.2 Diagramas das subpressões medidas	63
4.1.3 Diagramas das subpressões de projeto	66
4.1.4 Verificação da Eficiência da Cortina de Vedaçāo e Linha de Drenagem	67
4.2 Coeficiente de Permeabilidade	69
4.3 Medidas de vazão pela fundação	72
4.3.1 Seleção dos dados.....	73
4.3.2 Análise do fluxo através do programa SEEP/W.....	74
4.3.3 Dados de entrada para a modelo.....	74
4.3.4 Aplicação do Modelo	77
4.3.5 Localização e seleção dos dados reais de vazão de infiltração.....	81
4.3.6 Análise da eficiência da cortina de vedaçāo	83
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	84
5.1 Estudo das Subpressões	84

5.2 Estudo das vazões pela fundação.....	92
5.2.1 Vazões medidas pelos drenos de infiltração pela fundação	92
5.2.2 Simulação das vazões pelo Geoslope (SEEP/W)	97
5.2.1 Comparaçao entre vazões medidas X vazões simuladas	105
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
APÊNDICE A	117
APÊNDICE B.....	133

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo será exposta a importância da instrumentação e posterior análise das leituras dos aparelhos instalados em uma barragem, apresentando dados gerais sobre a Barragem Castanhão e descrevendo o problema que motivou esta pesquisa, acompanhado dos objetivos geral e específicos, além de um guia para acompanhamento da dissertação.

Nas últimas décadas, tem crescido o interesse pelos sistemas de inspeção e de observação das obras de engenharia civil, em especial de barragens, devido ao porte e segurança que as obras possam oferecer. A instrumentação é um dos métodos utilizados para acompanhar o comportamento de uma barragem e de sua fundação (Cruz,1996), podendo alertar para o desenvolvimento de condições inseguras, devendo ser vistoriada para seu desempenho apropriado (ELETROBRÁS,1987).

A necessidade da instrumentação na Barragem Castanhão deve-se ao fato desta obra ser considerada de grande porte, sendo imprescindível seu monitoramento constante, a fim de garantir a segurança da população residente à jusante, alem do estudo do seu comportamento com relação ao fluxo e do desempenho em relação às hipóteses formuladas no seu projeto.

A Barragem Castanhão localiza-se na bacia hidrográfica do Rio Jaguaribe, Município de Alto Santo, Estado do Ceará. O açude fica situado na região semi-árida nordestina, com base geológica predominantemente cristalina, taxa de evaporação potencial em 2.000 mm ao ano e precipitação média variando entre 550 a 900 mm/ano (MIRANDA E LIMA, 1998).

A barragem forma um lago artificial que cobre uma área de 32,5 mil hectares na sua cota de sangria, possibilitando o armazenamento e a criação de um reservatório com capacidade máxima de 6,7 bilhões de metros cúbicos de água e um volume útil de 4,2 bilhões de m³.

A instrumentação instalada da Barragem Castanhão é composta de piezômetros, drenos, canaletas e medidores triortogonais instalados no interior do maciço de concreto, na fundação e no vertedouro, que são utilizados para o estudo das subpressões medidas pelos piezômetros, das vazões de infiltração nos drenos e canaletas; e das medições de deslocamentos diferenciais obtidas através de medidores triortogonais. Com os resultados registrados nas

leituras dos aparelhos é possível analisar se o comportamento da barragem atende as condições esperadas no projeto.

1.1 Problema de pesquisa

O monitoramento de barragens vem se tornando uma prática de grande importância, sendo possível avaliar as condições de segurança da obra. Dentre os principais meios de quantificar os níveis de segurança de um empreendimento, ao longo de sua vida útil, está a instrumentação.

Considerando-se o grande porte da barragem Castanhão, faz-se necessário, no período operacional do reservatório (2004 e 2005), a manutenção constante do monitoramento, da inspeção das estruturas e da instrumentação (ENGETEC, 2005). Os dados obtidos nas leituras dos aparelhos instalados em uma barragem devem ser estudados e analisados, a fim de verificar-se se o comportamento desta está de acordo com as condições de projeto.

A verificação constante dos critérios de segurança é de grande importância na fase de operação da barragem, tendo em vista que o risco de ruptura (hidráulica ou estrutural) pode alertar aos gestores da obra sobre condições inseguras. Estes, por sua vez, acionarão a defesa civil, dando avisos de emergência à população e tomando as providências a fim de sanar ou amenizar o problema.

A instrumentação tem o objetivo de alertar sobre os riscos, podendo assim, prever possíveis problemas no funcionamento e estrutura da obra, o que facilita a ação dos gestores para resolver ou amenizar o problema, evitando maiores danos à barragem, ao meio ambiente e a população local.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral analisar os resultados das medidas obtidas na instrumentação no trecho construído em Concreto Compactado a Rolo (CCR), na fundação e no vertedouro da Barragem Castanhão, observando-se o seu desempenho, criando uma

metodologia para verificar se está de acordo com o previsto no projeto “As built” e se as condições de segurança estão dentro dos valores recomendados para grandes barragens.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Estudo dos registros das subpressões no contato do maciço com a fundação rochosa, através de dados obtidos nos piezômetros, tipo Casagrande, instalados na barragem;
- Verificação da eficiência da cortina de vedação, com a análise do comportamento da linha piezométrica;
- Análise da eficiência da cortina de vedação da fundação da barragem que será dada pelos resultados obtidos nas leituras de vazão máxima por furo de drenagem;
- Verificação das condições de segurança com relação às medidas efetuadas durante o período de coleta de dados através da comparação com os valores calculados utilizando o programa GEOSLOPE (SEEP/W).

1.3 Guia da dissertação

O trabalho está organizado em seis capítulos. O presente capítulo faz uma introdução ao assunto estudado, explica o problema que motivou esta pesquisa, bem como os objetivos geral e específicos.

O capítulo 2 apresenta o estudo sobre a literatura existente referente à percolação pela fundação, coeficiente de permeabilidade, controle do fluxo pela fundação, influência das subpressões atuantes em uma barragem, bem como os métodos de controle de subpressões, influência de terremotos em barragens de concreto e finalmente estudo sobre instrumentação e segurança de barragens.

O capítulo 3 descreve a área de estudo, apresentando os principais dados do projeto executivo, e das estruturas que compõem a barragem, uma breve descrição da geologia e geotecnica da região e a instrumentação instalada na barragem, destacando-se os instrumentos analisados nesta pesquisa.

O capítulo 4 mostra os materiais e métodos utilizados para obtenção dos resultados, como registros das leituras dos equipamentos, metodologia adotada para traçado os diagramas de subpressão e formulação utilizada para aplicação do programa GEO-SLOPE (SEEP/W).

O capítulo 5 apresenta os resultados e discussões da análise das subpressões atuantes na fundação, obtidas através das leituras dos piezômetros instalados na barragem, do estudo das vazões reais, medidas nos furos de drenagem e das vazões calculadas nas simulações de fluxo utilizando o aplicativo GEOSLOPE (SEEP/W).

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões e recomendações sobre a instrumentação da barragem Castanhão, com base nas leituras dos piezômetros e drenos de fundação.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será realizado um estudo sobre a literatura técnica referente à percolação pela fundação de barragens, mostrando a equação do fluxo, métodos para resolver a equação de Laplace, incluindo o coeficiente de permeabilidade. Será também exposto a importância da escolha dos métodos de controle do fluxo pela fundação, como cortina de drenagem e de injeções, além do estudo sobre a eficiência destas cortinas no controle da percolação. Outro tema que será relatado é a influência das subpressões atuantes em uma barragem, bem como os métodos de controle destas, os critérios adotados para projetos de barragens e a influência dos terremotos nessas. É realizado estudo sobre instrumentação de barragens, dando ênfase aos piezômetros e drenos de fundação e, por fim, relata-se sobre segurança de barragens.

2.1 Percolação pela fundação

O estudo do fenômeno da percolação de fluidos em meios porosos é essencial nos problemas de estabilidade de taludes, projetos de barragens e controle de águas subterrâneas (SARÉ, 2003).

Para entender melhor esse fenômeno é importante saber qual a permeabilidade do meio em que a água percola, a equação que rege o fluxo e as metodologias para traçar a rede de fluxo.

2.1.1 Equação do Fluxo

A lei de Darcy, desenvolvida em 1856 pelo engenheiro francês Henry Darcy, considera o solo saturado, o fluxo laminar, o meio homogêneo e o fluido incompressível. A equação 2.1 estabelece as relações básicas entre a vazão e o gradiente hidráulico que podem ser adaptadas de diversas formas, no intuito de modelar uma variedade de fluxos laminares, estacionários e/ou transientes (MORENO, 2005).

$$Q = K \cdot i \cdot A \quad (2.1)$$

Em que:

Q : vazão $[L^3 T^{-1}]$

i: gradiente hidráulico

A: área da seção transversal do solo através da qual a água flui [L^2]

O gradiente hidráulico é definido como a declividade de uma superfície piezométrica, ou seja, é a variação da carga de pressão, dh , pelo comprimento da trajetória do fluxo, dl , como mostra a equação 2.2.

$$i = \frac{dh}{dl} \quad (2.2)$$

A equação que rege o fluxo em meios porosos saturados é normalmente conhecida como Equação de Laplace. Sua formulação, segundo Cedergren (1988), admite as seguintes hipóteses: o solo é homogêneo e isotrópico; os vazios estão completamente preenchidos com água; não ocorre, durante a percolação, adensamento ou expansão na massa de solo; o solo e a água são incompressíveis e o fluxo é laminar, sendo aplicável a Lei de Darcy.

Para o desenvolvimento da equação que rege o fluxo utiliza-se um elemento cúbico de solo infinitesimal, saturado, conforme Figura 2.1:

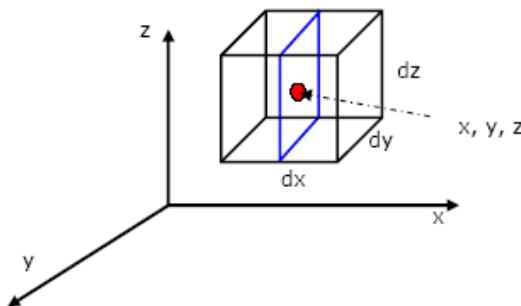


Figura 2.1 – Elemento infinitesimal

Existe fluxo entrando neste elemento nas três direções (x, y, z), que são as direções principais para aquíferos, como mostra a Figura 2.2 sendo, portanto, possível a aplicação da lei de Darcy, conforme equações abaixo:

$$\begin{aligned} q_x &= K_x \cdot i_x \cdot A_x = K_x \frac{\partial h}{\partial x} \cdot dy \cdot dz \\ q_y &= K_y \cdot i_y \cdot A_y = K_y \frac{\partial h}{\partial y} \cdot dx \cdot dz \\ q_z &= K_z \cdot i_z \cdot A_z = K_z \frac{\partial h}{\partial z} \cdot dx \cdot dy \end{aligned} \quad (2.3)$$

Em que:

K_x : coeficiente de permeabilidade da direção x;

K_y : coeficiente de permeabilidade da direção y;

K_z : coeficiente de permeabilidade da direção z.

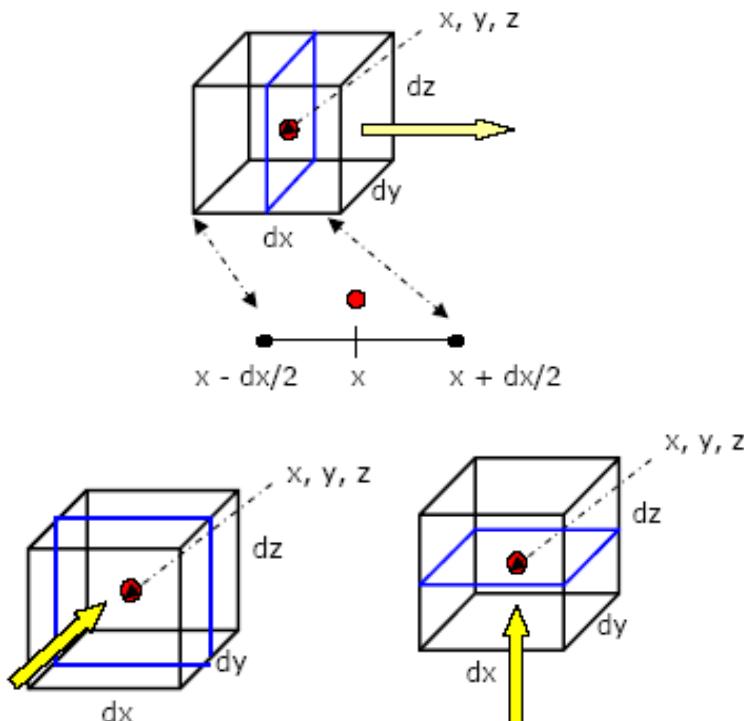


Figura 2.2 – Fluxo através do elemento infinitesimal

O fluxo de saída do elemento infinitesimal é definido como sendo o fluxo de entrada mais uma variação deste fluxo, sendo também aplicado nas três direções, conforme mostrado nas equações seguintes:

$$\begin{aligned} q_x + \Delta q_x &= K_x (i_x + \Delta i_x) A_x = K_x \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right) dy dz \\ q_y + \Delta q_y &= K_y (i_y + \Delta i_y) A_y = K_y \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) dx dz \\ q_z + \Delta q_z &= K_z (i_z + \Delta i_z) A_z = K_z \left(\frac{\partial h}{\partial z} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) dx dy \end{aligned} \quad (2.4)$$

Aplicando-se a equação da continuidade no elemento cúbico de solo infinitesimal, na qual se considera a conservação de massa de fluido dentro desse elemento, pode-se igualar o fluxo que entra com o fluxo que sai, conforme equação 2.5:

$$q_x + q_y + q_z = (q_x + \Delta q_x) + (q_y + \Delta q_y) + (q_z + \Delta q_z) \quad (2.5)$$

Substituindo-se as equações 2.3 e 2.4 na equação 2.5 obtém-se a equação do fluxo tridimensional para aquíferos confinados e regime permanente, expresso na equação 2.6:

$$K_x \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2.6)$$

Considerando-se um meio isotrópico e homogêneo, a equação acima se reduz a, normalmente conhecida como Equação de Laplace (SOUZA, 2005):

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \text{ ou } \nabla^2 h = 0 \quad (2.7)$$

2.1.2 Solução da Equação de Laplace

A equação de Laplace quando utilizada para fluxos bidimensionais pode ser reescrita como a seguir:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (2.8)$$

que trata-se de uma equação diferencial parcial de 2ª ordem.

Segundo Saré (2003), em problemas de linhas de fluxo, a solução da equação é constituída por dois grupos de funções, as quais podem ser representadas por duas famílias de curvas ortogonais entre si: as das linhas de fluxo e as das linhas equipotenciais, que se denominam rede de fluxo, como pode ser visto na Figura 2.3. Souza (2005) afirma que as linhas de fluxo representam as trajetórias por onde a água pode fluir através de uma seção da massa do solo, enquanto as linhas equipotenciais correspondem ao lugar geométrico dos pontos com mesma energia ou carga hidráulica.

A construção de redes de fluxo exige a utilização de alguns requisitos básicos (CEDERGREN, 1988):

- As linhas de fluxo e as equipotenciais devem se cruzar formando ângulos retos, constituindo áreas aproximadamente quadradas;
- Deve-se estabelecer, para a massa de solo, condições de contorno na entrada e saída d'água;
- Deve-se definir regras para deflexão das linhas da rede de fluxo por ocasião da passagem de água através de zonas com diferentes coeficientes de permeabilidade;
- Uma mesma quantidade de água flui entre dois canais de fluxo adjacentes.

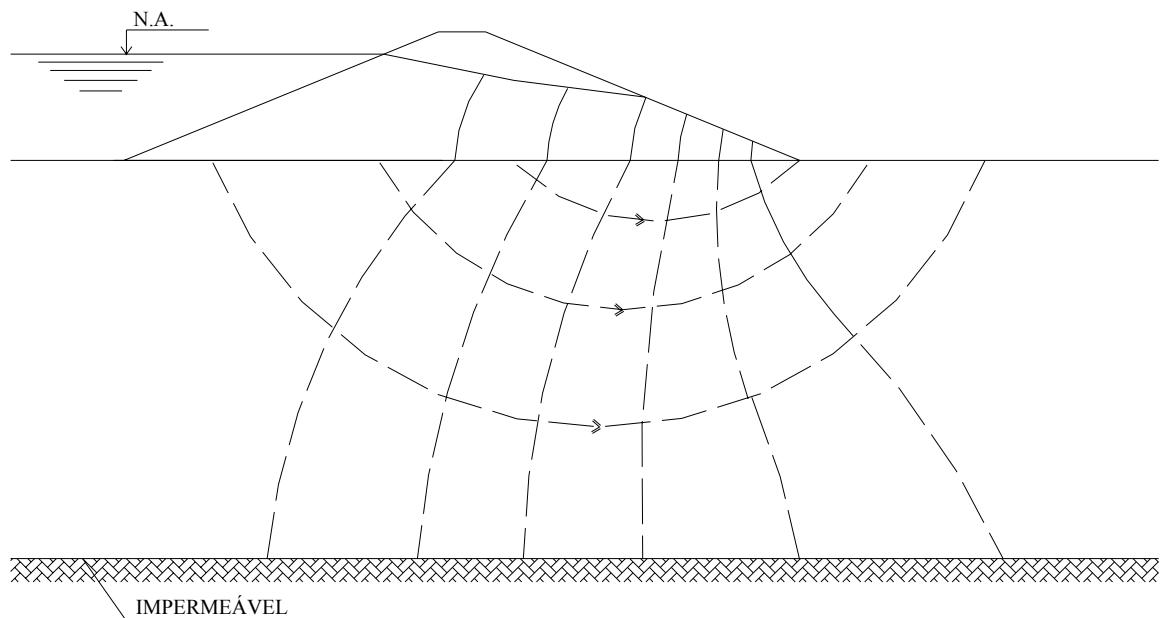


Figura 2.3 – Rede de fluxo pela fundação

De acordo com Saré (2003), quatro tipos de condições de contorno são geralmente encontrados:

- Superfície impermeável: quando um meio é, significativamente, menos permeável que outro, no qual o fluxo ocorre integralmente no meio mais permeável. O vetor velocidade da partícula do fluido percolante é tangente à fronteira, definindo uma linha de fluxo, de forma que as linhas equipotenciais sejam perpendiculares à superfície impermeável;
- Superfície em contato com o líquido: em todos os pontos a carga total é constante. Portanto a superfície em contato com o líquido é uma equipotencial, de forma que as linhas de fluxo sejam perpendiculares a esta superfície;

- Linha freática: é a fronteira superior da região de fluxo não confinado, com carga piezométrica nula em toda sua extensão;
- Superfície livre de fluxo: toda vez que a carga total variar linearmente com a altura não terá uma equipotencial. Por outro lado, estar sendo definida uma superfície livre de fluxo, região para a qual se dirigem os canais de fluxo.

O processo mais utilizado para análise de percolação em barragens envolve o traçado gráfico de redes de fluxo. Porém, existem outras abordagens, que podem ser empregadas para a obtenção da rede e fluxo através do maciço de terra compactada ou fundação (PINTO, 2000): Modelos físicos; Analogias com problemas físicos semelhantes, tais como o potencial elétrico ou o processo de dissipaçāo de calor por condução e Simulações numéricas.

O Método Gráfico é uma solução especial da Equação de Laplace no qual todos os espaços formados pela intercessão das linhas equipotenciais e de fluxo são aproximadamente quadrados. Este é o método mais fácil e mais utilizado. A solução é feita a mão livre, por tentativa e erros. A construção da rede de fluxo requer certa habilidade manual (SHERARD *et al*, 1976).

A utilização de Modelos Físicos, por seu custo e demora na obtenção de resultados, está normalmente associada a objetivos essencialmente didáticos e geralmente consiste em se construir uma caixa com faces laterais de vidro, na qual é lançado o material de aterro, com dimensões em escala reduzida (Figura 2.4).

A seguir, são impostas ao modelo as condições para o inicio da percolação e, através do uso de corantes, posteriormente, pode-se observar as linhas de fluxo resultantes do experimento (SOUZA, 2005).

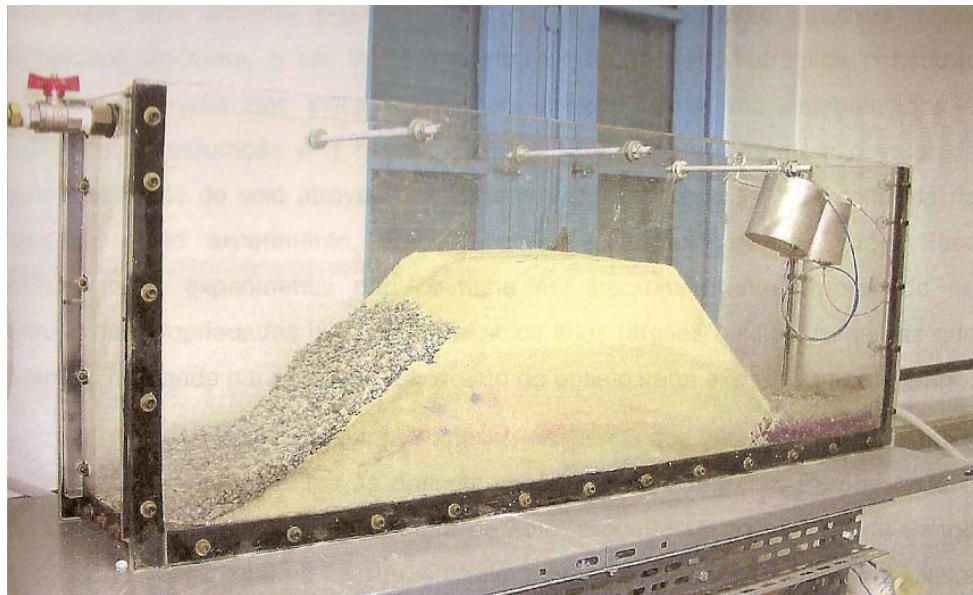


Figura 2.4: Exemplo de montagem de ensaio em modelo físico para a determinação de redes de fluxo em meios porosos (Laboratório de Geotecnia da Puc-Rio, 1998 *apud* SOUZA, 2005),

Os Métodos Analógicos são simplesmente analogias feitas com outros problemas físicos também governados pela equação de Laplace. A equação além de governar a equação do fluxo d'água, também governa a equação do fluxo elétrico.

A utilização de simulações numéricas, baseadas, por exemplo, no Método dos Elementos Finitos (MEF), tem sido largamente difundida no meio técnico e acadêmico ao longo dos últimos anos. Existem, atualmente, diversos programas computacionais disponíveis em universidades ou em âmbito comercial, que oferecem soluções robustas para o problema de fluxo em meios porosos, incluindo condições de anisotropia ou heterogeneidade, fluxo permanente ou transiente, fluxo em meio saturado ou não saturado, entre outros (SOUZA, 2005).

A Figura 2.5 apresenta um exemplo de rede de fluxo obtida através de um programa computacional que faz análises através dos métodos dos elementos finitos.

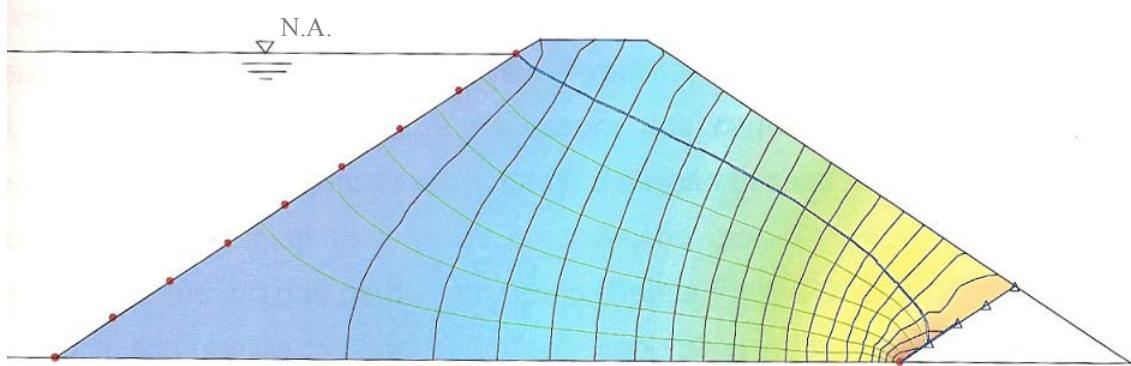


Figura 2.5: Exemplo de rede de fluxo obtida por meio de análise com o MEF (SOUZA, 2005)

2.1.3 Coeficiente de Permeabilidade

A permeabilidade de um meio poroso pode ser interpretada como a facilidade ou dificuldade que o meio oferece à passagem de um fluido por seus poros ou vazios (CRUZ, 1996). Enquanto que o coeficiente de permeabilidade é definido como a velocidade de descarga de água, através de uma unidade de área, por unidade do gradiente hidráulico, que, além de depender das propriedades do meio, também depende da viscosidade e densidade do fluido (USACE, 1986).

Em maciços rochosos, o regime de escoamento é governado pela permeabilidade da rocha matriz e pela condutividade hidráulica das fraturas ou descontinuidades, ou seja, a resistência ao fluxo oferecida por meio confinado (SOUZA, 2005).

Ainda segundo Souza (2005) diversos são os fatores que influenciam a permeabilidade dos maciços fraturados, tais como: permeabilidade da rocha matriz, espaçamento entre descontinuidades, abertura e preenchimento das descontinuidades, tipo de material de preenchimento e rugosidade das paredes das fraturas.

Maciços rochosos costumam apresentar geometrias normalmente muito complexas, onde as descontinuidades ocorrem de forma anisotrópica e heterogênea. Desta forma, o uso de modelos matemáticos ou físicos para a análise do fluxo em maciços fraturados se justifica somente se houver disponibilidade suficiente de informações acerca dos parâmetros *in situ*, (LOUIS, 1972 *apud* SOUZA, 2005).

De acordo com Quadros (1986) *apud* Souza (2005), a análise da permeabilidade dos maciços rochosos requer, em primeiro lugar, que seja definido se o meio em estudo deverá ser tratado de forma contínua ou descontínua.

Em uma abordagem descontínua, pode-se representar, a permeabilidade média equivalente de um maciço rochoso, como uma função da permeabilidade da rocha; condutividade hidráulica, abertura e espaçamento da fratura, conforme a equação 2.9, (LOUIS, 1972 *apud* SOUZA, 2005).

$$K_{MR} = \frac{a}{b} \cdot k_F + k_M \quad (2.9)$$

Em que:

K_{MR} : permeabilidade do maciço rochoso [LT^{-1}];

a: abertura das fraturas [L];

b: permeabilidade das fraturas [LT^{-1}];

k_F : condutividade hidráulica das fraturas [LT^{-1}];

k_M : permeabilidade da matriz rochosa [LT^{-1}].

A abordagem contínua refere-se às situações em que a parcela essencial do escoamento se dá por intermédio de uma extensa rede de fraturamento, e, nesses casos, os blocos rochosos delimitados pelas fraturas podem ser, por analogia, associados aos grãos sólidos impermeáveis de um meio poroso. Assim, a análise de fluxo em tais situações pode considerar o maciço rochoso como um meio “contínuo”, por intermédio do conceito de permeabilidade equivalente, (QUADROS, 1986 *apud* SOUZA, 2005).

2.2 Controle do fluxo pela fundação

A escolha dos métodos de controle de percolação, utilizados em fundações rochosas, depende de um número de fatores, podendo-se citar a caracterização da fundação e a identificação da trajetória potencial de percolação como essenciais. Antes da escolha de qualquer método de controle de percolação, a área deve ser completamente explorada e testada para assegurar que o método escolhido será aplicado para as condições gerais e assim como para condições locais. Em muitos casos, a combinação dos métodos pode ser utilizada com grande vantagem para fundações rochosas. O uso de diferentes métodos de controle torna-se particularmente

importante quando existe mudança na percolação característica da fundação, ou mudança dessa característica entre as ombreiras e a fundação (USACE, 1986).

A percolação pode ser interrompida ou controlada por drenagem sempre que possível. A segurança, contudo, deve ser um fator governante para selecionar o método de controle. Nota-se que existe a possibilidade de medidas de controle causarem um aumento substancial na taxa de percolação em vez de diminuição. Tal aumento é normalmente acompanhado de reduções de subpressões e são, portanto, desejáveis se o aumento da percolação não produzir efeitos prejudiciais. Na escolha final do método de percolação, ou métodos, fatores econômicos devem ser reconhecidos e avaliados (USACE, 1986).

No que se refere à hidrogeotecnia, esses tratamentos da rocha se resumem, basicamente, em dois tipos: cortina de injeção e drenagem. Geralmente, as injeções constituem-se de uma ou mais linhas de furos dispostos ao longo do pé de montante da barragem, igualmente espaçados e injetados com calda de cimento (PORTO E, 2002).

Para Osako (2002) os objetivos principais do tratamento da rocha de fundação podem ser resumidos em cinco: melhoria das qualidades mecânicas do maciço, seja de aumento da resistência ou de diminuição da deformabilidade; redução da permeabilidade da fundação; homogeneização de fluxos pela fundação; controle das subpressões e prevenção do carreamento de solos pela fundação.

2.2.1 Cortina de drenagem

Segundo USACE (1994) o método que possui o menor custo para aumentar a estabilidade de uma barragem é o de drenagem de água das fraturas. Isto pode ser obtido por drenos horizontais perfurados na face e furos de bombeamento vertical, atrás da face, ou galerias de drenagem.

As cortinas de drenagem são constituídas de furos, igualmente espaçados e dispostos logo a jusante da cortina de injeção profunda e têm como objetivo drenar as águas que fluem através do maciço e aliviar as subpressões impostas pela carga hidráulica do reservatório, ver Figura 2.6, (PORTO E., 2002).

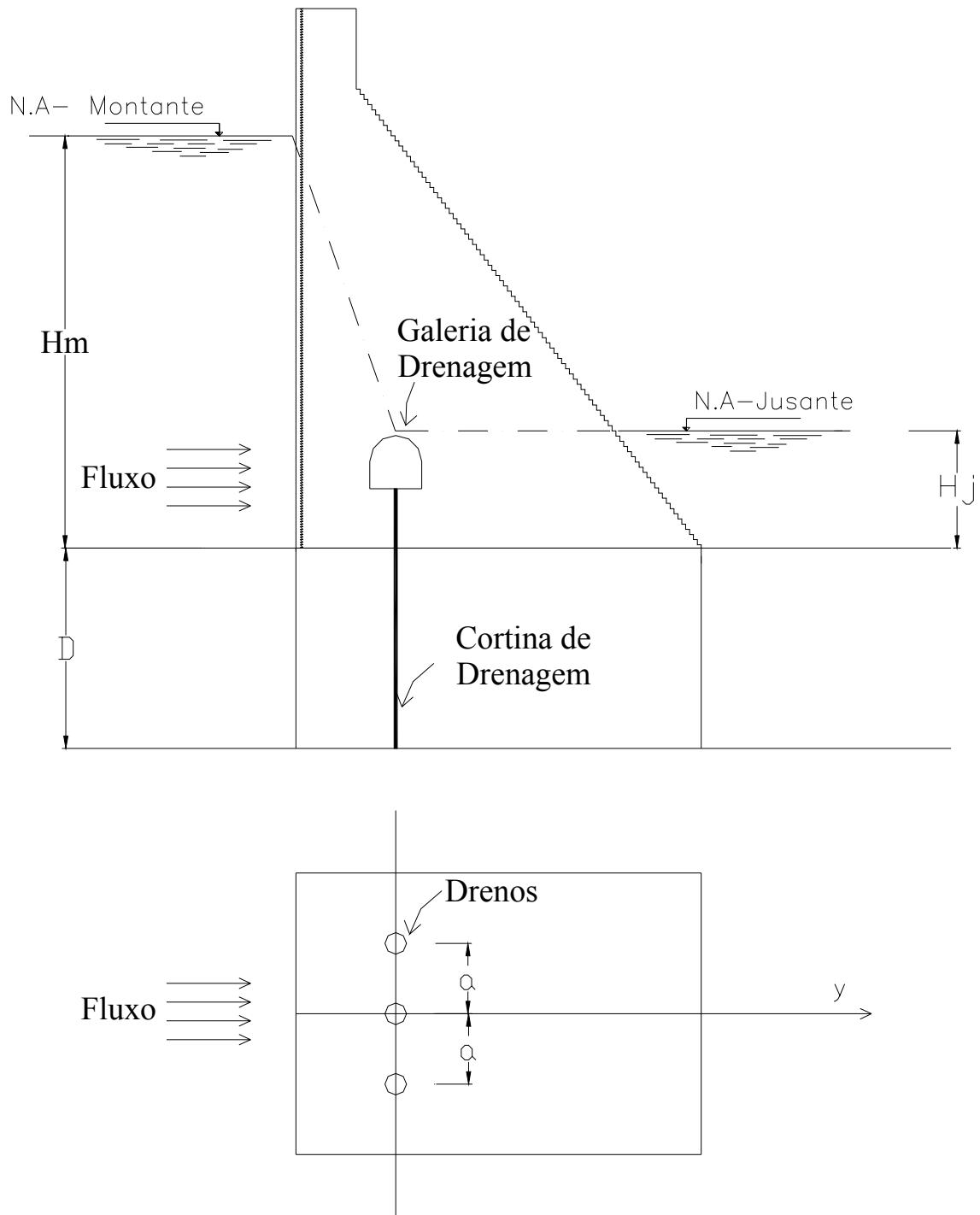


Figura 2.6 – Barragem de Concreto com uma galeria de drenagem e uma linha de drenos. Em que, H_m : Nível d'água à montante, H_j : Nível d'água à jusante, D : profundidade dos drenos, a : espaço entre os drenos (adaptado de SILVA FILHO e GAMA, 2003).

A sua função, portanto, é aumentar a estabilidade e a segurança destas estruturas. A drenagem de fundação constitui-se no meio mais efetivo de redução da subpressão, fornecendo um

caminho direto e altamente permeável para coleta e condução da água de percolação (OSAKO, 2002).

Ainda segundo Osako (2002) o projeto de drenagem profunda deverá incluir a disposição das linhas de drenagem, o diâmetro dos furos, o espaçamento, a profundidade, a inclinação e o tipo de perfuração.

A drenagem profunda deverá estar diretamente associada à instrumentação de auscultação da estrutura, seja pela medição direta das vazões coletadas pelo sistema, seja pelos níveis de subpressão resultantes na fundação, já que são dela diretamente dependentes.

Na prática do funcionamento dos sistemas de drenagem observa-se que os drenos freqüentemente se tornam parcialmente bloqueados com incrustação. A colmatação devida a depósitos de carbonato de cálcio é a causa mais comum e importante da obstrução de drenos. Com o entupimento dos drenos a subpressão aumenta. O tempo que um dreno leva para entupir depende de um número grande de parâmetros tais como minerais solúveis na fundação e no concreto, velocidade do fluxo, pH, etc.

O entupimento de drenos é usualmente detectado pelas observações visuais (indicadores qualitativos), e/ou pelos exames de subpressão e dados de monitoramento de infiltração (indicador quantitativo). Um crescimento gradual na subpressão acompanhado por um decréscimo na infiltração dos drenos é muito provavelmente uma indicação de que os drenos estão se entupindo.

A partir dos estudos desenvolvidos em dez países europeus, o coordenador do "European Working Group on Uplift Pressures under Concrete Dams" relata que "...a limpeza de drenos é raramente executada de acordo com um programa de manutenção pré-definido. Informações coletadas de diversas barragens indicaram uma faixa grande de periodicidade entre limpeza de drenos, que varia de 'anual' a 'nunca'" (RUGGERI, 2001 *apud* OSAKO, 2002).

Guimarães (1988) *apud* Levis (2006) comenta que é indispensável que os drenos interceptem as fraturas susceptíveis de conduzir água e que a cota de esgotamento do dreno seja a menor possível, pois ela condiciona os potenciais impostos ao maciço. Quanto menores estas cotas,

maiores as reduções de subpressão proporcionadas e maiores também serão as vazões afluentes do sistema.

2.2.2 Cortina de Injeções

As cortinas de injeções são normalmente projetadas para criar uma zona estreita de baixa condutividade hidráulica em fundações originalmente permeáveis (SOUZA, 2005). A cortina de injeção tem por objetivo criar uma massa sólida através da qual a água não flua. Contudo, a vedação de todas as fraturas não é obtida somente pela injeção, sendo difícil determinar a eficácia da cortina de injeção até que esta entre em operação. Para a USACE (1994) medidas de mudança em quantidade de injeção de “grout” (calda de cimento) são normalmente utilizadas para estimar a eficácia da operação de injeção.

Hsu, Re e Ono (1970) *apud* Levis (2006) afirmam que os processos de tratamento por meio de injeções, de fundações e ombreiras, visam aos seguintes objetivos: reduzir a perda d’água por percolação; controlar a pressão d’água dentro do maciço da fundação e no contato estrutura – fundação da barragem; melhorar a resistência e as propriedades elásticas das rochas fraturadas e obter informação de maiores detalhes das anomalias da fundação pela observação dos furos de injeção.

Usualmente é executada uma única linha de furos ao longo do eixo da cortina, podendo ainda ser executadas 3, 5 ou mais linhas em grandes barragens ou em situações desfavoráveis (SOUZA, 2005). É freqüente efetuar uma linha central que vai a maiores profundidades e duas linhas de furos mais rasos, a montante e a jusante da central (LEVIS, 2006). Estes furos devem ser dispostos ao longo do pé de montante da barragem, estarem igualmente espaçados e injetados com calda de cimento. A utilização de outros materiais como resina orgânica é menos comum, devido ao alto custo dos produtos químicos (PORTO E., 2002). A prática mais comum é adotar caldas grossas na proporção água:cimento (0,7:1,0 a 0,5:1,0) e pressões baixas (0,15 a 0,25 kg/cm²/m) (CRUZ, 1996).

Segundo Marques Filho (1986) *apud* Levis (2006) as injeções podem ser efetuadas tanto em rochas como em solos, variando, em cada caso, as finalidades e, principalmente, os métodos de execução. Nas rochas, tratam-se, predominantemente, os maciços fraturados e apenas

raramente os de tipo essencialmente intergranular, como os de arenito, a não ser quando fraturados.

Os furos em uma cortina costumam, normalmente, serem executados em seqüência, tal que permita a realização de ensaios de perda d'água antes da realização da injeção propriamente dita, em uma determinada zona do maciço rochoso, de modo a permitir o conhecimento das características iniciais de estanqueidade da fundação (SOUZA, 2005).

Segundo Cruz (1996) a permeabilidade média residual dos maciços injetados tem ficado na ordem de 10^{-4} cm/s.

As injeções são necessárias e devem ser bem estudadas. Elas não têm como função imediata diminuir as subpressões, mas, ao longo do tempo, elas têm um efeito de diminuição do fluxo d'água, e, consequentemente, provocam uma perda de carga maior, diminuindo assim os efeitos da subpressão (OSAKO, 2002).

2.2.3 Drenagem X Injeções

Durante a primeira “Rankine Lecture”, Casagrande (1961) defendeu o uso apenas de drenos para o controle da subpressão, porém observou mais discussões em publicações sobre as cortinas de injeções que sobre os furos de drenagem. Mostrou também que os drenos são muito mais espaçados em relação aos furos de injeções e que geralmente sua profundidade é cerca da metade daquela da cortina, este fato certamente torna o custo dos drenos pequeno comparado com o da cortina de injeção.

Ainda segundo Casagrande (1961) as publicações afirmam que o propósito da cortina de injeções é controlar a quantidade de percolação por baixo da barragem, e o da drenagem é aliviar a subpressão. Casagrande afirma que não consegue compreender como estes dois fatores são separados desta maneira tão simples, uma vez que uma cortina de injeções que promove a redução substancial na percolação também deverá reduzir as subpressões à jusante da mesma.

Sabarly (1968) *apud* Porto E. (2002) foi um importante aliado do Professor Casagrande ao mostrar que numa barragem estanque fundada em terreno homogêneo e contínuo, o efeito de

uma cortina de injeções, mesmo perfeita, a menos que possua uma profundidade considerável, praticamente não é notado nas medidas de subpressões na base da barragem. Sabarly fez uma análise da subpressão de uma barragem de gravidade, na qual concluiu que o terreno pode ser mais ou menos permeável, mas a pressão será a mesma nos mesmos pontos, tal que a rede de drenagem terá os mesmos efeitos das subpressões, variando somente a vazão nos drenos.

Para Bourdeaux (1979) em terrenos muito permeáveis, a cortina de injeção é praticamente indispensável, mas um sistema de drenagem profunda pode ser reduzido (observando as subpressões com piezômetros). Em terrenos pouco permeáveis, a cortina de injeção é inútil e pode ser dispensada a condição de se dimensionar um excelente sistema de drenagem. Em terrenos mediamente permeáveis, o problema só poderá ser resolvido com sucesso após uma análise cuidadosa de todos os fatores envolvidos.

Mais recentemente tem-se optado por conciliar as duas técnicas, a fim de aumentar a segurança da obra. Segundo a USACE (1995a) para a drenagem ser controlada economicamente, é necessária a execução de uma barreira artificial. Já para Cruz (1996), o sistema de drenagem das fundações é de fundamental importância no controle do fluxo e a vedação deve ser considerada como uma segurança a mais, e em nenhum caso como a única forma de segurança.

Recomenda-se que não se trata de suprimir, sistematicamente, a cortina de injeção e de se executar sempre sistemas de drenagem considerável. A arte do projetista consiste em ter profundo conhecimento dos fenômenos físicos e condicionantes geológicos envolvidos para adaptar, para cada caso, os princípios gerais sem subestimar ou superestimar um em relação aos outros (PORTO E., 2002).

2.3 Subpressões

As subpressões têm uma forte influência, tanto na estabilidade, quanto no custo da estrutura, sua determinação é provavelmente a tarefa mais importante do engenheiro responsável pelos aspectos geotécnicos do projeto de uma barragem (SILVA FILHO e GAMA, 2003). Os maiores desastres de barragens de gravidade ocorreram por resistência inadequada ao

movimento horizontal, isto é, ruptura por cisalhamento na fundação. Por isso os efeitos da subpressão devem ser reconhecidos e estudados criteriosamente (OSAKO, 2002).

Para melhor compreensão do conceito de subpressão é necessário o entendimento de poro-pressões. Segundo Pinto (2000), a água contida no interior dos vazios, abaixo do nível d'água, está sob pressão, que independe da porosidade do solo; depende só de sua profundidade em relação ao nível freático, esta pressão da água num plano qualquer é denominada como pressão neutra ou poro-pressão.

Segundo Silveira (2006), em instrumentação de barragens é importante diferenciar poro-pressões medidas no aterro da barragem daquelas medidas na fundação. Enquanto as primeiras são designadas de poro-pressões propriamente ditas, as observadas na fundação recebem a designação de subpressão, em decorrência de atuarem invariavelmente de baixo para cima.

Subpressão também pode ser definida como o esforço que é exercido em uma estrutura ou sua fundação, no sentido ascendente, isto é, de baixo para cima, em função da percolação de água através dos maciços de concreto, rochoso ou de terra. Na fundação, a subpressão atua no sentido de reduzir o peso efetivo da estrutura sobrejacente e, em consequência, diminuir a resistência ao cisalhamento de planos potenciais de deslizamento (OSAKO, 2002)

As barragens de concreto têm a sua estabilidade assegurada pelo peso e pela largura da sua base, devidamente adequados à resistência da fundação. Os principais esforços atuantes são o peso do bloco (P_c), a força resultante das pressões de água no paramento de montante (H_M), a força resultante das pressões de água no paramento de jusante (H_J), o peso da água sobre o paramento de jusante (P_{AJ}) e a subpressão (U), conforme mostrado na Figura 2.7. Os três primeiros são evidentes, designadas como forças resistentes, sendo, então, as duas últimas as desestabilizadoras que podem originar dois mecanismos principais de ruptura: tombamento e deslizamento (OSAKO, 2002).

Devido a esses fatores, as subpressions são de relevante importância na análise de condições de estabilidade da barragem e devem ser observadas nos principais horizontes da fundação (SILVEIRA, 2006): contato solo-rocha ou saprolito-rocha; níveis e camadas mais permeáveis da fundação e proximidades da base da barragem.

As subpressões tanto são função das permeabilidades dos materiais de fundação quanto da geometria do sistema de drenagem superficial da barragem (SILVA FILHO e GAMA, 2003).

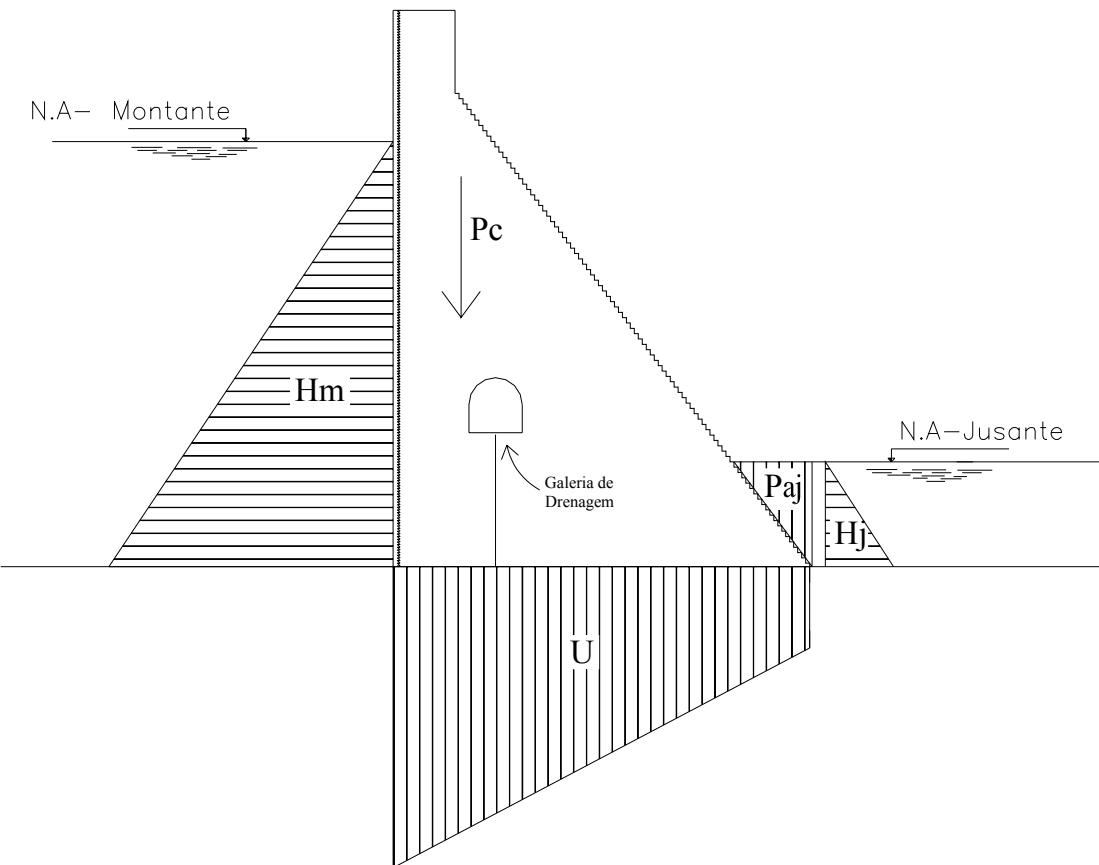


Figura 2.7 – Forças que atuam na seção típica de uma barragem de concreto (adaptado de MARQUES FILHO E GERALDO, 1998 apud OSAKO, 2002)

2.3.1 Controle das subpressões

A drenagem é um dos meios mais eficientes para assegurar coeficientes adequados para as estruturas de concreto de uma barragem, além de verificar os reais níveis piezométricos na fundação (SILVEIRA, 2003).

A instalação de piezômetros também objetiva determinar pressões de terra ou rocha, ou subpressões em contatos com estruturas de concreto (CRUZ, 1996).

A distribuição das subpressões nas fundações de uma barragem deve ser verificada através de medidas de subpressões efetuadas em piezômetros convencionalmente distribuídos em toda a extensão da fundação. Para a avaliação da eficiência de um dispositivo de vedação, é necessário instalar piezômetros à montante e à jusante do mesmo; a diferença das grandezas medidas atestará a eficiência do sistema e a segurança da obra (BOURDEAUX, 1979).

Segundo Silveira (2003), a análise das subpressões na fundação das barragens de concreto, medidas após certa estabilização, que normalmente ocorre alguns meses após o término do enchimento do reservatório, pode ser realizada tendo por base os seguintes critérios:

- Estudar a variação temporal das subpressões em função do N.A. (nível d'água) de montante, N.A. de jusante e, eventualmente, da temperatura ambiente, para o caso dos piezômetros de interface concreto-rocha.
- Comparar as subpressões estabelecidas pelos critérios de projeto, para a condição de drenos operantes e inoperantes.
- Comparar com as subpressões medidas em posições similares, em outros blocos da barragem e em feições geológicas semelhantes.
- Comparar com as subpressões medidas em outras barragens do mesmo tipo e, preferencialmente do mesmo porte.
- Comparar com as subpressões fornecidas por modelos matemáticos que permitam estudar as condições de percolação pela fundação.

As subpressões na fundação das barragens de concreto devem ser sempre analisadas de forma integrada com as vazões de drenagem no trecho em questão, visto que uma elevação de subpressões, associada a uma redução de vazões, pode constituir indícios de perda de eficiência do sistema da drenagem da fundação, vindo a requerer uma investigação minuciosa do problema e, eventualmente, a implementação de obras de reparo (SILVEIRA, 2003).

2.3.2 Critérios de Projeto

O United States Army Corps of Engineers (USACE), o United States Bureau of Reclamation (USBR) e o Federal Energy Regulatory Comission (FERC) desenvolveram e mantêm, cada qual, uma norma própria para avaliar a estabilidade de barragens de gravidade. As três agências têm procedimentos de engenharia baseados no uso da análise convencional de equilíbrio de um diagrama de corpo livre, de uma seção de barragem gravidade. As principais

diferenças entre os critérios de subpressão para o USACE e o USBR são as equações utilizadas para calcular a subpressão (OSAKO, 2002).

Nos casos onde não existirem drenos ou eles forem considerados inoperantes, a distribuição das subpressões é a mesma para ambas, correspondendo no lado de montante à pressão total do reservatório $H_m \cdot \gamma$ e à pressão total do canal de fuga no paramento de jusante $H_j \cdot \gamma$, em que γ é o peso específico da água, ver Figura 2.8. Nos casos onde existirem drenos de fundação e estes forem operantes, a distribuição de subpressão será um pouco diferente no modo de ver das duas agências.

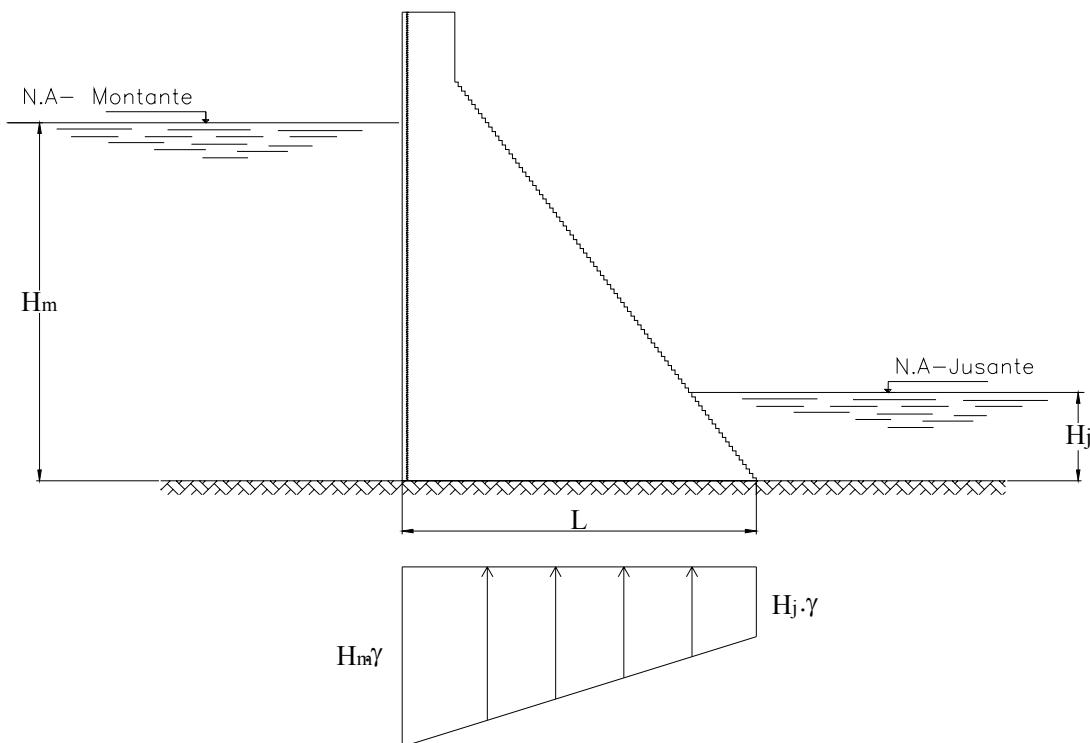


Figura 2.8 – Distribuição da subpressão sem drenagem na fundação (adaptado de Osako, 2002).

Segundo o USACE (1995a), os critérios para a construção dos diagramas de subpressão são:

- Assumir a eficiência dos drenos como 0,5 (novos projetos);
- O diagrama de subpressão é calculado segundo a equação 2.10 para o caso da cota do piso da galeria de drenagem está acima do nível do canal de jusante, conforme esquema mostrado na Figura 2.9, ou conforme a equação 2.11 caso este piso esteja abaixo do nível de jusante, conforme esquema mostrado na Figura 2.10.

$$H_1 = K \cdot \left[(H_m - H_g) \cdot \frac{(L - X)}{L} \right] + H_g \quad (2.10)$$

Em que,

H_1 : altura do nível d'água na linha dos drenos;

H_m : altura do nível d'água à montante;

H_j : altura do nível d'água à jusante;

H_g : altura do piso da galeria de drenagem;

E: drenagem efetiva, expressa em decimal;

K: 1-E;

X: distância do paramento de montante o dreno;

L: distância do paramento de montante ao de jusante.

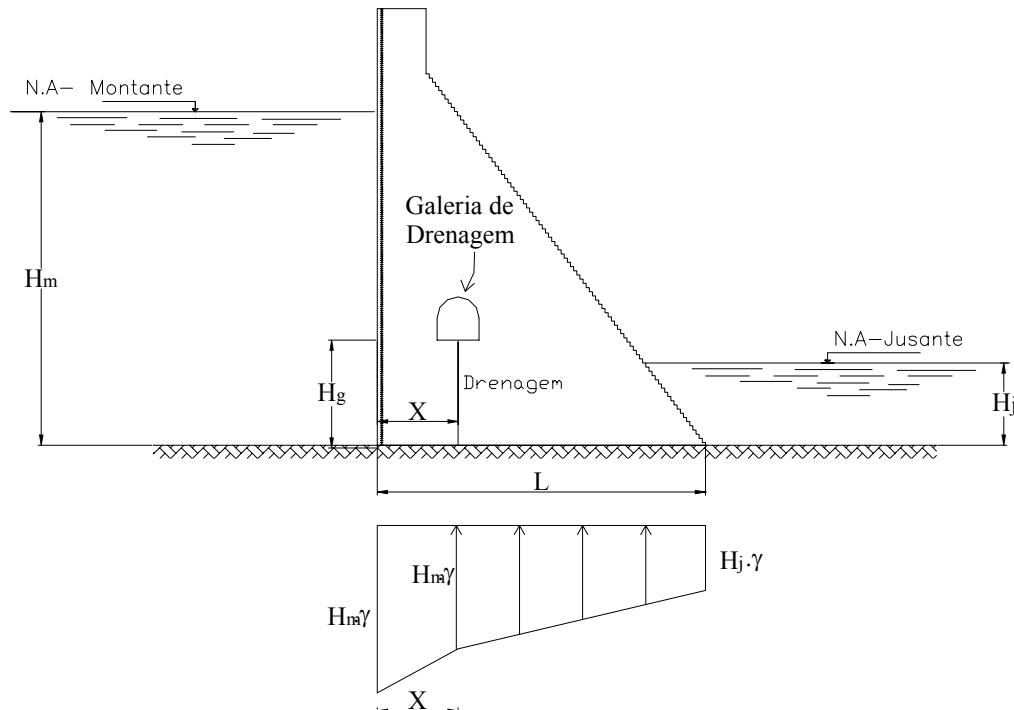


Figura 2.9 – Diagrama de subpressão com piso da galeria de drenagem situado acima da cota de jusante do canal do rio (adaptado de USACE, 1995a).

$$H_1 = K \cdot \left[(H_m - H_j) \cdot \frac{(L - X)}{L} \right] + H_j \quad (2.11)$$

Enquanto o USBR estabelece os critérios de diagrama de subpressão abaixo (OSAKO, 2002):

- Eficiência de 0,66 (novos projetos);
- O diagrama de pressão é calculado de forma diferenciada para a localização da cota do piso da galeria de drenagem em relação à cota de jusante, conforme mostra as equações 2.12 e 2.13.

Para altura da cota de jusante maior que altura do piso da galeria ($h_j \geq h_g$):

$$H_d = H_j + 1/3(H_m - H_j) \quad (2.12)$$

Para altura da cota de jusante menor que altura do piso da galeria ($h_j \leq h_g$):

$$H_d = H_g + 1/3(H_m - H_j) \quad (2.13)$$

Em que:

H_d : subpressão na linha dos drenos;

H_m : altura do nível d'água à montante;

H_j : altura do nível d'água à jusante;

H_g : altura do piso da galeria de drenagem.

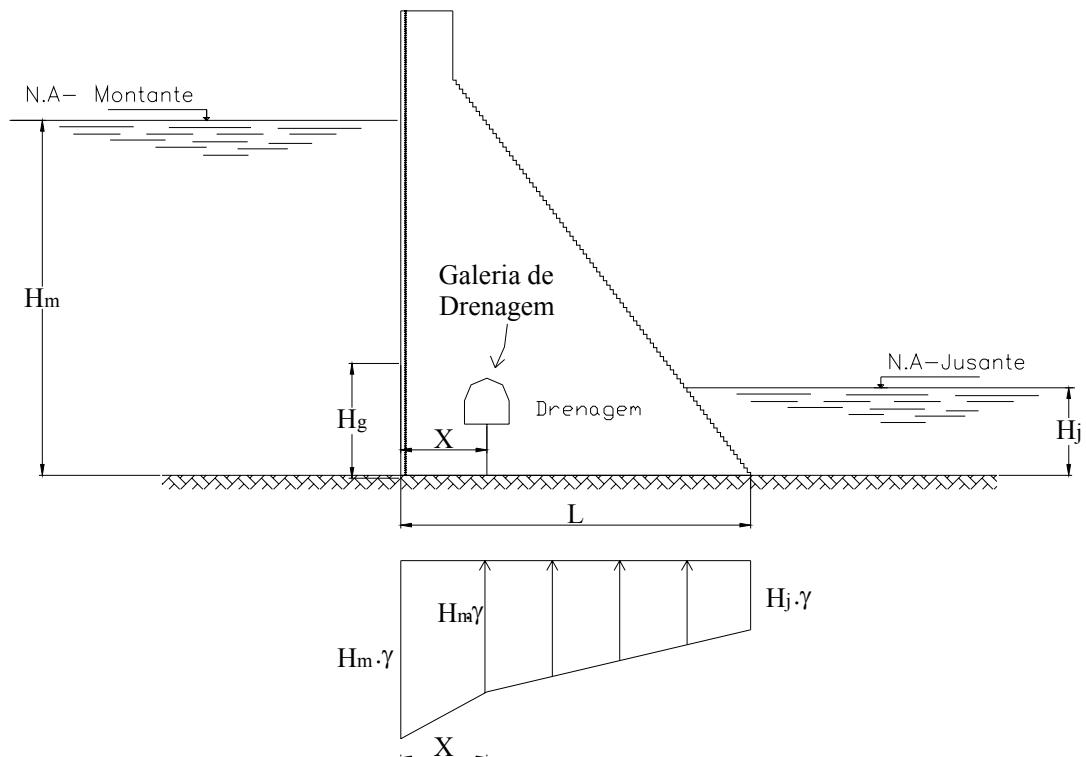


Figura 2.10 – Diagrama de subpressão com piso da galeria de drenagem situado abaixo da cota de jusante do canal do rio (adaptado de USACE, 1995a).

No Brasil, é comum e amplamente aplicado nos projetos, o diagrama recomendado pelo USBR, no qual, o critério do USBR (1987), define o valor da subpressão na linha dos drenos igual ao nível de jusante mais 1/3 da diferença da carga hidráulica entre o nível do reservatório e de jusante, o diagrama de subpressões neste caso está apresentado na Figura 2.11.

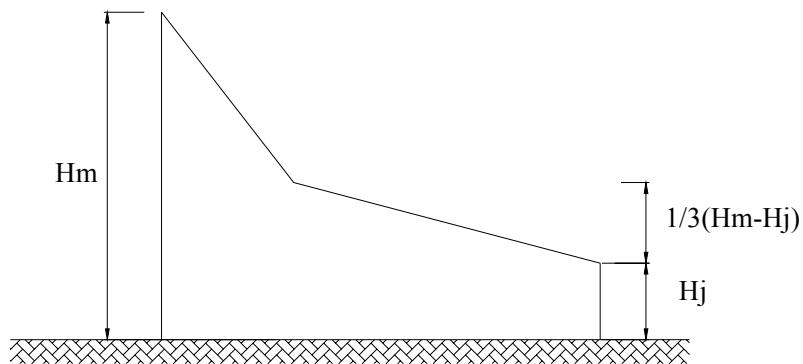


Figura 2.11 – Critério de subpressão do United States Bureau of Reclamation (adaptado de USACE, 1986).

2.3.3 Terremotos

A avaliação da segurança sísmica de barragens é uma preocupação crescente em vários países onde muitas barragens foram construídas em áreas de atividade sísmica (PEDROSO et al., 2005). Porque falhas em tais estruturas podem ter consequências desastrosas na sua vida e seu funcionamento (CHOPRA, 1978).

O Brasil, apesar de ser considerado, em princípio, um país poupadão (isento) de grandes tremores de terra, cada vez mais registros sísmicos significativos são repertoriados pelo Observatório Sismológico da UnB (Universidade Nacional de Brasília) (PEDROSO et al., 2005).

Os sismos que ocorrem no Brasil são de caráter superficial, com profundidades inferiores a 20 km e magnitudes tão baixas que raramente são sentidas além de um raio de 50 km (GONÇALVES, 1996).

Segundo Matos (2002) os sismos podem ocorrer em uma barragem por duas causas:

- Naturais, causados pelo deslocamento de placas tectônicas e atividades vulcânicas e

- Induzidos, causados pela criação do reservatório, que altera as condições estáticas das formações geológicas, do ponto de vista mecânico (peso da massa d'água) e do ponto de vista hidráulico. É um fenômeno dinâmico, resultante das novas forças induzidas, e que passam a interferir sobre o regime de forças pré-existentes.

O caso da Usina Emborcação, localizada no estado de Minas Gerais, em que os sismógrafos instalados, antes do enchimento do reservatório, não detectaram atividade sísmica, porém, o sistema sismológico instalado pouco antes do enchimento do reservatório registrou microssismos (localizados no interior do reservatório), logo após o enchimento do lago. Os sismos foram considerados como induzidos pelo reservatório, o que ainda não foi esclarecido (GONÇALVES, 1996).

A disponibilidade de novos registros de terremoto próximos a locais em que se situam barragens ao redor do mundo, em conjunto com avanços em sismologia e observações do comportamento sísmico das estruturas, tem mostrado que um forte tremor do solo pode induzir uma amplificação dinâmica significativa capaz de provocar danos estruturais em barragens de concreto (PEDROSO *et al.*, 2005).

Este fator pode comprometer a estabilidade de uma barragem, que, segundo JAVANMARDI *et al.* (2005), esta é uma das principais preocupações em barragens de gravidade durante abalos sísmicos, por isso a necessidade de investigar o efeito dinâmico das variações de subpressão em estabilidade em barragens de gravidade.

2.4 Instrumentação de Barragens

O interesse crescente pela segurança de barragens tem levado, em um número apreciável de países, à implementação de normas e critérios específicos para o projeto, construção, observação, inspeção e acompanhamento da operação de barragens e outras obras da engenharia geotécnica. Neste contexto, o monitoramento hidráulico-mecânico de barragens através da instalação de um adequado sistema de instrumentação desempenha um papel fundamental na avaliação do comportamento destas estruturas, tanto durante o período de construção quanto no regime de plena operação (GUTIÉRREZ, 2003).

A instrumentação é de grande utilidade quando, convenientemente, projetada, instalada e

interpretada, não só para a avaliação de segurança de um empreendimento, em todas as suas fases, mas também para verificação das hipóteses adotadas em projeto, objetivando tornar as obras mais econômicas, dentro das necessárias condições de segurança (CRUZ,1996).

Para o USACE (1995b), os principais objetivos da instrumentação geotécnica podem ser agrupados dentro de três categorias: avaliações analíticas, previsão do desempenho futuro, avaliações legais e desenvolvimento e verificação de futuros empreendimentos. Em que:

- As avaliações analíticas consistem na análise dos dados obtidos a partir da instrumentação geotécnica para verificar parâmetros de projeto, hipóteses de modelagem e técnicas de construção, analisar eventos adversos, e verificar se o desempenho é satisfatório;
- As previsões de desempenho futuro referem-se aos dados de instrumentação, que podem informar sobre o desempenho da obra. Tais previsões podem indicar desempenho satisfatório em condições normais de operação, além de mostrar o potencial de risco para futuros desastres;
- O desenvolvimento e verificação de futuros empreendimentos se referem à análise do desempenho de uma barragem tanto na etapa de construção quanto na fase de operação, com o propósito de aperfeiçoar o estado d'A arte do projeto e da construção de barragens.

Para Saré et al. (2003), o monitoramento de barragens assume diferentes características e finalidades dependendo da etapa da obra que se deseja analisar. Durante a construção, os instrumentos fornecem dados que possibilitam avaliar o comportamento da obra e, com isso, corrigir e/ou aprimorar determinadas premissas de projeto. Nesta fase, os principais objetivos da instrumentação apontam para a verificação de hipóteses, critérios e parâmetros de projeto, verificação da adequação dos métodos construtivos, etc.; com isso, visa-se executar um projeto mais econômico e seguro. Já ao longo de sua vida útil, o monitoramento pode detectar variações nas condições de segurança das barragens, como resultado de processos de envelhecimento e/ou alterações ambientais.

Os tipos e modelos de instrumentos deverão ser escolhidos de acordo com a precisão que se pretende obter. Essa escolha deverá ser extremamente criteriosa lembrando-se que precisão maior envolve instrumentos mais sofisticados, mais caros, com vidas úteis menores, mais delicados de serem instalados e operados e que exigem uma equipe treinada. Estes

instrumentos deverão ser posicionados nos locais mais críticos, no que se refere ao desenvolvimento dos parâmetros a serem medidos (BOURDEAUX, 1979).

A instrumentação mais comumente instalada nas barragens consiste de pontos superficiais da medição do recalque e de movimentos horizontais e verticais, inclinômetros, piezômetros e dispositivos de medição de percolação (ELETROBRÁS, 1987).

As barragens de concreto, que são estruturas de grande responsabilidade e que necessitam de monitoramento do seu desempenho, utilizam-se diversos equipamentos na instrumentação de barragens para medir tensões, temperatura, deformação, fissuração, subpressão, percolação e deslocamento (MORAIS *et al.*, 2003). Os aparelhos utilizados neste monitoramento são: termômetros, piezômetros de maciço, medidores de junta e extensômetros múltiplos, piezômetros de fundação, medidores de vazão, medidores triortogonais de juntas, pêndulos diretos e marcos superficiais, entre outros (LACERDA *et al.*, 2003).

Tendo em vista a grande diversidade de tipos de instrumentos e de sensores empregados para a realização de suas leituras, destacam-se os instrumentos utilizados para monitorar o comportamento do CCR: extensômetros múltiplos, marcos superficiais (medição de recalque); pêndulos diretos, marcos superficiais (medição de deslocamentos horizontais da crista); pêndulos invertidos, roseta de extensômetros múltiplos, inclinômetros fixos, fita de cisalhamento (medição de deslocamentos cisalhantes da fundação); medidores triortogonais (medição de deslocamentos diferenciais entre blocos); extensômetros de superfície, indicadores de movimento (medição de deslocamentos do maciço rochoso nas ombreiras); método da almofada plana, método da ruptura hidráulica (medição de tensões); medidor triangular de vazão, medidor trapezoidal de vazão, calha Parshall (medição de vazão de drenagem); drenos e piezômetros (medição de subpressões) (SILVEIRA, 2003).

2.4.1. Piezômetros

O acompanhamento piezométrico do maciço é absolutamente indispensável, uma vez que os fatores de segurança obtidos a partir de análises baseadas sobre resultados de ensaios de laboratório podem ser reavaliados em função das pressões neutras lidas na barragem (BOURDEAUX, 1979).

Dentre os vários tipos de piezômetros disponíveis no mercado, destacam-se o piezômetro de tubo aberto, o piezômetro pneumático, o piezômetro hidráulico, o piezômetro elétrico de resistência e o piezômetro elétrico de corda vibrante (CRUZ,1996).

Segundo Dunncliff (1988) *apud* Souza (2005), não existe um consenso sobre o melhor instrumento utilizado para medição de poro-pressões. Ainda segundo Souza (2005) o piezômetro de tubo aberto, também chamado de piezômetro do tipo Casagrande, é o mais simples e o mais utilizado de todos os piezômetros (provavelmente pela facilidade de execução, baixo custo e solidez nos resultados). Porém, segundo Silveira (2003) recentemente, com a necessidade de leitura remota dos instrumentos, quando se deseja proceder à automação da instrumentação, passou-se a utilizar os instrumentos dotados de transdutores de corda vibrante, que apresentam vantagem de grande sensibilidade e precisão, porém com vida útil de 30 anos.

O Piezômetro de tubo aberto, conforme a Figura 2.12 é composto de um tubo, o qual, em sua extremidade inferior, possui um elemento cerâmico ou de plástico poroso, podendo este elemento ser substituído por furos no próprio tubo do piezômetro. O tubo é colocado em furo (normalmente furo de sondagem) no solo até a profundidade onde se pretende obter a leitura da subpressão. A extremidade inferior deve ser envolvida com material de filtro, areia grossa e brita na proximidade do piezômetro e sobre estas, areia fina. A extremidade superior é aberta para a medição da posição da coluna d'água sobre o ponto instrumentado (BRUNSDEN e PRIOR, 1984 *apud* AGUIAR *et al.*, 2005).

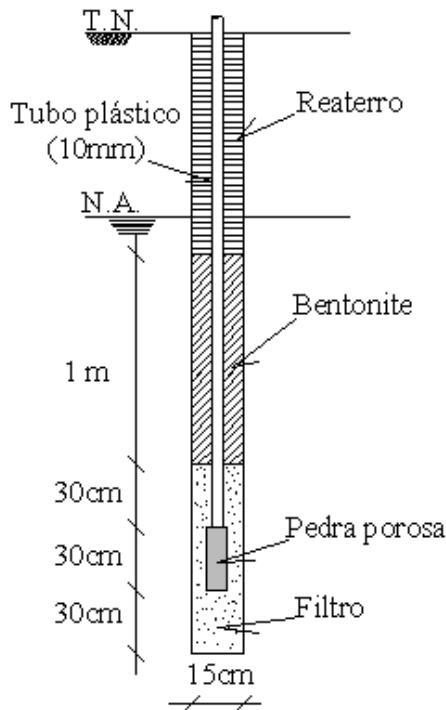


Figura 2.12 - Piezômetro de Casagrande (ENGETEC, 2005)

Ainda segundo Brunsden e Prior, (1984) *apud* Aguiar *et al.*, (2005) a medição é feita de maneira que identifique a superfície da água. O piezômetro deste tipo deve ser hidráulicamente isolado com a colocação de uma camada de bentonita sobre a areia fina, devendo-se complementar o restante do tubo até a superfície com material adequado ou pasta de cimento.

A água dos poros passa através do filtro do bulbo drenante do instrumento até atingir o equilíbrio com a poro-pressão na fundação. A poro-pressão corresponde, então, à altura da água acima do bulbo do instrumento. Normalmente, adota-se como referência para leitura dos piezômetros de tubo aberto a cota do ponto médio do bulbo (SILVEIRA, 2006).

Dentre os vários procedimentos de leitura em piezômetros de tubo aberto, Saré (2003) descreve que a leitura do instrumento pode ser feita através de um cabo elétrico com dois condutores, possuindo na extremidade um sensor constituído por eletrodos dispostos concentricamente, isolados eletricamente entre si (“Electrical dipmeter”). Este sensor é introduzido no tubo do instrumento e ao atingir o nível d’água, a água fecha o circuito elétrico formado pelo conjunto sensor/cabo/sinalizador/bateria. A condição de leitura é percebida pelo sinalizador, que pode ser sonoro, luminoso ou elétrico, ou deslocamento do ponteiro de um

galvanômetro. A leitura é referida à extremidade superior do tubo de PVC, e é obtida através de trena ou metro de madeira com precisão de milímetros (SARÉ, 2003).

As principais vantagens do piezômetro de tubo aberto são confiabilidade, durabilidade, sensibilidade e possibilidade de verificação de seu funcionamento através de ensaio de recuperação do nível d'água, além da possibilidade de estimar o coeficiente de permeabilidade do solo nos arredores do instrumento. Entretanto apresenta limitações, dentre as quais pode-se citar: interferência no canteiro de obras, não ser adequado para determinar poro-pressões no período construtivo, dificuldade de instalação a montante de barragens (devido à dificuldade de acesso às leituras) (CRUZ, 1996).

Lindquist (1983) *apud* Silveira (2006) observou que, desde que instalados, em condições apropriadas, os piezômetros do tipo tubo aberto estão entre os instrumentos mais confiáveis que existem. Na década de 1980 a Companhia Energética de São Paulo (Cesp) construiu um grande número de barragens ao longo dos rios Tietê, Paranapanema e Grande, onde foram instalados 1.024 desses instrumentos, constatando-se que apenas 45 deles, ou seja, 4% deixaram de fornecer leituras por problemas diversos, a saber: obstrução do tubo pela queda de objetos; obstrução do tubo por cisalhamento no interior do maciço; colmatação dos orifícios do tubo ou do material drenante; perfuração do tubo de aço por oxidação; ruptura do tubo plástico e flambagem da mangueira dentro do tubo rígido de proteção, com dificuldade para passagem do fio elétrico.

O tempo de resposta dos piezômetros do tipo Casagrande é um fator de grande importância para que não sejam tomadas conclusões erradas sobre o desenvolvimento das medidas com relação a outros fatores diretamente relacionados a estes aparelhos. Segundo Silveira (2006) estes aparelhos instalados em fundação rochosa de barragens (basalto ou granito-gnaisse) ou em solos porosos, apresentam, geralmente, tempo básico de resposta baixo. Para a maioria das barragens brasileiras localizadas na região centro-sul, o tempo de resposta para 95% de equalização é da ordem de 30 minutos, o que indica coeficiente de permeabilidade para essas rochas da ordem de 10^{-5} cm/s, mas podem variar de 2,2 a 4,8 horas para solos com coeficiente de permeabilidade de 10^{-6} cm/s, sendo perfeitamente adequado para fins práticos.

O Piezômetro Hidráulico, mostrado na Figura 2.13, também conhecido como piezômetro de tubo duplo, foi desenvolvido para ser instalado na fundação ou no aterro no período

construtivo da barragem. O sistema consiste em um elemento de filtro poroso inserido na massa do solo ou rocha, conectado a dois tubos flexíveis, que possuem manômetros na outra extremidade, estes tubos devem estar saturados em água desaerada (SOUZA, 2005) e (SARÉ, 2003).

O nível piezométrico é obtido pela média da soma das cargas de elevação e de pressão dos manômetros. Quando os tubos flexíveis estão saturados, ambos os manômetros indicam o mesmo nível piezométrico (USACE, 1995b).

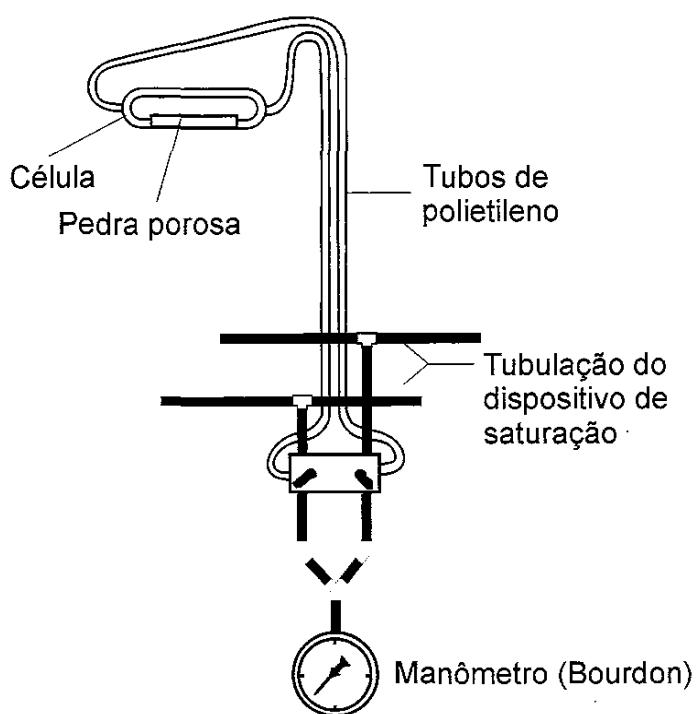


Figura 2.13 – Esquema de funcionamento do piezômetro hidráulico do tipo inglês instalado na barragem de Três Marias, da Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig), (SILVEIRA, 2006)

Algumas das vantagens do piezômetro hidráulico são: técnica de construção razoavelmente simples; permite leituras de poro-pressões neutras negativas; pode ser empregado para estimar a permeabilidade e acessibilidade ao elemento do sensor (CRUZ, 1996).

Suas principais limitações são: seu emprego é geralmente restrito a monitoramento de longo prazo em aterros de barragens; tubulação necessita ser instalada não muito acima do nível

piezométrico mínimo; necessidade de manutenção constante e lavagem periódica ; tempo de leitura relativamente grande para solos pouco permeáveis; eventual influência de recalques nas leituras dos instrumentos (USACE, 1995b).

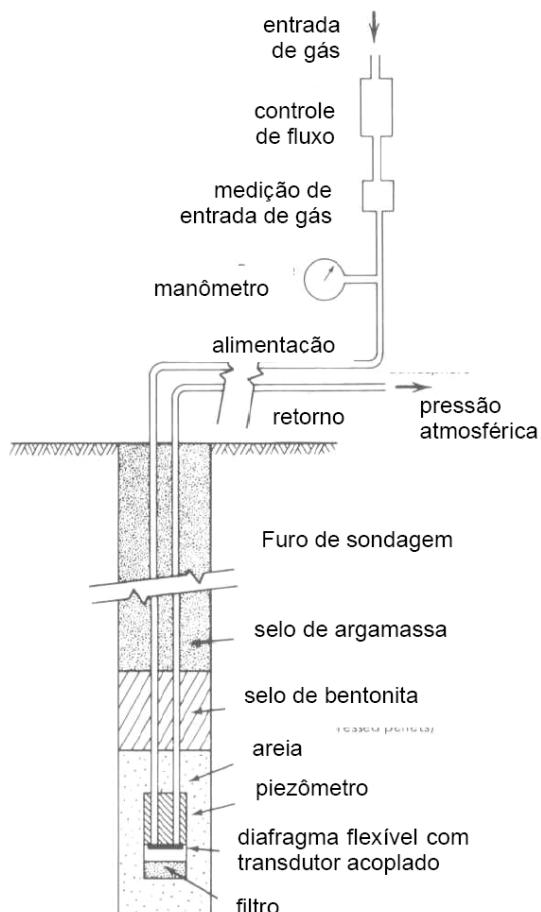


Figura 2.14 – Esquema de piezômetro pneumático (DUNNCLIFF, 1988 *apud* SARÉ, 2003)

Segundo USACE (1995a), o piezômetro pneumático apresenta, como principais vantagens: pouca interferência no processo construtivo; nível de topo e de leitura independentes do nível de topo; tempo de resposta relativamente curto; acesso ao sistema de calibração do medidor e segundo Cruz (1996) tem como limitações: menor confiabilidade para medidas de subpressões, geralmente menor sensibilidade que os de corda vibrante e necessidade de reabastecimento de gás constante.

O Piezômetro de Corda Vibrante, segundo a Figura 2.15 possui um diafragma metálico que separa a água do solo do sistema de medição. Uma corda tensionada é acoplada ao centro do diafragma de tal forma que um deslocamento do diafragma causa uma mudança de tensão na corda. As poro-pressões podem ser obtidas através de calibração do aparelho. O autor ainda

sugere que piezômetros de corda vibrante, quando fabricados com blindagem eletromagnética, são confiáveis, precisos e têm o tempo de resposta reduzido (DUNNCLIFF, 1988 *apud* SARÉ, 2003).

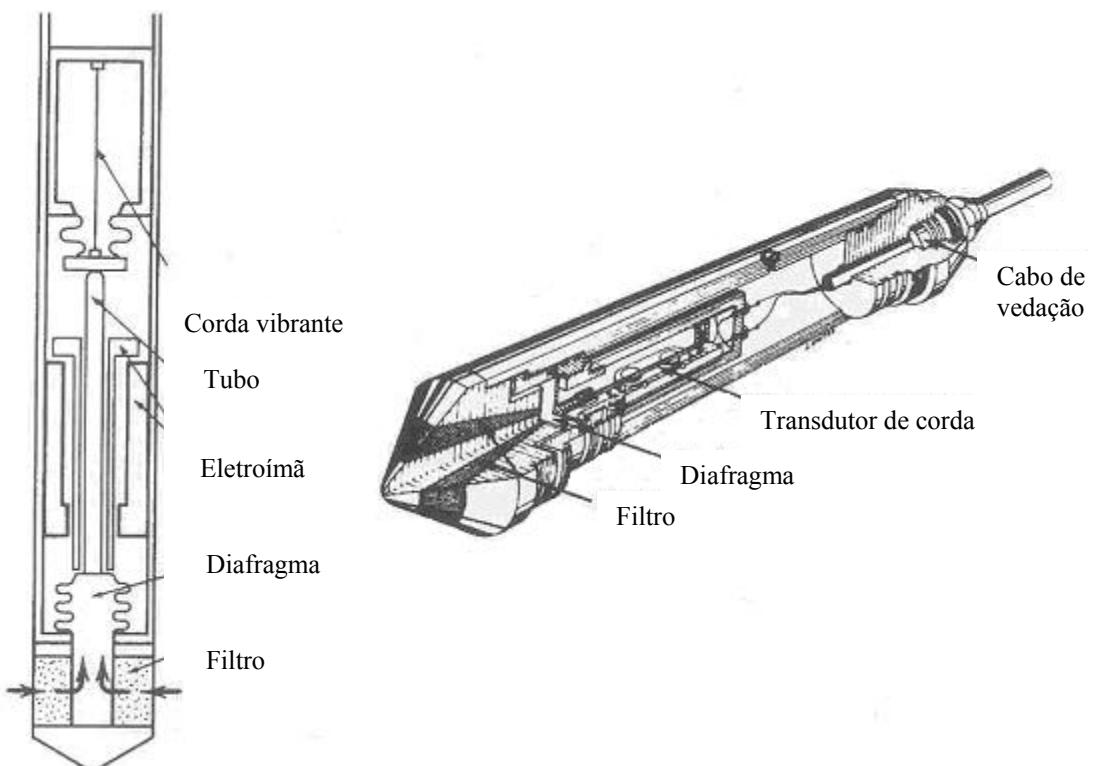


Figura 2.15 – Piezômetro de Corda Vibrante (MOIA, 2008)

O Piezômetro Elétrico, visto na Figura 2.16, é constituído de um cilindro selado que contém um transdutor de pressão. Este transdutor é um diafragma de cerâmica contendo um “strain gage” de resistência. Quando há mudança na pressão, o diafragma deflete proporcionalmente à carga aplicada e altera a resistência do “strain gage” (OSAKO, 2003).

Segundo USACE, (1995b) as vantagens dos piezômetros de corda vibrante e do elétrico são: facilidade na leitura, tempo de resposta relativamente curto, pouca interferência no processo construtivo, permite leitura de poro-pressões negativas. As limitações são: a possibilidade de ambos serem danificados por descargas elétricas, o potencial de registros nulos no caso no piezômetro de corda vibrante e possibilidade de erros de leitura associados à corrosão e a umidade, no caso do piezômetro elétrico.

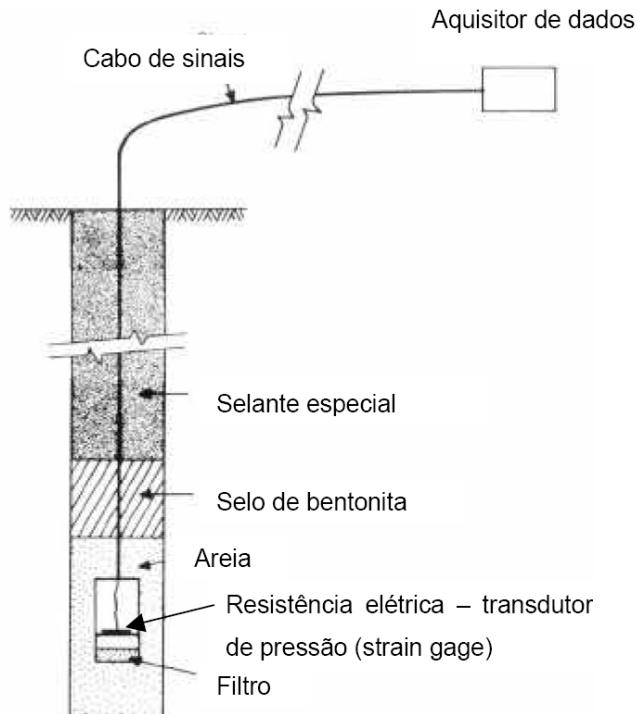


Figura 2.16 – Esquema de piezômetro elétrico (DUNNICLIFF, 1988 *apud* SARÉ, 2003)

2.4.2 Medidores de vazões

A medição de vazões de drenagem constitui, com a medição dos deslocamentos superficiais por meio de métodos topográficos, uma das primeiras observações realizadas com o objetivo de supervisionar as condições de segurança de uma barragem (SILVEIRA, 2006).

Estes medidores têm por objetivo determinar as vazões de percolação de drenos, maciço de terra ou rocha. A instalação pode ser feita em drenos de fundação, em canaletas de galerias de drenagem e em barramentos construídos para esta finalidade. Podem ser citados dois tipos principais de medidores de vazão: os vertedouros e a calha Parshall. A medição de vazão também pode ser feita de forma rudimentar, utilizando um recipiente coletor e um cronômetro, esta é realizada em urgências, drenos de fundação e poços de alívio. (LIGOICKI, 2003).

Segundo Delmeé (2003), os vertedouros se diferenciam pela forma de abertura. Esta pode ser retangular, trapezoidal (com inclinação dos lados de 4:1 é conhecido como Cipoletti), triangular ou de forma especial, sendo os três primeiros largamente empregados. O funcionamento dos vertedouros na sua forma mais simples, pode ser entendido como uma

placa metálica vertical que é interposta no fluxo de água, obrigando seu nível a subir à montante, até verter a jusante pela abertura.

Esta placa metálica com a geometria escolhida é instalada no final do canal, em posição normal ao fluxo. O fluido deve se aproximar do medidor com uma velocidade inferior a 15 cm/s. O medidor deve ter acabamento liso do lado da entrada do líquido, devendo o canal de aproximação estar livre de sólidos e sedimentos. A base de abertura do medidor deve estar acima da superfície líquida máxima possível, do lado de jusante, para evitar que o medidor fique submerso ou trabalhe afogado (SILVEIRA, 2006).

Para a escolha do tipo de vertedouro é importante observar a vazão que ele medirá. Os vertedouros triangulares são particularmente recomendados para medir vazões abaixo de 30 L/s, com cargas variando entre 0,06 e 0,50 m (Figura 2.17). Este vertedouro é tão preciso quanto os retangulares na faixa de 30 a 300 L/s (PORTO R., 2003).

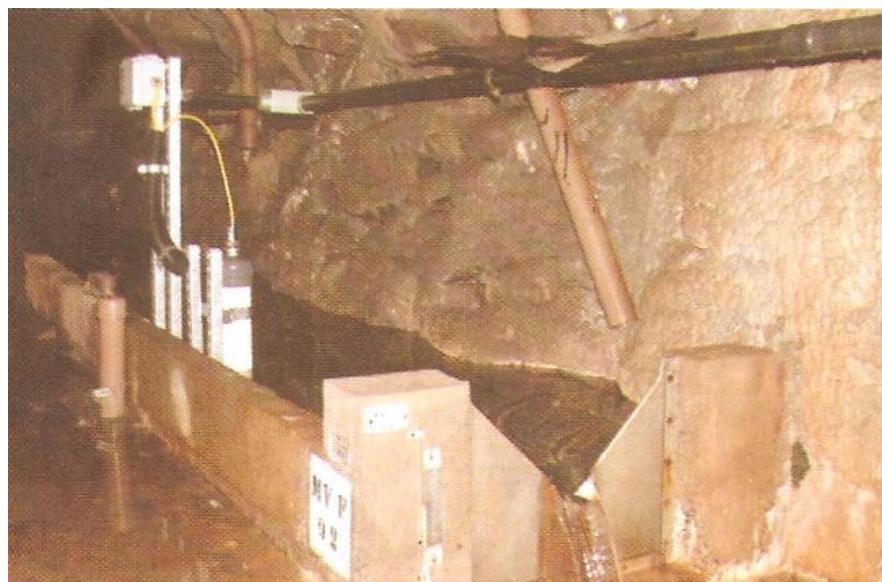


Figura 2.17 – Vertedouro triangular de vazão (SILVEIRA, 2006)

Quando há necessidade de se medir vazões de maior intensidade, os vertedouros triangulares são substituídos por medidores trapezoidais (SILVEIRA, 2003).

Outra forma clássica de medir vazão de líquidos em canais abertos consiste em inserir no canal uma calha Parshall (ver Figura 2.18), para acelerar localmente o fluxo, e medir o nível num local apropriado para representar a vazão. A vantagem das calhas em comparação aos

vertedouros é a ausência de obstáculo, que pode represar objetos, prejudicando a medição (DELMEÉ, 2003).

A calha Parshall deve ser empregada quando as vazões de infiltração são de grande intensidade, como em alguns casos de túneis de drenagem na fundação de barragens de concreto ou à jusante de barragens de enrocamento com face de concreto, em que as vazões vertidas são geralmente de várias centenas de litros por segundo (SILVEIRA, 2006).

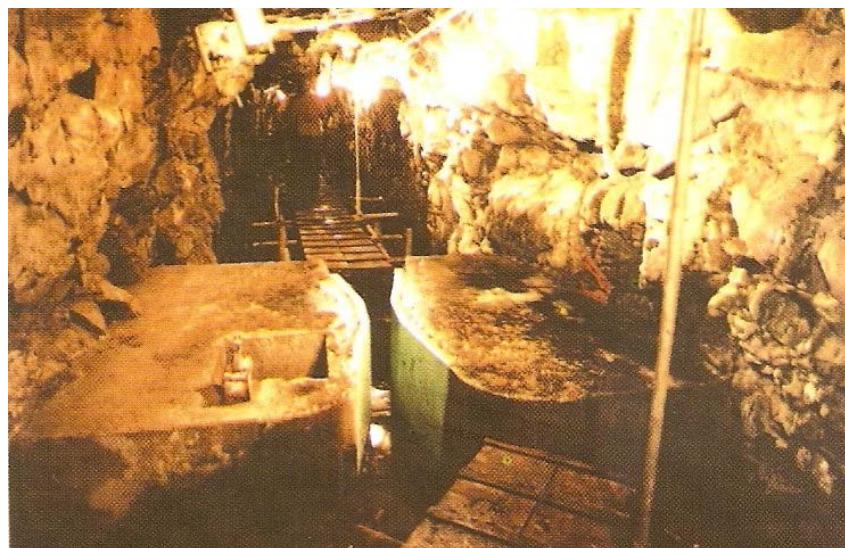


Figura 2.18 – Medidor de vazão tipo calha Parshall instalado no túnel de drenagem da Barragem de Água Vermelha (SILVEIRA, 2006)

A medição de vazão por meio de técnicas expeditas ainda é bastante empregada em barragens pequenas ou mesmo em barragens de grande porte, em locais onde é inviável a construção de um medidor de vazão.

Segundo Silveira (2006), o cálculo da vazão pode ser realizado utilizando a equação 2.14:

$$Q = \frac{V}{T} \quad (2.14)$$

Em que:

Q: vazão [L^3/T]

V: volume d'água coletado [L^3]

T: intervalo de tempo [T]

2.5 Segurança de Barragens

A Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD) define segurança como sendo a capacidade das estruturas, reservatórios e zona à jusante da barragem em atender requisitos de desempenho durante a expectativa de vida da estrutura, considerando aspectos ambientais, estruturais, hidráulicos e operacionais (SILVEIRA, 1990 *apud* MENESCAL, 2005).

A segurança de uma barragem está intimamente relacionada aos aspectos de projeto, construção, instrumentação/inspeção, operação e manutenção. É claro que, por melhores que tenham sido o projeto de uma barragem e a fiscalização de sua construção, só será possível exercer um eficiente controle das condições de segurança da barragem se a mesma estiver sendo, adequadamente, inspecionada e monitorada através de instrumentação apropriada (CARVALHO, 2005).

É necessário enfatizar que o fato de uma barragem estar instrumentada e analisada, a avaliação da segurança da barragem não deve ser feita apenas com base nos resultados fornecidos pela instrumentação e modelos de comportamento, mas igualmente levando em conta o conjunto das características da barragem e suas fundações, as inspeções visuais e apoiando-se sobre conhecimentos e experiências adquiridas em outras barragens (DIVINO e FUSARO, 2006).

Este fato também é citado pelo Comitê Brasileiro de Grandes Barragens (CBGB, 1996), no qual enfatiza que inspeções visuais periódicas e pormenorizadas podem detectar anomalias impossíveis de serem detectadas com a instrumentação: fissuras ou trincas, surgências d'água e erosão, por degradação, localizada de material.

Durante a operação da barragem, sua manutenção e inspeção devem ser executadas de modo a garantir um nível aceitável de sua segurança, devendo ser executada por pessoal qualificado e treinado para tal fim. Programas de manutenção devem ser organizados e avaliados, no mínimo anualmente. Nos quais, deverão estar disponíveis uma descrição das regras de manutenção, de procedimentos, de registros e de responsabilidades para as barragens, estruturas e equipamentos associados, inclusive instrumentação, essenciais para a segurança da barragem (MIN, 2002).

Segundo o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens, MIN (2002), as inspeções realizadas em uma barragem podem ser: periódicas e emergenciais; inspeções periódicas devem ser executadas para se determinar as condições das partes integrantes das estruturas de barramento d'água; inspeções especiais ou emergenciais devem ser executadas em função do potencial de danos provocados por eventos ou pela ocorrência de deficiências severas.

As inspeções periódicas devem constar de procedimentos básicos, incluindo as definições de responsabilidade, objetivando a avaliação: dos dados obtidos a partir de inspeções visuais, registros de instrumentação e de projeto; das condições das operações em curso, tais como controle da capacidade do vertedouro, borda livre, do esvaziamento, dos níveis máximos d'água; da confirmação da segurança estrutural e operacional e da identificação das áreas que necessitam de investigações de deficiências.

Para as inspeções emergenciais, as instruções e procedimentos da barragem devem descrever procedimentos para estas inspeções, além de outras observações e procedimentos necessários após cheias, chuvas torrenciais, sismos e observações não usuais, tais como fissuras, recalques, urgências d'água e indícios de instabilidade de taludes.

Além destas inspeções são necessárias, segundo CBGB (1996), obras periódicas de manutenção com intuito de preservar em bom estado as várias estruturas, assegurar superfícies hidráulicas satisfatórias e garantir a operacionalidade dos equipamentos eletromecânicos e instrumentos de auscultação. Para barragens de concreto as obras de manutenção mais usuais são:

- limpeza de drenos e canaletas de drenagem;
- tratamento de infiltrações através de fissuras ou juntas de concretagem;
- eventual tratamento de fissuras no concreto;
- execução de reparos nas superfícies dos circuitos hidráulicos;
- execução de reparos nas juntas de contração entre blocos, na soleira do vertedouro;
- manutenção e pintura de peças metálicas (escadas, passarelas, tubulações e guarda-corpos);
- limpeza e manutenção dos instrumentos de auscultação.

CAPÍTULO 3 – DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Este capítulo descreve a área de estudo, apresentando os principais dados do projeto executivo, e uma breve descrição das estruturas componentes da barragem e também mostra, de forma sucinta, a geologia e geotecnica da região. Finalmente, descreve a instrumentação instalada na barragem Castanhão, dando destaque para os piezômetros e drenos de fundação.

A Barragem Castanhão está localizada na bacia hidrográfica do Rio Jaguaribe, Município de Alto Santo, Estado do Ceará, como mostra a Figura 3.1. A obra foi construída pelo DNOCS conveniada com o Governo do Estado do Ceará, entre os anos 1995 e 2003.

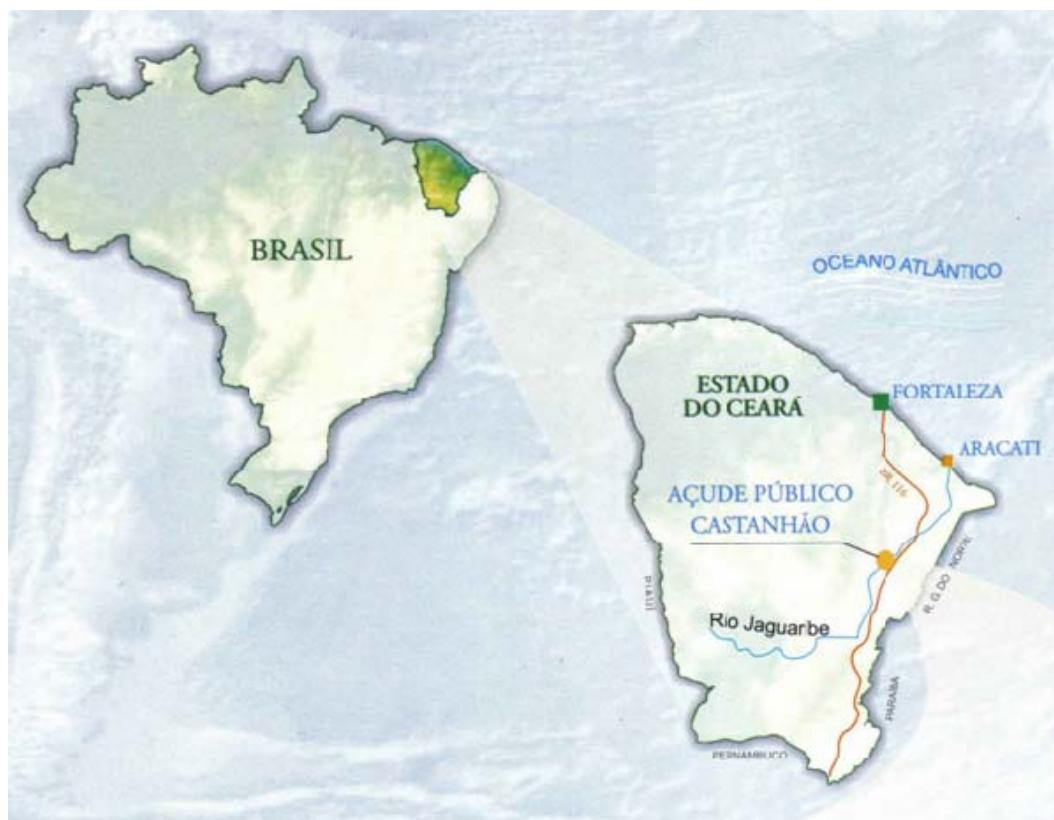


Figura 3.1 – Localização da Barragem Castanhão

A barragem foi projetada com os seguintes objetivos: auxiliar no abastecimento da população da região metropolitana de Fortaleza; ser um eventual suporte a grandes projetos industriais no complexo portuário do Pecém; gerar 22,5 megawatts de energia elétrica; produzir 4 mil toneladas, por ano, de pescados e controlar cheias na parte baixa do rio Jaguaribe, (IBPS, 2007).

O açude fica situado na região semi-árida nordestina, com base geológica predominantemente cristalina, taxa de evaporação potencial estimada em 2.000 mm ao ano e precipitação média variando entre 550 a 900 mm/ano (MIRANDA e LIMA, 1998).

3.1 Projeto Executivo

A concepção inicial do projeto executivo era relativamente simples e constava das seguintes estruturas básicas (DNOCS, 2003):

- Uma barragem de terra homogênea, com trecho em enrocamento, com altura máxima de 60 m, acima da fundação e comprimento total de 7,8 km, incluindo os 9 diques de fechamento das selas topográficas. O maciço principal teria comprimento de 3,45 km na cota 111,00. O reservatório formado abrigaria uma área de 325 km² e teria comprimento máximo de 48 km, quando atingisse o nível máximo normal (cota 100,00). Nesta cota o volume útil seria de 4,2 bilhões de metros cúbicos d'água. Para a cheia decamilenar o volume a ser atingido é de 6,7 bilhões de metros cúbicos d'água (cota 106,00).
- Uma tomada d'água tipo torre-galeria, que funcionaria como desvio durante a construção, com comprimento de 178 m e altura de 64,5 m. A galeria seria constituída de duas tubulações de aço de 3,70 m, com redução para 2,50 m de diâmetro e quatro válvulas dispersoras de 1.500 mm de diâmetro.
- Um vertedouro em concreto, terminando em salto de esqui, com extensão de 153,00 m na cota 95,00 e contendo 12 comportas de segmento acionadas através de cilindros hidráulicos. Um dique fusível de 750 m de comprimento e altura máxima de 5,00 m.
- Uma usina hidrelétrica de 22,5 MW de potência instalada.

O Projeto Executivo, originalmente elaborado, sofreu algumas modificações ao longo da execução das obras, basicamente na barragem principal. Inicialmente, em virtude do surgimento de um Paleo Canal, que cortava o eixo da barragem principal, e posteriormente, com a mudança do trecho central no leito do rio, de uma seção em terra homogênea para uma seção em CCR.

3.1.1 “Lay-Out” geral da obra

A Barragem apresenta um arranjo geral, conforme mostra a Figura 3.2, no qual se tem uma barragem de terra, um trecho central de CCR, um vertedouro com 12 comportas, uma tomada d’água e casa de válvulas na margem direita, um dique fusível na margem esquerda e 9 diques auxiliares na margem direita (ENGETEC, 2005).

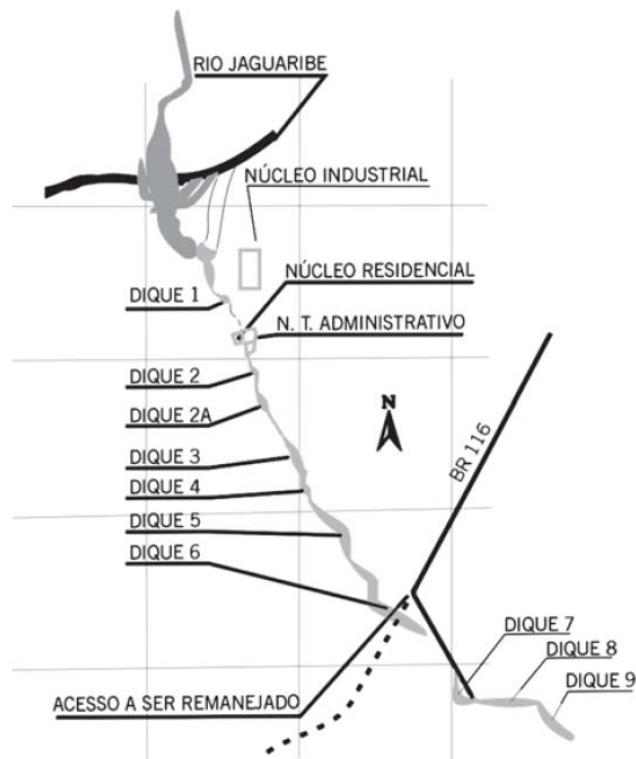


Figura 3.2 - “Lay-Out” geral da obra

3.1.2 Ficha Técnica

As principais características da obra são apresentadas na sua ficha técnica:

Características Gerais

Capacidade Máxima (cota 106,00) 6.700.000.000 m ³
Capacidade Normal (cota 100,00) 4.461.000.000 m ³
Município Alto Santo
Bacia/Sub-bacia Jaguaribe
Rio Barrado Jaguaribe

Área da Bacia Hidrográfica	44.850 km ²
Área da Bacia Hidráulica (cota 100,00).....	325 km ²
Área do Reservatório (cota 106,00)	458 km ²
Precipitação Média Anual	745 mm
Nível d'água Máximo Normal	106,00
Nível d'água Máximo Maximorum	108,80
Volume Útil	4.211.000.000 m ³
Volume Morto	250.000.000 m ³
Comprimento Máximo do Lago	48 km

Barragem Principal

Tipo	Terra Homogênea/CCR
Altura Máxima sobre as Fundações	72 m
Extensão pelo coroamento.....	3.450 m
Largura do coroamento - Terra.....	10 m
Largura do coroamento - CCR	7 m
Cota do Coroamento.....	111,00
Volume do Maciço - Terra	3.957.782 m ³
Volume do Maciço - CCR	934.582 m ³

Barragens Auxiliares (Diques)

Tipo	Terra homogênea
Quantidade	9
Altura Máxima sobre as Fundações	18 m
Cota do Coroamento.....	111,00
Extensão pelo coroamento.....	3.980 m

Vertedouro

Tipo.....	Soleira Delgada
Largura	153 m
Lâmina Máxima.....	11 m
Descarga Máxima (Tr =10.000 anos).....	12.345 m ³ /s
Cota da Soleira	95,00
Comportas	12 unidades
Dimensões	10 m (largura) x 11,55 m (altura)

Tomada D'água

Tipo.....	Galeria
Comprimento da Galeria	194 m
Diâmetro (2 tubos)	3,70 m
Descarga de projeto (90% de garantia).....	22,00 m ³ /s
Dissipaçāo	04 Válvulas dispersoras
Diâmetro das válvulas	1,50 m

3.1.3 Barragem principal

O Castanhão é composto por dois tipos de barragens: uma de solo compactado, outra de CCR, conforme mostra as Figuras 3.3 e 3.4.



Figura 3.3 – Barragem principal

A barragem de solo compactado é composta de terra homogênea, com maciço compactado com material cascalho-argiloso, filtro vertical tipo chaminé e tapete horizontal com sistema de dreno de pé a jusante. Este trecho da obra tem comprimento de 2.804,00 m, cota de coroamento de 111,00, largura de crista de 10,00 m, altura máxima do maciço de 60,00 m. A inclinação dos taludes é: montante (1 V : 2,5 H); jusante (1V : 2H) (ENGETEC, 2005).

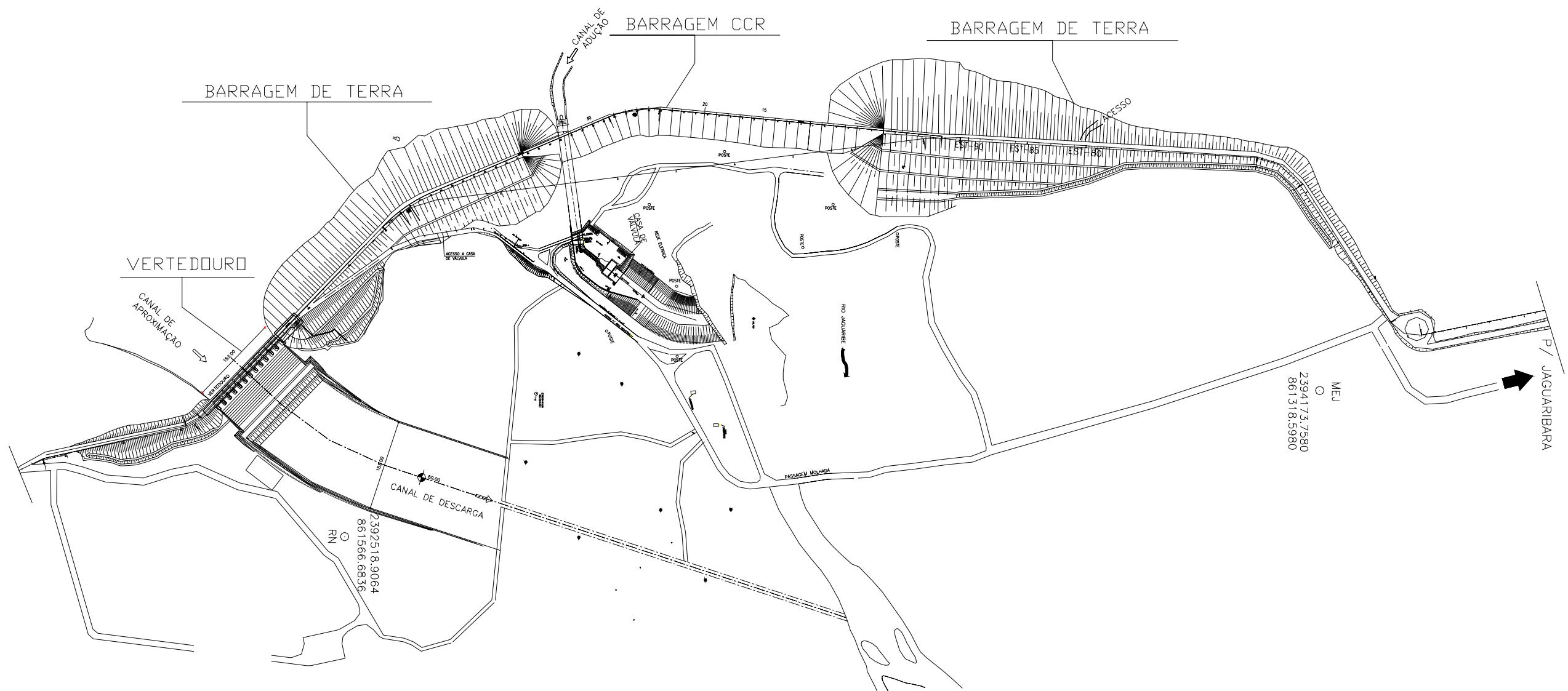


Figura 3.4 - “Lay-Out” do trecho central da barragem

O trecho central da barragem foi executado com CCR (Figura 3.5), composto por um maciço de concreto convencional a montante. A seção da barragem tem forma trapezoidal e é composta por dois tipos de CCR, denominados CCR1 e CCR2, conforme Figura 3.6. O CCR1 tem resistência de 10 MPa aos 90 dias e consumo de 90 kg de cimento por metro cúbico, que abrange toda a área da barragem até a cota 57,00 e daí prosseguindo até a cota 95,00 numa faixa de 8,0 metros, medidos a partir do paramento de montante no sentido de jusante; o CCR2 tem resistência de 7 MPa aos 90 dias e consumo de 70 kg de cimento por metro cúbico, abrangendo o restante da barragem de CCR (ENGETEC, 2005).



Figura 3.5 – Trecho de CCR da Barragem Castanhão

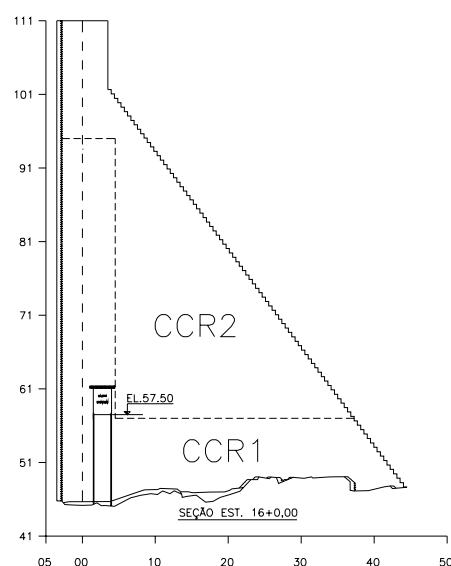


Figura 3.6 – Seção transversal da Barragem: trecho de CCR

O comprimento do trecho da Barragem de CCR é de 646,00 m, a cota de coroamento é de 111,00, a largura da crista é de 7,00 m e a altura máxima do maciço é de 60,00 m.

3.1.4 Dique Fusível

O dique fusível é composto de núcleo impermeável, inclinado, apoiado sobre um contra núcleo de areia. A estrutura tem 750 m de comprimento, 110 m de cota de coroamento, 10 m de largura de crista, 5 m de altura máxima do maciço, com inclinação de taludes de montante (1V : 2H) e jusante (1V : 1,6H).

3.1.5 Usina Hidrelétrica

A usina hidrelétrica até esta data ainda não está implantada, mas será composta de duas turbinas do tipo Kaplan de eixo vertical, tendo vazão nominal de 70 m³/s e potência total de 22,5 MW.

3.1.6 Vertedouro

O vertedouro é de concreto de soleira espessa com perfil Creager (Figura 3.7), terminando em salto de esqui, que lança o jato de água num poço de dissipação. O vertedouro tem extensão de 153,00 m na cota 95,00 e contem 12 (doze) comportas de segmento acionadas através de cilindros hidráulicos, cada uma com largura de 10,00 m. Esta estrutura funciona com cota de 100,00 m para operação normal e 106,00 m para cota máxima de operação, que corresponde a vazão máxima de 12.345 m³/s.

3.1.7 Tomada d'água

A tomada d'água é do tipo galeria (Figura 3.8) com dois condutos paralelos passando sob a barragem. Esses condutos têm diâmetros de 3,70 m, com comprimento de 195,30 m, com capacidade nominal de 100 m³/s. a estrutura dispõe de quatro válvulas dispersoras com 1,50 m de diâmetro cada.



Figura 3.7 – Vertedouro da Barragem Castanhão



Figura 3.8 – Torre de comando da tomada d'água da Barragem Castanhão

3.2 Geologia e geotecnia

3.2.1 Geologia

Segundo DNOCS (2003) a área do sítio da Barragem Castanhão é constituída, predominantemente, por um conjunto de rochas polimetamórficas, de Idade Arqueana e

Proterozóica Inferior, representadas por um complexo gnássico-granilítico, definido como complexo Nordestino Indiviso.

Na região do eixo da obra principal ocorrem cristas rochosas como litologias quartzosas-gnásses e granitos. Uma segunda litologia na região aparece em forma de extensos tabuleiros, ocorrendo em ambas as margens. Esses tabuleiros são pertencentes à Formação Faceira e possuem uma idade Tercio-Quaternária. Os sedimentos desta formação são de origem aluvional.

Na porção central do eixo da barragem tem-se ainda a presença de sedimentos aluvionares pertencentes ao rio Jaguaribe e de idade mais recente. Estes aluviões estão divididos em duas unidades que estão representadas por Terraços Aluvionares e Aluviões Recentes.

Os terraços aluvionares caracterizam-se por apresentarem superfícies planas, bordos sinuosos em contato com as unidades inferiores, existência de inúmeras lagoas e barracas escarpadas à beira do rio. Os aluviões recentes são constituídos, principalmente, por areias finas a médias e cascalhos finos com variada gama de componentes, ocorrendo ainda alguma argila e matéria orgânica associada.

3.2.3 Geotecnia

Os estudos básicos de geotecnia para a barragem Castanhão encontram-se resumidos em DNOCS (2003), onde a geotecnia é caracterizada e propõem-se os métodos de tratamento da fundação.

Em geral a rocha apresenta-se alterada ao longo do eixo da barragem, atingindo seu estado sólido a partir de profundidades de até 14 m, em relação ao topo rochoso. Nos 6 m superiores apresenta-se intensamente fraturada, conforme indicaram os resultados dos ensaios de perda d'água.

O embasamento rochoso foi considerado próprio em termos de capacidade de suporte para uma barragem de terra ou terra-enrocamento, desde que fosse tratado, quanto à percolação, nos seus 6 m superficiais. Para estruturas de concreto, a associação de uma escavação ao

tratamento da fundação, foi recomendada. Também foi indicada uma cortina de injeções, para garantir o critério de pressão máxima da ordem de 25 kPa por metro de profundidade.

Na região da calha do rio apresenta-se um aluvião de baixa resistência à penetração, alta compressibilidade e permeabilidade da ordem de 5×10^{-2} cm/s, com espessura da ordem de 7 m sobre o topo rochoso, na seção onde a barragem tem máxima altura.

Na região das ombreiras ocorrem os afloramentos de rocha ou topo rochoso capeado por pequena espessura de solos coluvionares e/ou saprolitos e nas partes altas em cota, da margem esquerda, encontra-se o cascalho argiloso da Formação Faceira. Esta situação oferece características adequadas para o assentamento das fundações das obras de terra.

O dique fusível localizado na extremidade esquerda do eixo, e a barragem em continuação ao dique, com altura inferior a 5 m, estão fundados nos solos da Formação Faceira.

Detectou-se, em abundância, a presença de materiais terrosos em jazidas nas imediações da obra principal. As rochas são oriundas das escavações obrigatórias e as areias, provenientes das areais identificados na margem do rio Jaguaribe.

3.2.2 Paleo Canal

Constatou-se em 1996, quando das escavações da trincheira de vedação, que no trecho entre as estacas 113 e 117 (no eixo reto) o substrato rochoso apresentava uma depressão paralela ao leito do rio, com dimensões e características bastante peculiares, não consideradas nos desenhos do projeto e que a areia do pacote aluvionar apresentava-se, de forma geral, fofa. Esta depressão, denominada “paleo canal”, descia em cascata em um desnível de cerca de 23 m, entre a região do pé de montante do projeto da barragem até o eixo, com largura variável de 30 a 60 m e paredes verticalizadas com grandes irregularidades e muitas fraturas (JARDIM e MOLER, 2001).

DNOCS (2003) descreve como o surgimento do “paleo canal” modificou os trabalhos na obra, quais os estudos e a solução utilizada para sanar o problema.

O aparecimento desta depressão causou um considerável atraso nos trabalhos de escavação, uma vez que os serviços nesta região foram paralizados, levando a equipe técnica a modificar o projeto a fim de garantir uma perfeita estanqueidade da fundação. Foi necessário adequar então a trincheira de vedação, de forma a manter as especificações técnicas de projeto. Para tanto, implantou-se dois sistemas de bombeamento, sendo um para rebaixamento do lençol freático e outro para o esgotamento das águas acumuladas no interior das escavações, como pode ser visto na Figura 3.9. No período de maior pico, chegou-se a utilizar 13 bombas, variando de 6,3 a 125 Hp e 2 dragas com 130 Hp de potência.

Foram procedidas uma série de investigações de campo e realizados estudos, visando definir soluções adequadas para a barragem. As investigações de campo concentraram-se em sondagens sísmicas, novas sondagens a percussão – “Standart Penetration Test” (SPT) e sondagens de penetração estática – “Cone Penetration Test” (CPT). Posteriormente, foram executados alguns ensaios para determinação da compacidade relativa das areias remanescentes na área de jusante, em condição natural.



Figura 3.9 – Vista do rebaixamento do lençol freático durante as escavações do Paleo Canal

Em junho de 1998, foram reiniciados os trabalhos na região do Paleo Canal. Na fase de esgotamento e rebaixamento do nível d'água, foram realizados serviços de escavação e execução do acesso até o fundo da depressão, juntamente com a remoção de material abaixo do nível d'água, atingindo assim o fundo impenetrável do Paleo Canal. Quando se atingiu a

cota (25,00), a jusante do eixo da barragem, as paredes laterais moldadas em rocha, pela ação erosiva das águas, se apresentaram praticamente verticais, exibindo taludes negativos em diversos trechos.

Com a depressão exposta, após a escavação, não foi percebida existência de infiltrações d'água nas paredes rochosas, que se mostraram secas, apesar da pequena distância ao rio (200 m), conforme consultoria prestada ao DNOCS para análise do projeto, que afirmou: “A espessa e volumosa massa de areia aluvionar que delimita a cavidade do lado de montante não tampouco exibe qualquer sinal de infiltração d'água, o que depõe a favor da estanqueidade do muro de concreto erguido anteriormente no fundo do Paleo Canal, ao longo do eixo da Barragem”.

3.3 Instrumentação da Barragem Castanhão

A instrumentação da Barragem Castanhão concentra-se no trecho de CCR. Os instrumentos utilizados no monitoramento da barragem são piezômetros instalados na fundação, medidores triortogonais instalados nas juntas dos blocos de concreto mais significativas da galeria de drenagem, além de drenos e réguas limnimétricas.

No período compreendido entre 2004 e 2005, a operação e monitoramento da barragem foram realizados pela empresa Engetec Engenharia Consultoria e Projetos LTDA.

3.3.1 Piezômetros de Fundação

Os piezômetros foram instalados no contato da estrutura com a fundação rochosa, para o acompanhamento e registros das subpressões. Estes piezômetros abertos do tipo Casagrande modificado, conforme Figura 3.10.

No total são 16 piezômetros instalados em seis seções transversais da galeria de drenagem, nas estacas 06, 11, 16, 21, 26 e 31, conforme Figura 3.11 que mostra a localização destas estacas na planta da barragem.

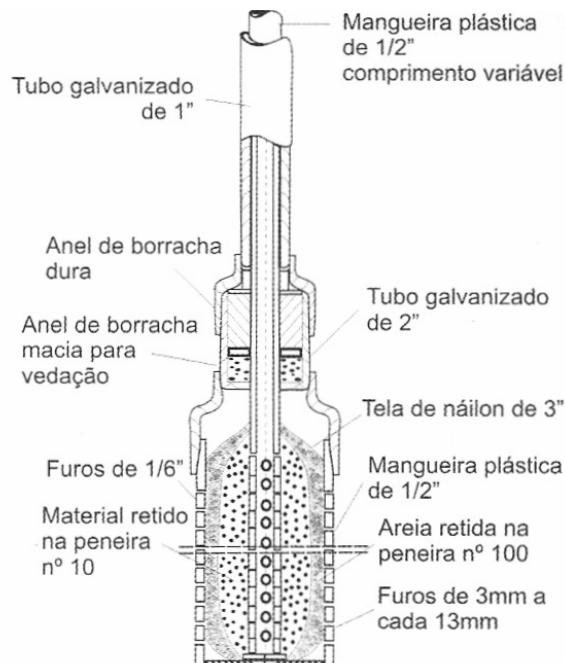


Figura 3.10 – Piezômetro de Tipo Casagrande Modificado (SILVEIRA, 2006)

Em cada seção definida, foram instalados 2 (dois) piezômetros, um à montante e outro à jusante da cortina de drenagem da fundação, conforme Figura 3.12. Em uma única seção transversal, que coincide com a galeria de acesso nº 2 (estaca 26), foram instalados 4 (quatro) piezômetros do mesmo tipo (ENGETEC, 2005).

Segundo a Engetec (2005), para a determinação das linhas piezométricas relativas aos 16 (dezesseis) piezômetros instalados no interior da galeria de drenagem do CCR, deverão ser observadas as seguintes situações:

- Nível d'água no furo do piezômetro abaixo do piso da galeria: neste caso, deverá ser utilizado o dispositivo a ser inserido no interior do furo, cujo sensor luminoso acenderá após o contato com a água. A cota piezométrica será o resultado da cota do piso da galeria no local do furo menos o comprimento obtido no sensor;
- Nível d'água no furo do piezômetro abaixo do piso da galeria: o procedimento será idêntico ao item anterior, porém sendo necessária a instalação de um prolongamento com tubo de PVC para permitir a leitura. O dispositivo será inserido no interior do tubo, cujo sensor luminoso acenderá após o contato com a água. A cota piezométrica será a soma da cota do piso da galeria no local do furo com o comprimento referente à diferença entre a altura do tubo e o bordo livre, conforme a Figura 3.13.

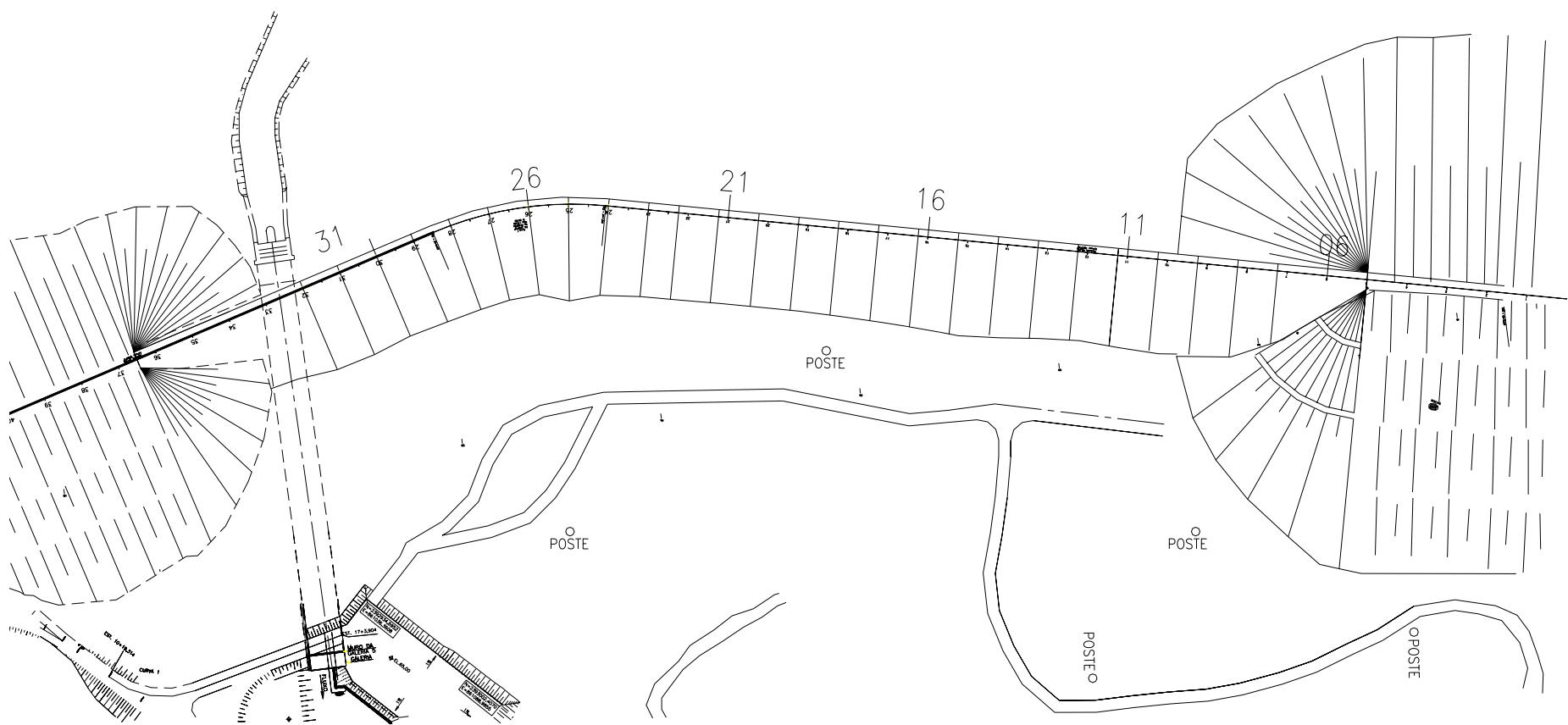


Figura 3.11 – Localização das estacas onde foram instalados os piezômetros



Figura 3.12 – Galeria de drenagem da fundação, com localização de piezômetros a montante e à jusante.



Figura 3.13 - Leitura do nível d'água nos piezômetros com sensor luminoso.

3.3.2 Drenos de Infiltração da Fundação

A vazão de infiltração pela fundação é coletada através de 151 furos de drenagem, à jusante da cortina de vedação, distribuídos ao longo de toda a extensão da galeria de drenagem do CCR e com profundidade média de 30 m abaixo da rocha do leito rochoso, conforme Figura 3.14.

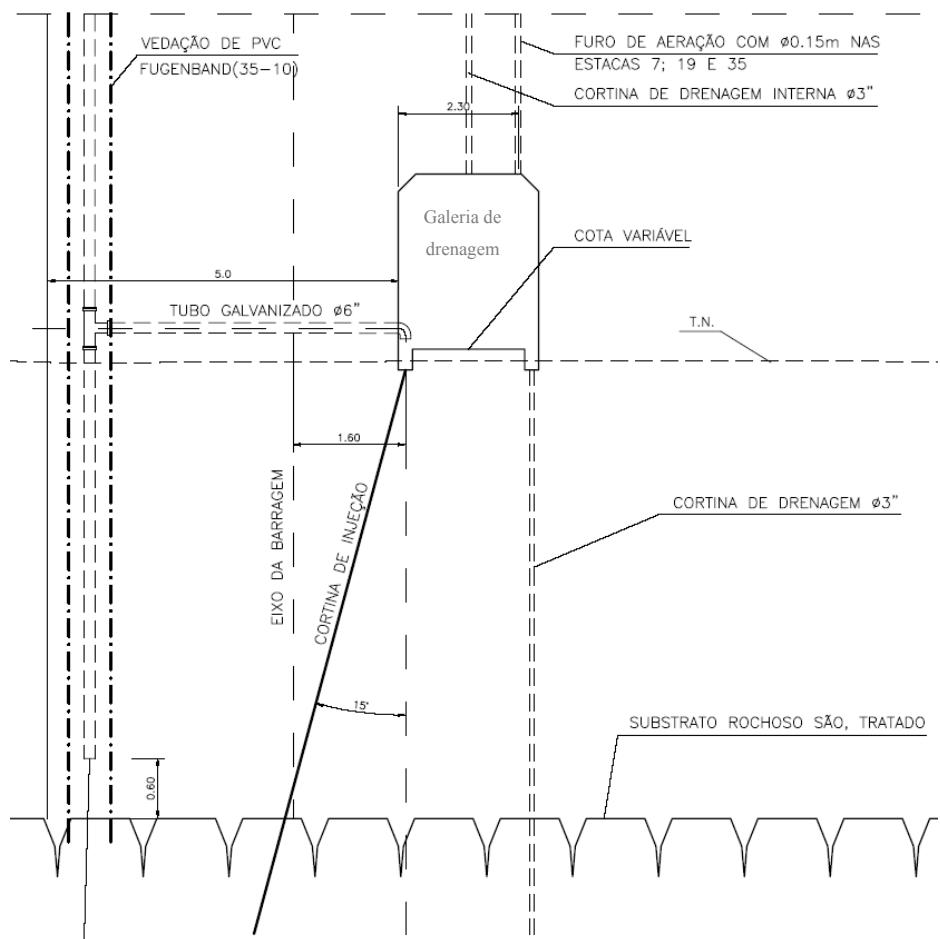


Figura 3.14 – Seção da Galeria de drenagem, indicando a localização dos furos de drenagem (ENGESOFT, 2000c)

O fluxo, proveniente dos furos de drenagem, resultam em 04 saídas de canaletas situadas nos 03 portões de acesso, conforme indicado abaixo e nas Figuras 3.15 e 3.16:

- | | |
|-----------|---------------------------------------------|
| Acesso 1: | 01 canaleta de saída (canaleta 01) |
| Acesso 2: | 02 canaletas de saída (canaletas 02E e 02D) |
| Acesso 3: | 01 canaleta de saída (canaleta 03) |

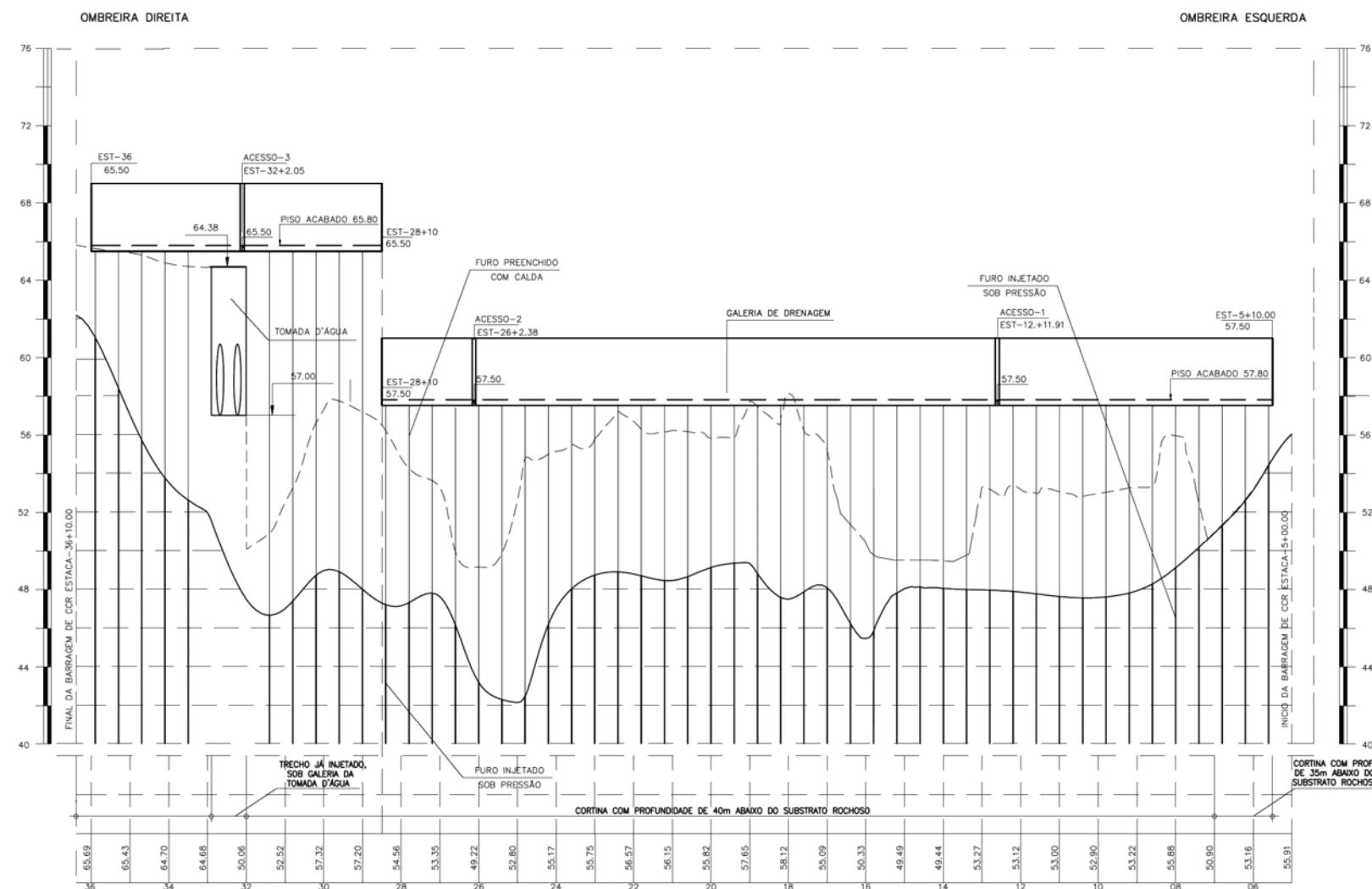


Figura 3.15 – Galeria de drenagem, localização dos acessos de saída das canaletas de drenagem (ENGESOFT, 2000c)

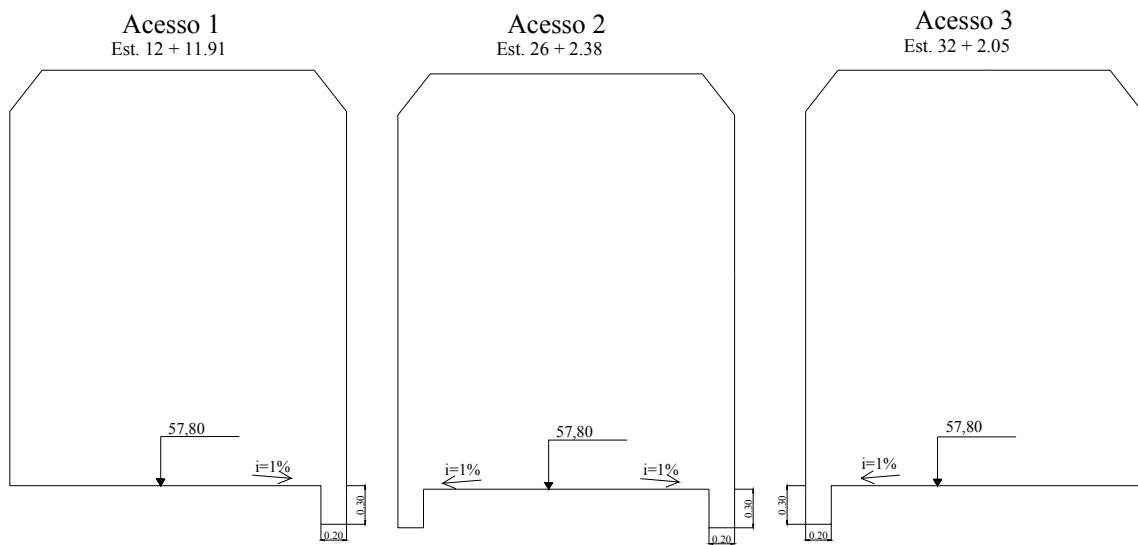


Figura 3.16 – Vista dos Acessos 1, 2 e 3 com a localização das canaletas de saída do fluxo (ENGESOFT, 2000c).

As determinações dos valores de vazão foram feitas nas saídas das galerias de drenagem, localizadas nos três portões de acesso, e diretamente na saída dos furos de drenagem, conforme descrito a seguir:

- As vazões totais nas saídas das galerias são obtidas cronometrando-se o tempo, em segundos, necessário para coleta da água em recipiente transparente com marcação em mililitros e são medidas na saídas das canaletas de drenagem, conforme Figura 3.17.



Figura 3.17 – Medição das vazões totais

- As vazões individuais dos furos de drenagem são obtidas de forma semelhante ao item anterior, porém neste caso diretamente na saída do furo de drenagem, conforme Figura 3.18.



Figura 3.18 – Medição das vazões individuais

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os materiais e métodos utilizados para obtenção dos resultados deste trabalho. Como materiais são utilizados os registros das leituras dos equipamentos que compõem a instrumentação da barragem e a metodologia adotada consiste no traçado dos diagramas de subpressões medidos e de projeto e na aplicação do programa GEO-SLOPE (SEEP/W) para a simulação do fluxo pela fundação da barragem.

Além destes dados foram utilizados valores de coeficientes de permeabilidade da fundação que foram cedidos pela Engesoft (Engenharia e Consultoria LTDA), responsável pelas investigações de campo e estudos laboratoriais, referente ao Projeto Executivo do Paramento Central da Barragem Castanhão em CCR e pela Aguasolos e Hidroterra que executaram serviços de consultoria para acompanhamento, acessoria e fiscalização das obras da Barragem.

Para os estudos da subpressão estabelecida é mostrado o tipo de piezômetro escolhido para a barragem, as seções nas quais foram instalados, além da descrição dos critérios de projeto adotados para a elaboração do diagrama de subpressão. Para tanto são utilizados os aplicativos Excel (2003) e AutoCad (2006).

As vazões através da fundação são estudadas pelos drenos de infiltração da fundação, dos quais mostra-se a maneira como a Empresa responsável pela manutenção da barragem realizou as leituras. As vazões são verificadas comparando-se os valores simulados e os valores correspondentes aos furos de drenagem da barragem, obtidos periodicamente. Descreve-se detalhadamente a metodologia adotada para a simulação, para tanto são utilizados os aplicativos: AutoCad(2006) e Geoslope (SEEP/W).

4.1 Medidas de subpressão

As medidas de subpressão da Barragem Castanhão utilizadas são obtidas através de Piezômetros do Tipo Casagrande, instalados no Maciço de CCR da barragem, Figura 4.1.

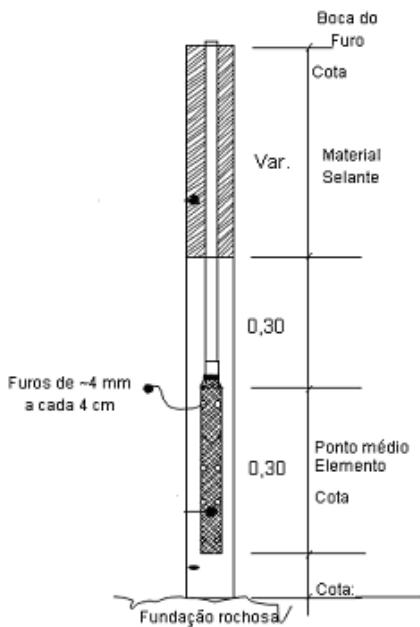


Figura 4.1 – Piezômetro do Tipo Casagrande, instalado na Barragem Castanhão (ENGETEC, 2005)

4.1.1 Seleção dos dados

São estudadas 06 (seis) seções transversais da galeria de drenagem, que correspondem às estacas 6, 11, 16, 21, 26 e 31, conforme Figura 3.11. No que concerne ao número de piezômetros, são utilizados dados de 15 (quinze) piezômetros dos 16 (dezesseis) instalados na barragem, devido o piezômetro 4 (quatro) encontrar-se desativado, por causa de uma obstrução no seu furo, não existindo portanto leituras referentes a tal aparelho.

A Engetec forneceu dados das leituras dos piezômetros realizadas no período entre 2004 e 2005, porém em nenhum dos anos cedidos foram feitas leituras seguidas durante os 12 meses do ano, ou seja, não houve uma continuidade nas medições. Em 2004 as leituras são correspondentes aos meses de janeiro a maio e julho, em 2005 de janeiro a junho, agosto, setembro e novembro. Havendo, assim, lacunas na sistematização das leituras, principalmente no período seco, em que só foram registradas 03 leituras em todo o período em estudo.

Os níveis d'água à montante do reservatório, juntamente com a vazão efluente foram registrados diariamente pela Empresa responsável pela manutenção da barragem, que disponibilizou tais dados referentes ao período de 2004 e 2005. No entanto, o nível d'água à jusante da barragem não apresenta registros freqüentes, sendo que só foram disponibilizados

04 registros em todo o período estudado, referentes aos meses de janeiro, fevereiro, março e abril de 2004.

Para o cálculo dos diagramas de subpressões, foram utilizados todos os dados obtidos referentes a leituras dos piezômetros e cotas de nível da água do reservatório. Para o nível d'água à jusante foram adotadas as quatro leituras existentes, padronizando-se uma cota de jusante para os demais meses analisados. Os dados são agrupados nas 06 seções escolhidas para o estudo.

4.1.2 Diagramas das subpressões medidas

Para a elaboração dos diagramas de subpressões, foram necessárias, para cada mês estudado, as medidas da cota do nível d'água à montante, as cotas piezométricas de cada seção e a cota do nível d'água à jusante.

As leituras de cada piezômetro indicaram a cota do nível d'água no piezômetro, a cota do reservatório e a cota do ponto médio do elemento poroso (que é constante para cada piezômetro). Com estes dados obteve-se a pressão hidrostática de acordo com a equação 4.1 (ENGETEC, 2005).

$$P_1 = \frac{(C - F)}{10} \quad (4.1)$$

em que,

P_1 : Pressão hidrostática (kgf/cm^2);

C: Cota do nível d'água no piezômetro (m);

F: Cota do ponto médio do elemento poroso (m).

O número 10 que aparece no denominador da equação corresponde a conversão de unidades de metros por coluna d'água (mca) para kgf/cm^2 , onde 10 mca são iguais a 1 kgf/cm^2 .

Para o cálculo das cotas piezométricas de cada Seção foi elaborada a Tabela 4.1, que utiliza os dados obtidos na leitura do instrumento de forma a obter a cota piezométrica.

Tabela 4.1 - Cálculo da Cota do Piezômetro

A	B	C	D	E	F	G
Data da Leitura	Cota do Reservatório (m)	Cota do Nível d'água no piezômetro (m)	Pressão Hidrostática (Kgf/cm ²)	Peso Específico da água = γ (Kgf/cm ³)	$\frac{P}{(100\gamma)}$ (m)	Cota Piezométrica (m)

Em que,

- A: Data da Leitura;
 B: Cota do Reservatório (m);

C: Cota do nível d'água no piezômetro que é obtidas das tabelas com as leituras dos aparelhos;

- D: Pressão Hidrostática, que é obtida pela Equação 4.1;
 E: Peso específico da água ($\gamma = 10 \text{ kgf/cm}^3$);
 F: Energia ou carga de pressão ($F=D/(E.100)$);
 G: Cota piezométrica ($G = C+F$).

A Tabela 4.1 tem base de cálculo na equação 4.2 (PORTO R., 2003).

$$H = z + \frac{P_1}{\gamma} \quad (4.2)$$

em que:

H: Cota piezométrica (m);

z: Carga de posição (energia potencial de posição em relação a um plano horizontal de referência) (m);

P_1 : Pressão hidrostática (kgf/cm^2); e

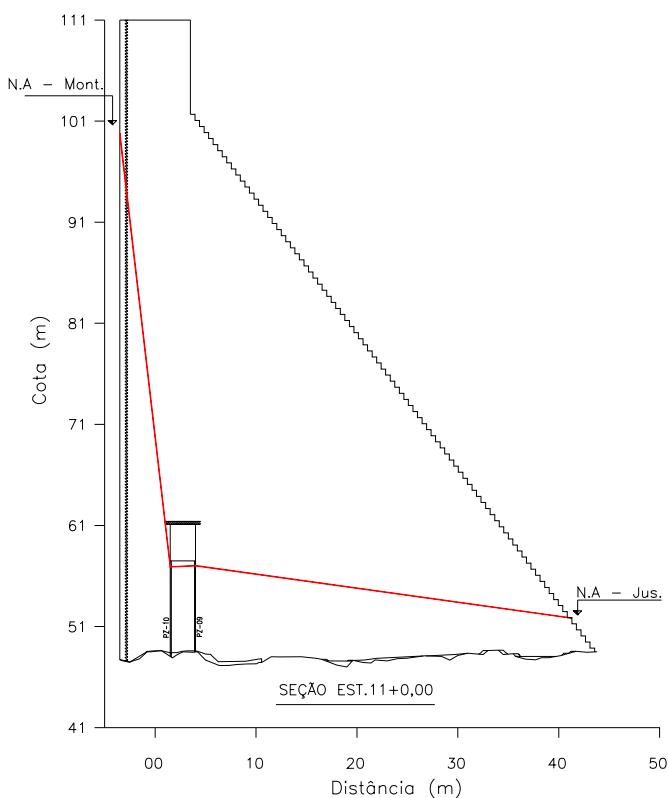
γ : massa específica (kgf/cm^3).

Dessa maneira, pode-se trabalhar com a cota do nível d'água à montante, retirada diretamente dos dados cedidos, com as cotas piezométricas, obtidas pelo método descrito. Faltando somente para o traçado do diagrama de subpressão a cota de jusante.

Esta cota, segundo a Engetec (2005) refere-se à cota do nível do rio à jusante da Barragem, esta medida, de acordo com item 4.1.1 só foi realizada nos quatro primeiros meses de 2004.

Portanto, para os meses posteriores foi adotado o valor de 52,89 m, referente ao mês de Abril de 2004, este valor foi escolhido devido a cota do nível d'água à montante, neste mês, ser a mais aproximada das demais cotas a serem utilizadas. Esta consideração torna-se possível devido a vazão da válvula dispersora não variar neste período, podendo-se concluir que o nível d'água do rio à jusante não sofre variações de cota.

Após a determinação das cotas dos piezômetros, os pontos correspondentes foram plotados na seção transversal relativa a cada furo, ligando-se o nível do reservatório à montante às cotas piezométricas (à montante e à jusante do interior da galeria de drenagem) e, finalmente, à cota do rio à jusante, a fim de se obter a linha piezométrica de cada seção, conforme Figura 4.2. Para cada uma das 06 seções em estudo foram plotadas 15 linhas piezométricas, totalizando 90 diagramas de subpressão.



— Linha Piezométrica medida através dos piezômetros

Figura 4.2 – Exemplo de diagrama de subpressões medidas e plotadas

4.1.3 Diagramas das subpressões de projeto

Segundo a Engesoft (2000a), a intensidade da subpressão é considerada ao longo da base da barragem, sendo adotado o critério do USBR (1987), que define o valor da subpressão na linha dos drenos igual ao nível de jusante mais $1/3$ da diferença da carga hidráulica entre o níveis do reservatório e o de jusante.

Para o traçado do diagrama de pressão admite-se a ligação dos pontos como uma variação linear entre o nível de montante com a cota piezométrica nos drenos e destes ao nível de jusante. Conforme mostrado na Figura 4.3.

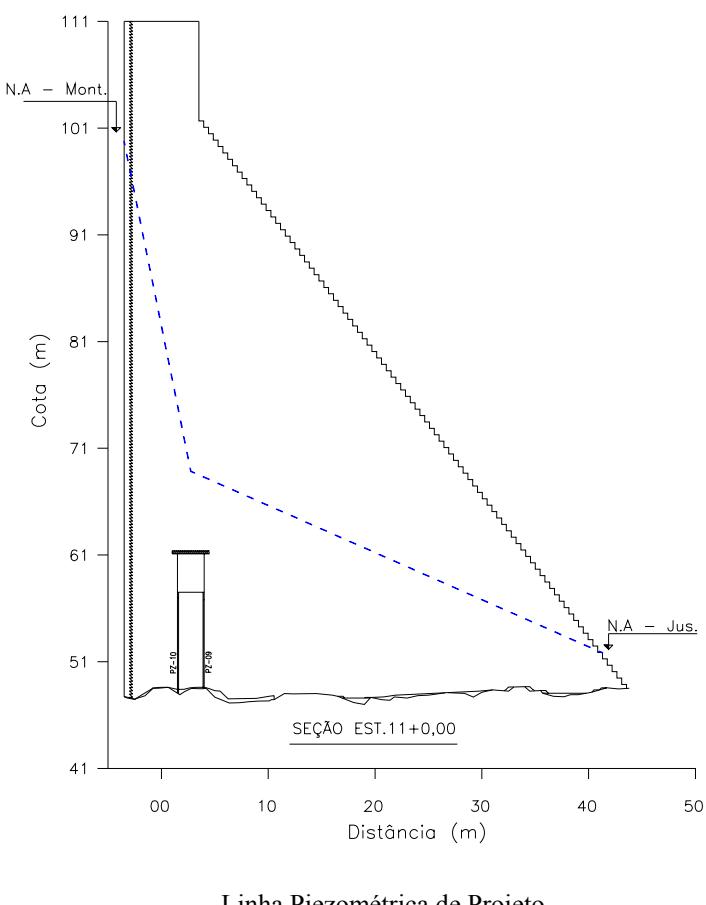


Figura 4.3 – Exemplo de diagrama de subpressões de projeto

Para a elaboração dos diagramas de subpressões, conforme os critérios de projeto, são adotados os mesmos meses que foram utilizados para os traçados dos diagramas das leituras de campo. Utilizando-se para tanto, as mesmas cotas de nível de água à jusante e à montante da barragem, que foram plotadas nos diagramas de subpressões medidas. Sendo assim,

também para cada uma das 06 seções em estudo foram traçados 15 diagramas de subpressões, totalizando 90 diagramas.

4.1.4 Verificação da Eficiência da Cortina de Vedação e Linha de Drenagem

A eficiência da cortina de vedação e da linha de drenagem e, portanto, o efeito de subpressão agindo na fundação da barragem, poderam ser aferidas analisando-se o comportamento das linhas piezométricas.

O comportamento satisfatório do sistema ocorre quando a linha piezométrica plotada, a partir das medições dos piezômetros instalados, apresenta-se inferior ou no máximo igual à linha piezométrica de projeto. Outra forma de analisar a eficiência do sistema é verificar se as cotas dos piezômetros não ultrapassam a cota do teto da galeria de drenagem. Para tanto, são sobrepostos, em cada seção, os diagramas de subpressões medidas e de projeto, conforme Figura 4.4, de forma a facilitar a visualização do comportamento das subpressões na barragem.

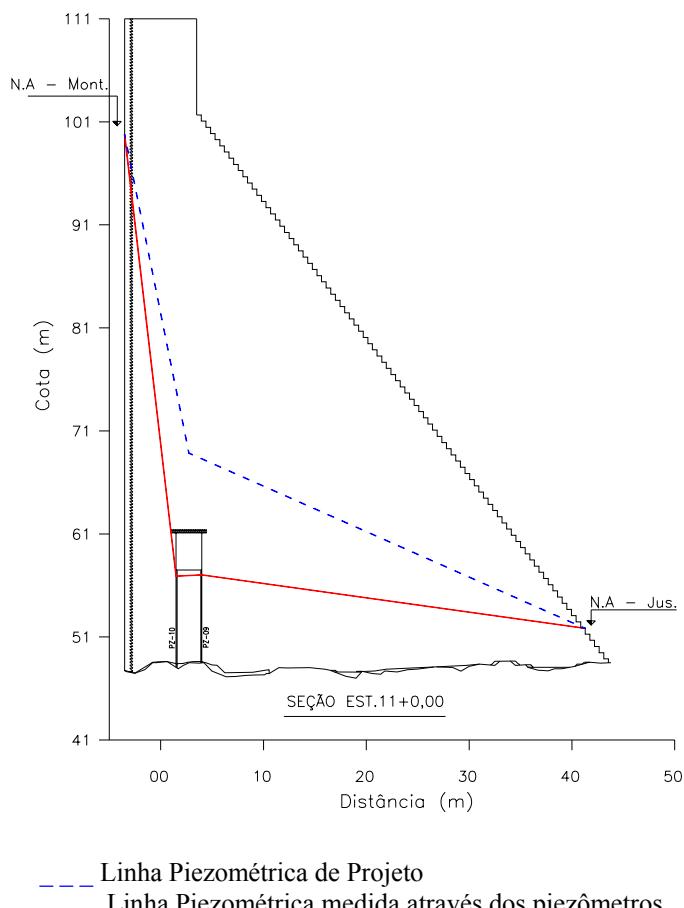


Figura 4.4 – Sobreposições dos Diagramas de Subpressões medidas e de projeto

Este comportamento também é analisado a partir da Tabela 4.2, na qual pode-se comparar a cota piezométrica de projeto, com a subpressão dos piezômetros instalados em cada seção em estudo.

Tabela 4.2 - Cálculo da Cota do Piezômetro

A	B	C	D	E		F				
				Altura do nível d'água a montante (m)	Altura do nível d'água a jusante (m)	Subpressão na linha dos drenos (m)	Medidas Reais de Subpressão Estaca	Piezômetro A	Piezômetro B	
Data da Leitura										

Em que,

- A: Data da leitura;
- B: Altura do nível d'água à montante (H_1), indicada na Figura 4.5;
- C: Altura do nível d'água à jusante (H_2), indicada na Figura 4.5;
- D: Subpressão na linha dos drenos (H_d);
- E: Medidas reais de subpressão no piezômetro localizado à montante na galeria de drenagem (H_m);
- F: Medidas reais de subpressão no piezômetro localizado à jusante na galeria de drenagem (H_j).

Onde, a subpressão na linha dos drenos é calculada pelo critério do USBR (1987), mostrado na equação 4.3.

$$H_d = H_j + 1/3(H_m - H_j) \quad (4.3)$$

Ainda na planilha da Tabela 4.2 é possível a identificação imediata, quando as cotas dos piezômetros encontrarem-se superiores às subpressões de projeto na linha dos drenos, mostrando a cota do piezômetro em negrito, alertando assim possível ineficiência do sistema.

Como existem no mínimo, 02 piezômetros instalados em cada seção estudada, um à montante e outro à jusante na galeria de drenagem, também é possível identificar quando a subpressão do piezômetro de jusante apresenta-se menor que a de montante, pois tal fato caracteriza um comportamento anômalo do sistema, tendo em vista que o comportamento normal do sistema é que a ligação da cota piezométrica de montante para jusante seja decrescente. Quando este fato ocorrer a célula da tabela em questão é destacada por hachura.

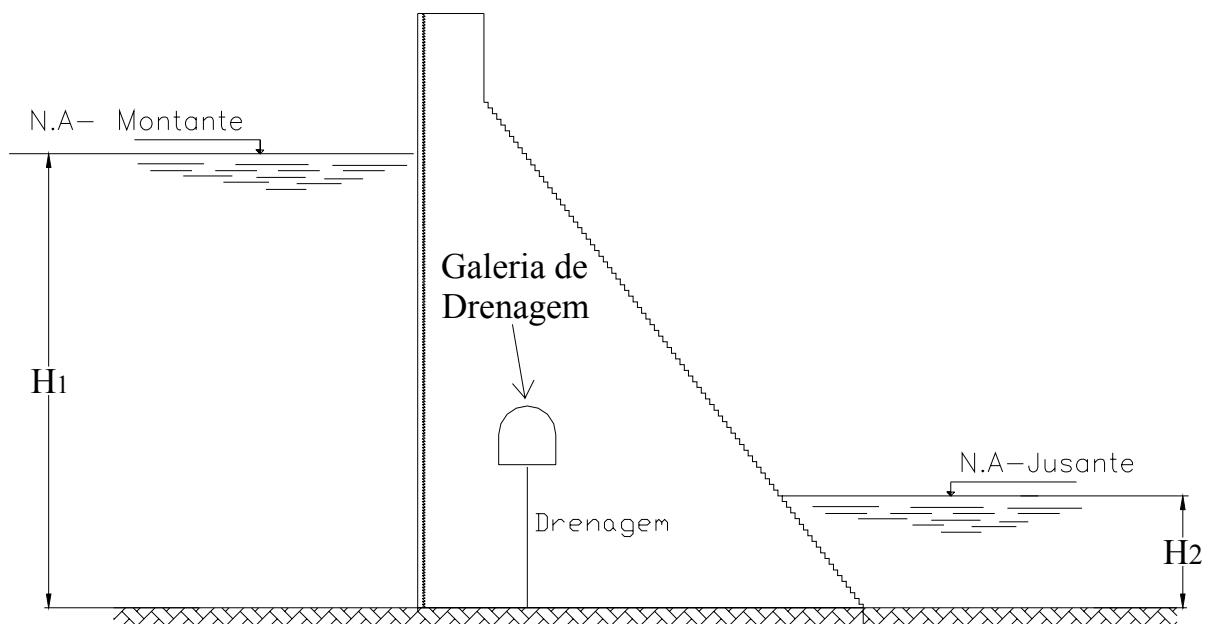


Figura 4.5 – Barragem de Concreto, com nível de água à jusante abaixo do nível do piso da galeria de drenagem

4.2 Coeficiente de Permeabilidade

Os dados de coeficientes de permeabilidade do solo da fundação utilizados foram cedidos pelas empresas Engesoft, Aguasolos Consultoria de Engenharia Ltda., Hidroterra (Engenharia e Comércio S.A.) e pelo DNOCS.

Segundo a Engesoft (2000,b) a investigação geotécnica da barragem Castanhão em 2000 foi realizada utilizando-se 08 (oito) sondagens à percussão (SP) e apenas 02 (duas) sondagens mistas (SM) (iniciadas a percussão e prosseguidas com rotativa ao ser encontrado material impenetrável à percussão), identificadas como SM-4E e SM-7E. Os locais das sondagens estão indicados na Figura 4.6.

Neste trabalho foram utilizados os dados da sondagem SM-4E, correspondente a seção 16 do maciço de CCR e o resultado desta sondagem foi adotado para as demais seções em estudo (Estacas 06, 11, 16, 21, 26 e 31), cujo o perfil individual está mostrado na Figura 4.7, a seguir.

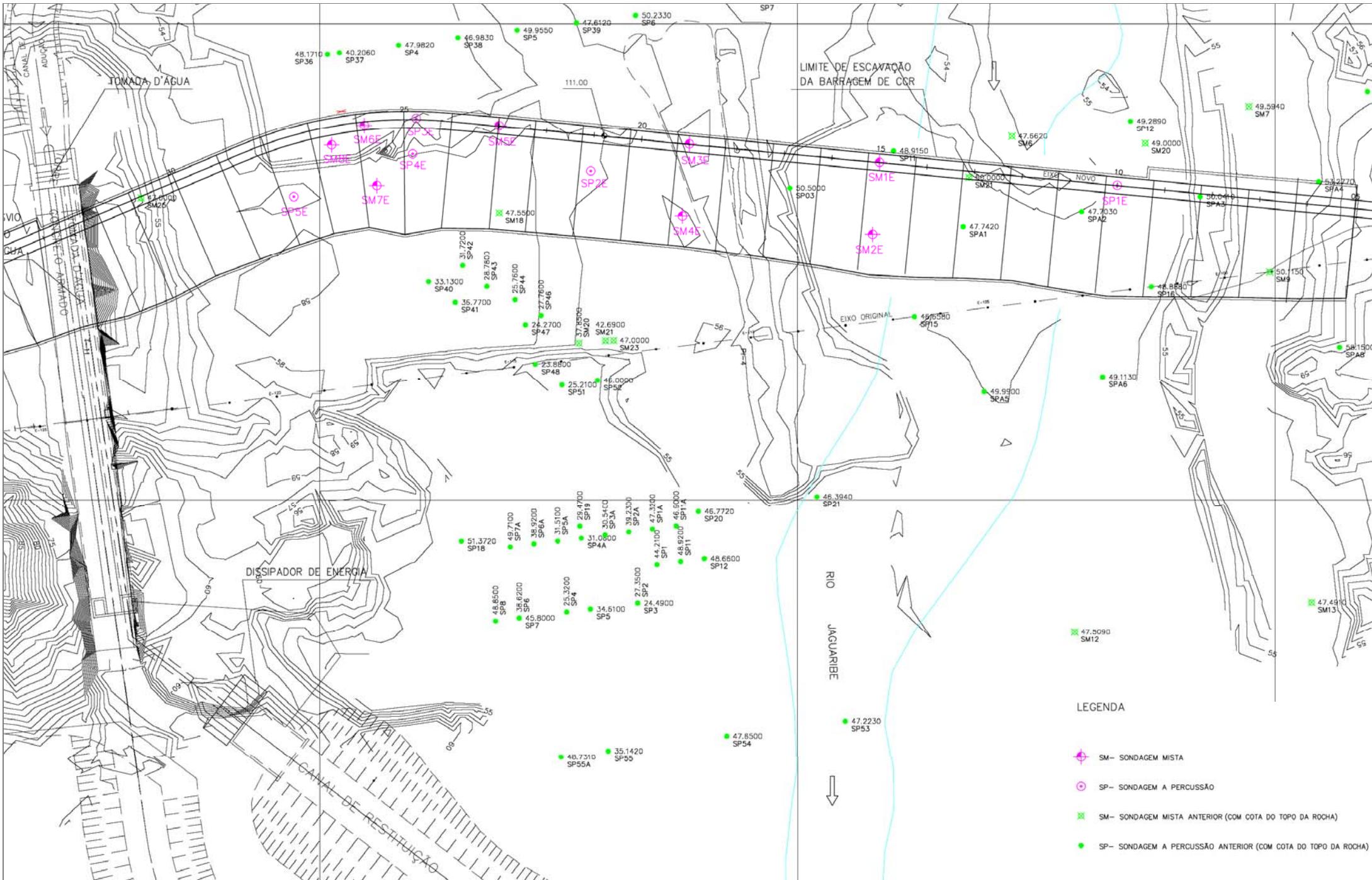


Figura 4.6 – Localização das sondagens na fundação do maciço de CCR, (ENGESOFT, 2000b)

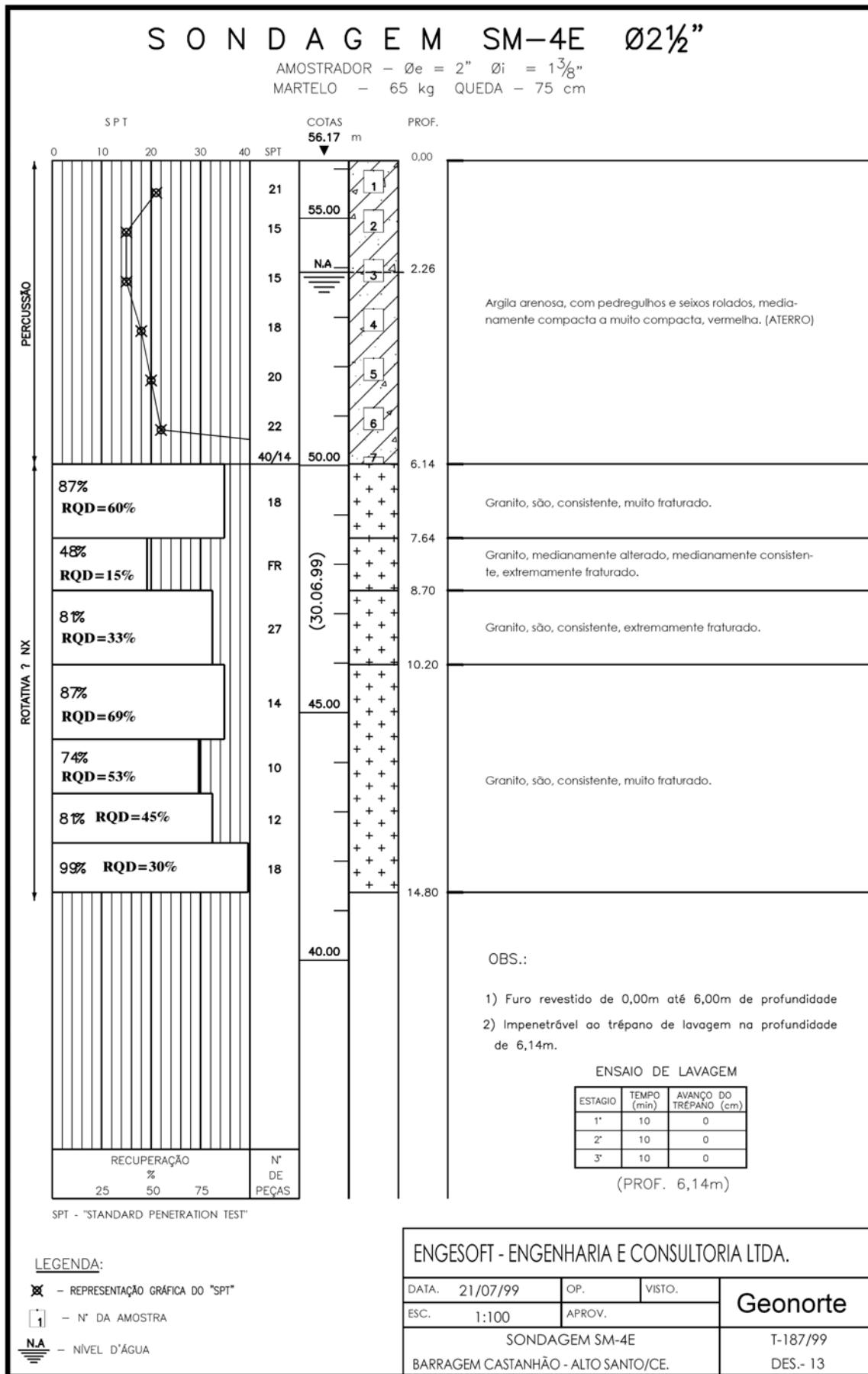


Figura 4.7 – Perfil de sondagem SM-4E (estaca 16), (ENGESOFT, 2000b)

Nesta sondagem (SM-4E) nos trechos perfurados em rocha, foram realizados ensaios de perda d'água do tipo “LUGEON” que foram realizados em cinco estágios de pressões, no sentido descendente, com obturação simples, nos trechos entre 6,20 a 8,70 m; 8,70 a 11,70 m e 11,70 a 14,80 m (ENGESOFT, 2000b).

Os coeficientes de permeabilidade mostrados na Tabela 4.3, correspondem aos valores médios, de cada trecho sondado. Estes valores foram calculados através da média aritmética das várias permeabilidades encontradas em cada trecho em que foi realizado o ensaio de perda d'água.

Tabela 4.3 – Coeficientes de Permeabilidade média por trecho

Trecho (m)	Profundidade (m)	K _{médio} (cm/s)
6,20 - 8,70	2,5	6,50 x 10 ⁻⁵
8,70 - 11,70	3,0	1,01 x 10 ⁻³
11,70 - 14,80	3,1	1,10 x 10 ⁻⁴

K _{médio}: coeficiente de permeabilidade médio do trecho

Como os valores encontrados pela Engesoft (2000b) correspondem apenas a uma seção e a generalização deste valor para toda a fundação pode não representar uma boa aproximação, optou-se pela escolha de valores médios obtidos através do cálculo do coeficiente de permeabilidade equivalente ou a utilização de coeficientes de estudos anteriores no eixo da barragem, como os realizados na época da aplicação de injeção de cimento.

Segundo a Aguasolos e Hidroterra (1997) os ensaios de perda d'água executados no maciço rochoso, durante os serviços de injeções de cimento, indicam coeficiente de permeabilidade da ordem de $1,0 \times 10^{-4}$ à $3,5 \times 10^{-3}$ cm / s.

4.3 Medidas de vazão pela fundação

As medidas de vazão pela fundação da Barragem Castanhão foram obtidas através de drenos instalados na fundação do trecho do maciço em CCR da barragem e as simulações de fluxos foram determinadas a partir do aplicativo SEEP/W (GEOSLOPE), para as quais utilizou-se dados como níveis de água à montante e à jusante da barragem e sobre a permeabilidade da fundação.

4.3.1 Seleção dos dados

Os dados utilizados foram relativos às leituras da vazão de água dos drenos de fundação. O volume d'água correspondente a vazão de infiltração pela fundação da barragem foi coletado através de 151 furos de drenagem, à jusante da cortina de vedação, distribuídos ao longo de toda a extensão da galeria de drenagem do maciço de CCR e que estão instalados a cada 4,0 m.

A Engetec forneceu dados das leituras dos drenos do período entre 2004 e 2005, porém em 2004 só foram disponibilizadas cinco leituras, que correspondem aos meses de janeiro, abril, maio, junho e julho e no ano de 2005 apenas seis leituras referentes aos meses de janeiro, fevereiro, março, julho, agosto e setembro.

Portanto, os dados estudados totalizam 11 leituras, destas, 9 correspondem ao período chuvoso da região e apenas duas ao período seco, este fato impossibilita a análise da sazonalidade das medidas, ou seja, o estudo da vazão de infiltração nos períodos de chuva e seco, a fim de verificar se o fluxo pela fundação tem o mesmo comportamento durante o ano todo ou se varia entre o período seco e chuvoso.

As medidas de vazão cedidas foram realizadas nas saídas das galerias de drenagem, localizadas nos três portões de acesso, e diretamente na saída dos furos de drenagem, conforme descrito no item 3.3.3.

Para a simulação do fluxo através da fundação da barragem foram necessários dados sobre os níveis d'água à montante e à jusante da barragem, além de dados sobre o coeficiente de permeabilidade da fundação da barragem obtidos de acordo com item 4.2. Para os níveis d'água tanto à montante como à jusante adotando-se o mesmo critério do item 4.1.2.

Não foram utilizadas cortinas de injeção de cimento na fundação para a simulação de fluxo, uma vez que não se obteve informações sobre localização exata, profundidade e coeficiente de permeabilidade, optando-se assim por não utilizá-las.

4.3.2 Análise do fluxo através do programa SEEP/W

O SEEP/W é um *software* gráfico, pertencente ao GEO-SLOPE International Ltd., que opera no Microsoft Windows e tem como base de cálculo o método de elementos finitos, podendo ser utilizado para modelar a movimentação e distribuição das poro-pressões (pressão devido à presença da água) em meios porosos, tanto em solo como rocha, assim como analisar problemas de percolação, tanto simples como de alta complexidade.

Este programa analisa a percolação de forma geral, para modelos de fluxo saturado e não saturado. É formulado com base no coeficiente de permeabilidade do solo e na água contida, utilizando uma função de poro-pressão da água. O fluxo em solo não-saturado segue a Lei de Darcy, de maneira semelhante ao fluxo em solo saturado que é proporcional ao gradiente hidráulico e ao coeficiente de permeabilidade (GEO-SLOPE, 2001).

Para a discretização da malha no domínio podem ser utilizados elementos finitos quadriláteros e triangulares e cada um pode ter vários números de nós secundários opcionais para prover interpolação de ordem mais alta de valores de nós dentro do elemento.

As condições de contorno utilizadas na modelagem de percolação são: carga total, fluxo de percolação nodal e fluxo de percolação por área. A condição de contorno da carga hidráulica no reservatório é uma função do nível de reservatório.

Os principais parâmetros de entrada do modelo são as próprias condições de contorno citadas e o coeficiente de permeabilidade do maciço e fundação da Barragem.

4.3.3 Dados de entrada para a modelo

Com o objetivo de proceder à realização das simulações numéricas de fluxo, visando a avaliação das condições operacionais do sistema de drenagem interna da Barragem Castanhão, foram selecionadas seis seções transversais do trecho em CCR da barragem, correspondentes às Estacas 06, 11, 16, 21, 26 e 31.

Em seguida, elaborou-se um eixo de coordenadas, sendo o eixo das abscissas a distância (m) da seção transversal e o eixo das ordenadas a cota (m) do reservatório, para inserir o desenho de cada seção em estudo. A geometria das seções submetidas à análise foi reproduzida em malhas de elementos finitos, adotando-se elementos quadrangulares lineares, ver na Figura

4.8, devendo-se adotar para cada camada da fundação o coeficiente de permeabilidade correspondente.

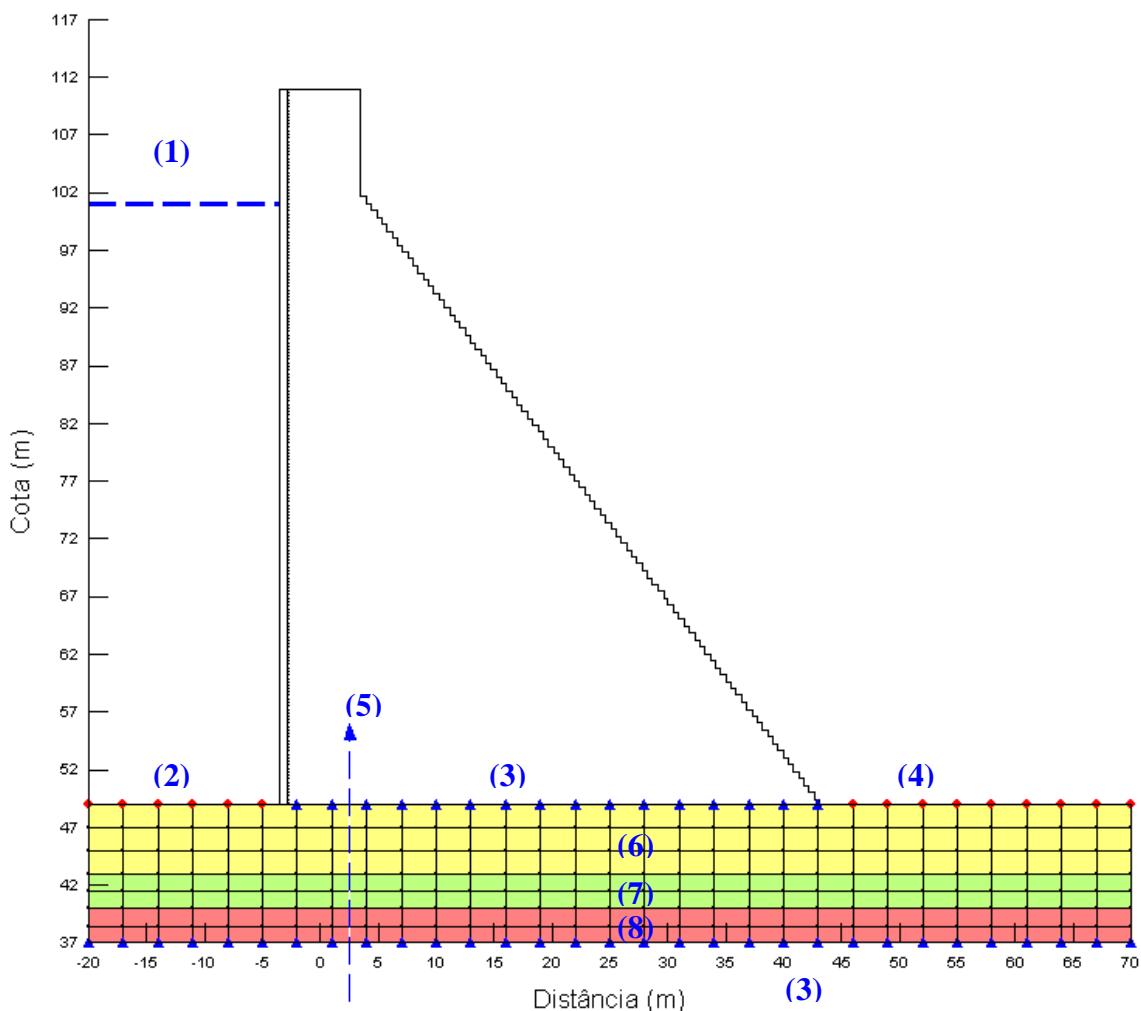


Figura 4.8 – Discretização da malha de elementos finitos para três camadas de solo na fundação e condições de contorno do problema da Seção 21.

A Figura 4.8 mostra a distribuição da malha de elementos finitos, as condições de contorno, além de outros elementos utilizados para a simulação, onde as numerações encontradas na figura identificam estes elementos, sendo (1) o nível do reservatório à montante da barragem, (2) condição de contorno de carga total adotada como o nível d'água à montante do reservatório, (3) fluxo de percolação, considerado zero para o contato concreto-rocha e para a camada abaixo da cota 37, (4) condição de contorno de carga total referente ao nível d'água à jusante, (5) seção selecionada para medição do fluxo de percolação pela fundação, (6), (7) e (8) correspondem respectivamente a primeira, segunda e terceira camadas de solo da fundação.

Quanto às condições de contorno, foram adotados para os nós situados à montante e à jusante, referentes à carga total do fluxo, os níveis de água correspondentes à montante e à jusante do reservatório, conforme Tabela 4.4. Para o contato concreto-rocha e para o limite de 14,10 m estabelecido para profundidade de fundação o fluxo foi considerado zero.

Tabela 4.4 – Condições de contorno de carga total de fluxo à jusante e à montante da barragem

Data da Leitura	Altura do nível d'água à montante (m)	Altura do nível d'água à jusante (m)
23-jan-04	71,33	53,23
20-abr-04	100,74	52,89
20-mai-04	101,17	52,89
16-jul-04	101,55	52,89
27-jan-05	99,73	52,89
21-fev-05	99,58	52,89
16-mar-05	99,42	52,89
17-agosto-05	99,39	52,89
20-set-05	99,02	52,89

Para as situações em que a simulação foi realizada para apenas uma camada de fundação, ou seja, nos casos onde não se dispõe dos coeficientes de permeabilidade do solo para as diversas camadas da fundação da barragem, a malha de elementos finitos foi distribuída uniformemente por toda fundação, conforme Figura 4.9.

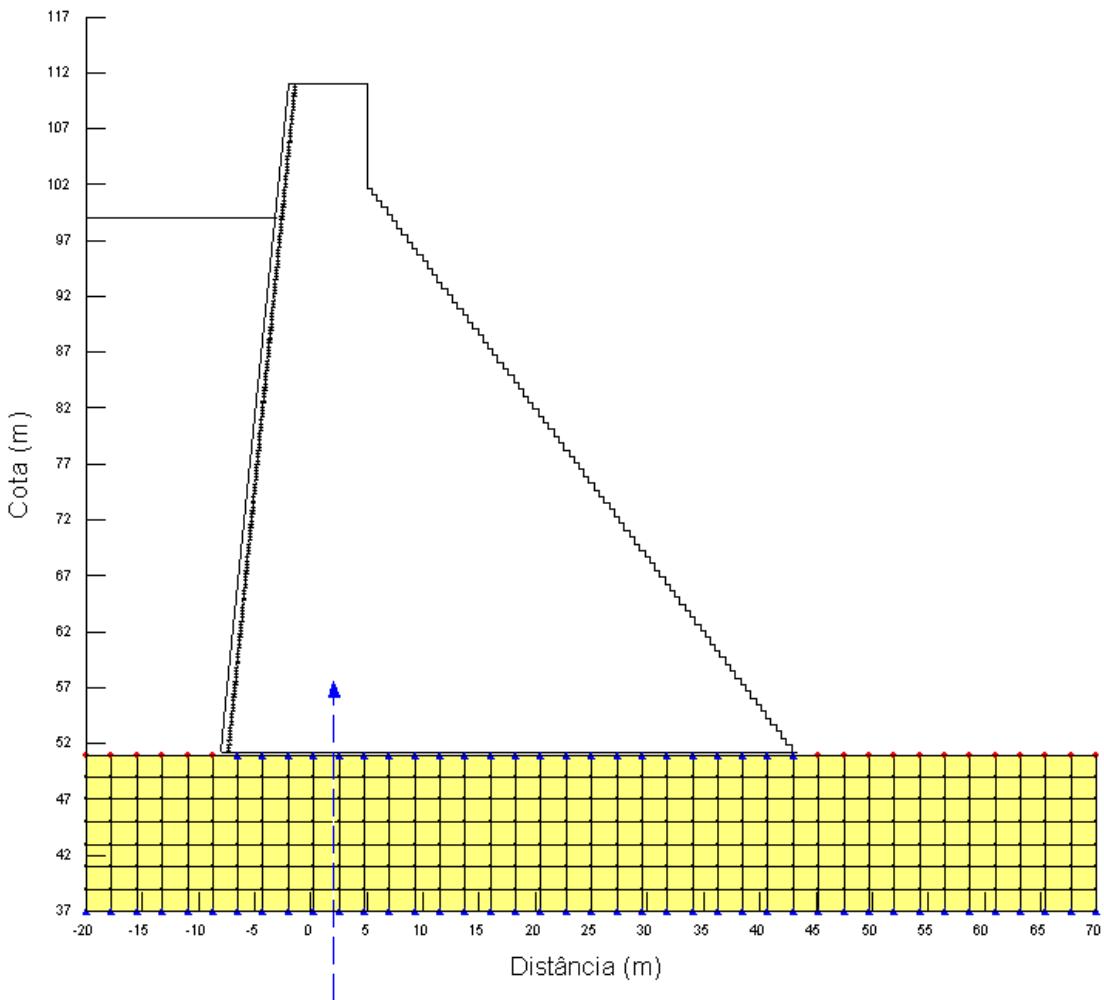


Figura 4.9 – Discretização da malha de elementos finitos da Seção 06, para a fundação no caso de uma única camada de solo.

4.3.4 Aplicação do Modelo

Foi realizado um total de 270 simulações nas Seções 06, 11, 16, 21, 26 e 31 da barragem, correspondentes aos dados de níveis do reservatório e cotas da água à jusante (referentes aos níveis do rio à jusante da barragem) nos meses de janeiro, abril, maio e julho de 2004 e janeiro, fevereiro, março, agosto e setembro de 2005. Cada seção foi simulada para os 09 meses em observação e para cada coeficiente de permeabilidade adotado.

As simulações foram divididas em 05 cenários, nos quais variou-se o coeficiente de permeabilidade da fundação, a fim de verificar o comportamento do fluxo pela fundação da barragem.

- Primeiro Cenário

Para o primeiro cenário adotou-se a permeabilidade obtida pela Engesoft (2000b), na qual se encontra dividida em 03 camadas de rocha com permeabilidades diferentes. O cálculo foi realizado para cada seção e os valores do coeficiente de permeabilidade das camadas não variaram, porém, como todas as seções são fixas na cota 37, a realização da simulação variou com relação às espessuras das camadas entre as seções, conforme Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Espessuras e permeabilidades referentes a cada Seção estudada.

Estaca	Espessuras (m)		
	1 ^a camada	2 ^a camada	3 ^a camada
	$k = 6,50 \times 10^{-5}$ (cm/s)	$k = 1,01 \times 10^{-3}$ (cm/s)	$k = 1,10 \times 10^{-4}$ (cm/s)
6	8,0	3,0	3,1
11	5,5	3,0	3,1
16	2,5	3,0	3,1
21	3,0	3,0	3,1
26	2,5	3,0	3,1
31	2,5	3,0	3,1

A Figura 4.10 mostra o gráfico com o coeficiente de permeabilidade variando com a pressão: (a) refere-se ao comportamento do coeficiente de permeabilidade da Estaca 06; (b) corresponde a Estaca 11; (c) é referente às Estacas 16, 26 e 31, estas seções têm o mesmo gráfico da permeabilidade em função da carga total de pressão, isto porque todas possuem as mesmas espessuras nas camadas da fundação, conforme Tabela 4.5 e a (d) a Estaca 21.

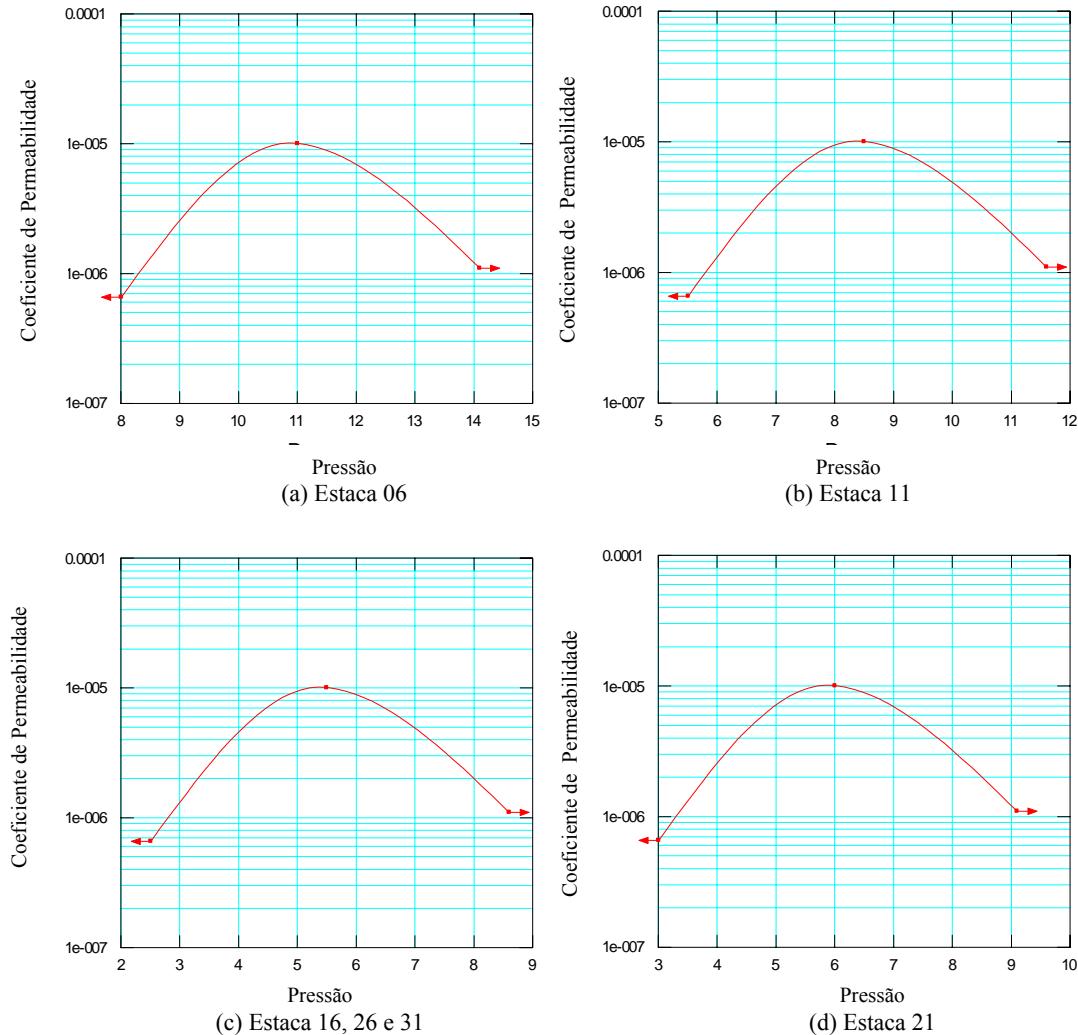


Figura 4.10 – Gráficos do Coeficientes de Permeabilidade (m/s) versus Pressão (m).

- Segundo Cenário

O segundo cenário faz uso do cálculo de uma permeabilidade equivalente, para cada uma das seis (06) Seções em estudo, a partir dos dados referentes à espessura de cada camada da fundação e da permeabilidade, conforme Tabela 4.5. Este cálculo, segundo Caputo (1988), é realizado através da equação 4.4.

$$k_v = \frac{\sum e_i}{\sum \frac{e_i}{k_i}} \quad (4.4)$$

Em que,

k_v : coeficiente de permeabilidade perpendicular à estratificação (vertical);

e_i : espessura da camada de solo;

k_i : coeficiente de permeabilidade do solo na respectiva camada.

Logo, para os dados obtidos da Tabela 4.3, os cálculos seguiram a equação 4.5:

$$k_v = \frac{e_1 + e_2 + e_3}{\frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \frac{e_3}{k_3}} \quad (4.5)$$

Em que,

e_1 : espessura da primeira camada de solo (conforme 1ª camada da Tabela 4.5);

e_2 : espessura da segunda camada de solo (3,00 m);

e_3 : espessura da terceira camada de solo (3,10 m);

k_1 : coeficiente de permeabilidade da primeira camada de solo ($6,5 \times 10^{-5}$ cm/s);

k_2 : coeficiente de permeabilidade da segunda camada de solo ($1,01 \times 10^{-3}$ cm/s);

k_3 : coeficiente de permeabilidade da terceira camada de solo ($1,10 \times 10^{-4}$ cm/s).

O coeficiente de permeabilidade equivalente calculado conforme a equação 4.5 para as Seções 06, 11, 16, 21, 26 e 31, é expresso segundo a Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Coeficiente de Permeabilidade Equivalente para as Seções 06, 11, 16, 21, 26 e 31

Estaca	k_v (cm/s)
6	$9,14 \times 10^{-5}$
11	$1,00 \times 10^{-4}$
16	$1,24 \times 10^{-4}$
21	$1,18 \times 10^{-4}$
26	$1,24 \times 10^{-4}$
31	$1,24 \times 10^{-4}$

- Terceiro Cenário

O terceiro, o quarto e o quinto cenários consistem na utilização de uma única camada de solo na fundação da barragem, para tanto nesta camada foi adotado um coeficiente de permeabilidade para cada cenário executado.

Para o terceiro cenário considerou-se um valor médio de $1,8 \times 10^{-3}$ cm/s para o coeficiente de permeabilidade obtido, segundo a Aguasolos e Hidroterra (1997), nos ensaios de perda d'água executados no maciço rochoso, durante os serviços de injeções de cimento.

- Quarto Cenário

Para o quarto cenário foi considerado o maior valor de percolação encontrado pela Engesoft (2000b) no ensaio de perda d'água realizado, tal valor corresponde $1,01 \times 10^{-3}$ cm / s.

- Quinto Cenário

Na escolha do coeficiente de permeabilidade do quinto cenário adotou-se a condição mais crítica de permeabilidade, ou seja, utilizou-se o maior valor deste coeficiente, que corresponde a um maior valor de percolação de água pelo maciço rochoso. Adotou-se o valor de permeabilidade maior, $3,50 \times 10^{-3}$ cm / s, portanto o valor que proporciona a maior vazão pela fundação, caracterizando-se como valor de vazão mais crítico, este valor foi obtido pela AGUASOLOS e HIDROTERRA (1997).

4.3.5 Localização e seleção dos dados reais de vazão de infiltração

Os 151 furos de drenagem estão localizados a cada 4,00 m, ao longo da galeria de drenagem da barragem e à jusante da cortina de vedação, conforme item 3.3.3. Para realização deste estudo foram utilizados os dados de vazões totais e individuais de infiltração na fundação, referentes aos meses de janeiro, abril, maio, junho, julho e novembro de 2004, e também de janeiro, fevereiro, março, julho, agosto e setembro de 2005.

Foram utilizados os dados de vazões individuais pela fundação, tendo em vista que as vazões totais, medidas a partir das saídas das canaletas de drenagem, não coletam somente as águas dos drenos de fundação, mas também a água de drenagem do próprio maciço em CCR, conforme Figura 4.11.

Como as vazões totais medidas na Barragem não contêm somente vazões de infiltração, essas leituras foram retiradas deste estudo, essa consideração foi baseada na teoria proposta pelo CBGB (1996), na qual é recomendado sempre procurar individualizar a contribuição das diferentes fontes de infiltração, a saber, drenos de fundação, drenos de concreto, drenos de juntas entre os blocos, fissuras no concreto, esgotamento de equipamentos, entre outros.

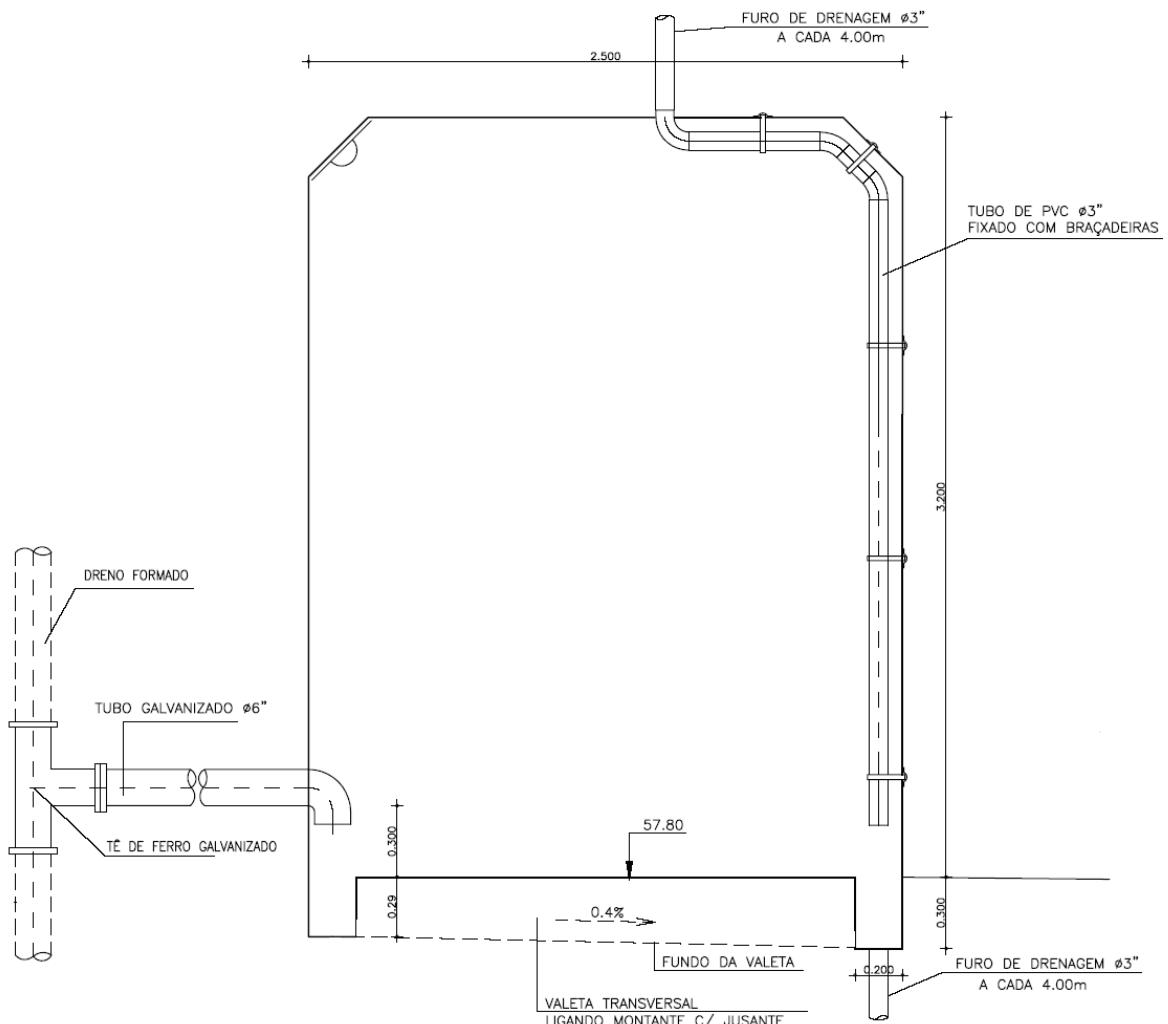


Figura 4.11 - Localização dos furos de drenagem e drenos na galeria do maciço em CCR (ENGESOFT, 2000c)

Os dados das vazões individuais dos drenos estão tabelados de acordo com a data da leitura e com a numeração do furo de drenagem, observando-se se os drenos apresentaram, ou não, fluxo d'água. Posteriormente, os drenos, próximos às seções analisadas através de simulações numéricas de percolação pela fundação, foram selecionados com a finalidade de se comparar as vazões de fundação simuladas e reais.

Para efeito de comparação dos valores de fluxo pela fundação foram considerados três casos, em que os valores obtidos na simulação de cada mês e seção são correlacionados com as vazões medidas nos furo de drenagem.

- Caso 1: o valor de fluxo a ser comparado com os valores simulados refere-se exatamente ao furo de drenagem localizado na seção em estudo;

- Caso 2: o valor do fluxo simulado é comparado com valor médio de vazão, obtido a partir da média de 3 a 5 furos de drenagem mais próximos da seção estudada;
- Caso 3: o valor do fluxo simulado é relacionado com o valor médio de vazões mais próximas da seção estudada, neste caso só entrarão na média os valores de vazões maiores que zero, porém quando nos 5 furos mais próximos não ocorrer vazão, esta será considerada nula.

4.3.6 Análise da eficiência da cortina de vedação

A análise da eficiência da cortina de vedação da fundação da barragem é dada pelos resultados obtidos nas leituras de vazão máxima por furo de drenagem, considerando a recomendação sugerida no II Simpósio Sobre Instrumentação de Barragens (CBGB, 1996), na qual a vazão máxima por furo de drenagem deve estar limitada a 50,00 litros/minuto.

Esta análise foi realizada a partir dos resultados obtidos nas leituras de vazão por furo de drenagem, em que todos os valores foram comparados com o limite de vazão especificado acima. Um bom funcionamento do sistema é indicado no caso das vazões se manterem abaixo deste limite, caso contrário, o furo que apresentar vazão maior que este limite deve ser monitorado com mais atenção, principalmente no que diz respeito a inspeções visuais, presença de carreamento de materiais e, se necessário, realizar intervenções a fim de corrigir este problema.

Os dados foram lançados em uma planilha eletrônica, onde as colunas referem-se à data da leitura e as linhas ao número do furo de drenagem. No caso de vazões maiores do que o limite de 50 L/min, a leitura é apresentada automaticamente em negrito, como forma de destacar o comportamento insatisfatório do furo da cortina de drenagem.

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados das análises das simulações baseadas nas medidas da instrumentação do trecho do maciço em CCR e na fundação da Barragem Castanhão. Este estudo se encontra dividido em duas etapas: análise da subpressão atuante na fundação através das leituras dos piezômetros e análise das vazões reais obtidas dos furos de drenagem e das vazões simuladas, calculadas utilizando o aplicativo GEOSLOPE (SEEP/W).

Os resultados foram comparados com as especificações do projeto “As built” e valores recomendados na literatura para grandes barragens, quando verificou-se se o seu desempenho está dentro dos limites aceitáveis de segurança.

5.1 Estudo das Subpressões

O estudo dos registros das subpressões no contato do maciço de CCR com a fundação rochosa foi feito através das leituras realizadas nos piezômetros, tipo Casagrande, instalados na barragem e mostraram comportamento satisfatório das subpressões, tendo em vista que a comparação entre os diagramas de subpressões medidas pelos piezômetros e os obtidos através de critérios de projeto comprovaram este fato. Os diagramas das seções referentes às Estacas 6, 11, 16, 21 e 31, apresentaram comportamento satisfatório, no que concerne a comparação entre subpressão medida e de projeto, conforme se observa na Figura 5.1 e no APÊNDICE A.

O caso mais crítico do traçado dos diagramas destas seções foi observado na Estaca 31, referente ao primeiro mês de operação da Barragem (Janeiro de 2004), em que, as linhas piezométricas de projeto e as obtidas através dos piezômetros apresentaram-se praticamente sobrepostas, como mostra a Figura 5.2.

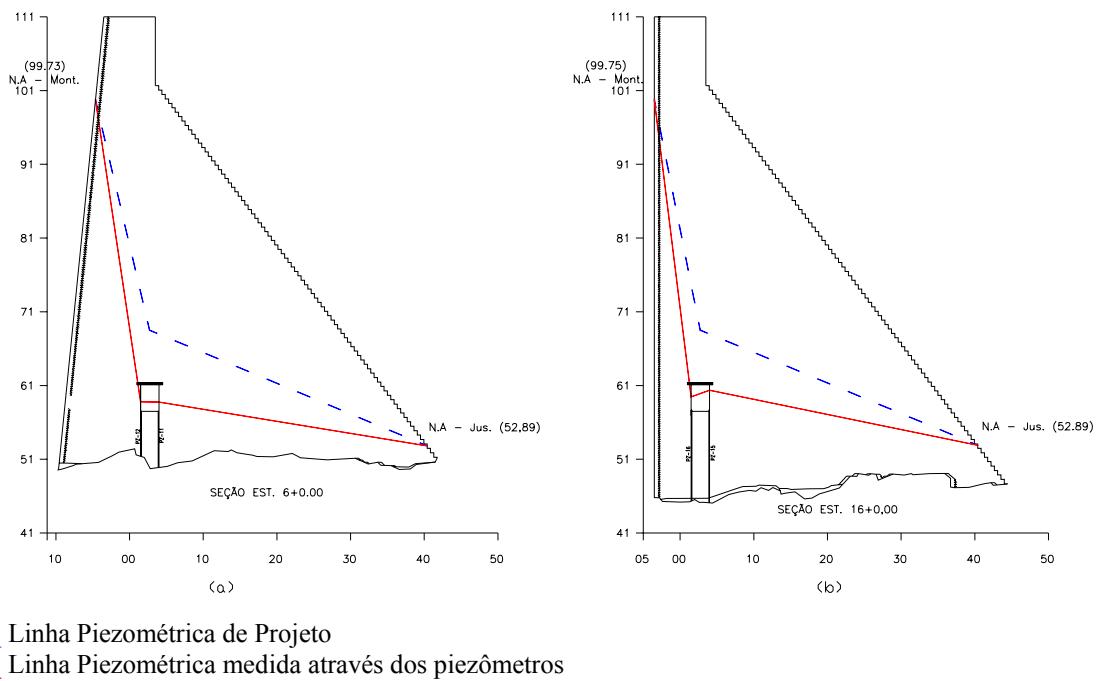


Figura 5.1 – Diagramas de subpressões medidas e de projeto – (a) Estaca 06 (janeiro de 2005), (b) Estaca 16 (junho de 2005)

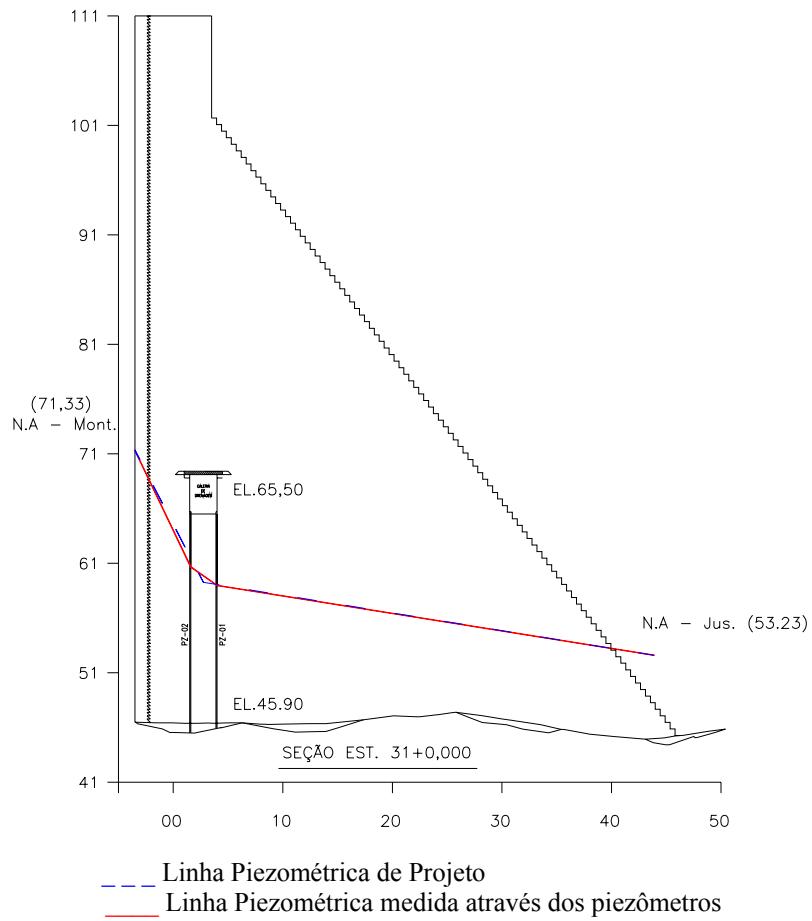


Figura 5.2 - Diagrama de subpressões medidas e de projeto – Estaca 31 (janeiro de 2004)

Esta situação limite também foi observada na Tabela 5.1, que mostra as subpressões reais e medidas na linha dos drenos, na qual o piezômetro 02, localizado à jusante na galeria de drenagem, apresentou valor de cota piezométrica maior que a subpressão de projeto.

Tabela 5.1 - Dados utilizados para elaboração dos diagramas de subpressões de projeto e reais, para a Estaca 31

A Data da Leitura	B Altura do nível d'água a montante (m)	C Altura do nível d'água a jusante (m)	D Subpressão na linha dos drenos (m)	E Medidas Reais de Subpressões Est 31	
				F Piezômetro 01	F Piezômetro 02
jan-04	71,33	53,23	59,26	58,98	60,67
fev-04	94,3	53,51	67,11	60,03	62,35
mar-04	100,37	55,2	70,26	61,36	63,60
abr-04	100,74	52,89	68,84	60,58	63,31
mai-04	101,17	52,89	68,98	60,85	63,89
jul-04	101,55	52,89	69,11	60,93	64,55
jan-05	99,73	52,89	68,50	61,46	64,59
fev-05	99,58	52,89	68,45	60,85	66,10
mar-05	99,42	52,89	68,40	60,90	66,12
abr-05	99,94	52,89	68,57	61,00	65,93
mai-05	99,93	52,89	68,57	60,79	65,94
jun-05	99,75	52,89	68,51	60,70	64,35
ago-05	99,39	52,89	68,39	60,69	65,62
set-05	99,02	52,89	68,27	60,75	65,62
nov-05	98,27	52,89	68,02	60,72	65,61

Cota piezométrica de montante maior que a de Jusante

Em negrito Cota piezométrica real maior que a projetada

O primeiro ano de operação do Castanhão deu-se em 2004, portanto esta medida referente à Janeiro de 2004, na qual, a cota do reservatório encontrava-se com 71,33 m, corresponde ao período de enchimento do reservatório. Nos meses seguintes, o nível de montante da Barragem apresenta crescimento mais estável, conforme Figura 5.3. Em Fevereiro de 2004 este nível atingiu 94,3 m e continuou crescendo até o fim do período chuvoso, porém de maneira mais lenta. No ano seguinte o nível do reservatório manteve-se com valor praticamente constante, como pode também ser verificado na Figura 5.3, o que confirma uma situação singular para os primeiros meses de operação da barragem, especialmente para janeiro de 2004.

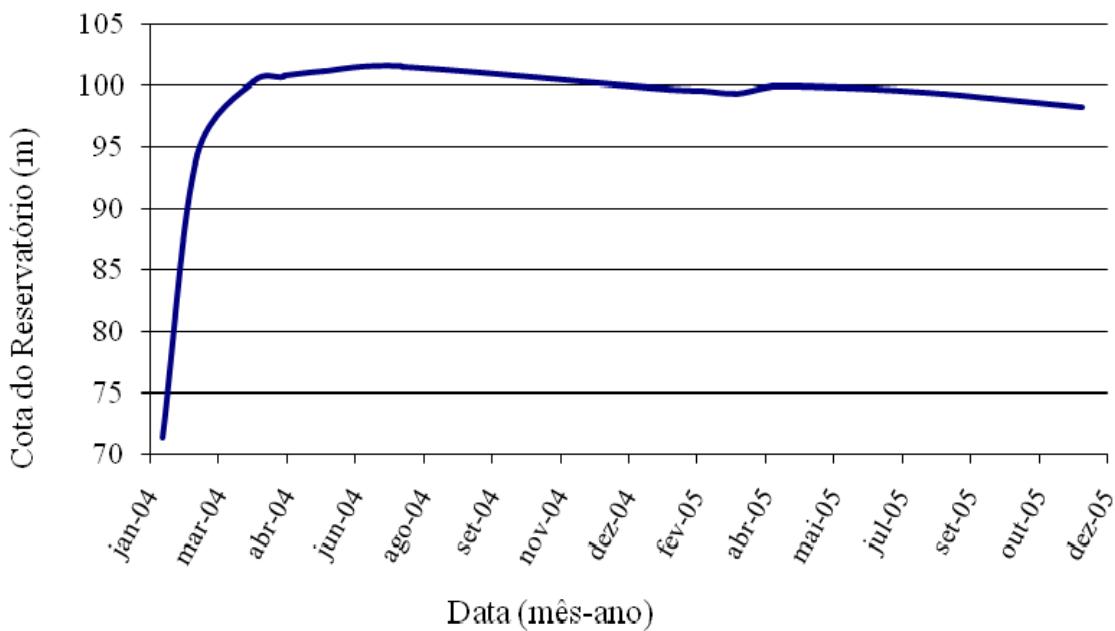


Figura 5.3 – Gráfico das cotas do nível d’água do reservatório da Barragem Castanhão referente aos anos de 2004 e 2005

Como a diferença entre a subpressão na linha dos drenos, projetada e medida, na Estaca 31, no mês de janeiro de 2004, representou apenas 2,4 % e este fato demonstrou-se isolado, tendo em vista que não se repetiu nos outros meses em estudo, conforme se observou na Tabela 5.1, este comportamento pode ser atribuído ao período de enchimento do reservatório, que se caracteriza instável para as subpressões atuantes na fundação. Esta situação também é citada por Silveira (2003), confirmando que a análise das subpressões, medidas na fundação das barragens de concreto, deve ser realizada após certa estabilização, que normalmente ocorre nos primeiros meses após o término do enchimento do reservatório.

A Seção 26 tem 06 piezômetros instalados, dos quais 05 estão em funcionamento e foi analisada separadamente por tratar-se de um caso em que o diagrama de subpressões medido foi o mais real possível, tendo em vista o maior número de piezômetros instalados ao longo desta seção transversal. Portanto, neste caso, foi possível observar-se, mais precisamente, o comportamento da linha piezométrica e compará-lo com a literatura existente, na qual os projetos são baseados e desenvolvidos.

A Figura 5.4 mostra os quatro tipos de comportamento encontrados da linha piezométrica na Seção 26, correspondentes ao período estudado. A Figura 5.4 (a) refere-se à janeiro de 2004 e mostra que o diagrama de subpressões de projeto nos dois primeiros piezômetros, localizados

na posição de montante para jusante (Piezômetros 03 e 05), foi maior do que o diagrama obtido pelas medidas de campo, ocorrendo a interseção das linhas piezométricas no Piezômetro 06, localizado na parte central da seção transversal, sendo que nos últimos (Piezômetros 07 e 08) ocorreu a inversão na posição das linhas dos diagramas.

Observou-se também que, neste caso, a linha piezométrica medida, a partir da linha dos drenos, tem comportamento linear, mostrando uma pequena ascendência, até o último piezômetro instalado (08), e a partir deste instrumento, verificou-se uma queda acentuada até unir esta cota à de jusante.

A Figura 5.4 (b) mostra os diagramas de subpressões projetadas e medidas em março de 2004 na Estaca 26, na qual a linha medida encontra-se totalmente abaixo da projetada, demonstrando um bom funcionamento do sistema. Esta tendência de comportamento foi percebida também durante as leituras de Fevereiro, Abril e Maio do mesmo ano, mostrando sempre variação no último piezômetro de jusante (08), cuja leitura da cota piezométrica ultrapassou o diagrama de projeto, ver APÊNDICE A.

Para a Engetec (2005), a eficiência da cortina de vedação e da linha de drenagem e, portanto, o efeito de subpressão agindo na fundação da barragem, pode ser aferida analisando-se o comportamento da linha piezométrica, no qual se diz satisfatório quando a linha piezométrica tende a aproximar-se do nível de jusante. Fato que pode ser observado nos meses de Fevereiro, Março, Abril e Maio de 2004 conforme Figura 5.4 (b) e APÊNDICE A.

A Figura 5.4 (c) corresponde ao mês de julho de 2004 da Estaca 26 e mostra um comportamento singular em comparação aos demais meses em estudo, apresentando uma queda brusca na linha piezométrica a partir do Piezômetro central (06) até a cota de jusante, o que está relacionado com a ausência de leituras dos Piezômetros 07 e 08 neste mês, logo a linha piezométrica que deveria ser a ligação de todas as cotas dos piezômetros da seção, neste caso, esta ligação é feita diretamente do Piezômetro 06 a cota do nível d'água à jusante, logo não mostrando o comportamento real da subpressão na Seção 26 neste mês.

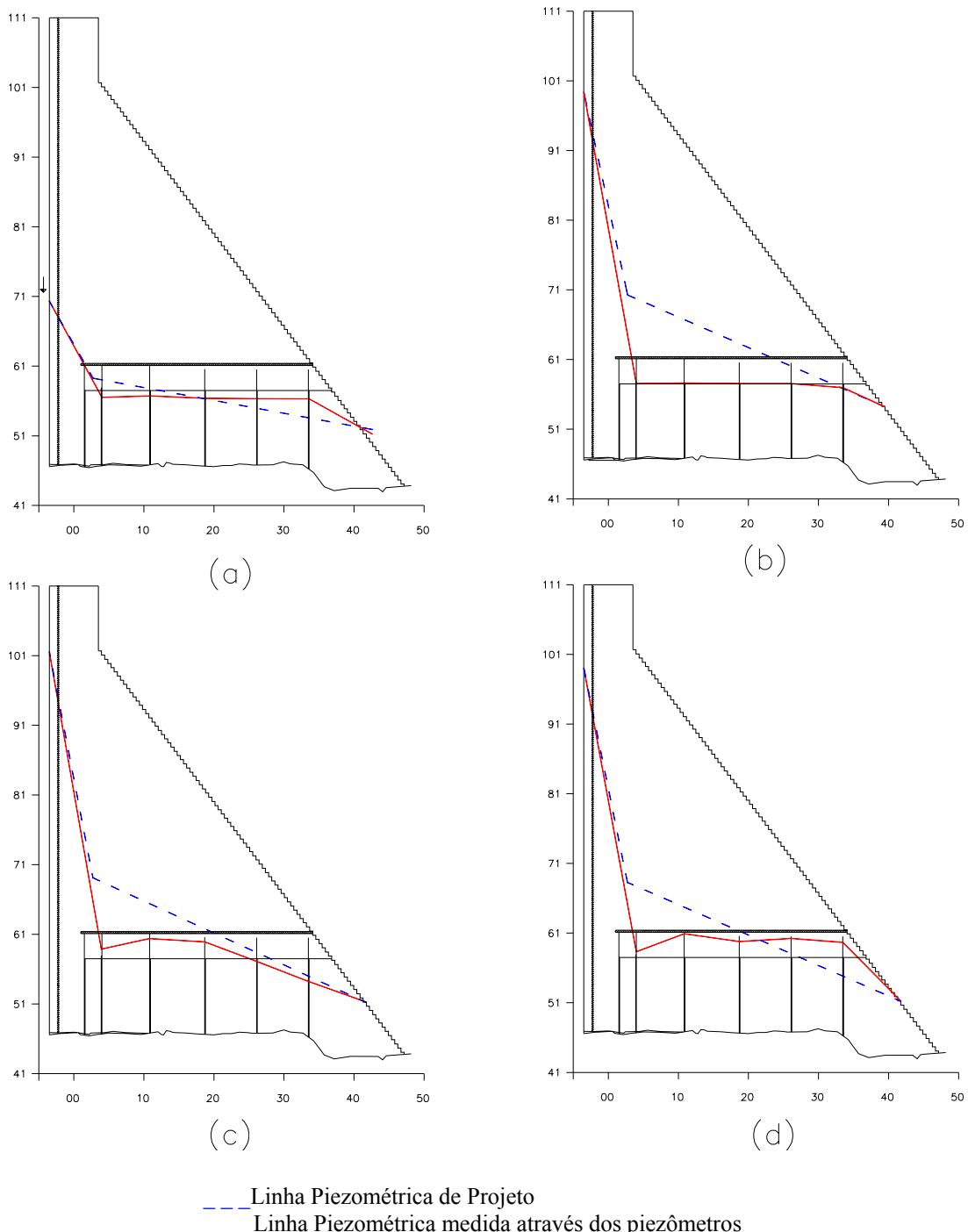


Figura 5.4 - Diagrama de Subpressão medido e de projeto – Seção 26, (a) janeiro de 2004, (b) março de 2004, (c) julho de 2004 e (d) setembro de 2005.

As demais seções apresentaram desempenho de subpressão similar da Figura 5.4 (d), em que o comportamento é semelhante ao descrito para a Figura 5.4 (a), porém as cotas piezométricas são mais elevadas do que as de janeiro de 2004 e não mostram linearidade, conforme se observa na Figura 5.4 (d) e APÊNDICE A.

Em algumas seções notou-se comportamento anômalo das cotas piezométricas de montante e jusante da galeria de drenagem, conforme Figura 5.5.

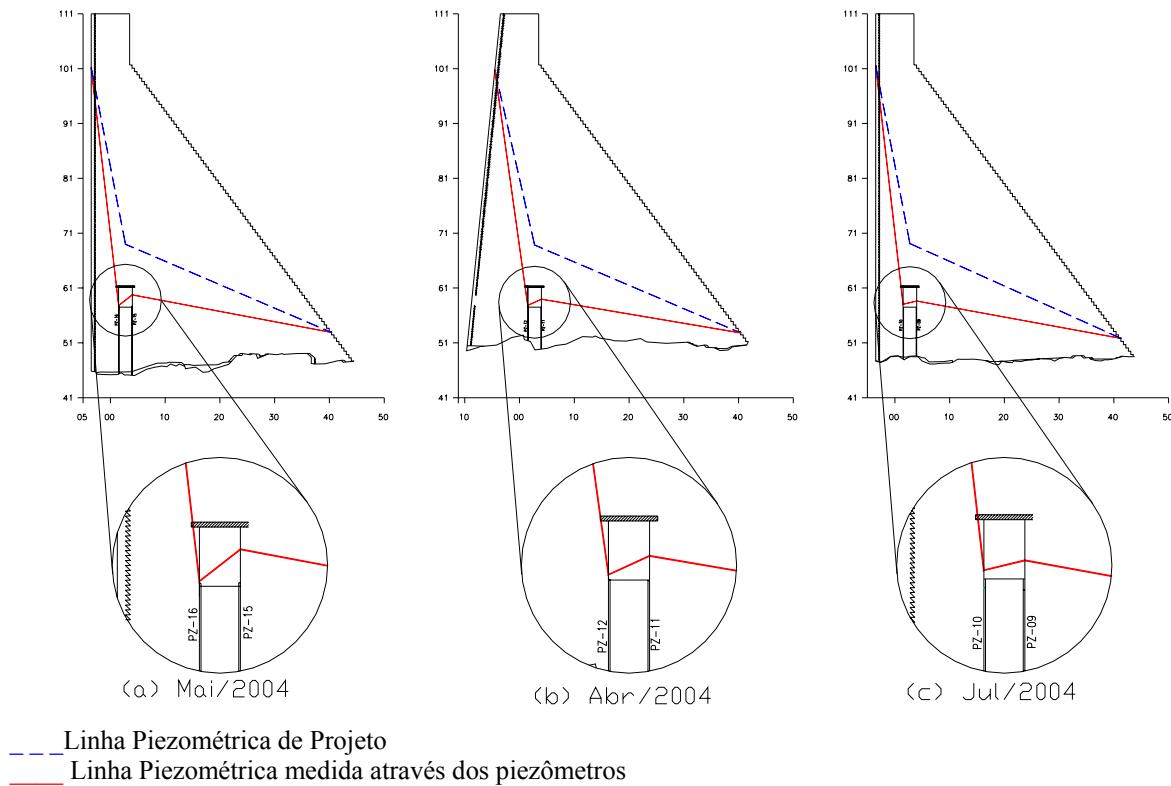


Figura 5.5 – Detalhes do diagrama de subpressões medidas com comportamento crescente da linha piezométrica nos drenos – (a) Seção 16 – maio de 2004, (b) Seção 06 – abril de 2004 e (c) Seção 21 - julho de 2004

Este comportamento foi discutido por França e Gomes (2006), que no estudo das Seções 6, 11, 16 e 26, verificaram percentuais de 86,7%, 66,7%, 80% e 40%, respectivamente, de cotas piezométricas de montante menores do que as de jusante, o que indica um comportamento não esperado destas leituras, ou seja, ao invés de perda de carga, o que se apresentou foi um ganho de carga na linha piezométrica.

Diversas explicações técnicas podem ser elaboradas para justificar este fato, dentre as várias possibilidades têm-se, como por exemplo, a ocorrência de erros de leitura por parte do operador, erros de tempo de leitura (resposta do aparelho), mau funcionamento do piezômetro ou até mesmo ineficiência da drenagem.

Casagrande (1961) mostra comportamento similar aos observados nestas seções e afirma que este comportamento pode ser devido a ineficiência da drenagem, os furos de drenagem não são profundos o suficiente, penetrando parcialmente dentro da zona permeável, o que pode causar um grande aumento nas subpressões de jusante dos drenos.

Porém, neste caso, não foi possível concluir sobre a real causa do que ocorreu com as leituras nestes piezômetros específicos.

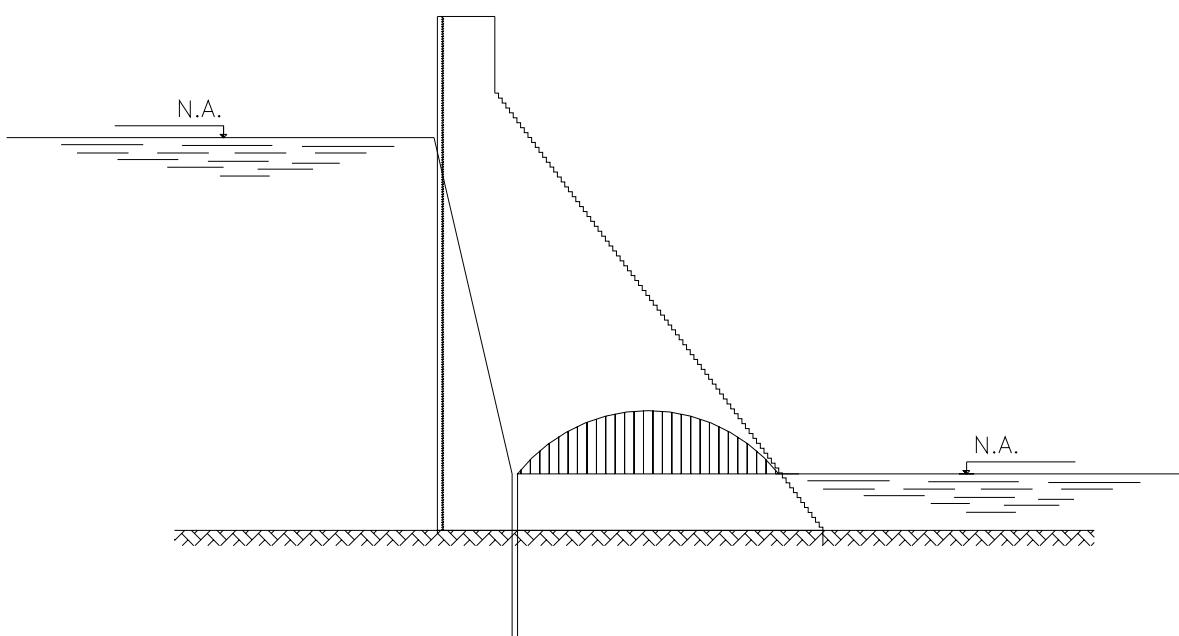


Figura 5.6 – Comportamento da linha piezométrica quando a drenagem mostra-se ineficiente - furos de drenagem não profundos o suficiente para as condições rochosas (adaptado de Casagrande, 1961)

Embora as linhas piezométricas medidas não apresentarem linearidade e, em certos trechos dos diagramas, encontrarem-se maiores do que as linhas de projeto, ou até mesmo comportamento de ganho de carga entre os piezômetros de montante e jusante da galeria de drenagem, em todos os meses estudados e em todas as seções, as cotas piezométricas mantiveram-se inferiores a cota do teto da galeria de drenagem interna do maciço de CCR, o que demonstra comportamento satisfatório do sistema de drenagem da barragem.

Esta ocorrência pode ser verificada na Figura 5.7, que mostra as maiores cotas piezométricas registradas pelos instrumentos durante todo o período estudado. Na Seção 26, referente ao mês de fevereiro de 2005 e na Seção 16, no mês de novembro de 2005 encontram-se as

maiores subpressões, que chegam à cota do teto da galeria de drenagem, porém não o ultrapassam, confirmado ainda assim a eficiência do sistema de alívio de pressões.

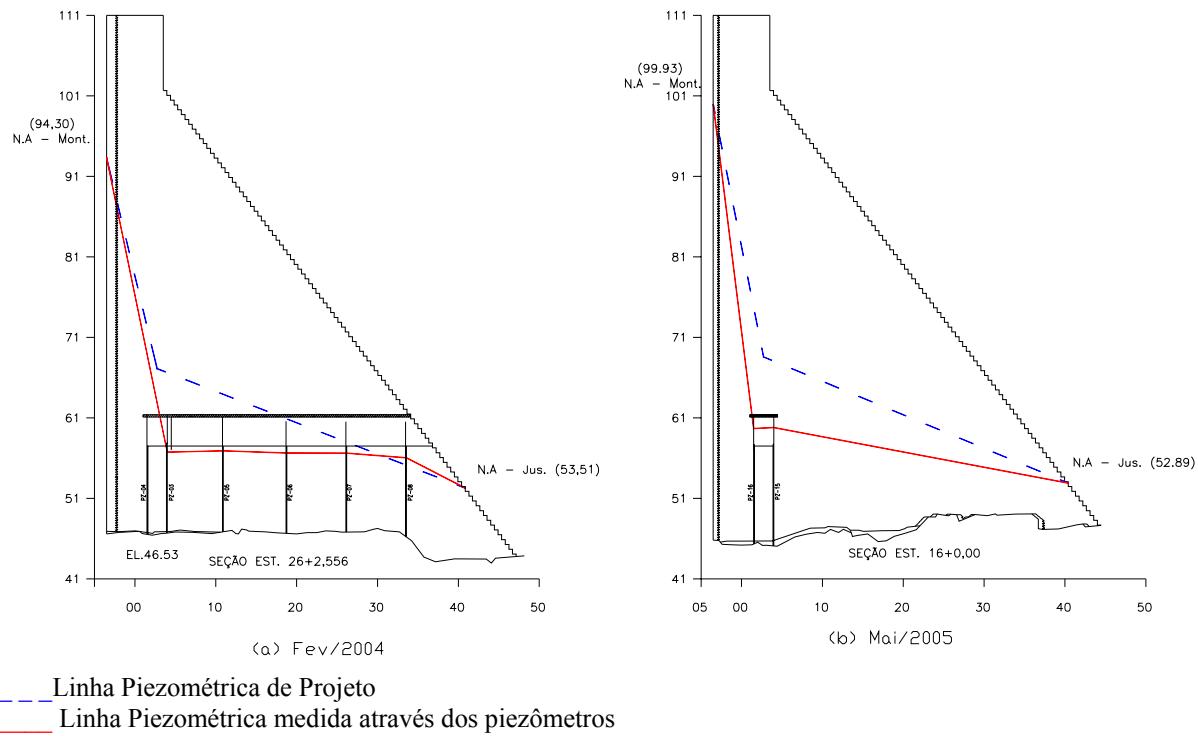


Figura 5.7 - Diagrama de subpressões medidas e de projeto – (a) Seção 26 - fevereiro de 2004, (b) Seção 16 - novembro de 2005

5.2 Estudo das vazões pela fundação

As vazões pela fundação são medidas nos drenos de infiltração e calculadas pela simulação de fluxo utilizando o GEOSLOPE (SEEP/W) sendo posteriormente comparadas.

5.2.1 Vazões medidas pelos drenos de infiltração pela fundação

Os valores medidos de vazões individuais pela fundação referem-se aos furos de drenagem a cada mês em estudo, porém percebeu-se a ausência de vazão (escoamento) em cerca de 65% dos drenos durante todo o período analisado.

Este fato pode indicar um bom ou um mau funcionamento da cortina de vedação da barragem. Segundo Osako (2002) um crescimento gradual na subpressão acompanhado por um decréscimo na infiltração dos drenos, é muito provavelmente uma indicação de que os drenos

estão com problemas de entupimento, o que indica falha no sistema de vedação. Porém, neste caso não se detecta subpressões altas próximas aos drenos com ausência de vazões, logo esta situação pode reforçar a eficiência da cortina de vedação.

Entre os drenos com ausência de leitura de vazão, cerca de 40% localizam-se entre as estaca 27 e 35, que estão próximas à tomada d'água, conforme Figura 5.8.

Na região do paleo canal, localizada entre as estacas 21 e 26 (do eixo do maciço em CCR), e que compreende cerca de 25 furos de drenagem, apresentou vazão em somente 16 leituras das 500 realizadas, sendo que 8 destas no primeiro mês de operação da barragem (janeiro de 2004), 1 em abril de 2004 e em 2005 apresentou 3 medidas em março, 2 em agosto e 2 novembro.

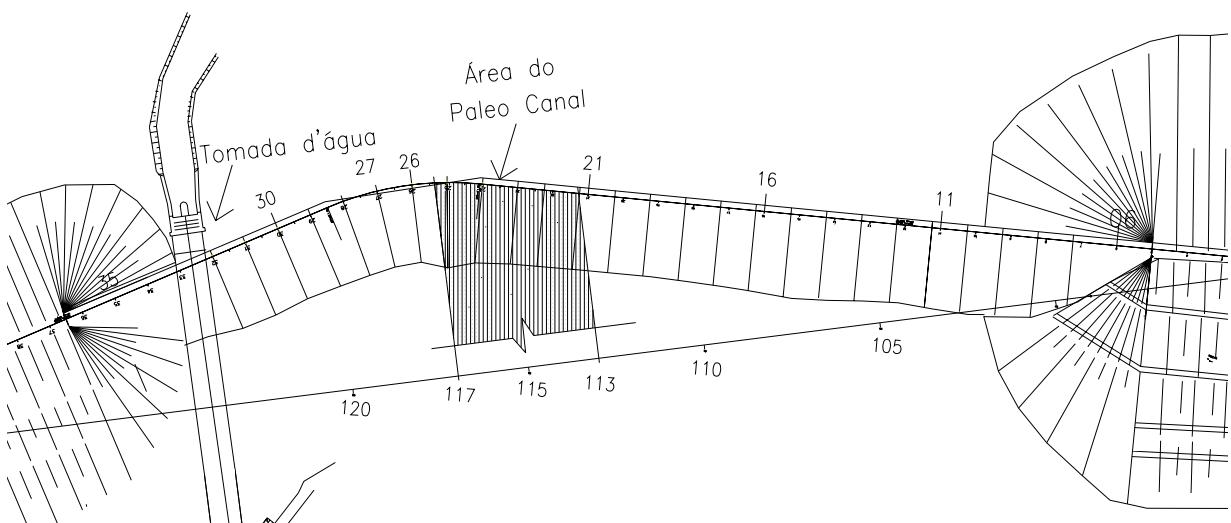


Figura 5.8 – Localização do Paleo Canal

1

Ainda na região do paleo canal, além de poucas medidas de vazão, a maior vazão registrada foi de 6,61 L/min, que é cerca de 25% do limite máximo recomendado (50,00 L/min) pelo CBGB (1996), logo esta região, considerada a mais crítica da barragem, não apresentou problemas sob o ponto de vista de excesso das vazões de percolação pela fundação.

Do total de 151 furos instalados, 53 apresentaram vazão e apenas 10, cerca de 7%, apresentam vazão superior a 10 L/min, fato que segundo Santos *et al* (2006) caracteriza a fundação como permeável. A Tabela 5.2 mostra as vazões obtidas nos 53 furos de drenagem estudados, na qual observou-se que em 33 deles, ocorrência de vazão é um caso pontual, os demais furos

apresentaram, pelo menos, 5 leituras de vazão e apenas os drenos de número 20 e 111, mantiveram vazão durante todo o período estudado.

O furo de drenagem 111 apresentou medida de vazão superior ao limite de 50 L/min recomendado pelo CBGB (1996) como vazão máxima por furo de drenagem, o que foi registrado entre os meses de fevereiro e setembro de 2005, totalizando 5 leituras com este comportamento.

O maior valor de vazão anotado neste furo é de 69,29 L/min, referente ao mês de março de 2005, o que corresponde a um valor de aproximadamente 39% acima do valor limite de 50 L/min recomendado. Este acontecimento deve ser monitorado com mais atenção a fim de identificar-se as causas do problema, sendo importante a análise da subpressão no piezômetro mais próximo do dreno específico. Outro fato que reforça a necessidade de um monitoramento mais rigoroso neste furo é a sua proximidade a região do Paleo Canal, pois este furo encontra-se entre as estacas 26 e 27, e o Paleo Canal entre as estacas 21 e 26.

A análise da subpressão para este furo foi feita na Estaca 26, junto aos Piezômetros 03, 05, 06, 07 e 08, que são os mais próximos do furo de drenagem, onde não foi observado aumento significativo da subpressão, o que ameniza, em parte, os valores elevados de vazão, mas não descarta o risco, compensando manter o furo sempre em observação, a fim de intervir quando necessário.

Segundo a Engetec (2006) foi realizada análise visual do furo em questão e não constatou-se qualquer tipo de carreamento de material da fundação, ou seja, a água vertente está completamente límpida. Porém se faz necessário uma análise química da água coletada na saída do furo 111, com o objetivo de certificar-se se este não está em processo de colmatação e transporte de sedimentos.

Tabela 5.2 - Vazões nos furos de drenagem da Barragem Castanhão (2004 – 2005)

Nº FURO DRENAGEM	jan-04 (L/min)	abr-04 (L/min)	mai-04 (L/min)	jun-04 (L/min)	jul-04 (L/min)	jan-05 (L/min)	fev-05 (L/min)	mar-05 (L/min)	jul-05 (L/min)	ago-05 (L/min)	set-05 (L/min)
07	-	19,86	15,31	-	-	-	-	-	-	-	-
08	-	-	-	17,19	16,93	23,04	-	24,91	20,50	23,02	23,20
09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	21,08	-	-	8,31	-	-	-	-	-
15	0,30	-	-	-	-	-	-	7,43	7,63	7,50	8,16
17	0,69	-	-	-	-	-	-	2,14	-	-	-
20	10,91	29,84	26,21	23,24	25,08	22,18	15,11	22,38	22,19	21,32	22,02
21	10,08	7,98	7,20	-	-	1,43	2,88	4,20	3,51	3,92	3,94
37	-	3,35	-	-	-	-	2,82	3,05	2,09	2,09	2,11
38	1,51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
39	-	-	-	-	-	-	-	0,81	-	-	-
40	0,28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
41	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	-	1,39	-	-	-	-	-	1,20	-	-	-
45	0,56	8,62	-	-	-	7,96	9,88	7,40	2,68	6,73	7,00
46	4,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	0,10	-	-	-	-	-	-	1,97	-	-	-
51	1,11	-	-	-	-	-	-	0,42	-	-	-
52	-	0,80	-	-	-	-	-	0,59	-	-	-
53	0,31	2,74	-	-	-	-	-	2,46	-	2,53	2,61
54	0,72	4,74	-	-	-	-	3,88	4,27	-	3,32	3,23
55	1,86	2,31	-	-	-	-	-	1,88	-	-	-
56	0,82	3,80	-	-	-	-	-	3,47	2,40	1,60	1,68
57	1,57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	5,63	24,31	29,52	-	-	23,00	20,17	21,86	23,77	23,05	20,29
59	4,67	12,41	-	-	-	13,43	11,05	11,06	13,05	11,36	11,71
60	2,68	7,69	-	-	-	-	6,79	6,72	7,28	7,29	7,42
61	0,32	1,56	-	-	-	7,54	-	-	-	-	-
62	1,16	-	-	-	-	-	-	3,28	-	-	-

Nº FURO DRENAGEM	jan-04 (L/min)	abr-04 (L/min)	mai-04 (L/min)	jun-04 (L/min)	jul-04 (L/min)	jan-05 (L/min)	fev-05 (L/min)	mar-05 (L/min)	jul-05 (L/min)	ago-05 (L/min)	set-05 (L/min)
63	0,48	2,12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	0,18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
65	0,18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	0,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
72	3,72	13,60	-	13,38	14,30		11,90	10,36	8,37	9,11	9,43
74	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
77	0,55	2,72	-	-	-	-	-	2,22	1,88	1,87	1,90
78	0,76	7,44	-	6,93	6,42		4,51	4,25	-	3,53	3,56
89	0,77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	1,36	-	-	-
91	1,74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
92	1,69	-	-	-	-	-	-	5,45	3,43	4,48	4,65
93	0,45	6,61	-	-	-	-	-	3,55	3,65	3,42	3,46
94	1,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
95	0,09	-	-	-	-	-	-	-	2,50	-	-
96	0,26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
98	0,28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
103	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
104	0,11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
105	0,40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
107	7,27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
108	15,19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
109	7,58	13,08	-	35,93	35,66	34,74	27,63	27,44	39,67	33,18	34,37
111	0,23	32,84	34,49	43,64	41,48	44,00	69,09	69,29	68,00	61,52	62,34
112	0,45	20,22	18,93	17,40	13,90	5,63	-	4,68	3,67	-	-
114	-	31,08	33,50	28,15	29,93	11,42	14,14	14,33	9,45	11,30	11,42

Em negrito – furos de drenagem com vazão superior a 50 L/min

5.2.2 Simulação das vazões pelo Geoslope (SEEP/W)

O primeiro cenário é composto de 54 simulações e utiliza três camadas de solo na fundação, onde cada uma possui coeficiente de permeabilidade diferente. Observou-se que as vazões possuem valor abaixo de 1,0 L/min, conforme Figura 5.9, Tabela 5.3 e APÊNDICE B, valor que apresentou-se abaixo dos valores mostrados por Cruz (1996), que em estudo realizado para vazões medidas em fundações rochosas sob estruturas de concreto, o menor valor de vazão encontrado foi de 2,00 L/min.

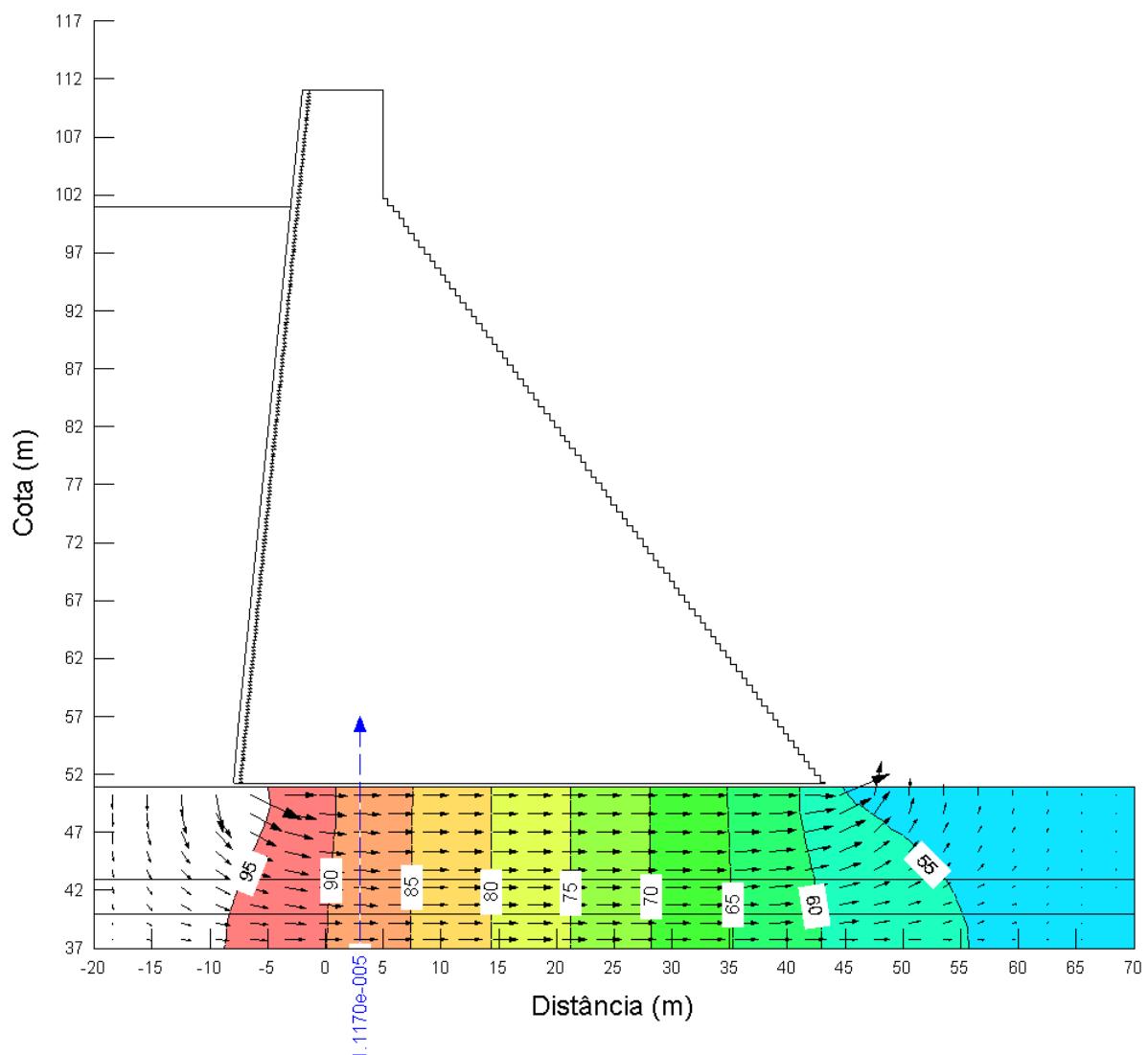


Figura 5.9 – Primeiro cenário de simulação da rede de fluxo referente à Seção 11 em abril de 2004 (vazão em m^3/s)

Tabela 5.3 - Vazões do Primeiro Cenário

Mês/Ano	Nível do reservatório (m)	Estaca 6 (L/min)	Estaca 11 (L/min)	Estaca 16 (L/min)	Estaca 21 (L/min)	Estaca 26 (L/min)	Estaca 31 (L/min)
jan-04	71,33	0,210	0,204	0,204	0,259	0,166	0,188
abr-04	100,74	0,555	0,540	0,599	0,684	0,440	0,498
mai-04	101,17	0,560	0,545	0,544	0,691	0,444	0,503
jul-04	101,55	0,564	0,549	0,548	0,696	0,448	0,507
jan-05	99,73	0,543	0,529	0,528	0,670	0,431	0,488
fev-05	99,58	0,542	0,527	0,526	0,668	0,429	0,486
mar-05	99,42	0,540	0,525	0,524	0,666	0,428	0,485
ago-05	99,39	0,539	0,524	0,524	0,665	0,428	0,484
set-05	99,02	0,535	0,521	0,520	0,660	0,424	0,480

França e Gomes (2007), encontraram valor de vazão pela fundação de 0,86, 2,00 e 2,20 L/min para a Seção 16 da Barragem Castanhão, durante os meses de janeiro, abril e maio de 2004 respectivamente. Quando estes valores foram comparado com os resultados da Tabela 5.3 foi percebido que estes são cerca de 3 a 4 vezes menores que os valores obtidos por estas autoras. Como em ambas as simulações foi utilizado o programa SEEP/W, esta diferença deve-se às condições iniciais utilizadas na modelagem, que divergem em relação ao valor do coeficiente de permeabilidade, neste cenário é considerado uma permeabilidade diferente para cada camada, conforme Tabela 4.5, e para a simulação anterior foi considerada uma única, com valor de $3,95 \times 10^{-6}$ cm/s.

O segundo cenário proposto consiste na utilização de uma permeabilidade equivalente para cada seção em estudo, e os resultados das simulações são apresentados na Figura 5.10, na Tabela 5.4 e no APÊNDICE B. Estes resultados apresentaram vazões maiores do que as do primeiro cenário nas Seções 06, 11 e 26, sendo estes valores respectivamente cerca de 21%, 12% e 7% maiores que os do primeiro cenário. Nas Seções 16, 21 e 31 as vazões obtidas no segundo cenário foram menores do que as do primeiro cerca de 14%, 15% e 9% respectivamente.

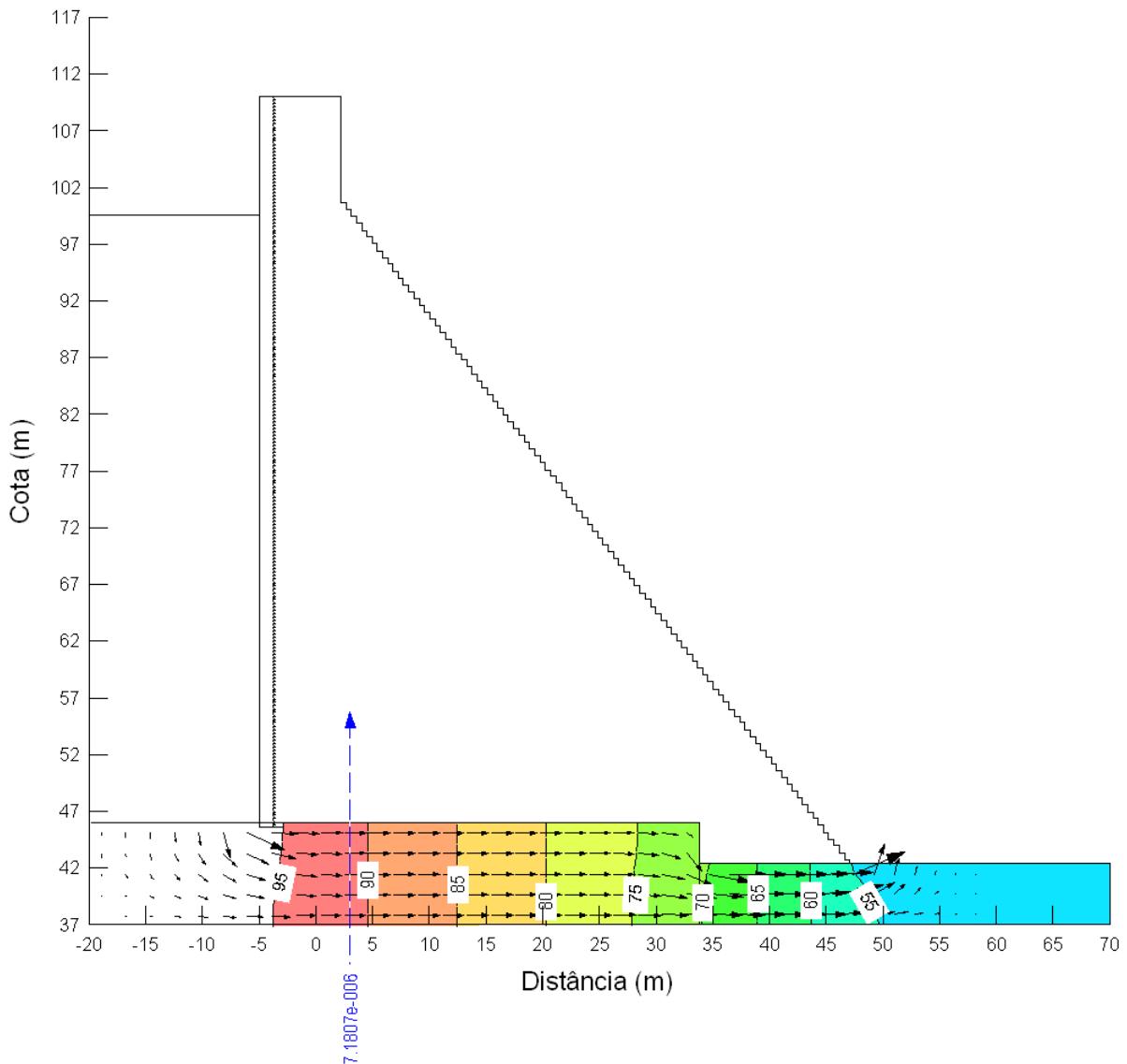


Figura 5.10 – Segundo cenário de simulação da rede de fluxo na Seção 26 em janeiro de 2005 (vazão em m^3/s)

Tabela 5.4 - Vazões do Segundo Cenário

Mês/Ano	Nível do reservatório (m)	Estaca 6 (L/min)	Estaca 11 (L/min)	Estaca 16 (L/min)	Estaca 21 (L/min)	Estaca 26 (L/min)	Estaca 31 (L/min)
jan-04	71,33	0,254	0,228	0,176	0,236	0,178	0,160
abr-04	100,74	0,670	0,603	0,466	0,624	0,471	0,422
mai-04	101,17	0,676	0,608	0,470	0,630	0,476	0,426
jul-04	101,55	0,682	0,613	0,474	0,635	0,479	0,429
jan-05	99,73	0,656	0,590	0,456	0,611	0,462	0,413
fev-05	99,58	0,654	0,588	0,455	0,609	0,460	0,412
mar-05	99,42	0,652	0,586	0,453	0,607	0,458	0,410
ago-05	99,39	0,651	0,586	0,453	0,607	0,458	0,410
set-05	99,02	0,646	0,581	0,449	0,602	0,455	0,407

De acordo com França e Gomes (2007), a diferença nos valores das vazões observadas aumentou de 3 a 4 vezes no primeiro cenário para 4 a 5 vezes no segundo cenário simulado. Esta diferença deve-se, novamente, ao valor do coeficiente de permeabilidade, sendo o primeiro cenário por camada e o segundo, especificamente para a Seção 16, tem permeabilidade equivalente igual a $1,24 \times 10^{-4}$ cm/s.

Foram executados mais três cenários de simulações, nos quais utilizou-se uma única camada de fundação com coeficientes de permeabilidade médios. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 5.5, 5.6 e 5.7, correspondentes ao terceiro, quarto e quinto cenários.

Tabela 5.5 - Vazões do Terceiro Cenário

Mês/Ano	Nível do reservatório (m)	Estaca 6 (L/min)	Estaca 11 (L/min)	Estaca 16 (L/min)	Estaca 21 (L/min)	Estaca 26 (L/min)	Estaca 31 (L/min)
jan-04	71,33	4,135	3,677	2,961	3,949	2,413	2,736
abr-04	100,74	10,931	9,721	7,827	10,440	6,389	7,234
mai-04	101,17	11,030	9,808	7,897	10,534	6,446	7,298
jul-04	101,55	11,117	9,886	7,959	10,617	6,497	7,356
jan-05	99,73	10,701	9,516	7,661	10,220	6,254	7,081
fev-05	99,58	10,667	9,485	7,637	10,187	6,234	7,058
mar-05	99,42	10,630	9,453	7,611	10,152	6,213	7,034
ago-05	99,39	10,623	9,433	7,606	10,145	6,209	7,030
set-05	99,02	10,539	9,371	7,546	10,065	6,160	6,973

Tabela 5.6 - Vazões do Quarto Cenário

Mês/Ano	Nível do reservatório (m)	Estaca 6 (L/min)	Estaca 11 (L/min)	Estaca 16 (L/min)	Estaca 21 (L/min)	Estaca 26 (L/min)	Estaca 31 (L/min)
jan-04	71,33	2,320	2,063	1,661	2,216	1,354	1,535
abr-04	100,74	6,134	5,455	4,392	5,858	3,585	4,059
mai-04	101,17	6,189	5,504	4,431	5,911	3,617	4,095
jul-04	101,55	6,236	5,547	4,466	5,957	3,645	4,127
jan-05	99,73	6,004	5,339	4,299	5,734	3,509	3,973
fev-05	99,58	5,985	5,322	4,285	5,716	3,498	3,960
mar-05	99,42	5,965	5,304	4,271	5,696	3,486	3,947
ago-05	99,39	5,961	5,293	4,268	5,693	3,484	3,944
set-05	99,02	5,913	5,259	4,234	5,648	3,456	3,913

Tabela 5.7 - Vazões do Quinto Cenário

Mês/Ano	Nível do reservatório (m)	Estaca 6 (L/min)	Estaca 11 (L/min)	Estaca 16 (L/min)	Estaca 21 (L/min)	Estaca 26 (L/min)	Estaca 31 (L/min)
jan-04	71,33	8,041	7,150	5,757	7,679	4,692	5,321
abr-04	100,74	21,256	18,902	15,219	20,300	12,422	14,065
mai-04	101,17	21,447	19,072	15,355	20,483	12,534	14,191
jul-04	101,55	21,616	19,222	15,355	20,644	12,632	14,303
jan-05	99,73	20,807	18,503	14,897	19,872	12,161	13,768
fev-05	99,58	20,741	18,444	14,850	19,808	12,122	13,724
mar-05	99,42	20,669	18,380	14,799	19,740	12,080	13,677
ago-05	99,39	20,656	18,341	14,789	19,727	12,073	13,668
set-05	99,02	20,492	18,223	14,672	19,571	11,977	13,559

Para o terceiro cenário, cujo coeficiente de permeabilidade é $1,8 \times 10^{-3}$ cm/s, os valores obtidos na simulação mostraram-se de 13 a 20 vezes maiores que os calculados nos dois primeiros cenários, este fato deveu-se ao coeficiente de permeabilidade adotado ser cerca de 2 a 20 vezes maior que as permeabilidades adotadas nos primeiros cenários, uma vez que evidentemente, quanto maior a permeabilidade maior a vazão. Um exemplo do resultado da simulação para este cenário pode ser observado na Figura 5.11, referente a simulação do fluxo pela fundação da barragem na Seção 31 em setembro de 2005.

No quarto cenário as simulações de fluxo pela fundação foram realizadas com uma única camada na fundação com coeficiente de permeabilidade de $1,01 \times 10^{-3}$ cm/s. A Figura 5.12 mostra um exemplo de simulação para o quarto cenário e a Tabela 5.6 apresenta os resultados destas simulações.

O quinto cenário realizou as simulações de fluxo de forma semelhante ao quarto cenário, com apenas uma camada de fundação e com coeficiente de permeabilidade igual a $3,50 \times 10^{-3}$ cm/s. A Figura 5.13 mostra um exemplo de simulação para o quinto cenário e os valores obtidos nas demais simulações deste cenário são descritos na Tabela 5.7.

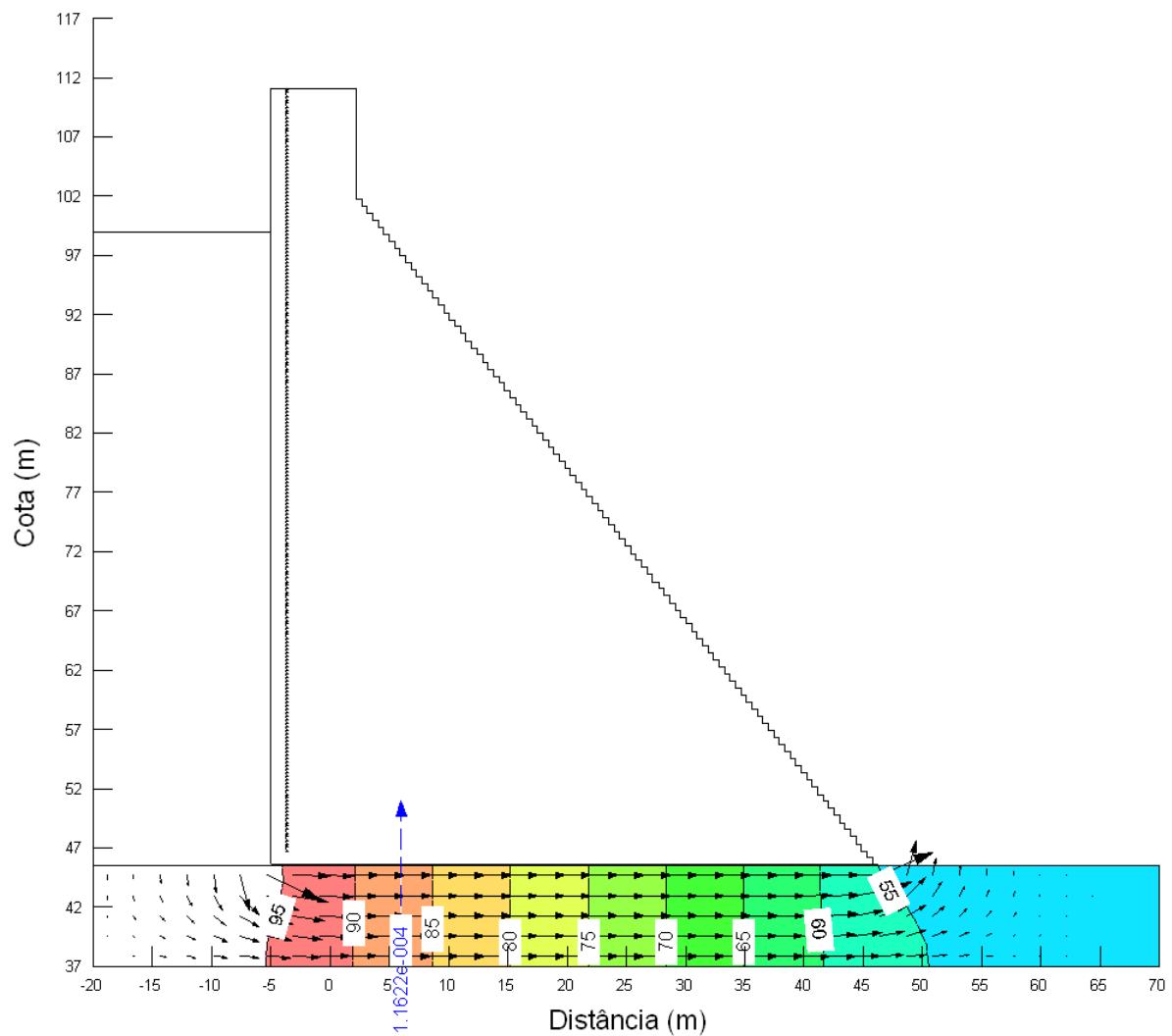


Figura 5.11 – Terceiro cenário de simulação da rede de fluxo referente à Seção 31 em setembro de 2005 (vazão em m^3/s)

Como no terceiro, quarto e quinto cenários a única mudança nas condições iniciais para a realização da simulação foi a adoção de valores diferentes para os coeficientes de permeabilidade, observou-se que quanto maior a permeabilidade maior o valores de vazão obtidos nas simulações de solo de fundação, conforme Tabelas 5.6 e 5.7, o que veio apenas confirmar a hipótese inicial.

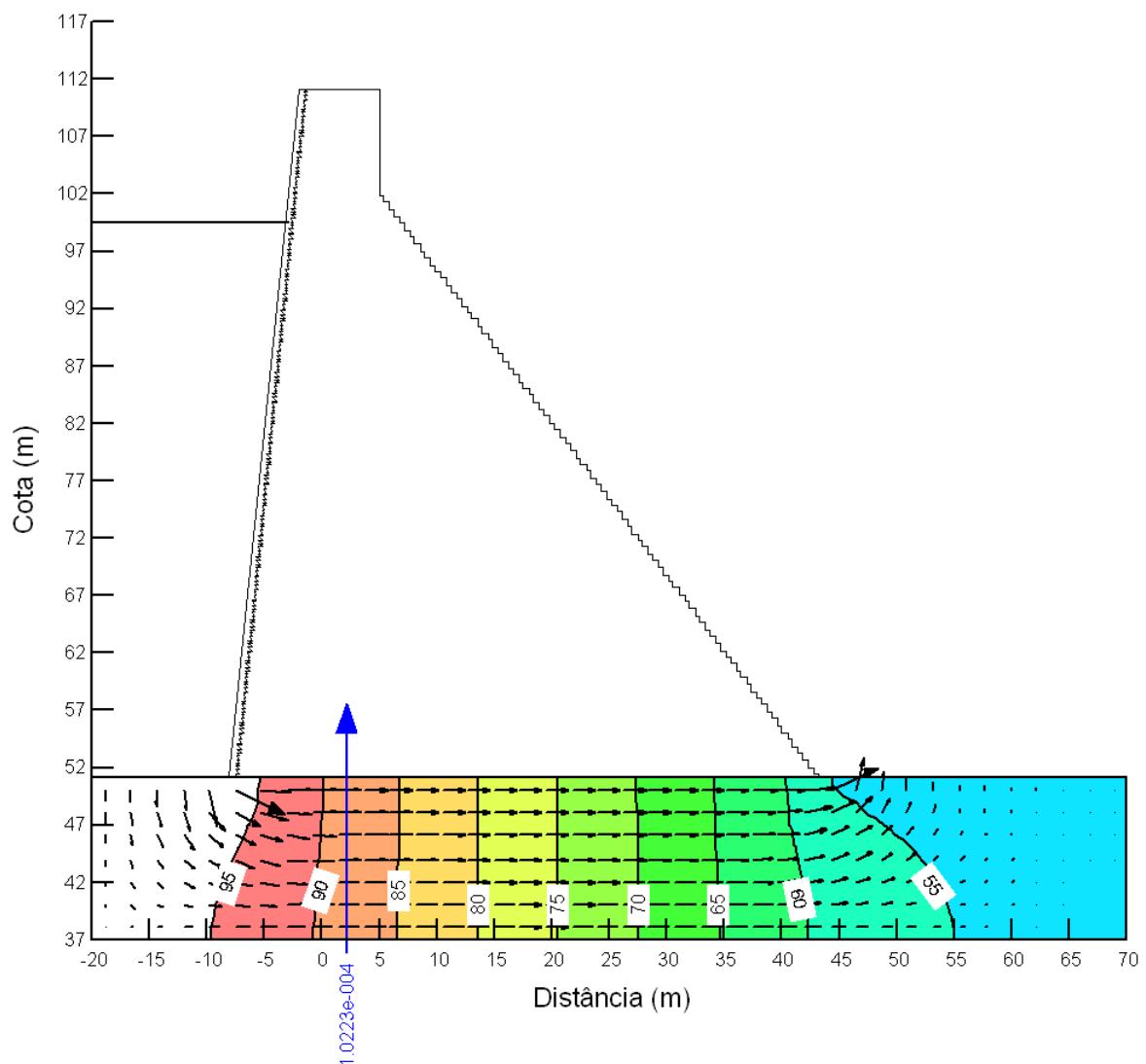


Figura 5.12 – Quarto cenário de simulação da rede de fluxo referente à Seção 06 em abril de 2004 (vazão em m^3/s)

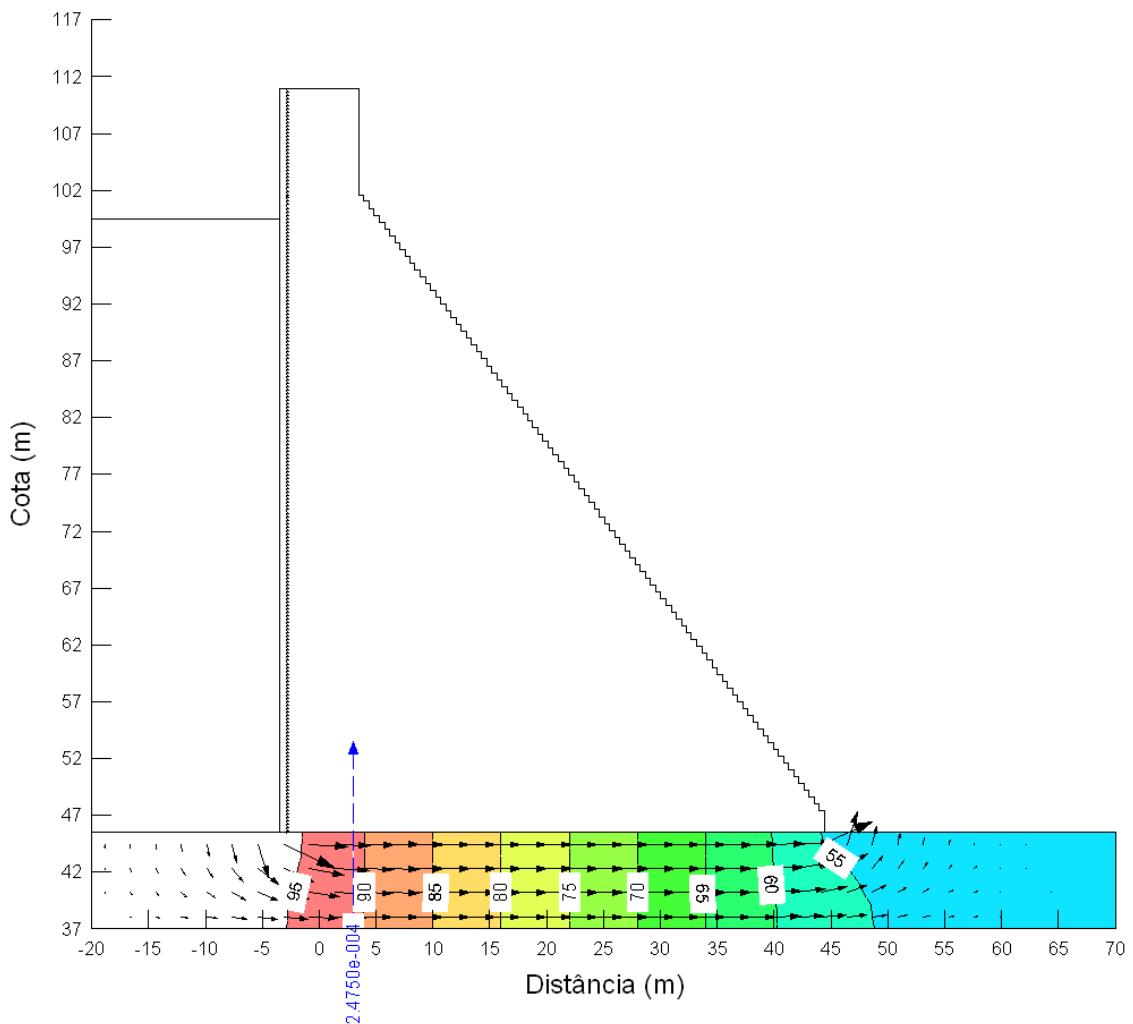


Figura 5.13 – Quinto cenário de simulação da rede de fluxo referente à Seção 16 em fevereiro de 2005 (vazão em m^3/s)

A permeabilidade assumida no terceiro cenário é 1,78 vezes maior que a do quarto, a do quinto, 1,94 vezes maior que a do terceiro e 3,47 vezes maior que a do quarto. Nos resultados obtidos nas simulações observaram-se as mesmas proporções nas vazões, por exemplo, as vazões obtidas no quinto cenário foram 1,94 vezes maiores que as do terceiro cenário igual a proporção entre as permeabilidades destes cenários. Este resultado satisfaz a Lei de Darcy (Fórmula 2,1), em qual a vazão é diretamente proporcional a permeabilidade.

Para o quinto cenário aconteceram as maiores vazões, uma vez que, entre todas as situações simuladas, esta é a mais crítica, tendo em vista a utilização do maior coeficiente de permeabilidade. Portanto, para as simulações realizadas a maior vazão obtida foi de 21,6 L/min, ocorrida na Seção 06, no mês de Julho de 2004, mês em que durante todo o período estudado registrou maior nível d'água à montante no reservatório. Esta vazão de 21,6 L/min é

43,2% do limite máximo (50,00 L/min) estabelecido pela literatura, logo, como esse é o maior valor obtido na simulação, todos os valores simulados apresentaram-se inferiores do limite máximo de vazão.

5.2.1 Comparação entre vazões medidas X vazões simuladas

No Caso 1, em que o fluxo simulado foi comparado à vazão do furo de drenagem, localizado exatamente na seção em estudo, observou-se a ocorrência de vazão apenas em 7 leituras das 54 realizadas, sendo 5 destas na Seção 06. As duas leituras de vazão foram observadas nas Estacas 16 e 26 no primeiro mês de operação da barragem, depois estes não registraram mais vazão.

As cinco leituras restantes de vazão, diferentemente das outras duas, se manifestaram a partir do sétimo mês (Julho de 2004) de operação da barragem, conforme se observa na Tabela 5.8.

Se for comparado este primeiro caso com as vazões simuladas, percebe-se que o primeiro e o segundo cenários foram os que mais se aproximaram desta situação, isso se forem consideradas todas as leituras. Pois nestes cenários as leituras de vazão obtidas foram menores que 1 L/min, mas não apresentaram dispersão nos valores de vazão como no Caso 1, onde nas 5 leituras que apresentaram vazão, estas foram maiores do que 16 L/min.

Tabela 5.8 - Leituras de vazões dos drenos de fundação – Caso 1

Mês/Ano	Nível do reservatório (m)	Estaca 6 (L/min)	Estaca 11 (L/min)	Estaca 16 (L/min)	Estaca 21 (L/min)	Estaca 26 (L/min)	Estaca 31 (L/min)
jan-04	71,33	0,000	0,000	1,570	0,000	7,270	0,000
abr-04	100,74	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
mai-04	101,17	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
jul-04	101,55	16,930	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
jan-05	99,73	23,040	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
fev-05	99,58	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
mar-05	99,42	24,910	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ago-05	99,39	23,020	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
set-05	99,02	23,200	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Como, para as simulações, foram utilizados coeficientes de permeabilidade generalizados, a Seção da Estaca 06 apresentou coeficiente de permeabilidade maior do que o considerado neste estudo.

O Caso 2, em que valor do fluxo simulado é comparado com valor médio de vazão, obtido a partir da média de 3 a 5 furos de drenagem mais próximos da seção estudada, apenas 7 leituras não apresentaram vazões e estas encontram-se distribuídas em todas as seções em estudo, como pode ser verificado na Tabela 5.9.

As leituras de vazão neste caso se assemelham às obtidas nos cenários 3 e 4. No terceiro cenário observou-se cerca de 24% das leituras variando entre 0,5 e 1,5 vezes as medidas de vazão do Caso 2. Para o quarto cenário observou-se que 50% das vazões mostraram-se dentro deste intervalo e que 33 % destas leituras apresentaram medidas de vazão variando entre 0,8 e 1,2 das vazões medidas.

Tabela 5.9 - Leituras de vazões dos drenos de fundação – Caso 2

Mês/Ano	Nível do reservatório (m)	Estaca 6 (L/min)	Estaca 11 (L/min)	Estaca 16 (L/min)	Estaca 21 (L/min)	Estaca 26 (L/min)	Estaca 31 (L/min)
jan-04	71,33	0,000	1,680	2,670	0,250	6,090	0,000
abr-04	100,74	6,620	1,330	9,370	2,480	2,620	7,770
mai-04	101,17	10,330	1,200	9,840	0,000	0,000	8,380
jul-04	101,55	6,540	0,000	0,000	2,140	7,132	7,480
jan-05	99,73	7,680	0,238	7,670	0,000	6,950	2,860
fev-05	99,58	0,000	0,478	6,720	1,500	5,530	3,540
mar-05	99,42	8,300	0,698	8,440	1,420	5,490	3,580
ago-05	99,39	7,670	0,653	8,220	1,180	6,640	2,830
set-05	99,02	7,330	0,657	7,320	1,190	6,870	2,860

No Caso 3, o valor do fluxo simulado foi relacionado com o valor médio de vazões, de até cinco furos, mais próximos da seção estudada, observou-se que 14 leituras não apresentaram vazão, destas, 8 estão situadas na estaca 26, que apresentou leitura apenas no primeiro mês de operação da barragem, conforme Tabela 10.

As leituras de vazão, neste caso, quando comparadas ao quinto cenário, notou-se que 39% delas encontraram-se variando entre 0,5 e 1,5 vezes o valor de vazões obtidas no Caso 3 e 28% variando entre 0,8 e 1,2 vezes o valor da mesma leitura.

Tabela 5.10 - Leituras de vazões dos drenos de fundação – Caso 3

Mês/Ano	Nível do reservatório (m)	Estaca 6 (L/min)	Estaca 11 (L/min)	Estaca 16 (L/min)	Estaca 21 (L/min)	Estaca 26 (L/min)	Estaca 31 (L/min)
jan-04	71,33	0,000	10,080	4,960	0,760	11,230	0,000
abr-04	100,74	19,860	7,980	14,060	7,440	0,000	31,080
mai-04	101,17	15,310	7,200	29,520	0,000	0,000	33,500
jul-04	101,55	16,930	25,080	0,000	6,420	0,000	29,930
jan-05	99,73	23,040	1,430	23,000	0,000	0,000	11,420
fev-05	99,58	0,000	2,870	20,170	4,510	0,000	14,140
mar-05	99,42	24,910	4,200	12,660	4,250	0,000	14,330
ago-05	99,39	23,020	3,920	12,330	3,530	0,000	11,300
set-05	99,02	23,200	3,940	10,990	3,560	0,000	11,420

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As principais conclusões e recomendações sobre a instrumentação da Barragem Castanhão, baseadas nas leituras de piezômetros e drenos de fundação estão apresentadas neste capítulo.

A grande barragem Castanhão necessita de monitoramento constante, a fim de garantir a segurança da obra, uma vez que se esta vier a romper, os danos físicos, materiais e humanos são inevitáveis e catastróficos à população residente à jusante. Portanto, a instrumentação torna-se ferramenta fundamental na gestão do empreendimento. Neste contexto a análise das medidas dos instrumentos (piezômetros e drenos de fundação) instalados na barragem permite avaliar as reais condições de segurança do maciço.

A metodologia adotada neste trabalho possibilita dividir a pesquisa em três fases distintas: (1) estudo das subpressões na fundação, que torna possível avaliar a eficiência da cortina de vedação da barragem; (2) estudo das vazões pela fundação, que permite quantificar e verificar a vazão que percola em cada furo de drenagem e (3) simulações de fluxo pela fundação, utilizando o “software” GEOSLOPE (SEEP/W), que possibilita a avaliação e a comparação dos fluxos simulados com as vazões registradas nos furos de drenagem.

Durante a fase de estudo das subpressões, é realizada a comparação dos diagramas de subpressões medidas e as definidas no projeto. Esta mostra, de forma geral, um comportamento satisfatório das subpressões atuantes na barragem, mas, no entanto, é constatado que no primeiro mês de operação da barragem, janeiro de 2004, a estaca 31 apresenta a situação mais crítica ocorrida no período estudado, quando os níveis piezométricos medidos ficaram praticamente sobrepostos às subpressões de projeto. Dentre as diversas possibilidades, este fato pode ser atribuído para explicar à instabilidade das subpressões, comum no período de enchimento de reservatórios.

Em algumas estacas é notado um comportamento anômalo das cotas dos piezômetros instalados na mesma seção transversal, ou seja, a linha piezométrica é crescente do piezômetro, no sentido de montante para jusante. Para entender este fato existem várias explicações, porém não é possível concluir sobre a real causa desse problema com as leituras nesses piezômetros específicos. Porém, para o aspecto da segurança, em todas as seções, estas

cotas piezométricas mantiveram-se inferiores ao nível máximo do teto da galeria de drenagem interna do maciço de CCR, demonstrando desempenho satisfatório do sistema de drenagem da barragem.

O comportamento crescente anômalo de alguns piezômetros dentro da galeria de drenagem deve ser analisado pela equipe que cuida da manutenção da barragem, a fim de verificar qual a real causa desta anomalia.

A fase de estudos das vazões pela fundação revela que o furo de drenagem 111 registrou cinco leituras superiores ao limite de 50 L/min especificado pela literatura, o que coloca este furo em estado de alerta. É importante também ressaltar que este furo de drenagem localiza-se entre as estacas 26 e 27, região próxima a área do paleo canal que situa-se entre as estacas 21 a 26 do eixo da barragem de CCR, o que reforça os cuidados a serem tomados neste furo de drenagem. Por outro lado, a análise das subpressões próximas ao furo 111 não mostra aumento significativo na subpressão, o que ameniza, em parte, estes valores de vazão acima do limite, mas não descarta o risco.

O furo de drenagem 111 necessita de maior atenção no monitoramento, além da execução de análises químicas da água coletada neste furo, a fim de certificar-se que este não está em processo de colmatação ou transportando sedimentos. Se esta vazão se mantiver acima da vazão limite recomendada é então preciso urgência de uma inspeção de maneira a se descobrir a causa do problema e solucioná-lo, antes que este possa por em risco a segurança da barragem.

Para as simulações de fluxo pela fundação realizadas com o auxílio do programa GEOSLOPE (SEEP/W), o primeiro cenário, mostra vazões (0,50 L/min) condizentes com vazões encontradas na literatura (1,0 L/min). O segundo cenário apresentou vazões (0,49 L/min), esta pequena diferença, referente ao primeiro cenário, está relacionada a adoção do coeficiente de permeabilidade que para o segundo cenário foi adotado o equivalente e para o primeiro o individual para cada camada de solo. Para o terceiro (8,0 L/min), quarto (4,5 L/min) e quinto (15,5 L/min) cenários conclui-se que o aumento da vazão é diretamente proporcional ao aumento do coeficiente de permeabilidade adotado, satisfazendo a Lei de Darcy.

No estudo comparativo entre as vazões simuladas e as medidas é percebido que o primeiro e o segundo cenários simulados são os que mais se aproximam do Caso 1, cujos valores de vazões correspondem exatamente ao furo de drenagem da seção em estudo. O Caso 2, em que o valor do fluxo simulado é comparado com o valor médio de vazão dos drenos mais próximos (de 3 a 5 drenos), se assemelha as vazões obtidas no terceiro e quarto cenários de simulação. As leituras de vazão no Caso 3, no qual o valor do fluxo simulado é relacionado com o valor médio de vazões mais próximas da seção estudada, podem ser comparadas com o quinto cenário de simulação.

Nos cenários comparados a maior percentagem de comparação entre vazões reais e medidas, no intervalo de variação de 0,5 a 1,5, foi de 50%, o que deve-se a generalização adotada para o coeficiente de permeabilidade, reforçando a teoria de que a garantia das hipóteses adotadas em projetos deve-se cada vez mais a uma caracterização completa e confiável da obra.

Logo, considerando-se que o programa GEOSLOPE (SEEP/W) obteve em um cenário metade dos resultados variando cerca de 50% em relação aos valores medidos, mesmo utilizando um único coeficiente de permeabilidade para toda a fundação da barragem, pode-se concluir que o programa deve ser utilizado para simulações de fluxo de fundações de barragens de CCR, porém, para isso, necessita de estudos geotécnicos de forma mais bem distribuída.

Este fato reafirma a importância de um melhor conhecimento das características da fundação de uma barragem, pois quanto mais precisas estas informações de dados de entrada do modelo, mais confiáveis e reproduzíveis serão os valores simulados.

No caso dos drenos de fundação não foi possível a utilização de vazões totais, tendo em vista que as canaletas de drenagem não coletam somente as águas dos drenos de fundação, mas também a água de drenagem do próprio maciço em CCR. Para a medição das vazões totais de infiltração da fundação é necessária a instalação de vertedouros nas canaletas internas, antes destas se unirem a canaleta de drenagem do maciço em CCR.

Como recomendações para prosseguimento desses estudos sugere-se:

- A realização de leituras dos aparelhos com mais freqüência, de forma que a interpretação dos dados possa ser feita com maior segurança, obedecendo os critérios encontradas na literatura;
- A construção de vertedouros nas canaletas de drenagem para realização das medidas de vazões totais de infiltração da fundação;
- A instalação de piezômetros localizados à jusante da barragem para a determinação dos níveis d'água de jusante;
- A consideração da influência de terremotos no estudo das subpressões, relacionando as medidas de sismos com as das cotas piezométricas;
- O estudo de deslocamentos diferenciais dos blocos utilizando as leituras dos medidores triortogonais de juntas;
- A criação de um “check-list” especial para a barragem Castanhão, a fim facilitar as inspeções rotineiras realizadas pela equipe responsável pela manutenção e apoiar a elaboração de um Plano de Contingência.
- A estruturação de um Plano de Contingência, para preparar as autoridades responsáveis e a população para situações de emergência na barragem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUASOLOS e HIDROTERRA. Análise dos Serviços de Injeção – Execução de Serviços de Consultoria para Acompanhamento, Assessoria e Fiscalização das Obras da Barragem do Castanhão, Alto Santo, 1997.

AGUIAR, M. F.P.; SILVA FILHO, F. C. e ALMEIDA, M. S. S. *Análise de Movimentos em Encostas Naturais Através de Monitoramento por Instrumentação – Caso Coroa Grande – RJ Revista Tecnologia*, v. 26, n.1, Junho, 2005.

BOURDEAUX, G. H. R. M. **Projetos de Barragens de Terra e Enrocamento**, *Curso de Projetos e Construção de Pequenas Barragens*. Governo do Estado do Ceará, Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará e Departamento Nacional de Obras contra as Secas (DNOCS). Fortaleza, 1979.

CARVALHO J. V. **Modelagem temporal das medidas de vazão de drenos na Barragem de Funil (RJ) utilizando redes neurais e métodos estatísticos**. Tese de Doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, 2005.

CASAGRANDE, A. - *Control of Seepage through Foundations and Abutments of Dams, Géotechnique*, Vol. 11, First Rankine Lecture, 1961.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**, volume – 2, 6d. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 1988

CBGB – *Auscultação e Instrumentação de Barragens no Brasil – II Simpósio sobre Instrumentação de Barragens –Volume I*, Belo Horizonte, 1996.

CEDERGREN, H. R. **Seepage, Drainage, and Flow Net**, 3.ed. New York. John Wiley & Sons, 1988.

CHOPRA, A. N. *Earthquake Resistant Design of Concrete Gravity Dams, Journal of the Structural Division*, Vol. 104, No. 6, June 1978, pp. 953-971, Estados Unidos, 1978.

CRUZ, P. T. **100 barragens brasileiras**: casos históricos, materiais de construção projeto. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

DELMEÉ, G. J **Manual de Medição de Vazão** 3d. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 2003.

DIVINO, P. L. e FUSARO, T. C. **Manual da Instrumentação: O Elo entre Projeto e Operação de Barragens**. In: III Simpósio Sobre Instrumentação de Barragens, 2006, São

Paulo. Anais do III Simpósio Sobre Instrumentação de Barragens, São Paulo: CBCB, 2006. p 337-345.

DNOCS. Barragens no Nordeste do Brasil. Experiência do DNOCS em Barragens na Região Semi-Árida. Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), Fortaleza, 2003. CD-ROM.

ELETROBRÁS. Avaliação da segurança de barragens existentes. Rio de Janeiro: Eletrobrás, Memória da Eletricidade, 1987.

ENGETEC. Relatório Março – 2005. ENGETEC – Engenharia Consultoria E Projetos LTDA, DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra a Seca, Alto Santo, 2005.

ENGESOFT. Volume 3 – Memória de Cálculo – Projeto Executivo do Paramento Central da Barragem Castanhão em Concreto Compactado à Rolo. ENGESOFT – Engenharia e Consultoria S/C Ltda, Jaguaribara, 2000a.

ENGESOFT. Volume 4 – Investigações de Campo e Estudos Laboratoriais – Projeto Executivo do Paramento Central da Barragem Castanhão em Concreto Compactado à Rolo. ENGESOFT – Engenharia e Consultoria S/C Ltda, Jaguaribara, 2000b.

ENGESOFT. Desenhos – Projeto Executivo do Paramento Central da Barragem Castanhão em Concreto Compactado à Rolo. ENGESOFT – Engenharia e Consultoria S/C Ltda, Jaguaribara, 2000c

FRANÇA, E. M. e GOMES, C. C. (2006) - *Análise da Instrumentação Piezométrica da Barragem Castanhão* - III Simpósio Sobre Instrumentação de Barragens – Comitê Brasileiro de Barragens, São Paulo, Brasil.

FRANÇA, E. M. e GOMES, C. C. (2007) - *Análise da Percolação d'Água Através da Fundação da Barragem Castanhão* - XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – Associação Brasileira de Recursos Hídricos, São Paulo, Brasil.

GEO-SLOPE. “SEEP/W for seep analysis – User’s Guide”. GEO-SLOPE International Ltd. Canadá, 2001.

GONÇALVES, E. S. *Instrumentação Sismológica de Reservatórios- Experiência da CEMIG* – Revista do Comitê Brasileiro de Grandes Barragens 01/96. Rio de Janeiro, 1996.

GUTIÉRREZ, J. L. C. Monitoramento da Instrumentação da Barragem de Corumbá-I por Redes Neurais e Modelos de Box & Jenkins. Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, 2003.

IBPS. A grandiosa e Polêmica Barragem Castanhão. Instituto Brasileiro de Produção Sustentável e Direito Ambiental, Porto Alegre. Disponível em: <<http://www.ibps.com.br/index.asp?idnoticia=772>>. Acesso em: 08 de Agosto de 2007.

JARDIM, W. F. D e MOLER, W. A. *Junta Longitudinal em CCR na Barragem do Castanhão.* XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Vol. II, pp. 271-286, Comitê Brasileiro de Barragens, Fortaleza, 2001

JAVANMARDI, F., LÉGER, P. e TINAWI, R. *Seismic structural stability of concrete gravity dams considering transient uplift pressures in cracks.* Engineering Structures 27 (2005) 616–628, 2005.

LACERDA, L. A. et al. *Análise Termo-Mecânica de Barragens de Concreto Compactado com Rolo – Anais do II Congresso de Inovação Tecnológica em energia Elétrica,* Salvador, 2003.

LEVIS, S. D. **Verificação da Eficácia dos Sistemas de Vedação e Drenagem em Fundações de Barragem de Concreto.** Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2006.

LIGOCKI, L. P. **Comportamento geotécnico da barragem de Coruá-Uma, Pará.** Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, 2003.

MATOS, S. F. **Avaliação de Instrumentos para Auscultação de Barragem de Concreto.** Estudo de Caso: Deformímetros e Tensômetros para Concreto na Barragem de Itaipu. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Paraná (UFPR), Paraná, 2002.

MENESCAL, R. A., GONDIM FILHO, J.G. e OLIVEIRA, Y.C. A Recuperação de Açudes no Âmbito dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará. In: **A Segurança de Barragens e a Gestão de Recursos Hídricos no Brasil.** 12. ed. Brasília: Proágua, 2005. Cap.5, p. 91-99, 2005.

MIN, Ministério da Integração Nacional, **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens,** Brasília, 2002.

MIRANDA, R. N. e LIMA F.P.F. **A Barragem do Castanhão e sua contribuição para o desenvolvimento sustentável do Ceará.** Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará, Grupo Multi-Participativo de Acompanhamento das Obras da Barragem Castanhão, Fortaleza, 1998.

MOIA, F. **Linee Guida per la Sicurezza Sismica e il Controllo dei Versanti Instabili Sistemi di Sorveglianza Automatici e Manuali,** Linee Guida Per La Salvaguardia Dei Beni Culturali Dai Rischi Naturali, Fascicolo IV, Disponível em: <http://www.afs.enea.it/protprev/www/lineeguida4/img_4_44.jpg> Acesso em: 05 de fevereiro de 2008.

MORAIS, E. L. et al. *Desenvolvimento de um Medidor Triortogonal – Instrumento para monitoração de Fissuras e de Juntas em Barragens de Concreto - Anais do II Congresso de Inovação Tecnológica em energia Elétrica,* Salvador, 2003.

MORENO, M. G. M. **Modelagem Numérica da Elevação de Subpressão no Dique A da Usina Hidroelétrica de Sobradinho (Uhs)**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, 2005.

OSAKO, C. I. **A Manutenção dos Drenos nas Fundações de Barragens - O Caso da Usina Hidrelétrica de Itaipu**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Paraná - UFPR, Paraná, 2002.

PEDROSO, L. J., Silva, S. F. e Sousa Jr., L. C. *Avaliação Preliminar da Segurança sísmica de um Perfil Típico em Barragem de Concreto Gravidade*. XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens, T.95 A16. Comitê Brasileiro de Barragens, Goiânia, 2005.

PINTO, C.S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. São Paulo: Oficina do texto, 2000.

PORTO, E. C. **Critério Para Determinação de Vazões Pela Fundação de Barragens Com Base nos Ensaios de Perda D'água: O Caso da Usina Hidrelétrica de Itaipu**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Paraná (UFPR), Paraná, 2002.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 2d. São Carlos: Ed. EESC – USP, 2003.

SANTOS, R. P., PEREIRA, P. N. e SILVEIRA, J. F. A. *Importância da Re-Instrumentação de Barragens- Experiência com a Barragem de Jurumirim*. III Simpósio Sobre Instrumentação de Barragens. Comitê Brasileiro de Barragens, São Paulo, 2006.

SARÉ, A. R. **Análise das Condições de Fluxo na Barragem de Coruá-Uma, Pará**. Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, 2003.

SARÉ, A. R.; et al. *Monitoramento da UHE Curuá-Uma: Elemento de Avaliação de Segurança* - Anais do II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Salvador, 2003

SILVA FILHO, J. F. e GAMA, E. M. *Um modelo para a análise do fluxo das fundações de barragens de concreto* – Revista Escola de Minas, v56, n. 1 Janeiro/Março, 2003.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e comportamento de fundações de barragens de concreto**. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2003.

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

SHERARD, J. L., et al. Earth and Earth-Rock-Dams. New York, John Wiley end Sons, 1963.

SOUZA, V. A. D. **Simulação do Regime de Fluxo no Maciço de Terra Compactada da Barragem Jaburu I.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, 2005.

USACE. “Seepage Analysis and Control for Dams”. Department of the Army, U. S. Army Corps of Engineers, Estados Unidos, 1986.

USACE. **“Rock Foundations”.** Department of the Army, U. S. Army Corps of Engineers, Estados Unidos, 1994.

USACE. “Gravity Dam Design.- Engineering and Design”. Department of the Army, U. S. Army Corps of Engineers, Estados Unidos, 1995a.

USACE. “Instrumentation of Embankment Dams and Levees”. Department of the Army, U. S. Army Corps of Engineers, Estados Unidos, 1995b.

USBR. **Design of Small Dams.** United States Bureau of Reclamation, Department of Interior. Water Resources Technical Publication, Estados Unidos, 1987.

APÊNDICE A

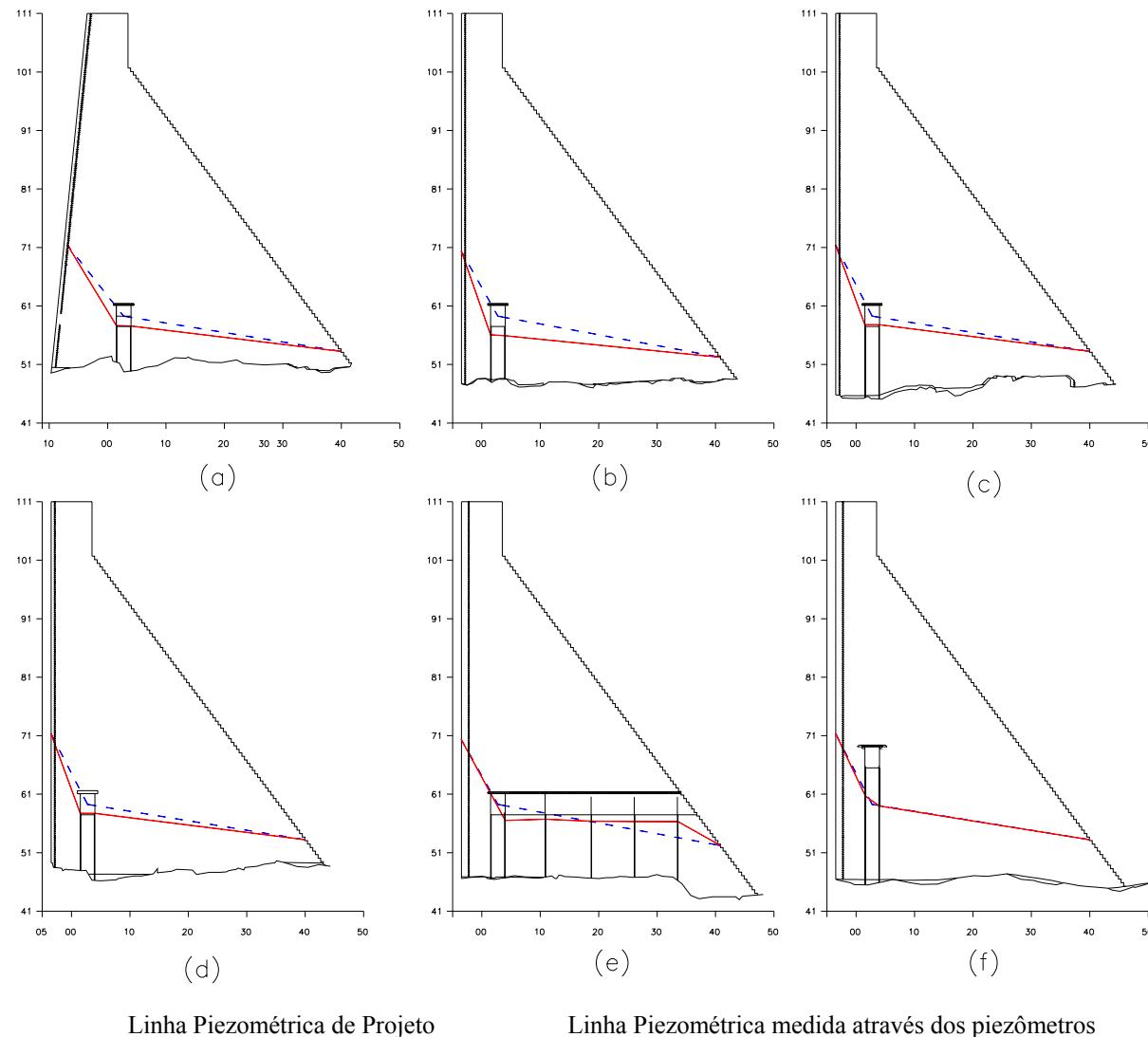


Figura A1 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de janeiro de 2004 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.

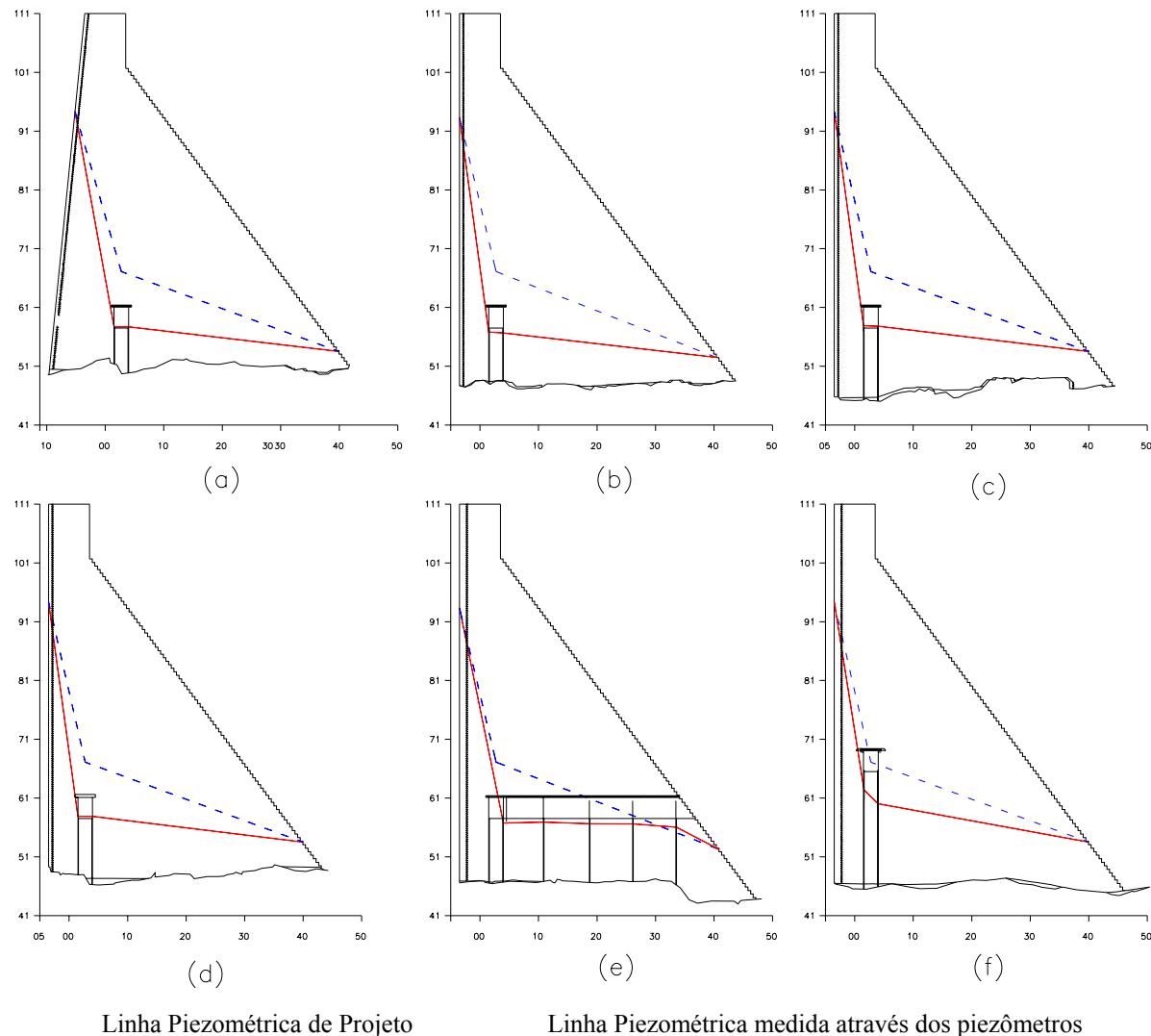


Figura A2 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de fevereiro de 2004 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.

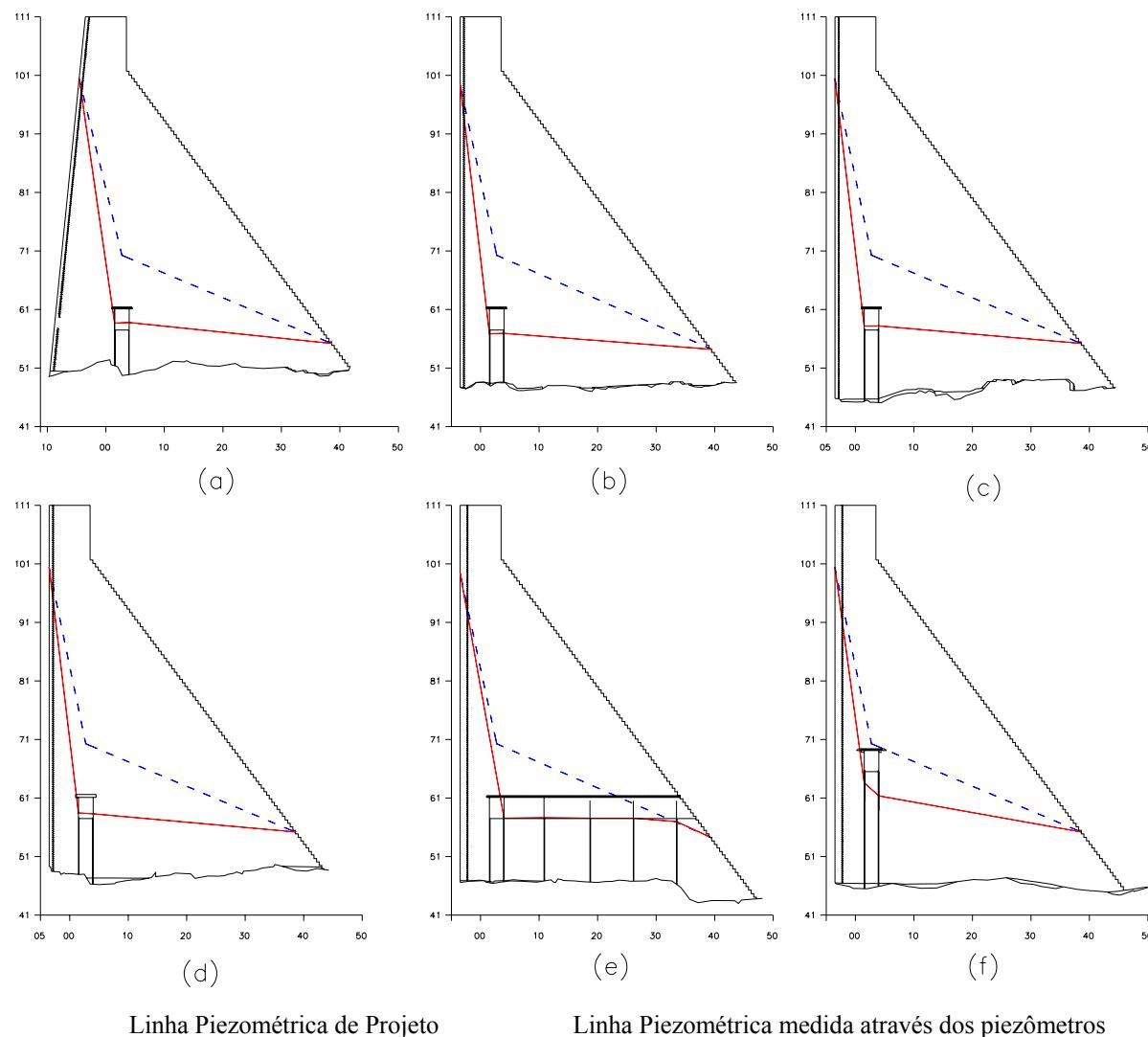


Figura A3 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de março de 2004 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.

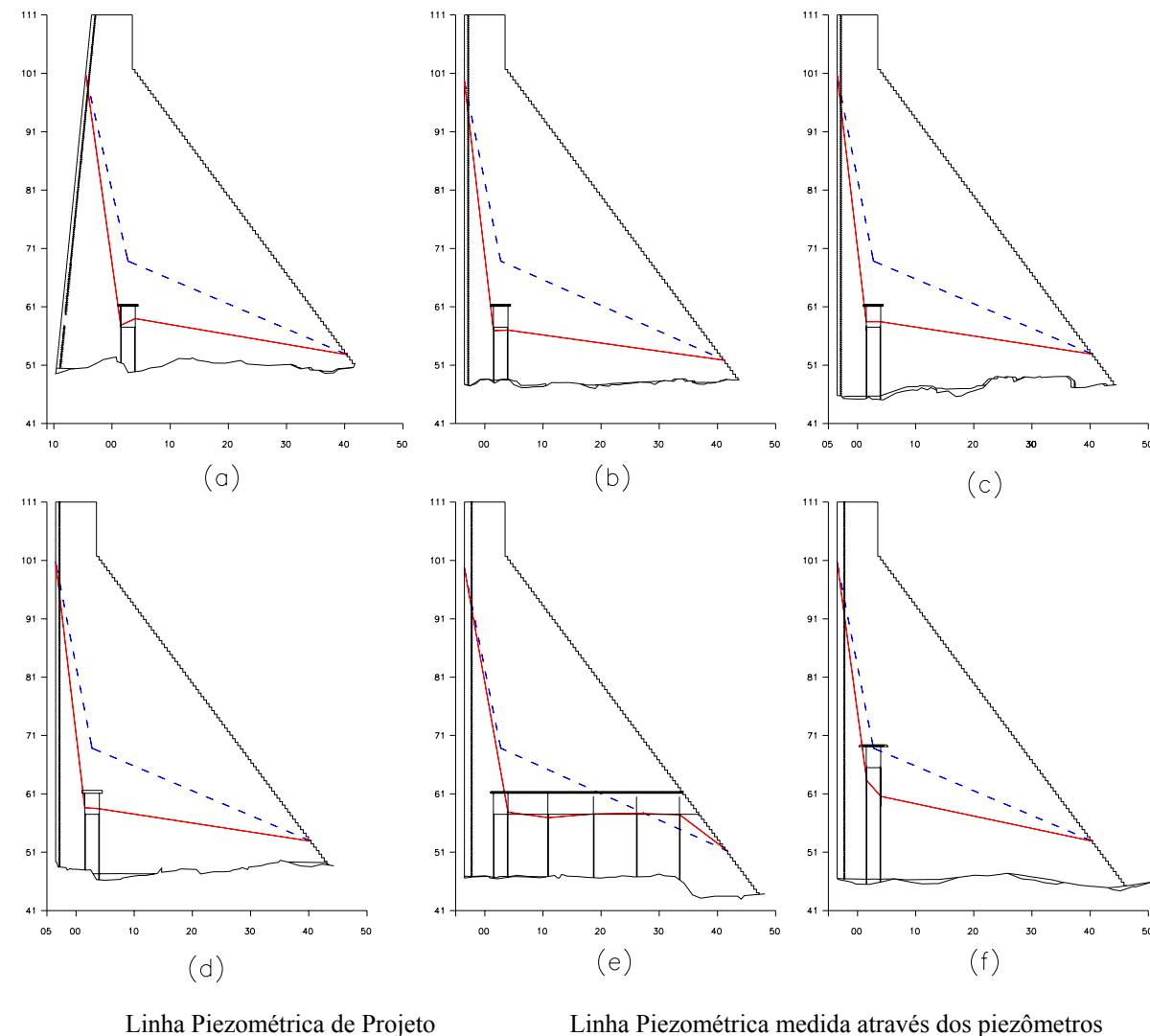


Figura A4 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de abril de 2004 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.

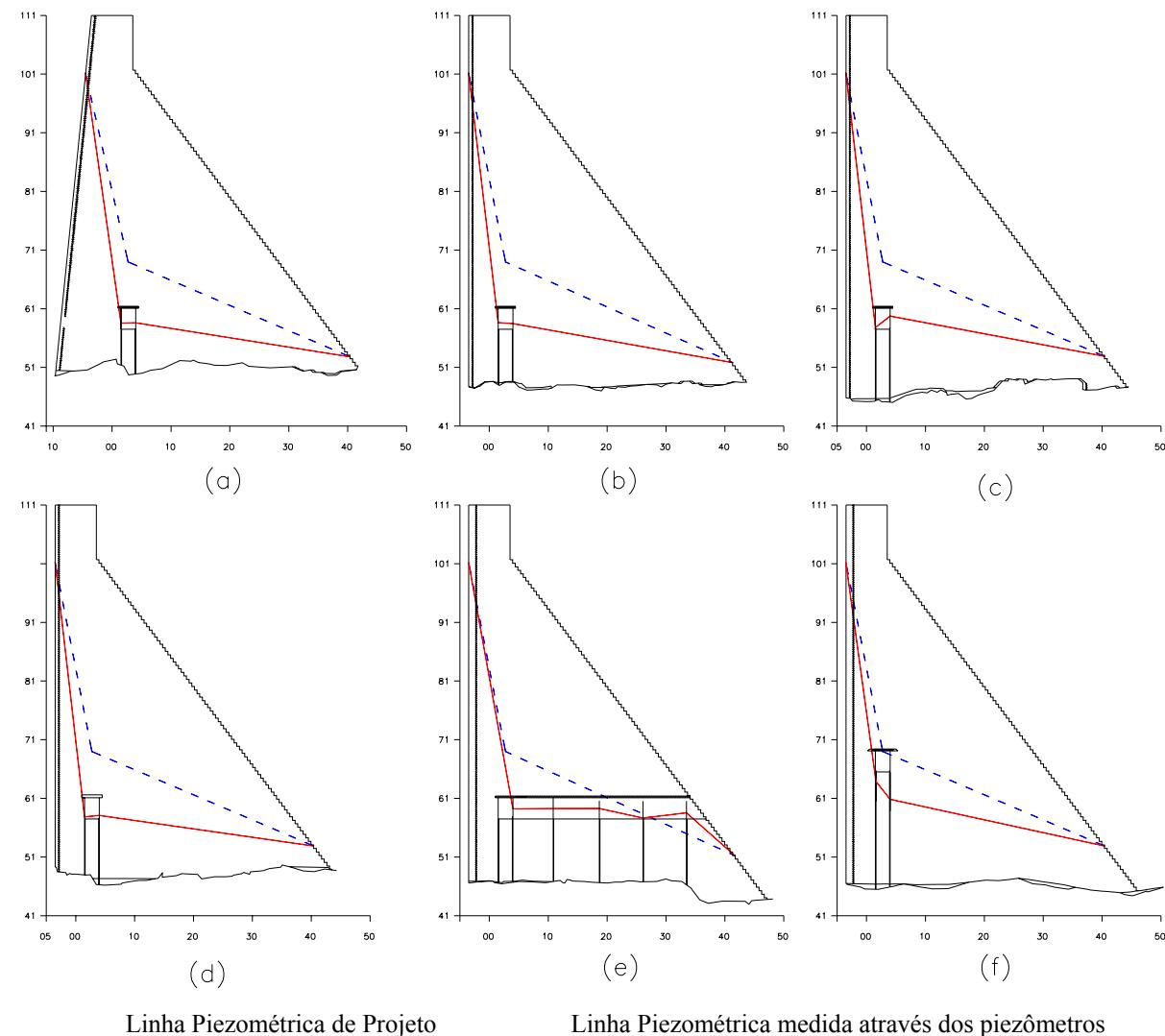


Figura A5 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de maio de 2004 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.

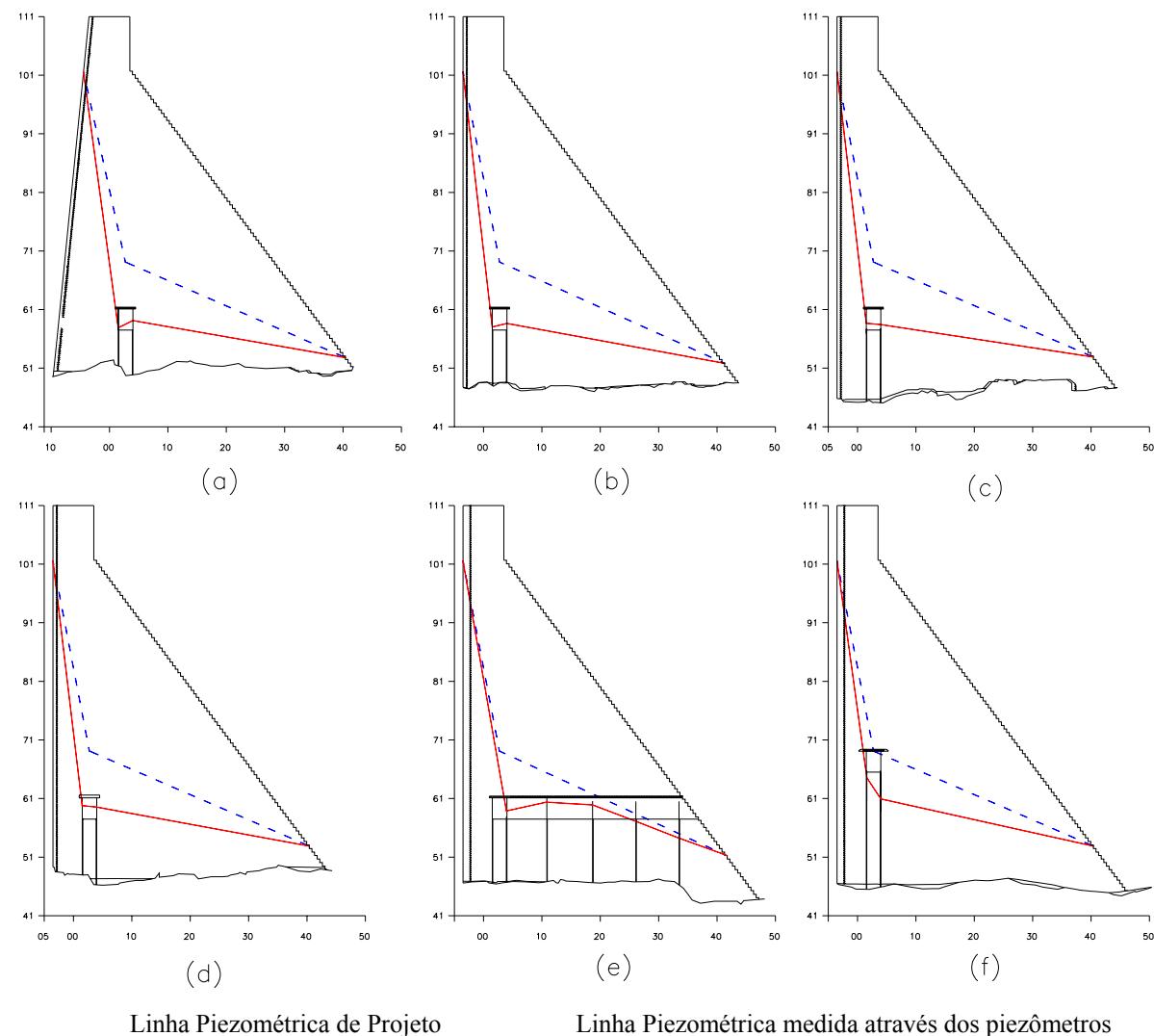


Figura A6 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de junho de 2004 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.

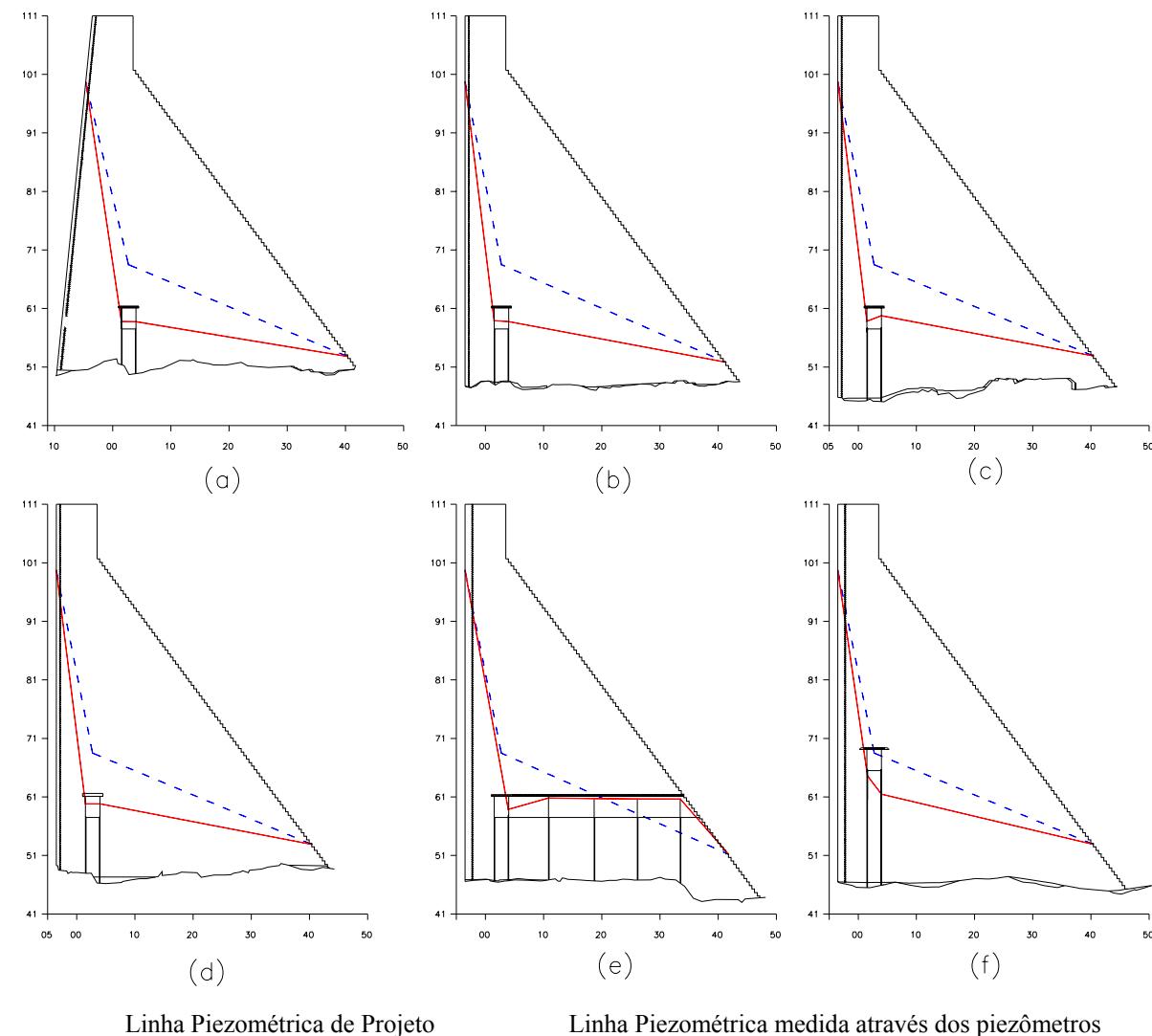


Figura A7 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de janeiro de 2005 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.

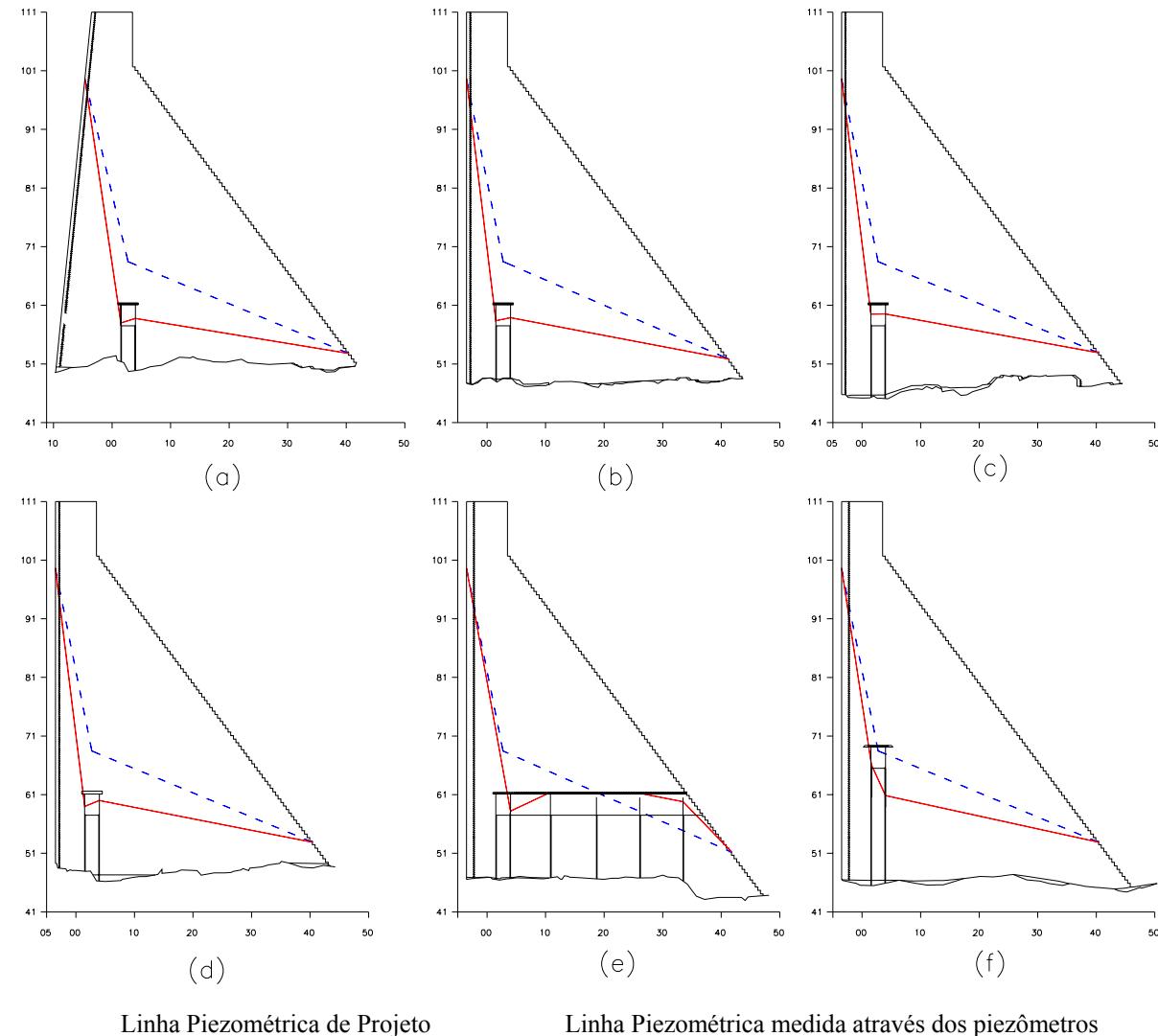


Figura A8 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de fevereiro de 2005 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.

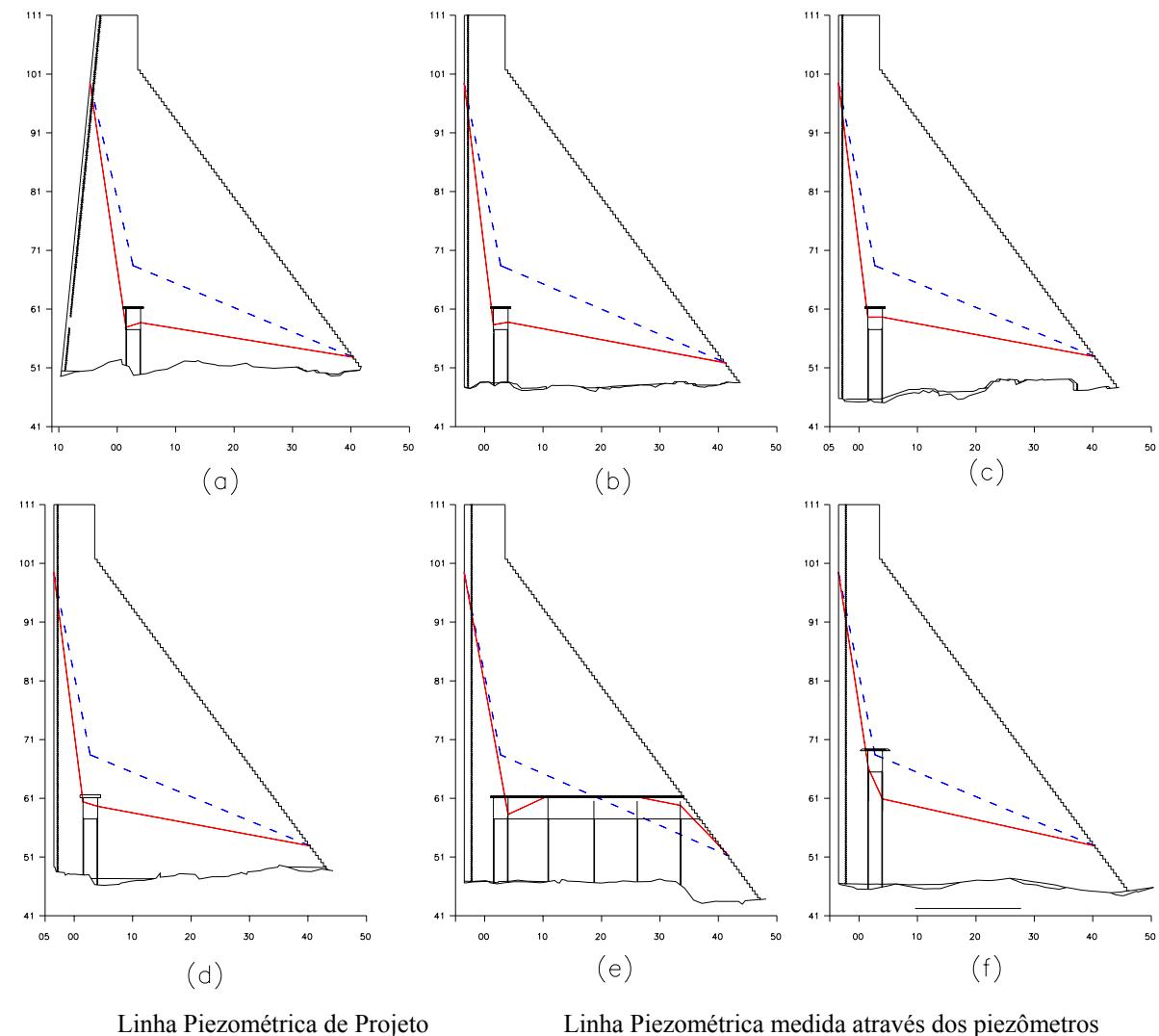


Figura A9 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de março de 2005 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.

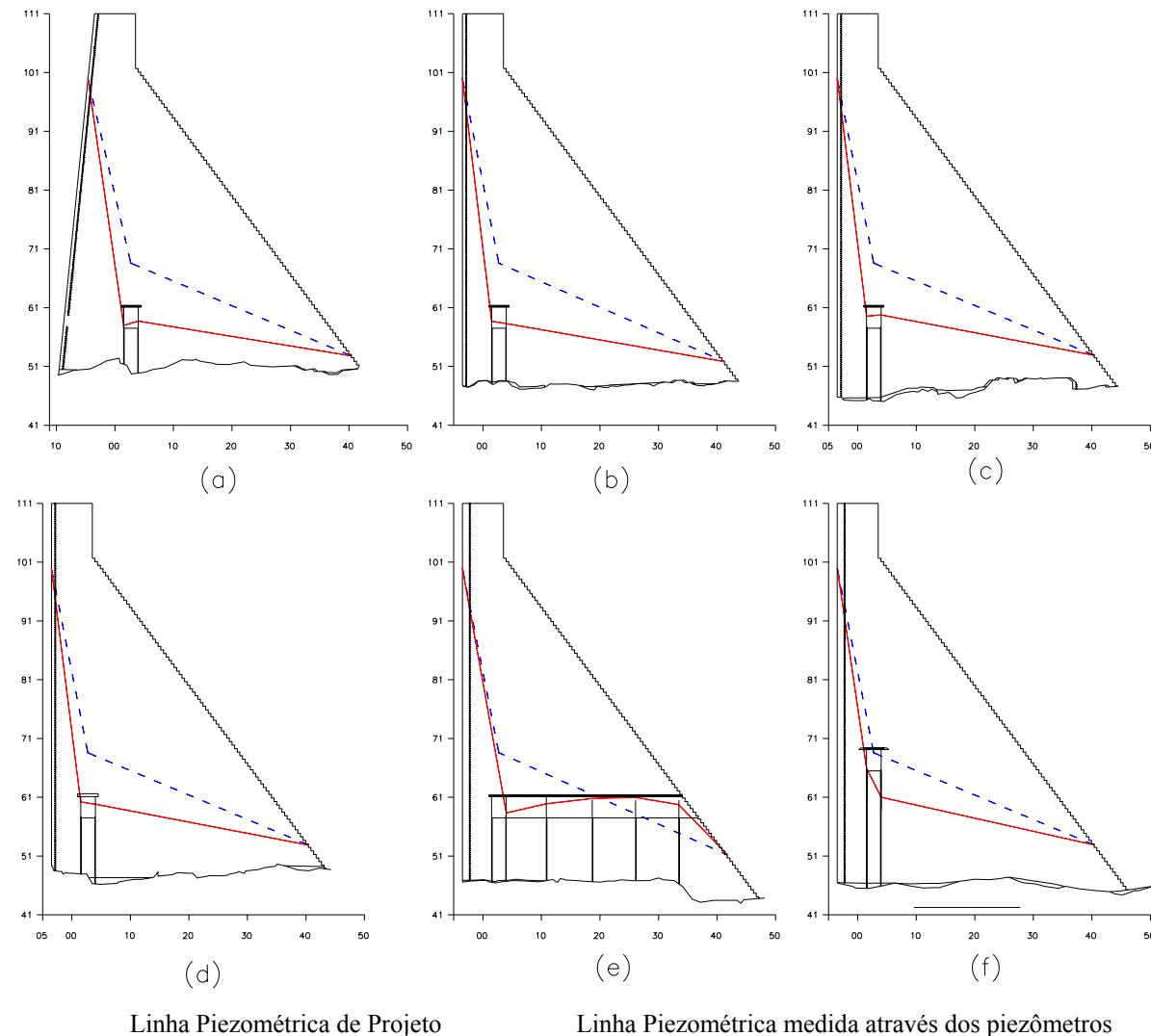


Figura A10 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de abril de 2005 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.

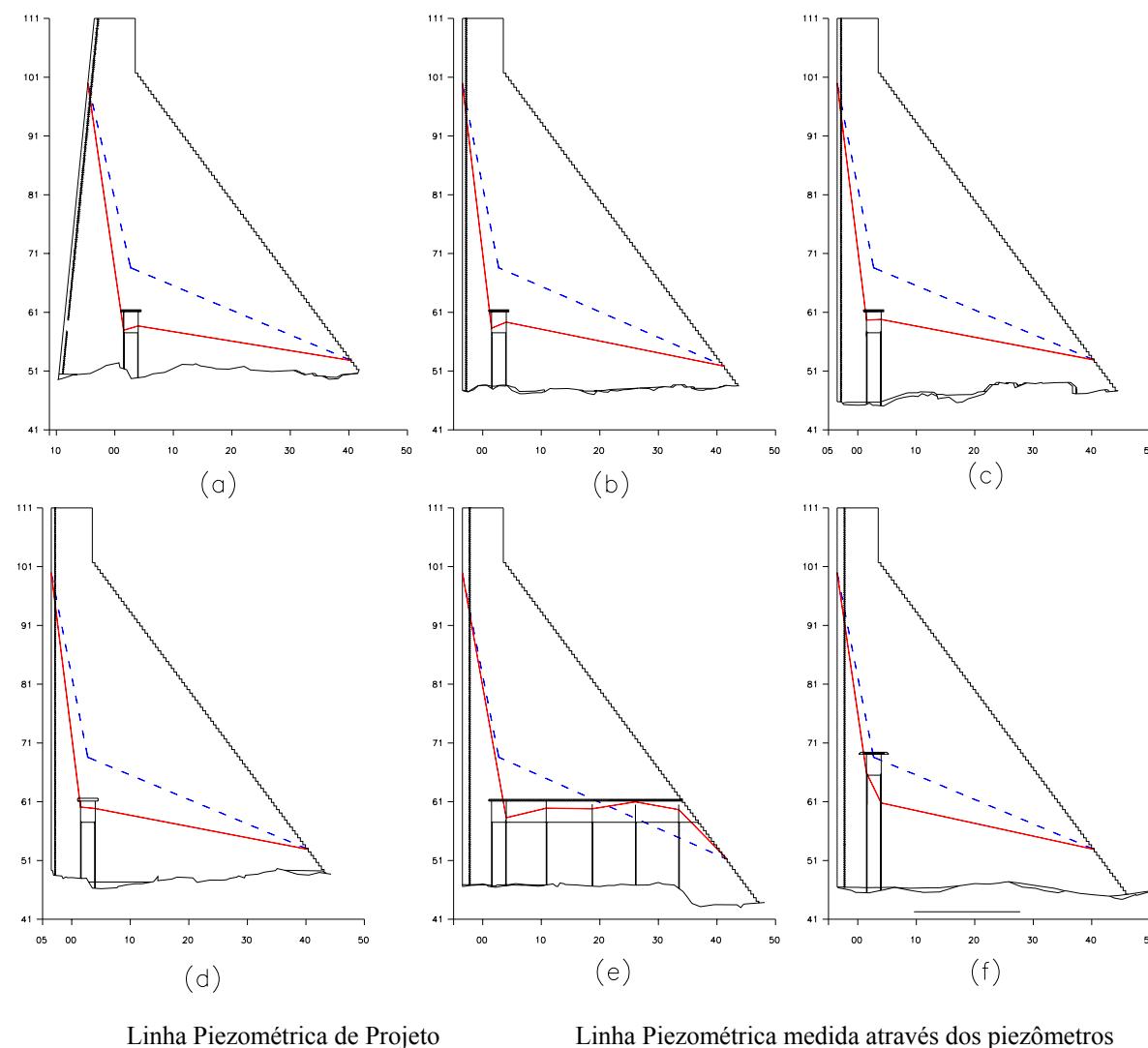


Figura A11 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de maio de 2005 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.

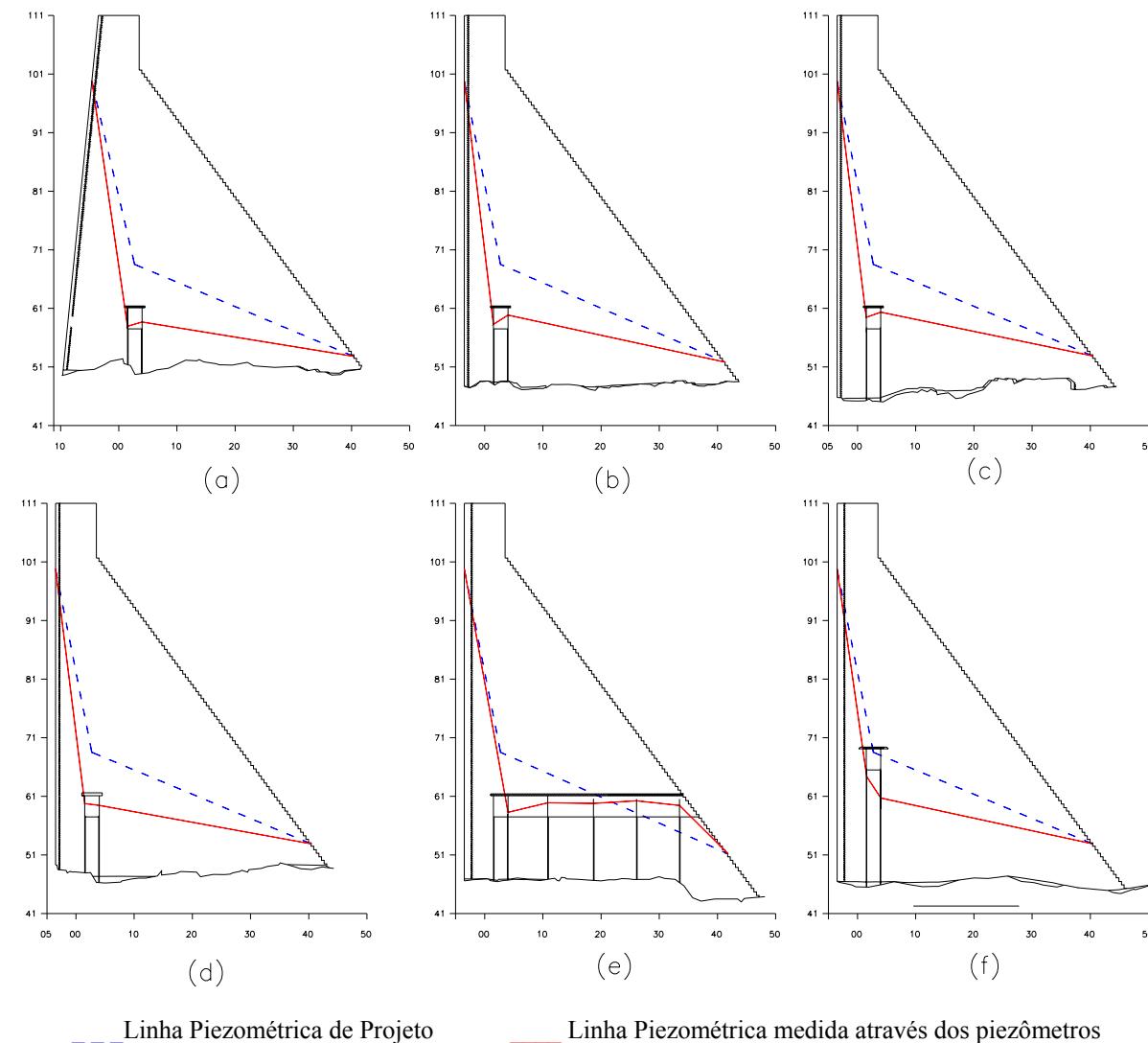


Figura A12 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de junho de 2005 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.

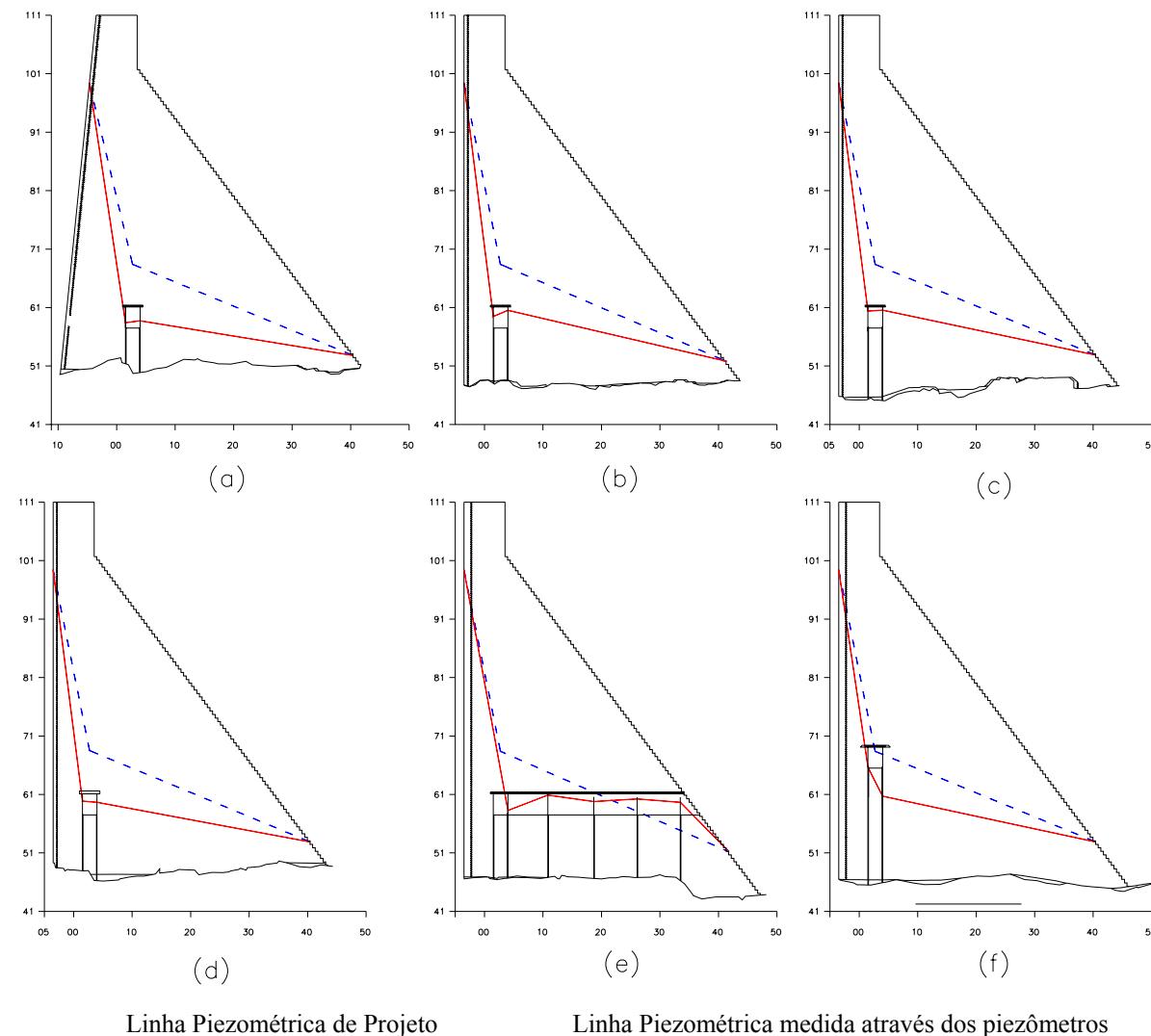


Figura A13 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de agosto de 2005 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.

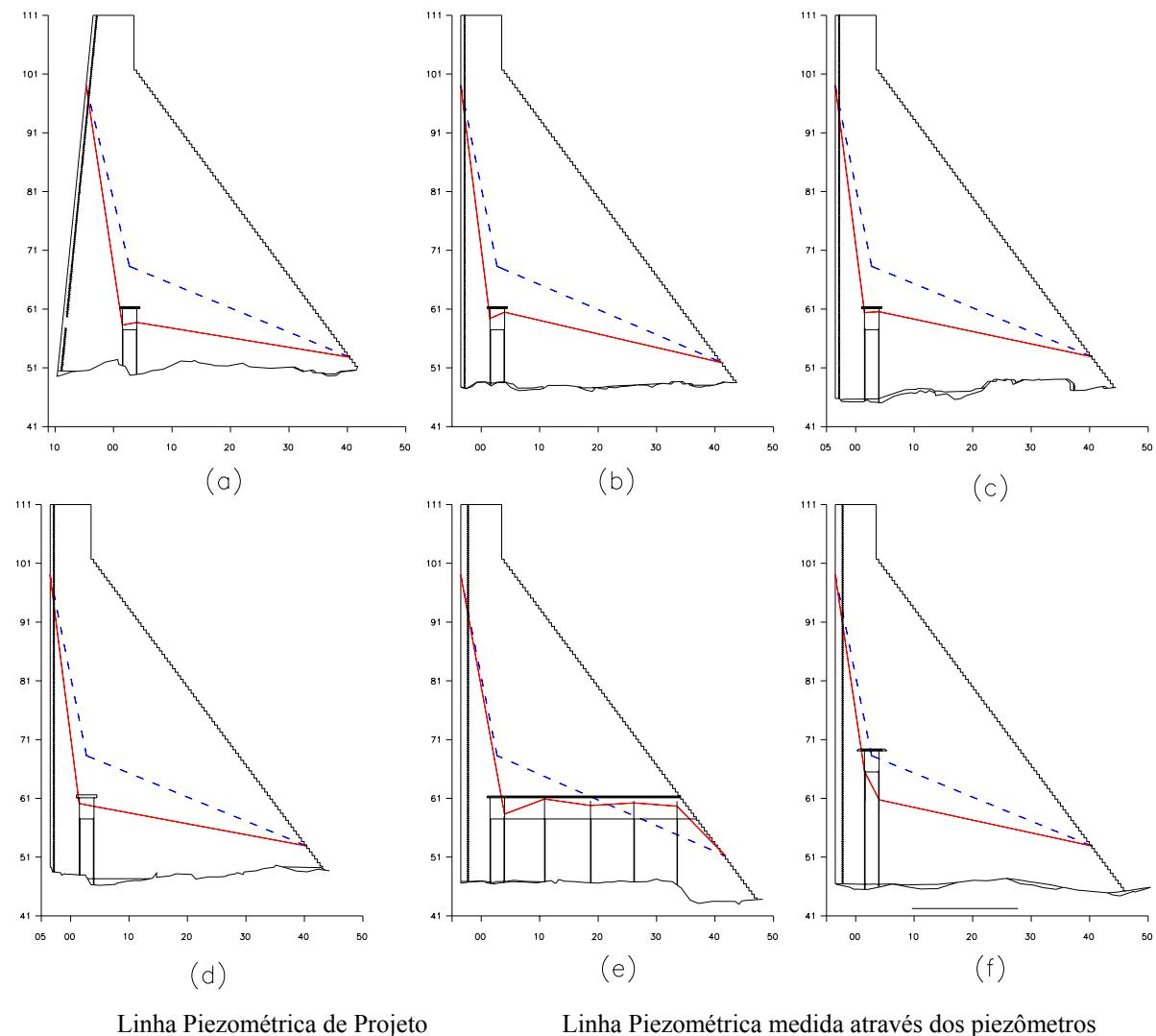


Figura A14 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de setembro de 2005 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.

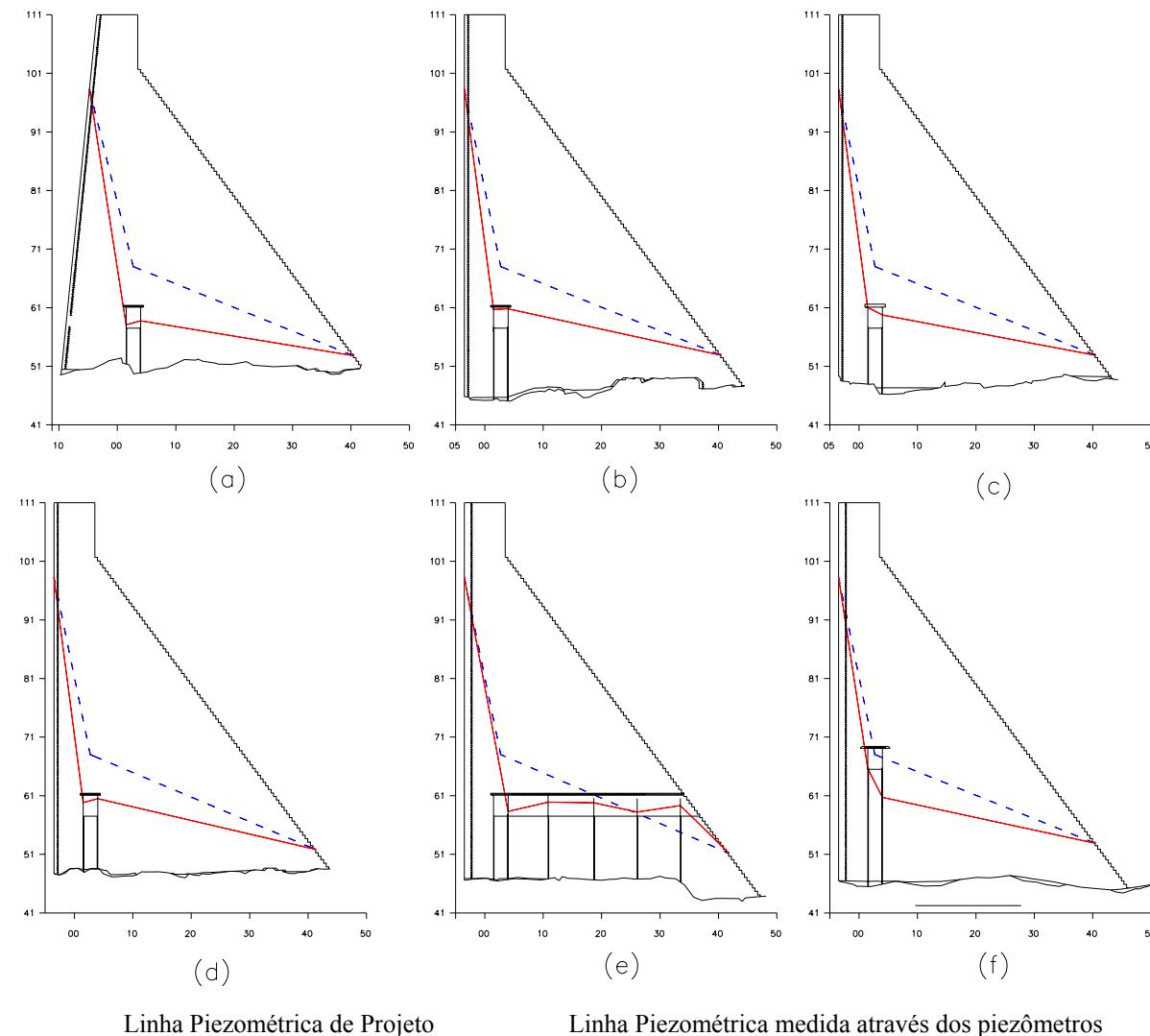


Figura A15 - Diagramas de subpressões medidas e de projeto de novembro de 2005 – (a) Estaca 06, (b) Estaca 11, (c) Estaca 16, (d) Estaca 21, (e) Estaca 26 e (f) Estaca 31.

APÊNDICE B

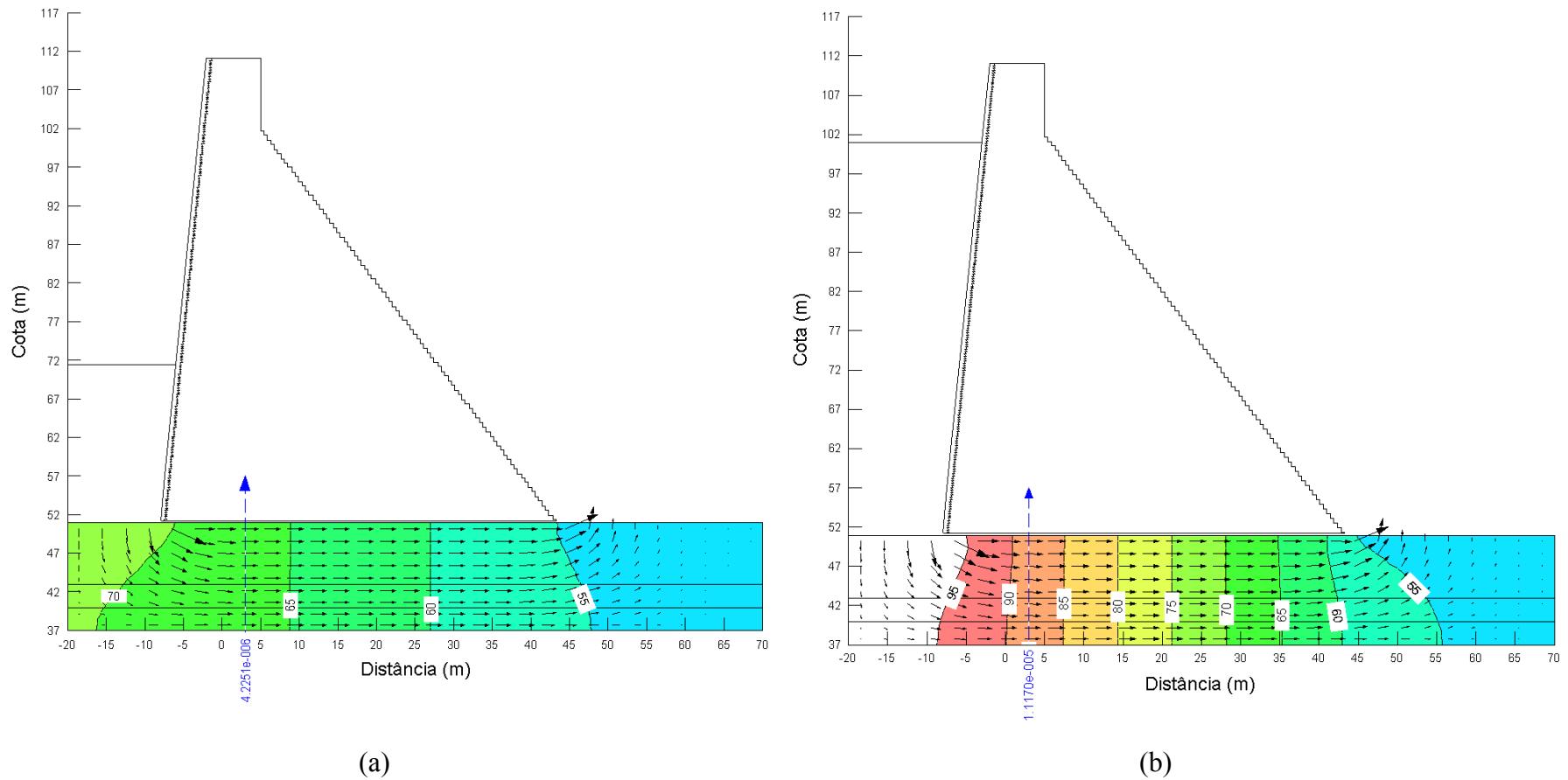


Figura B 1 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

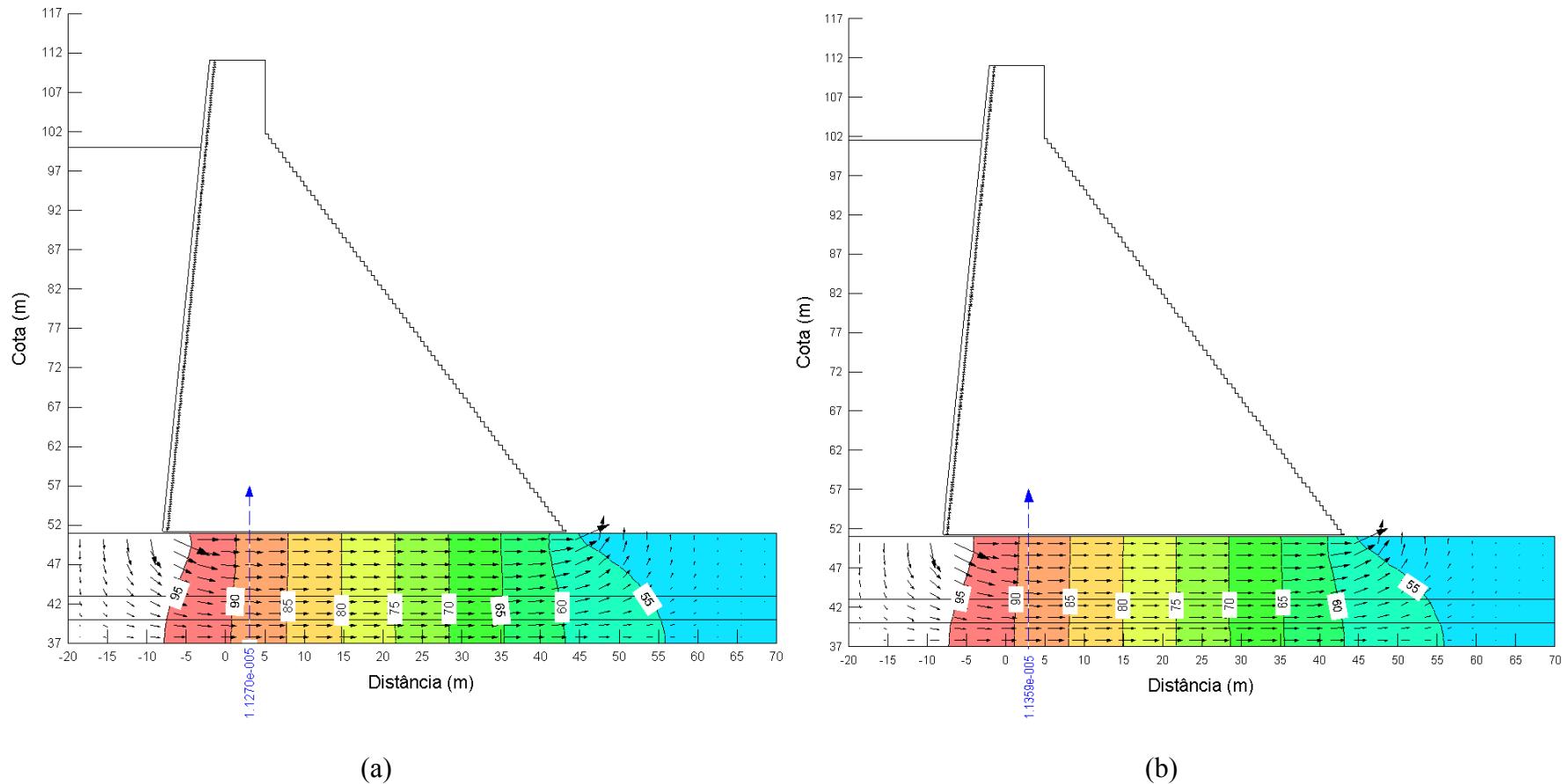


Figura B 2 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

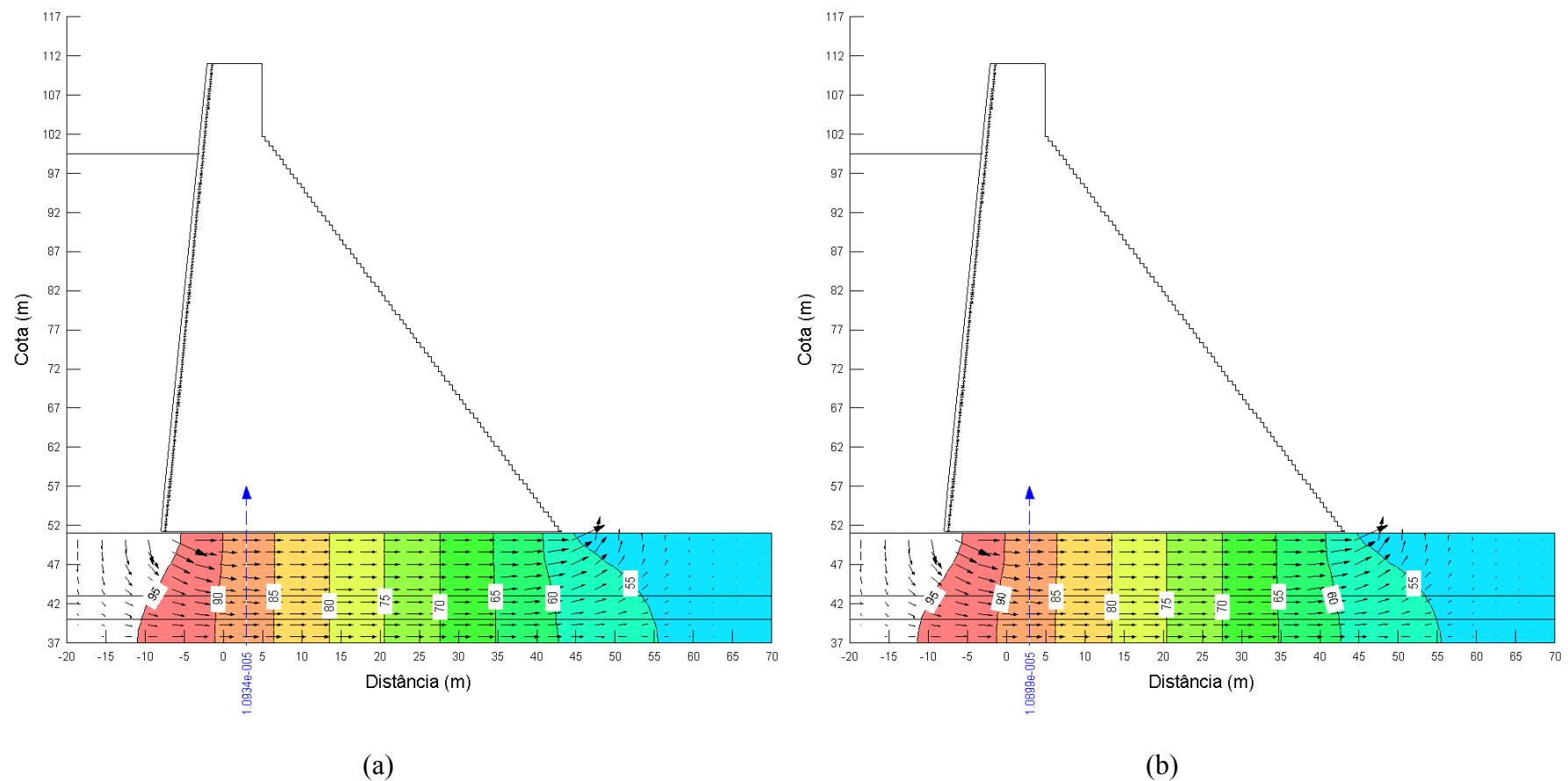


Figura B 3 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

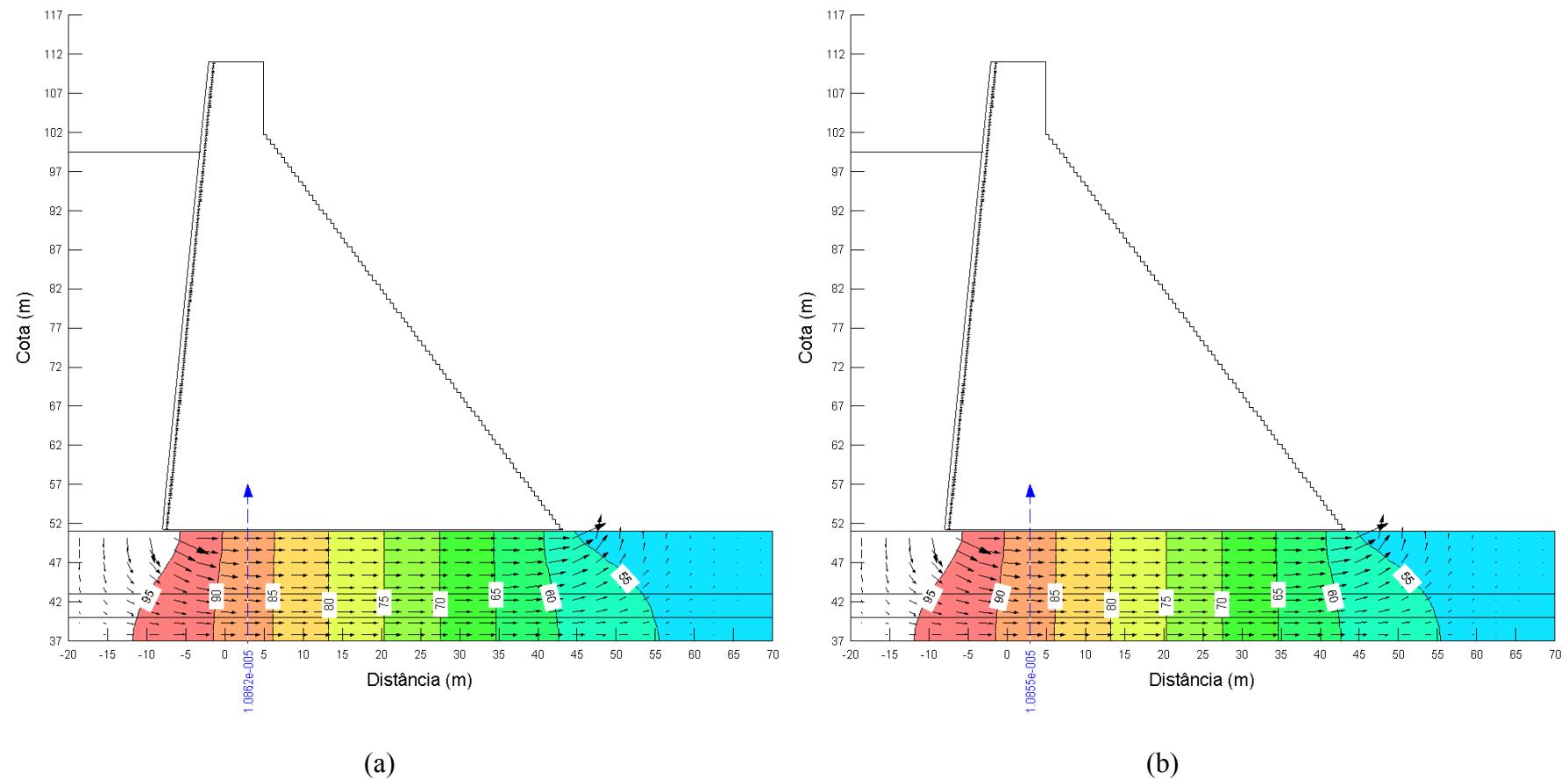


Figura B 4 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

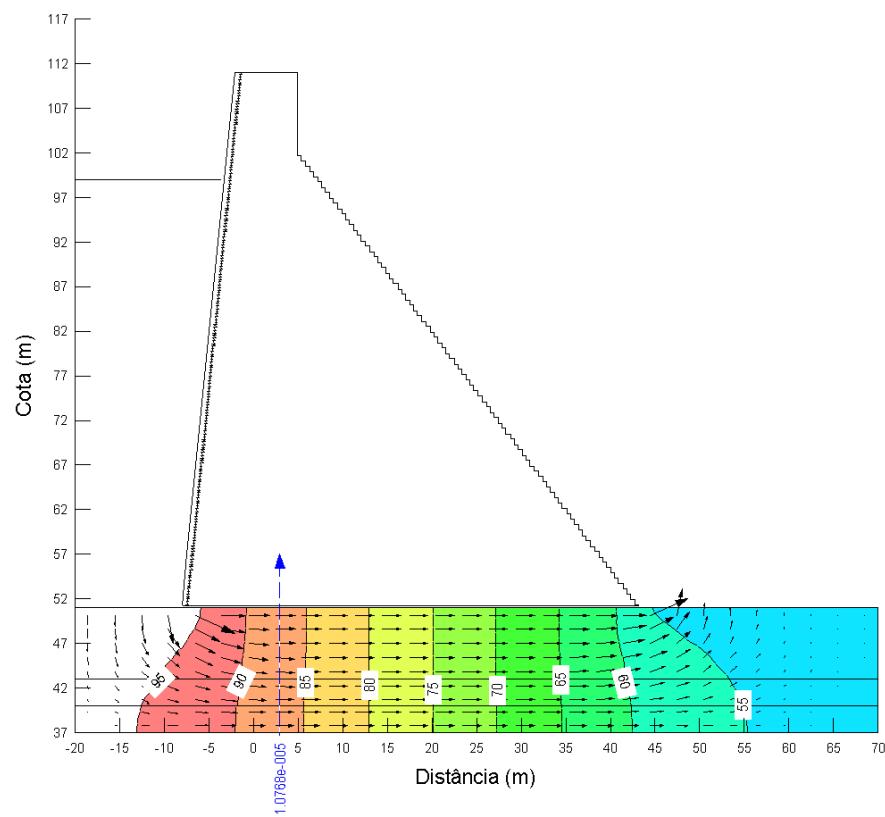


Figura B 5 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, setembro de 2005

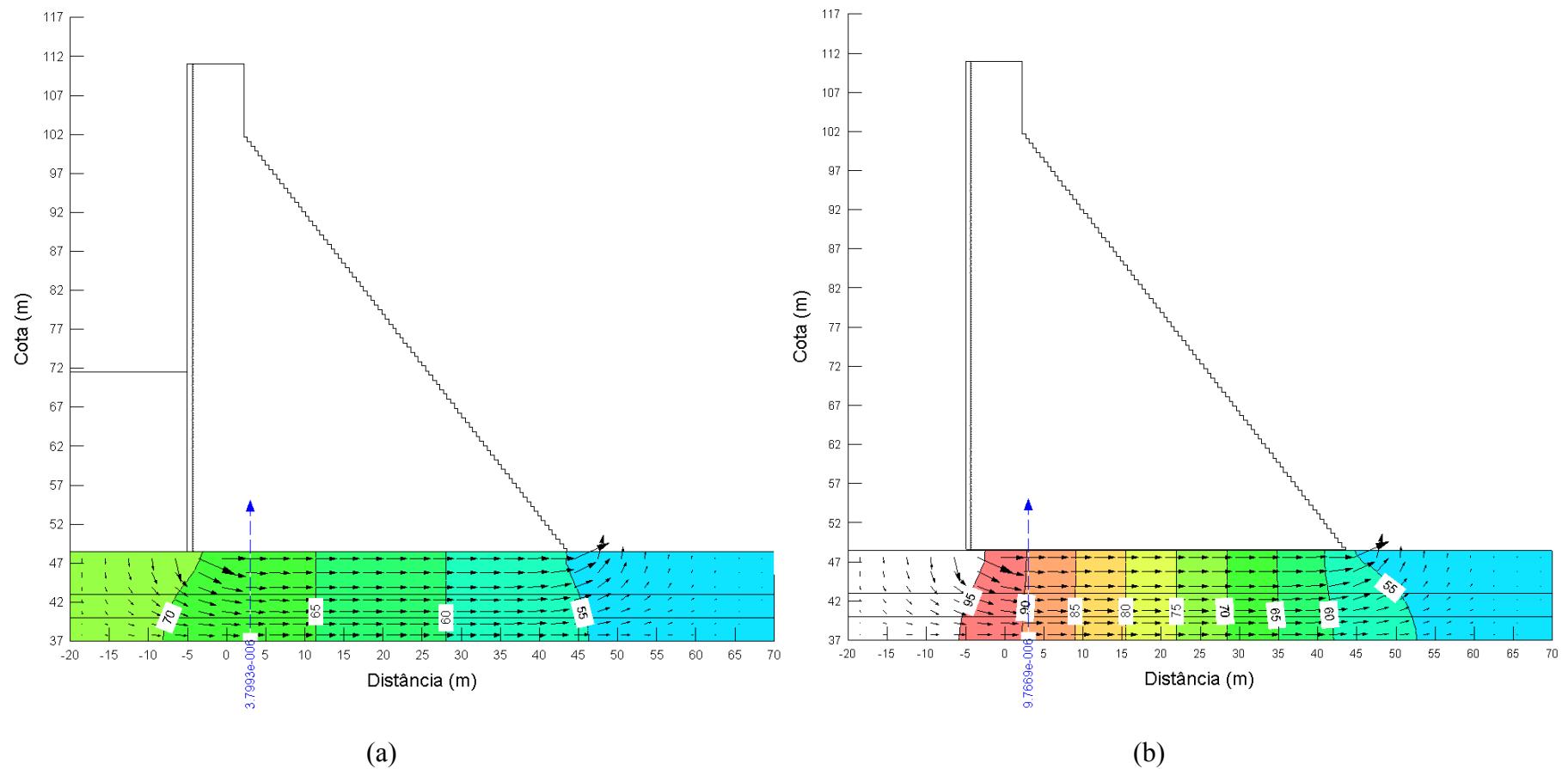


Figura B 6 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

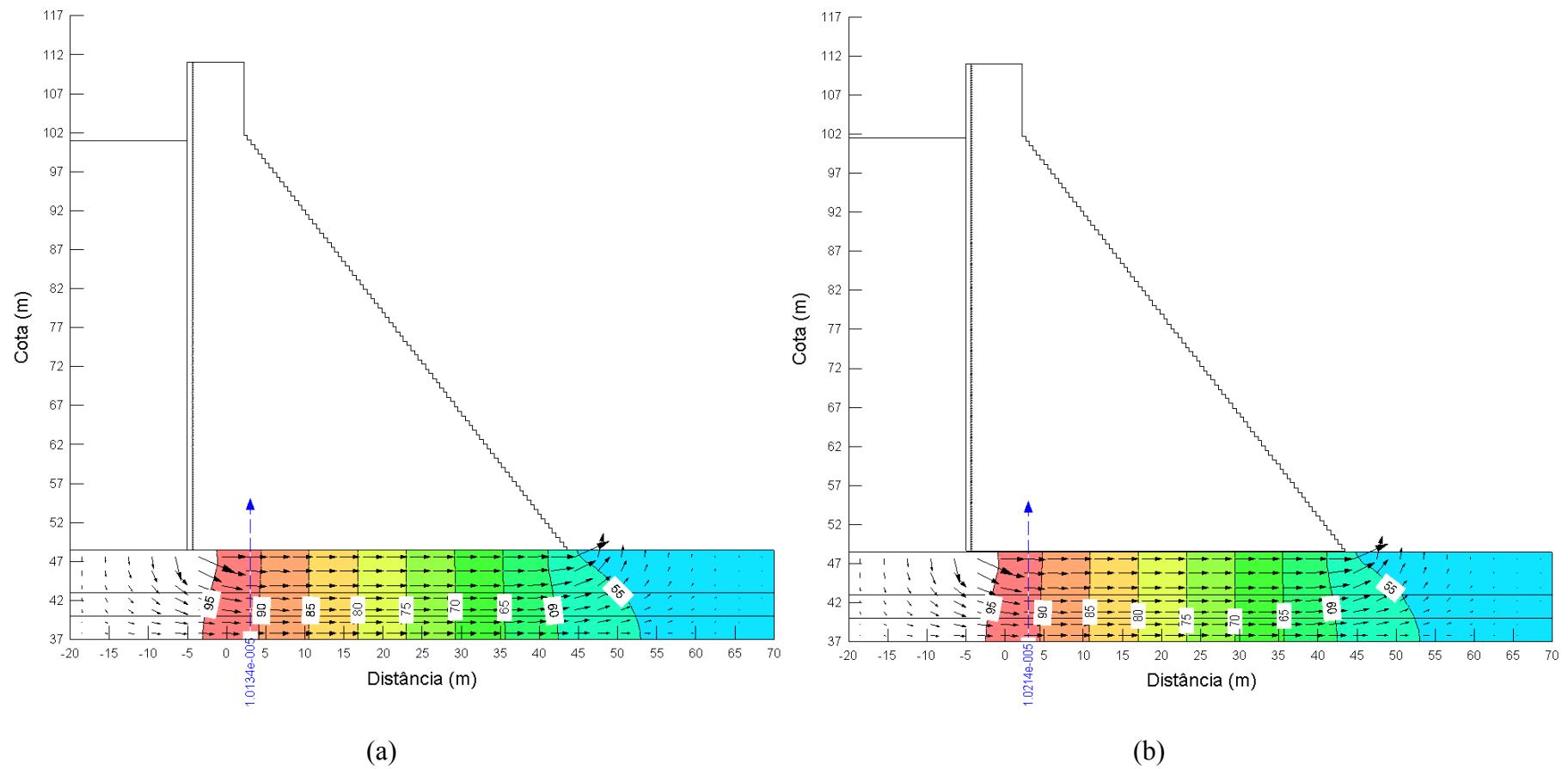


Figura B 7 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

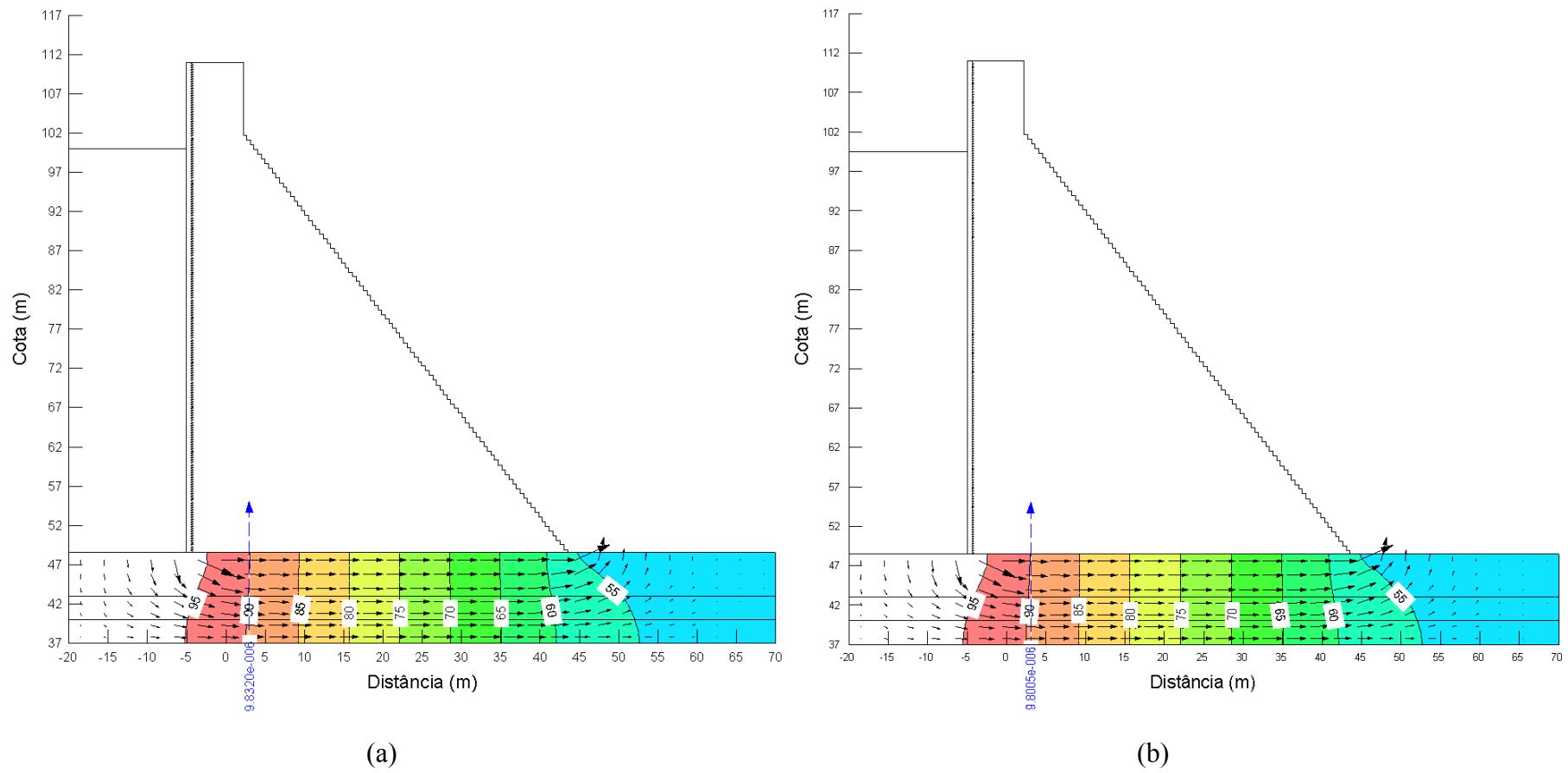


Figura B 8 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

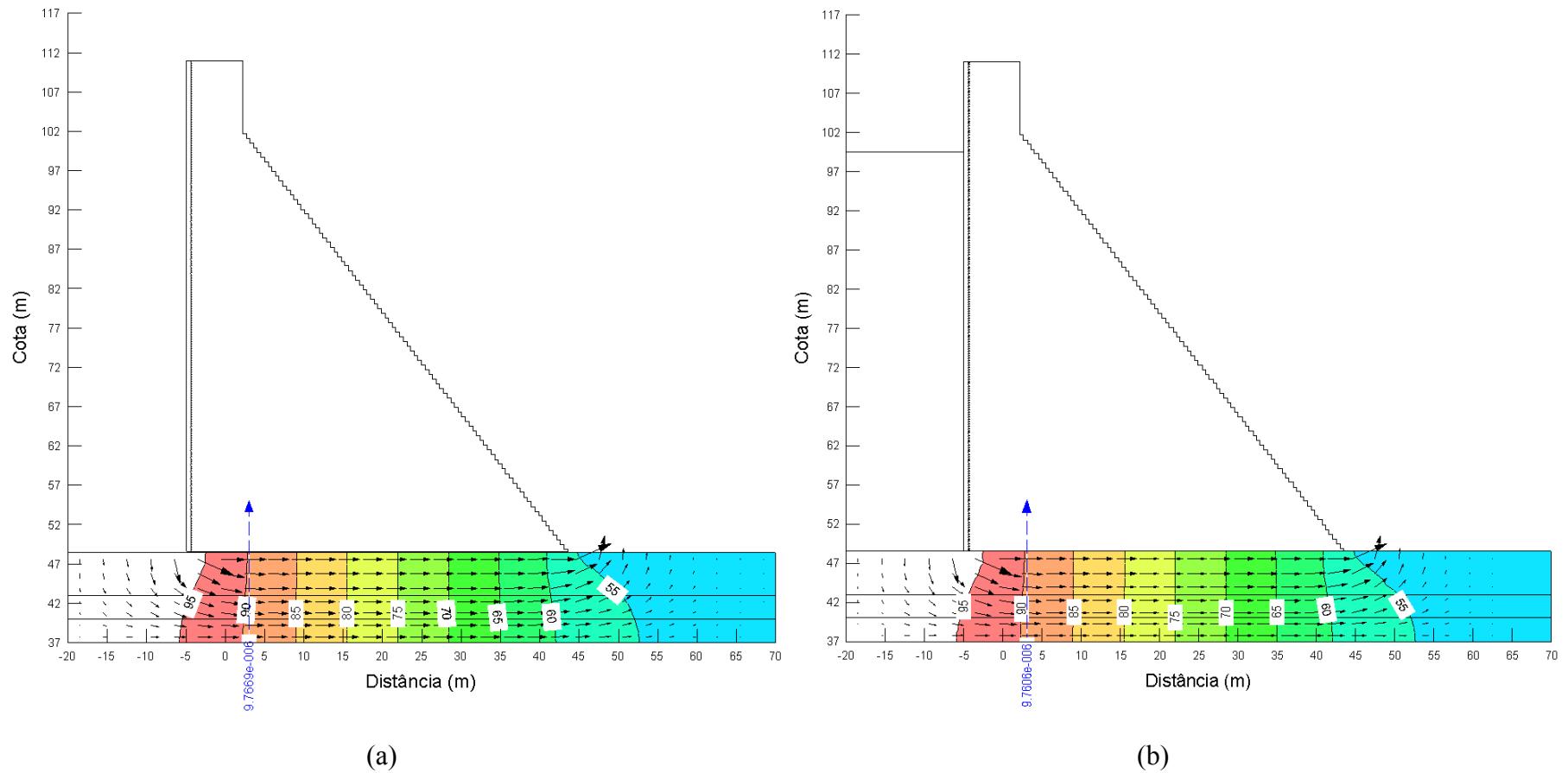


Figura B 9 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

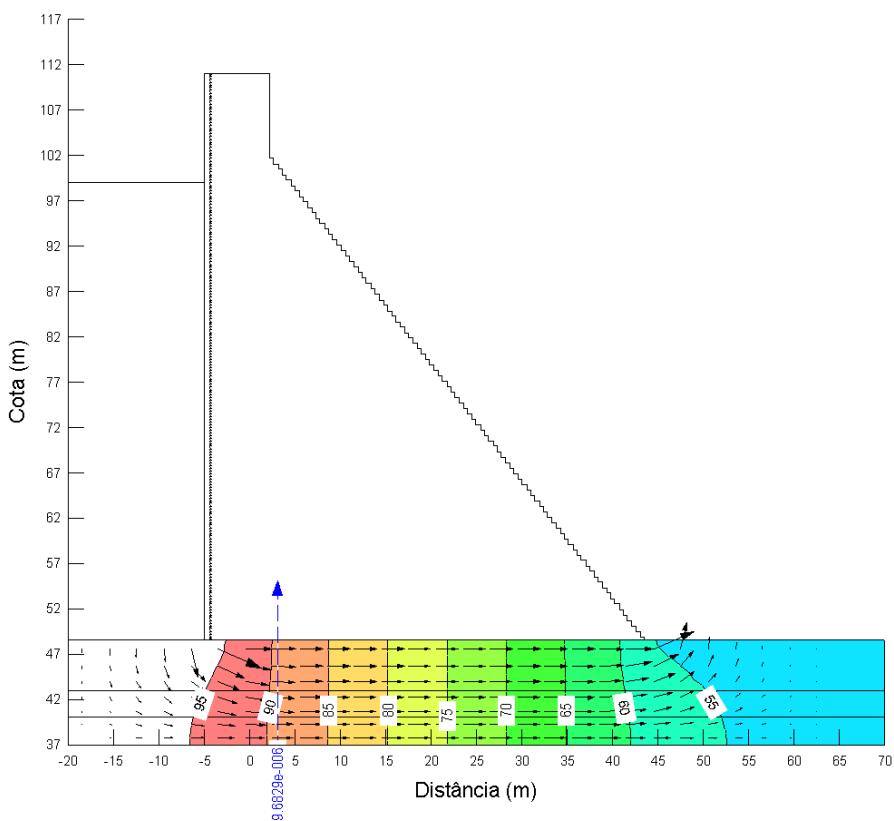


Figura B 10 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, setembro de 2005

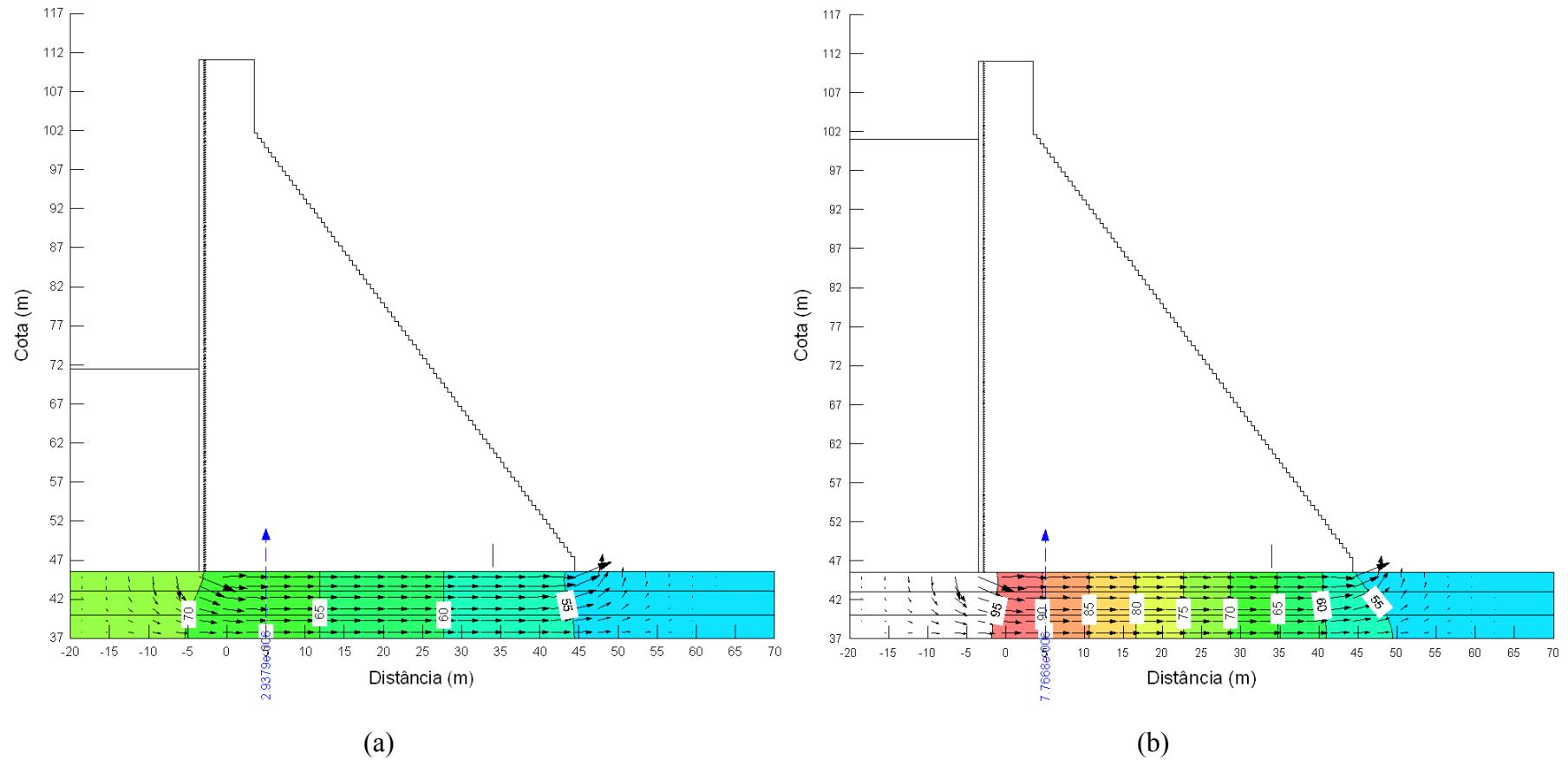


Figura B 11 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

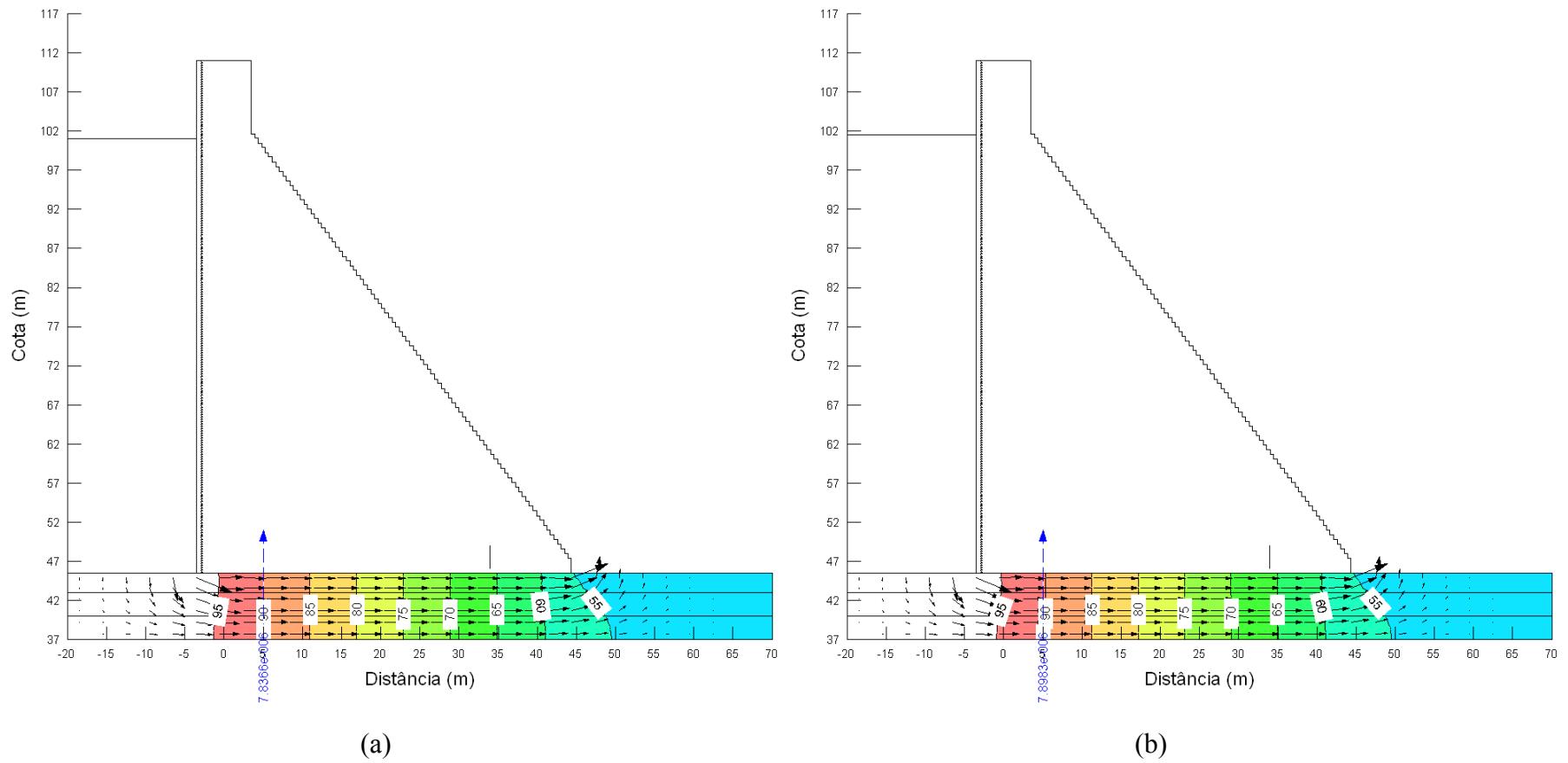


Figura B 12 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) Maio de 2004 e (b) Julho de 2004

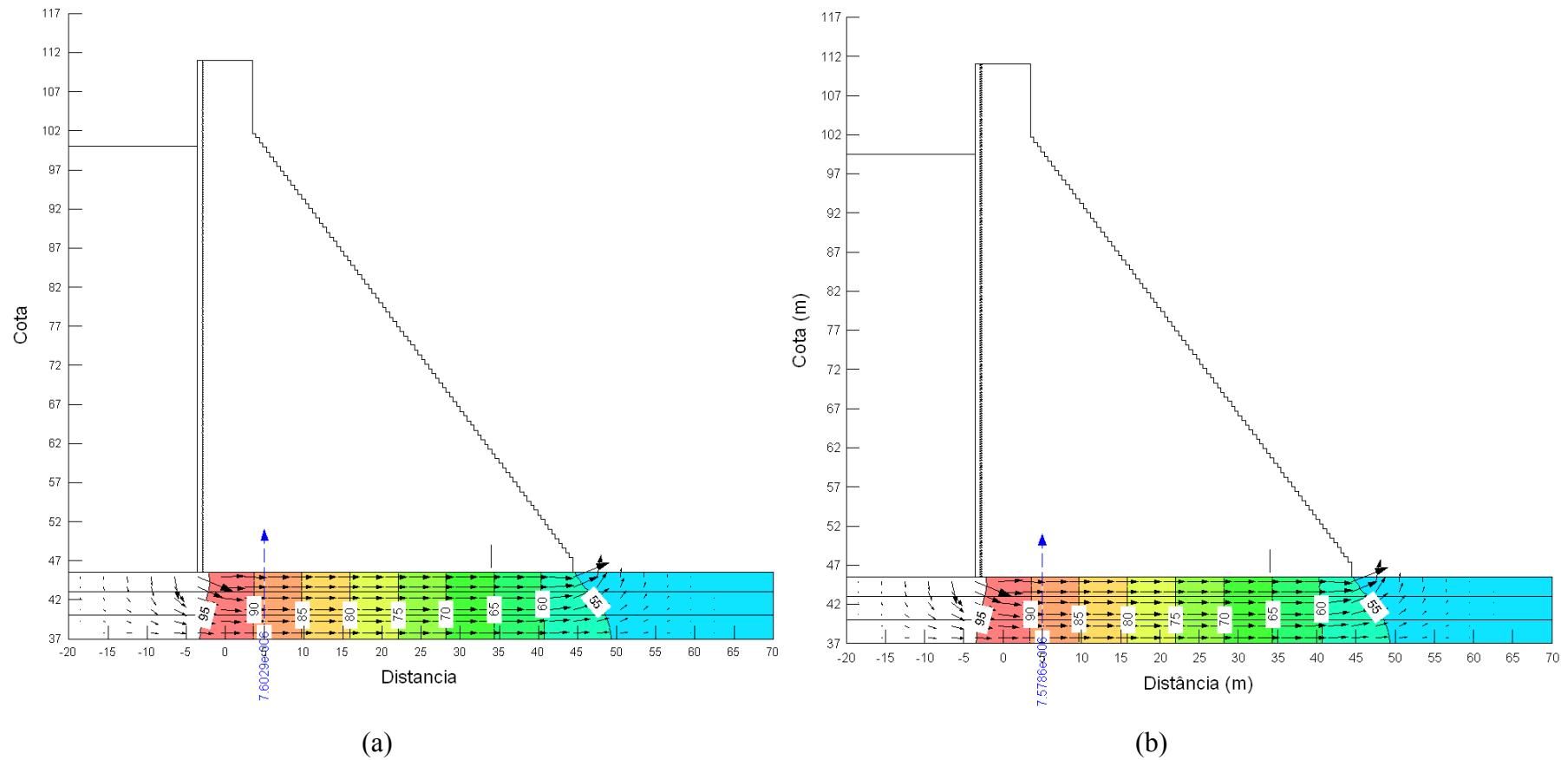


Figura B 13 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

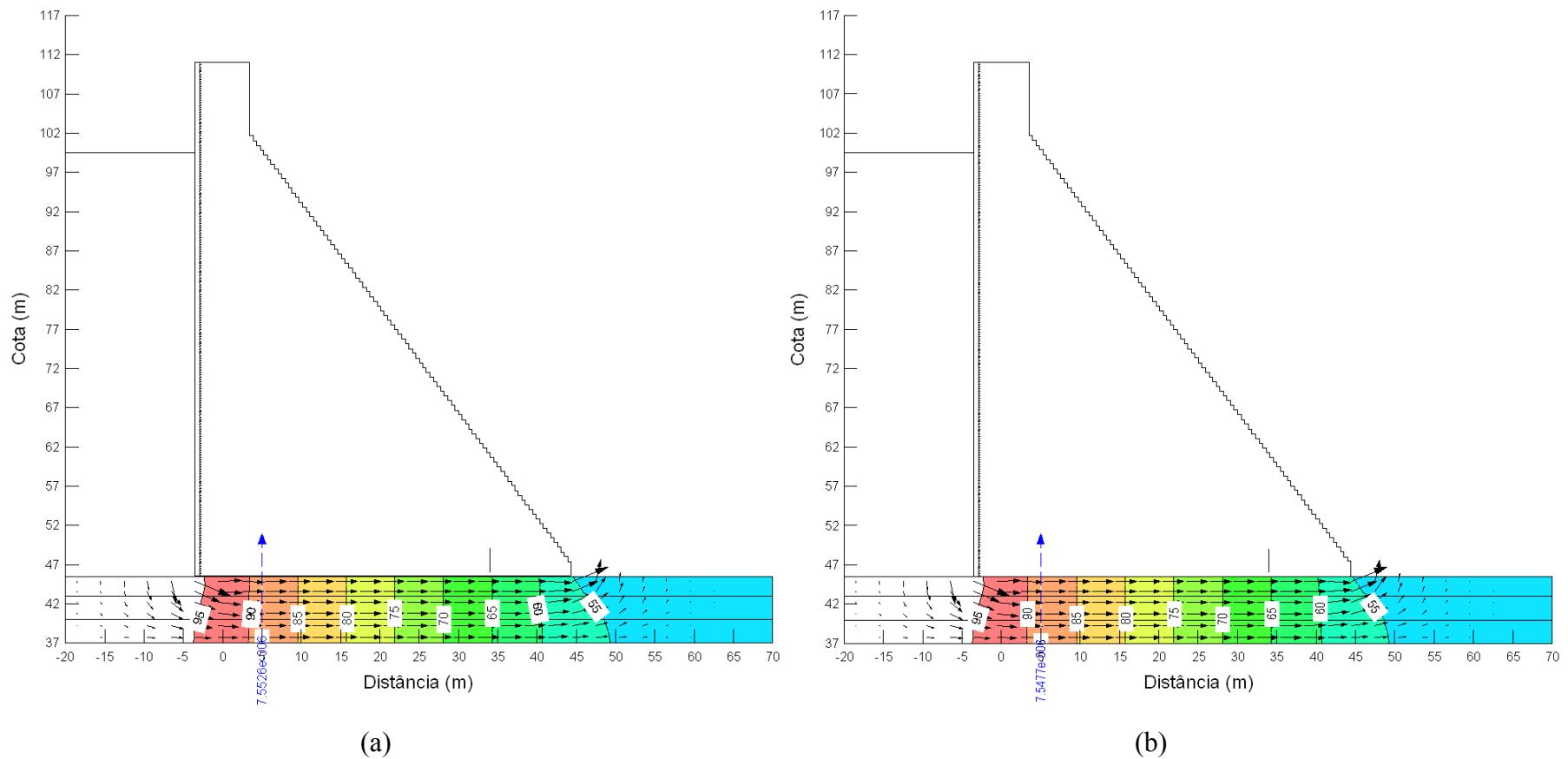


Figura B 14 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

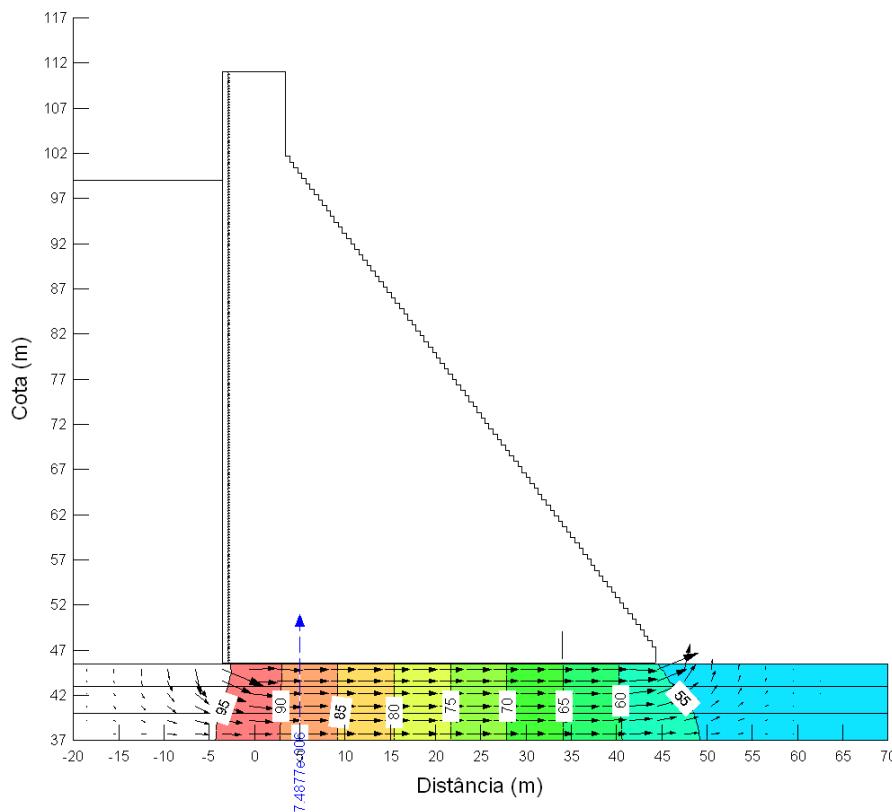


Figura B 15 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, setembro de 2005

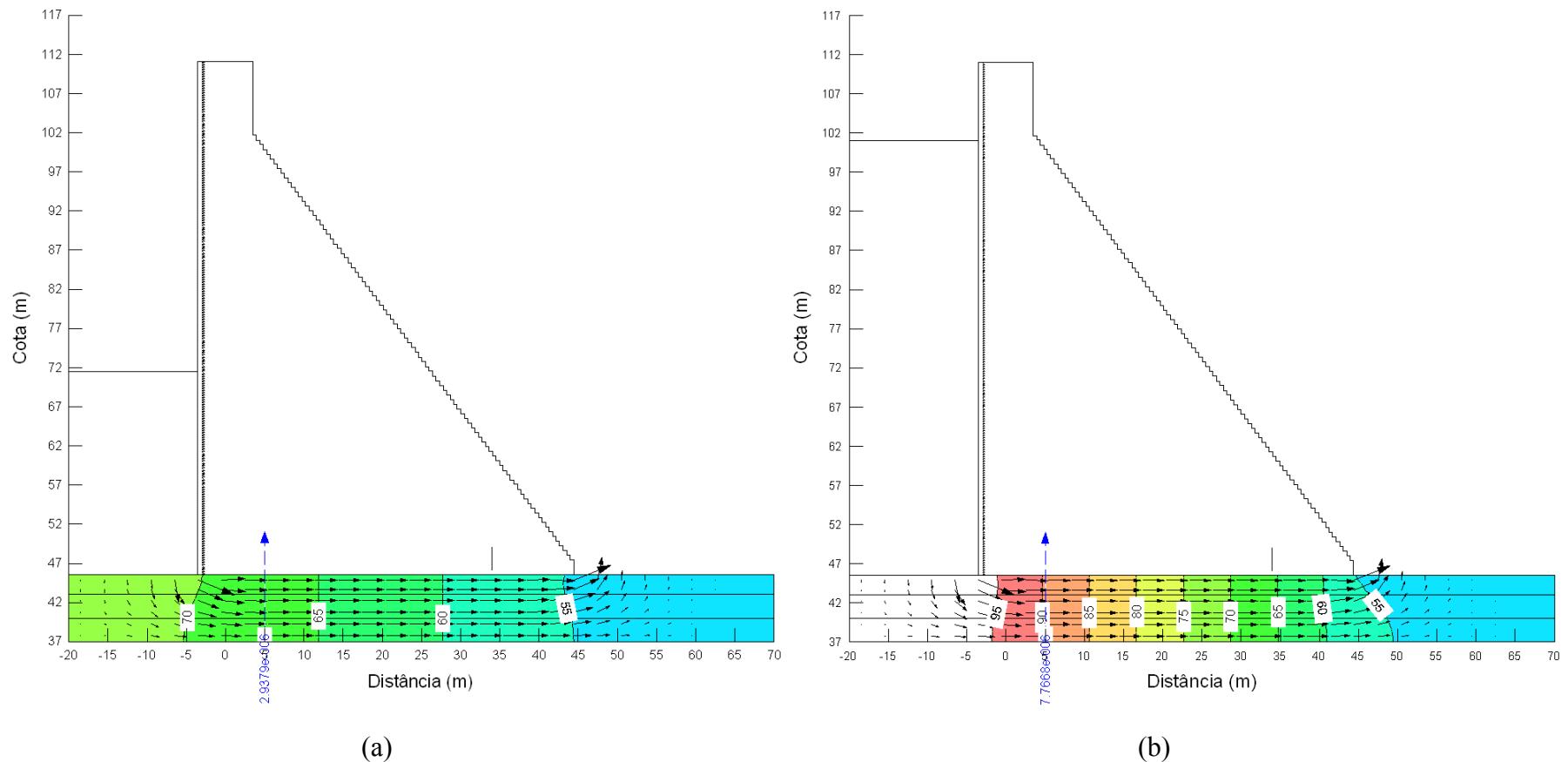


Figura B 16 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

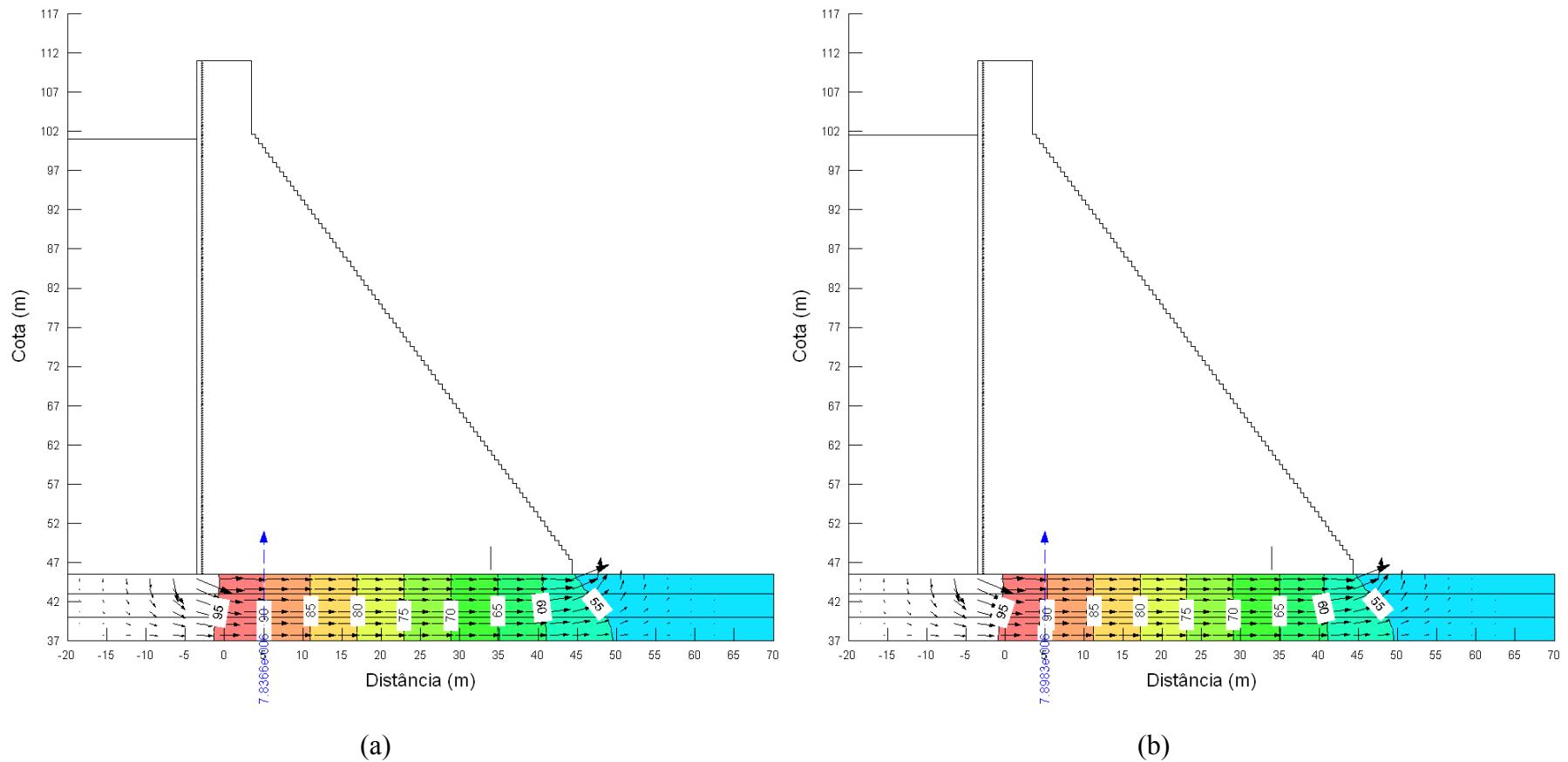


Figura B 17 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

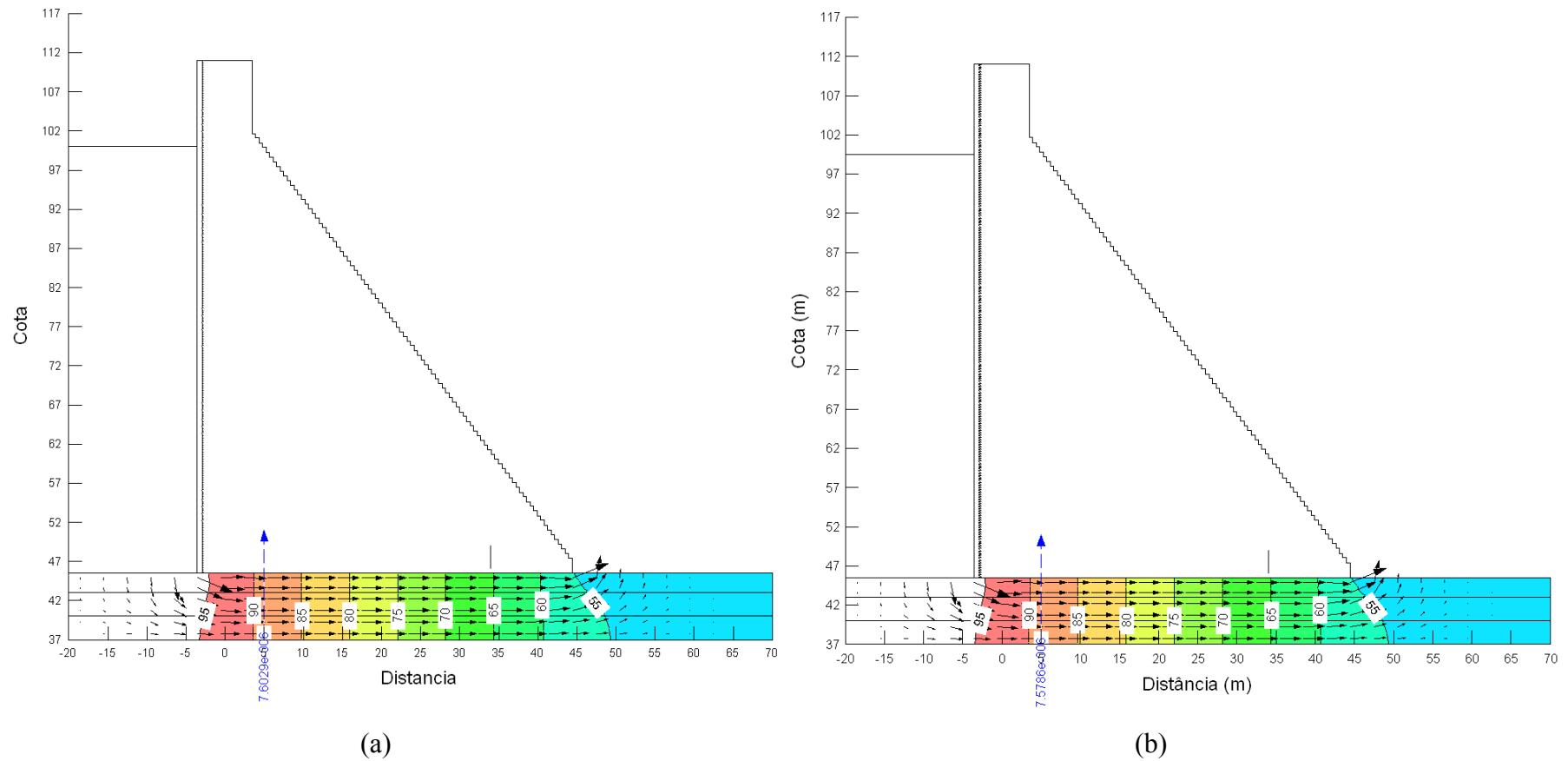


Figura B 18 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

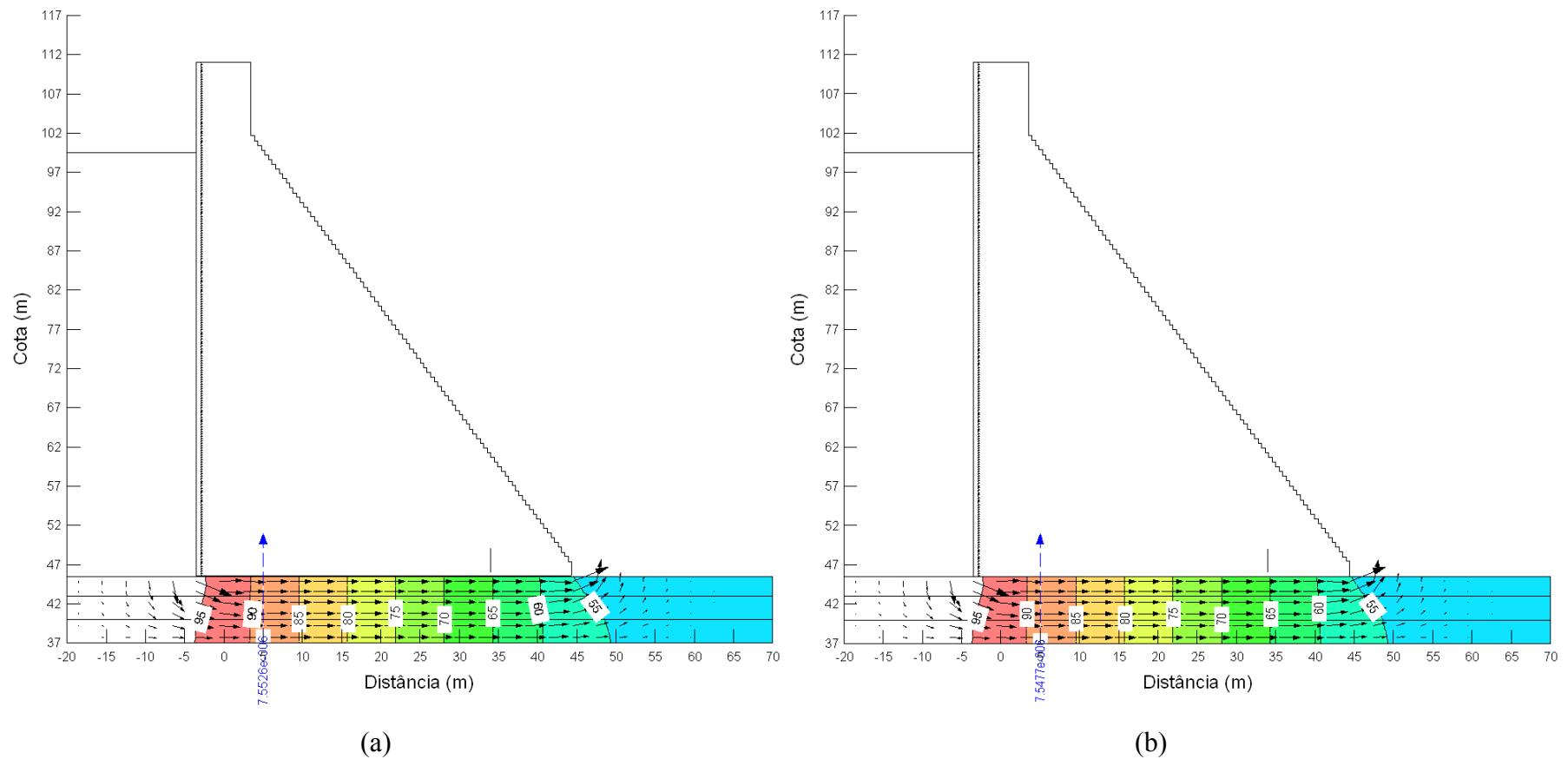


Figura B 19 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

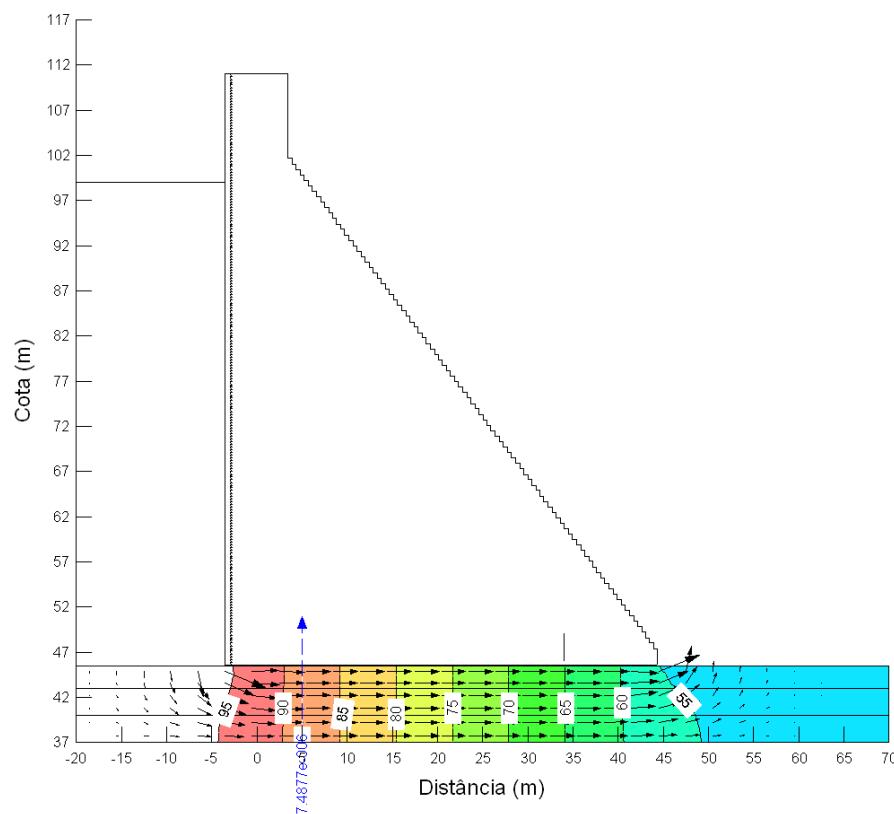


Figura B 20 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, setembro de 2005

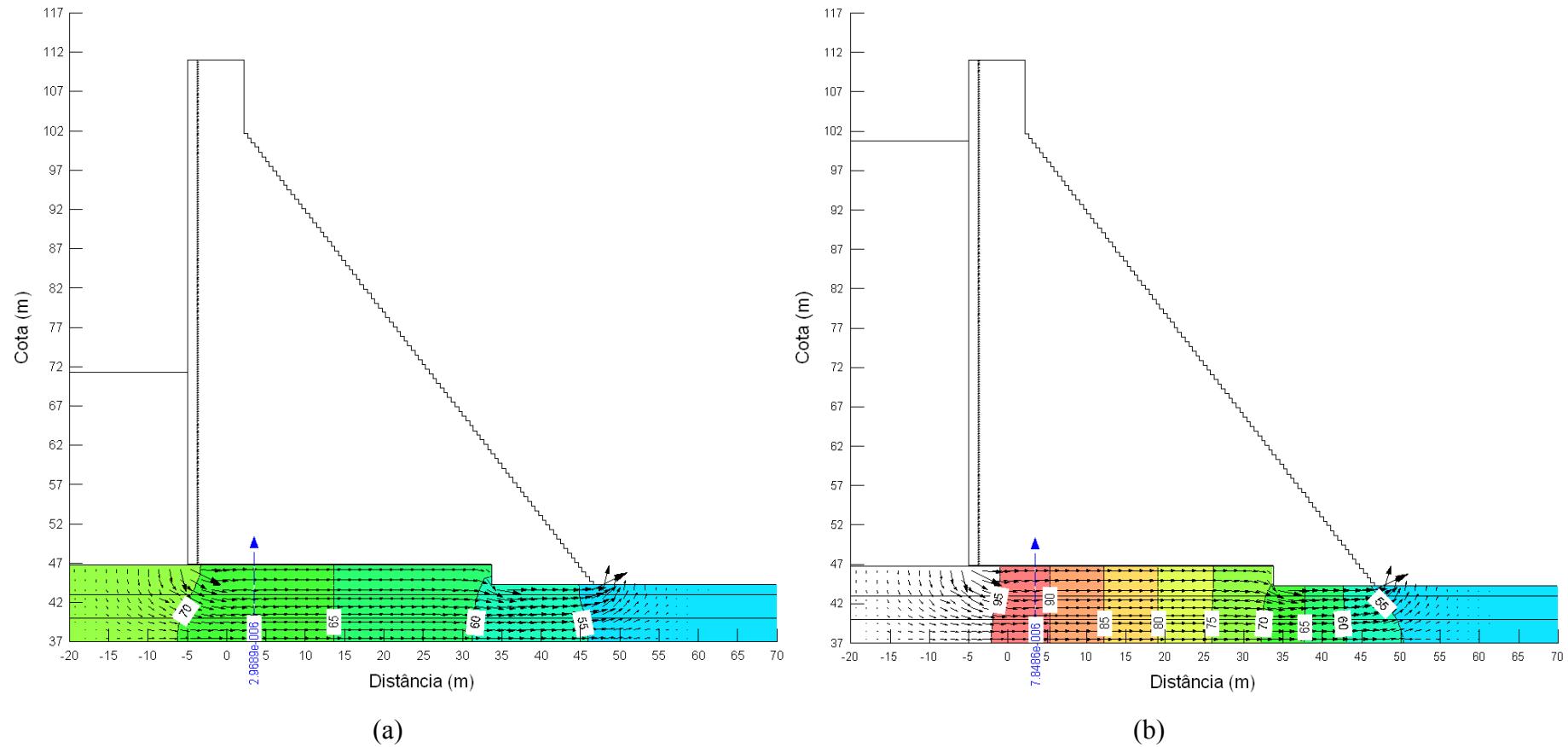


Figura B 21 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

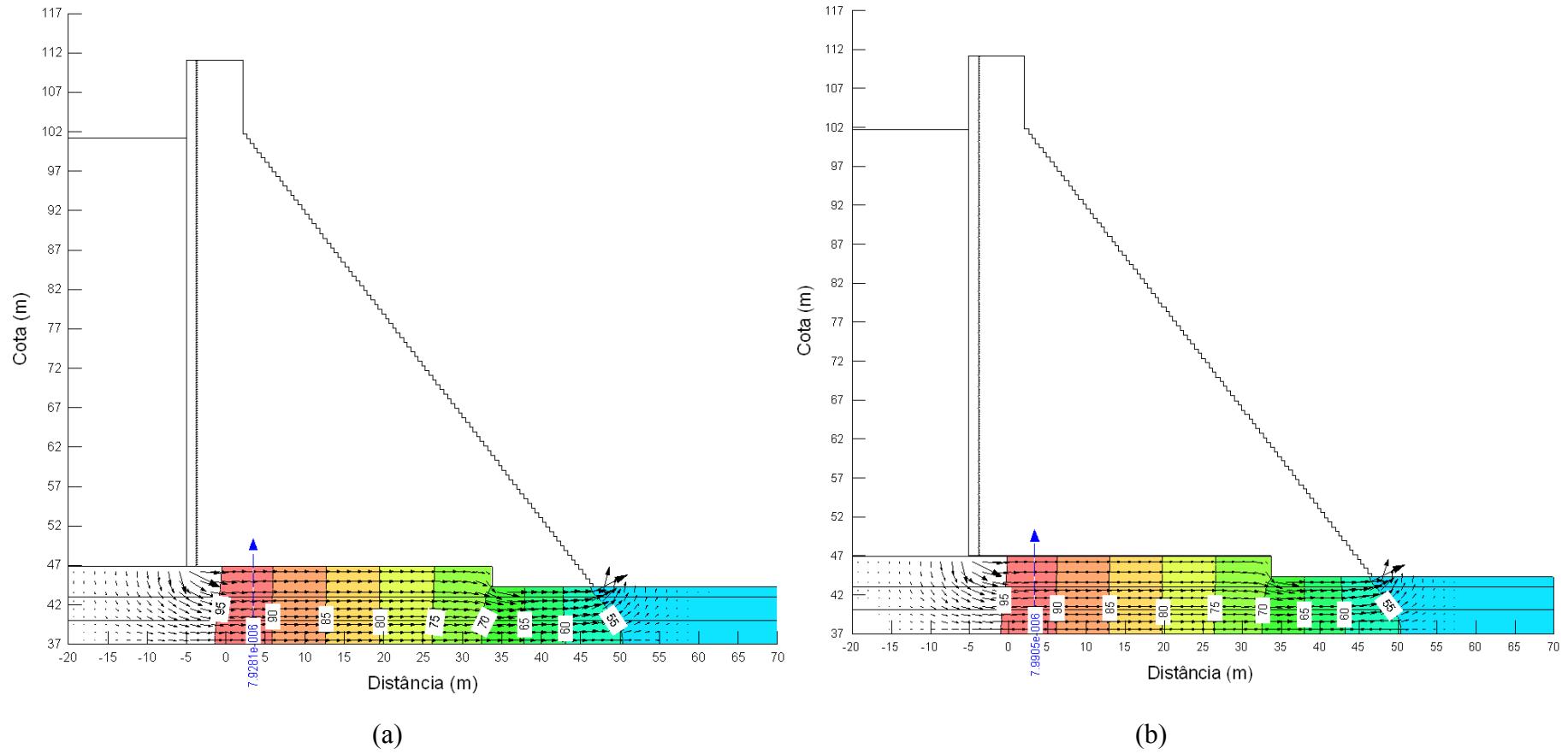


Figura B 22 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

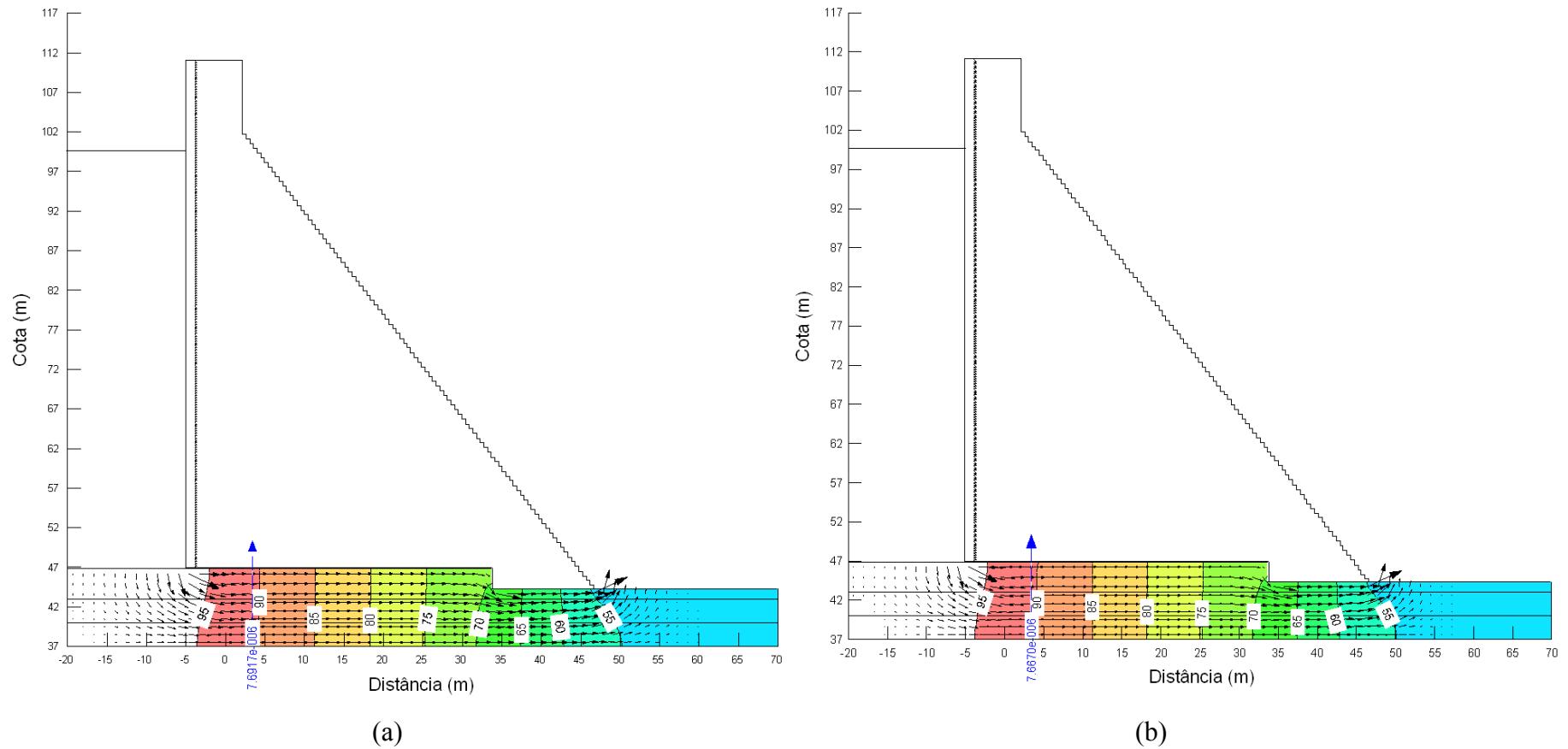


Figura B 23 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

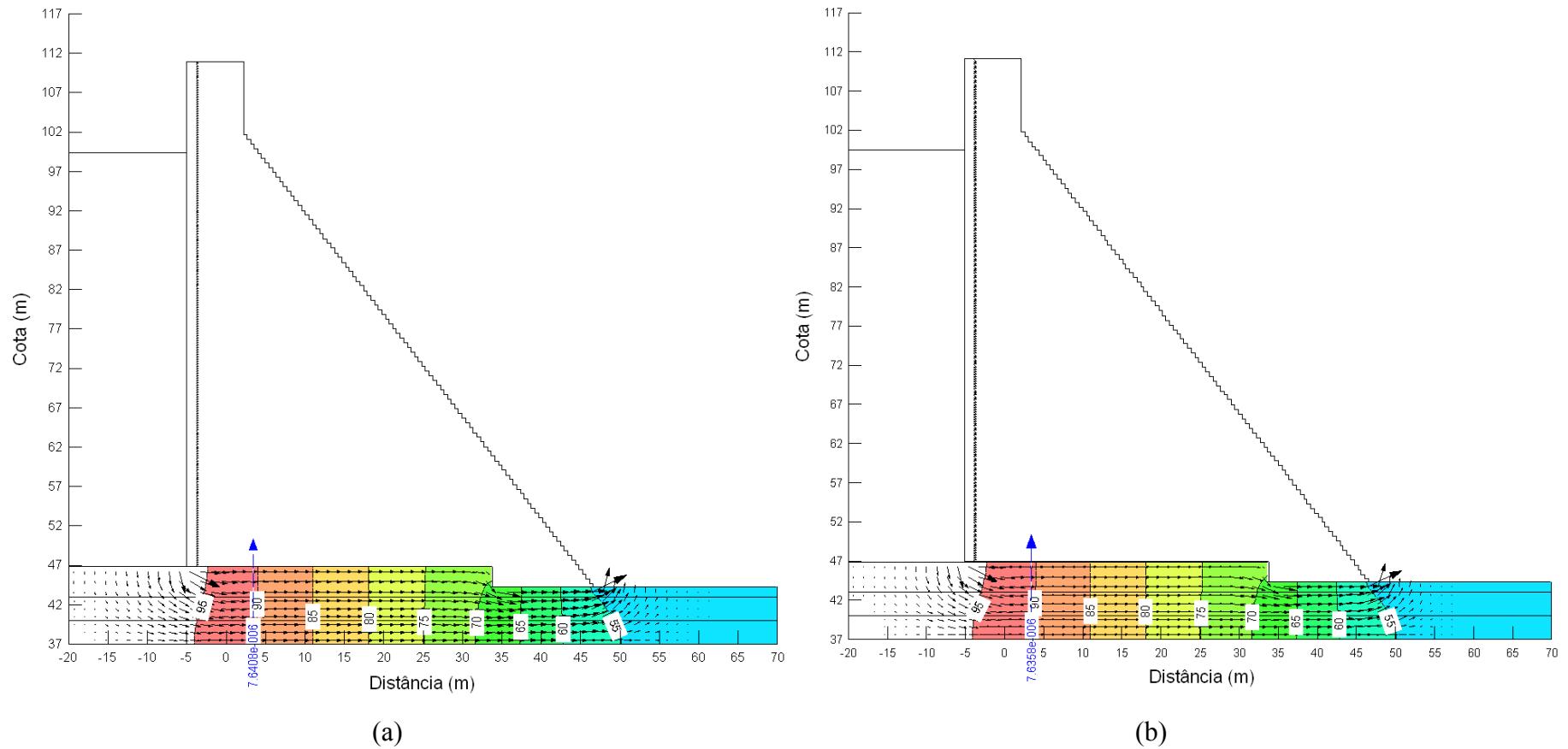


Figura B 24 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

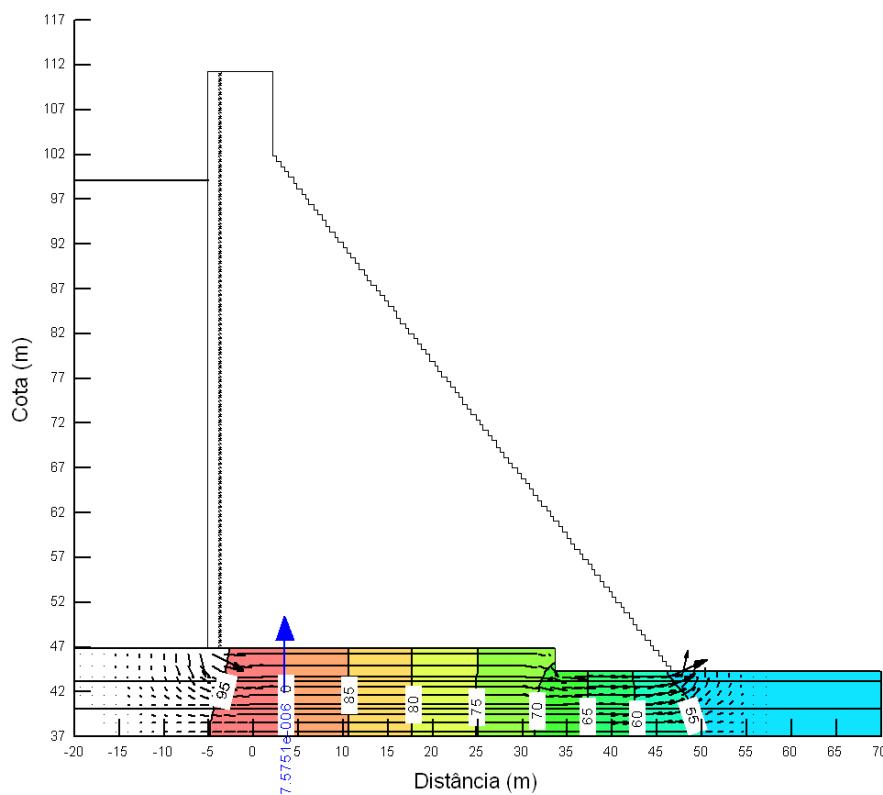


Figura B 25 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, setembro de 2005

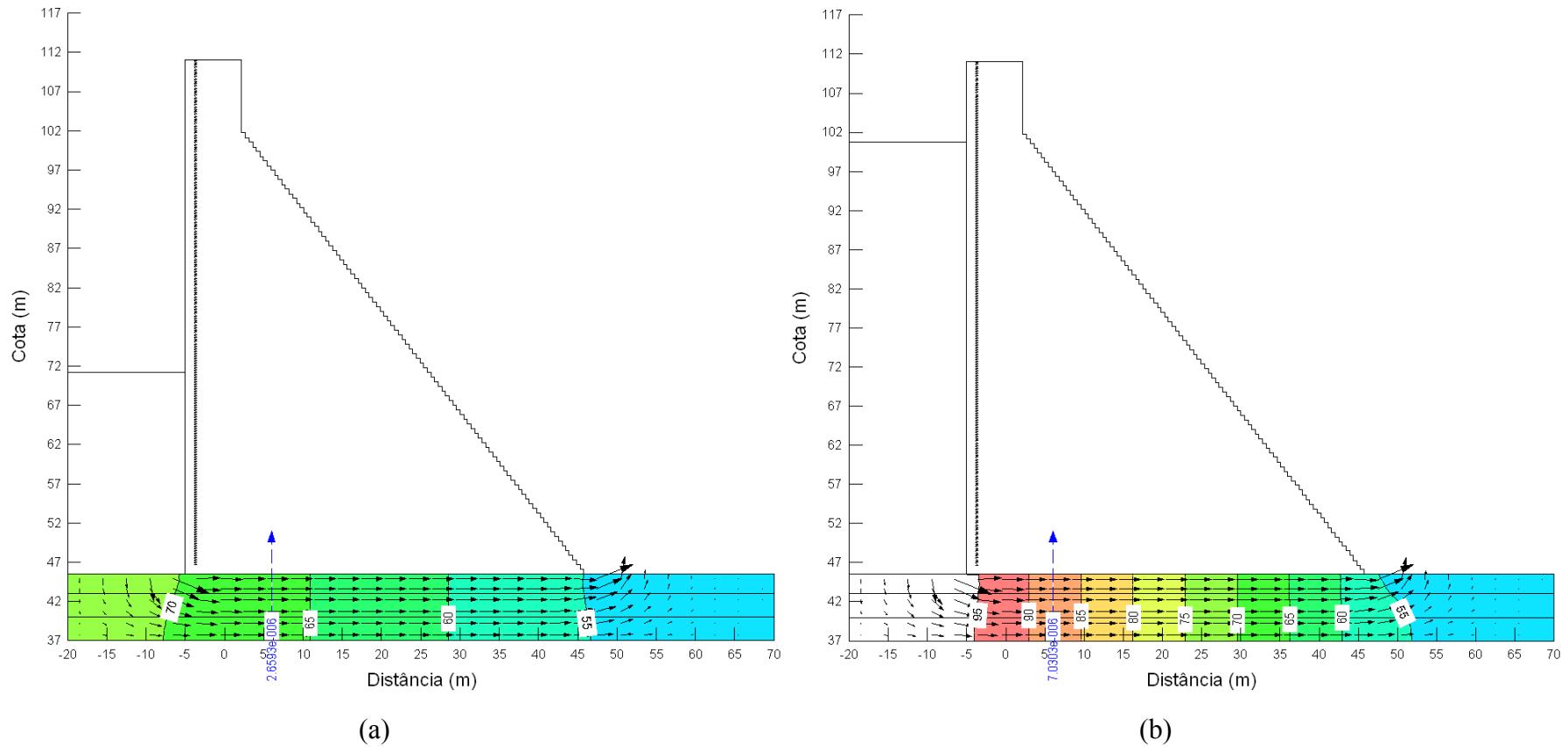


Figura B 26 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

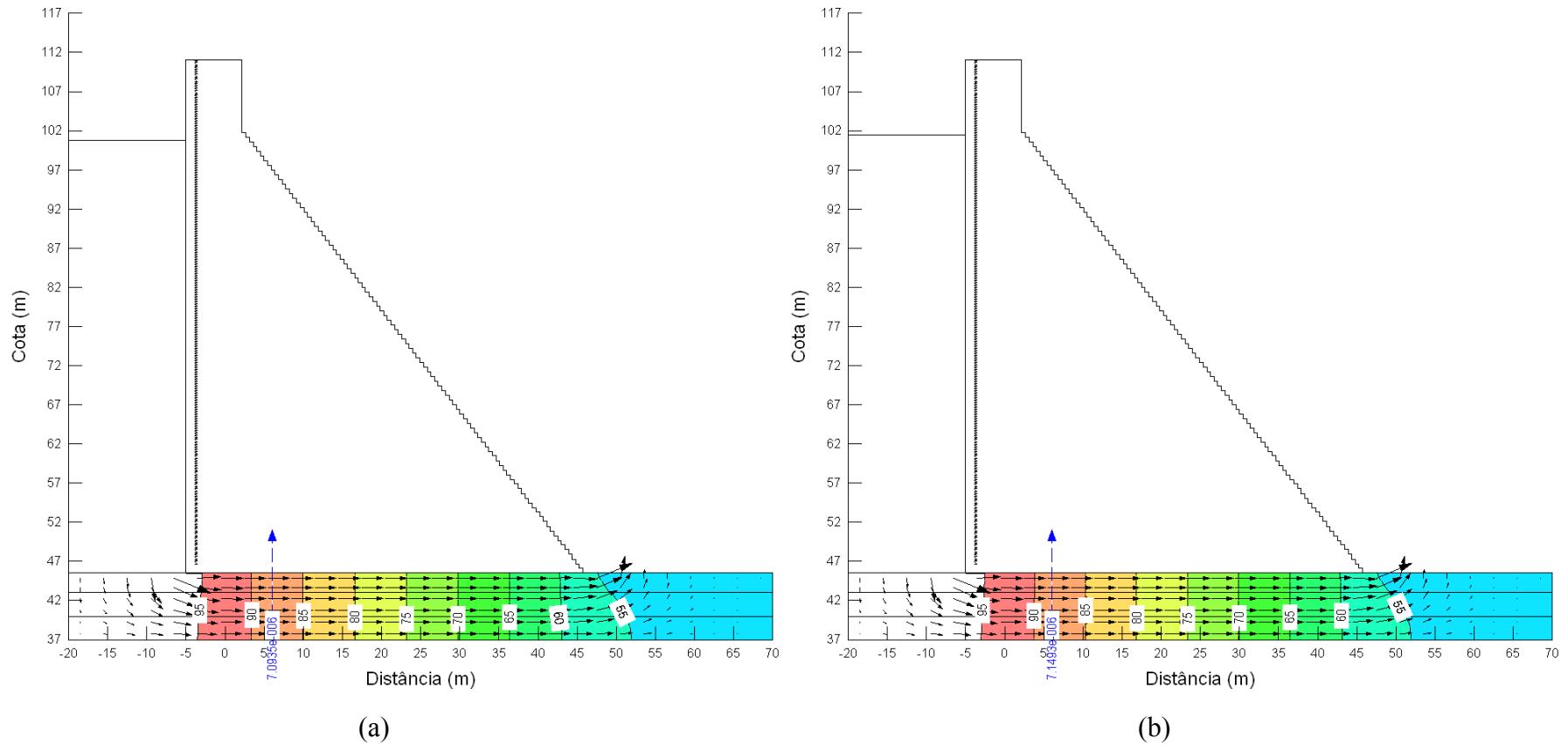


Figura B 27 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

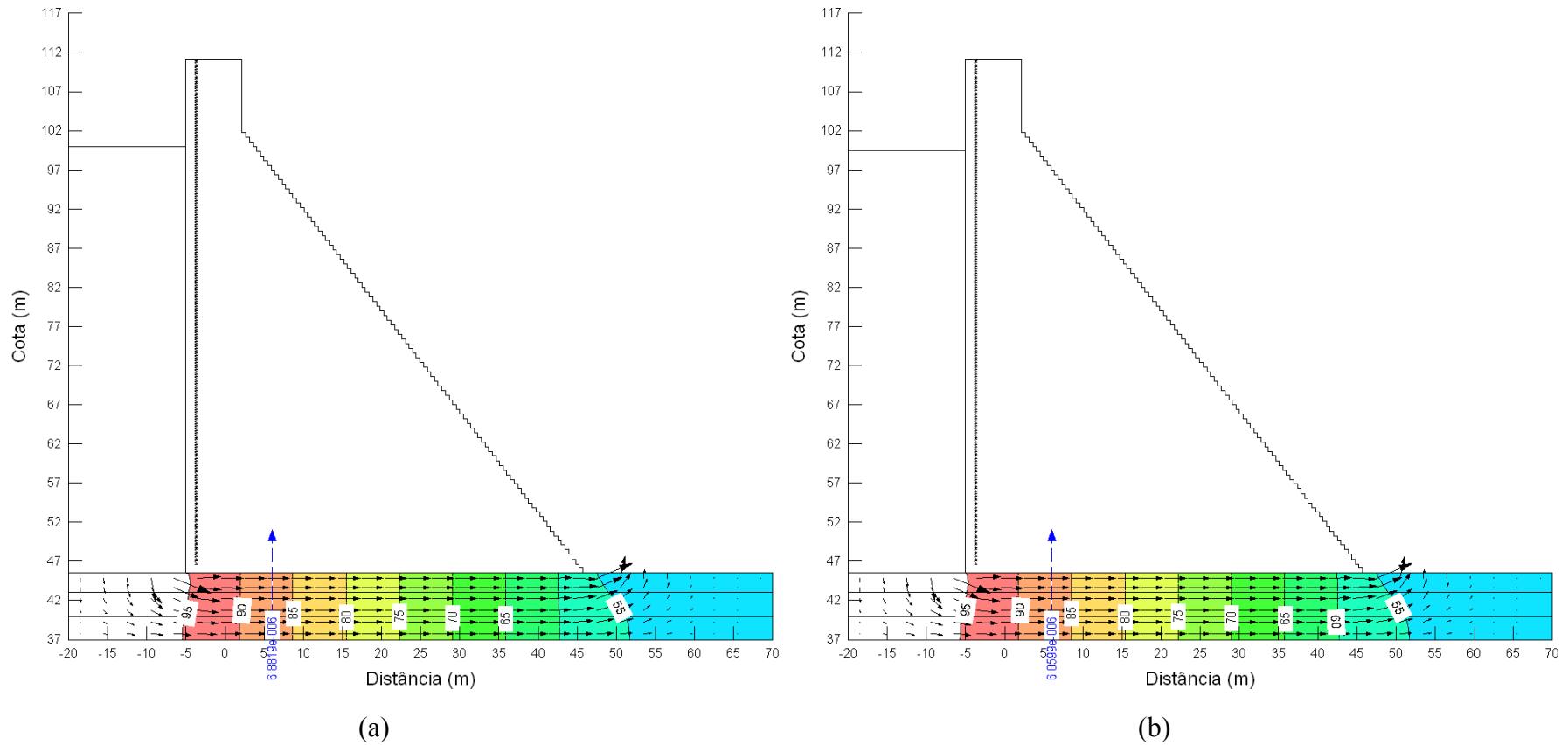


Figura B 28 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

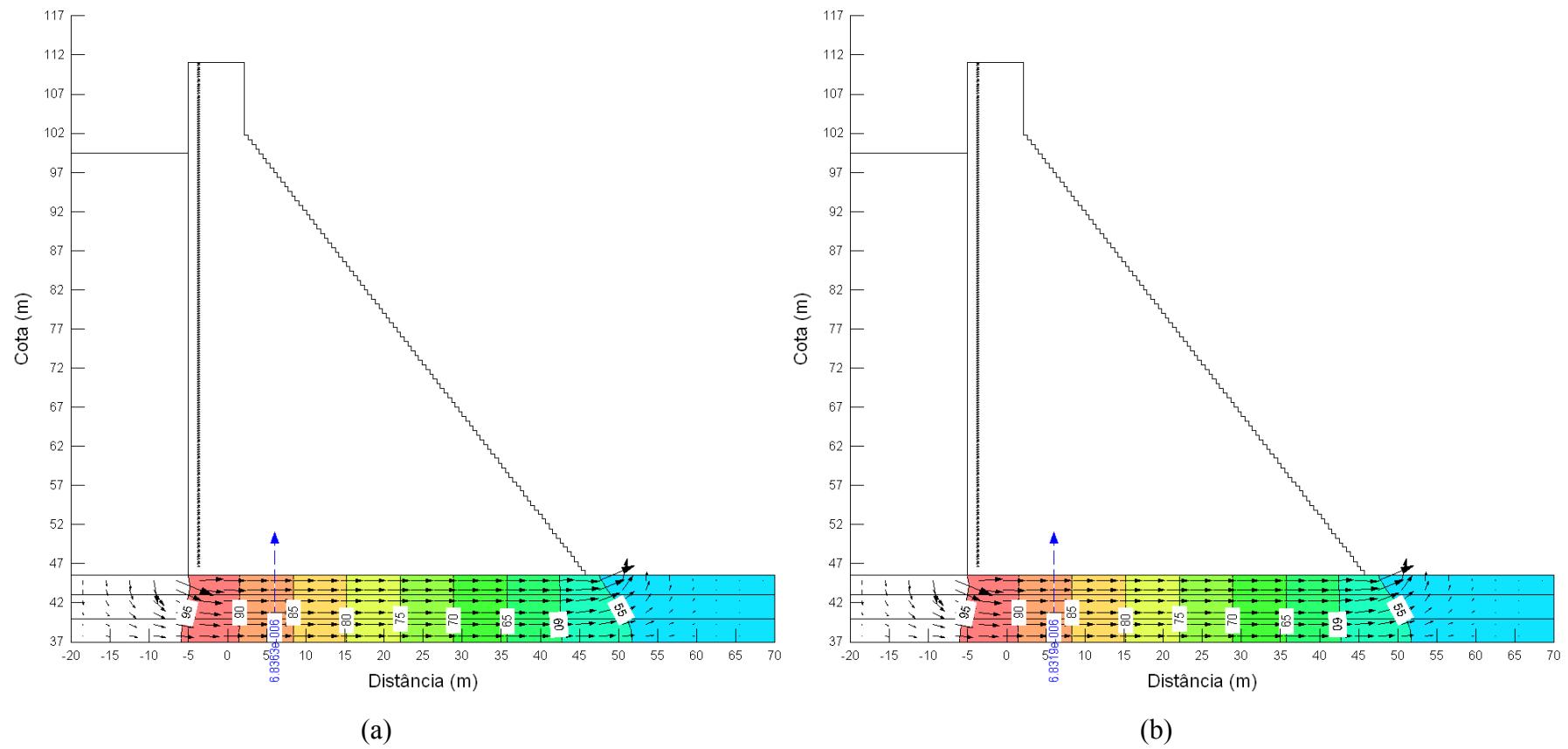


Figura B 29 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

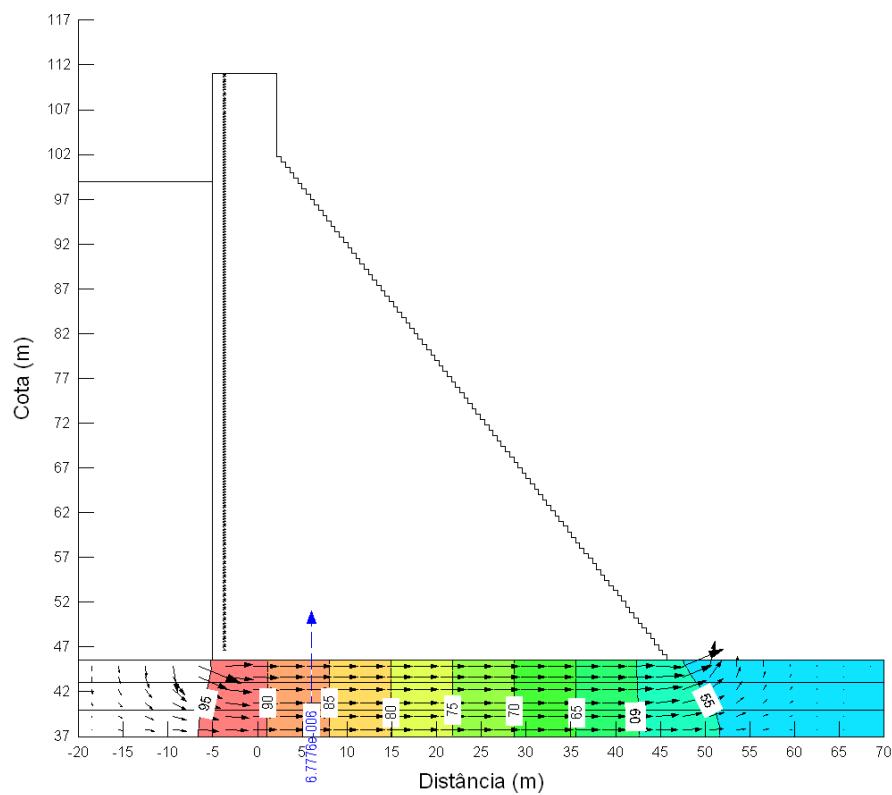


Figura B 30 – Primeiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, setembro de 2005

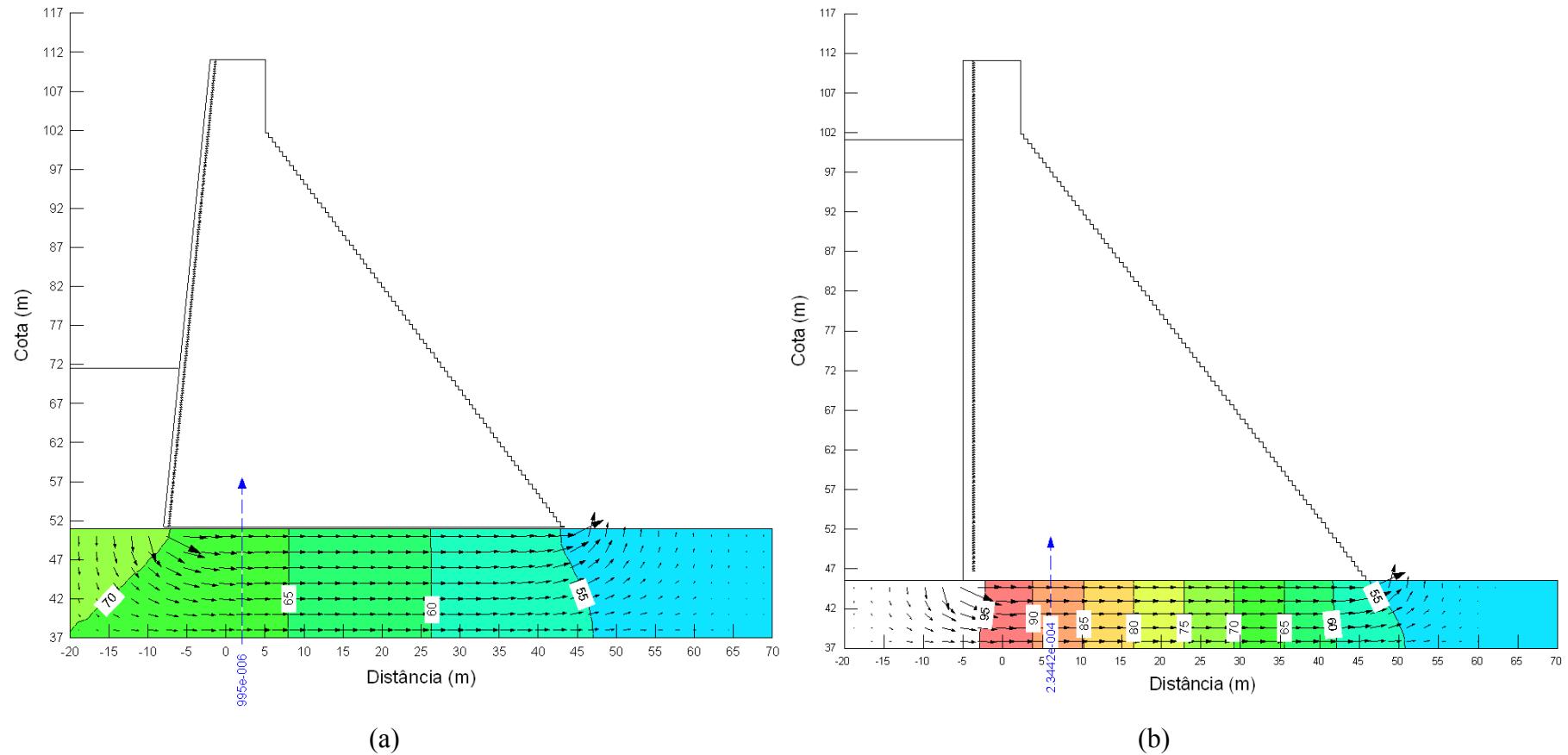


Figura B 31 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

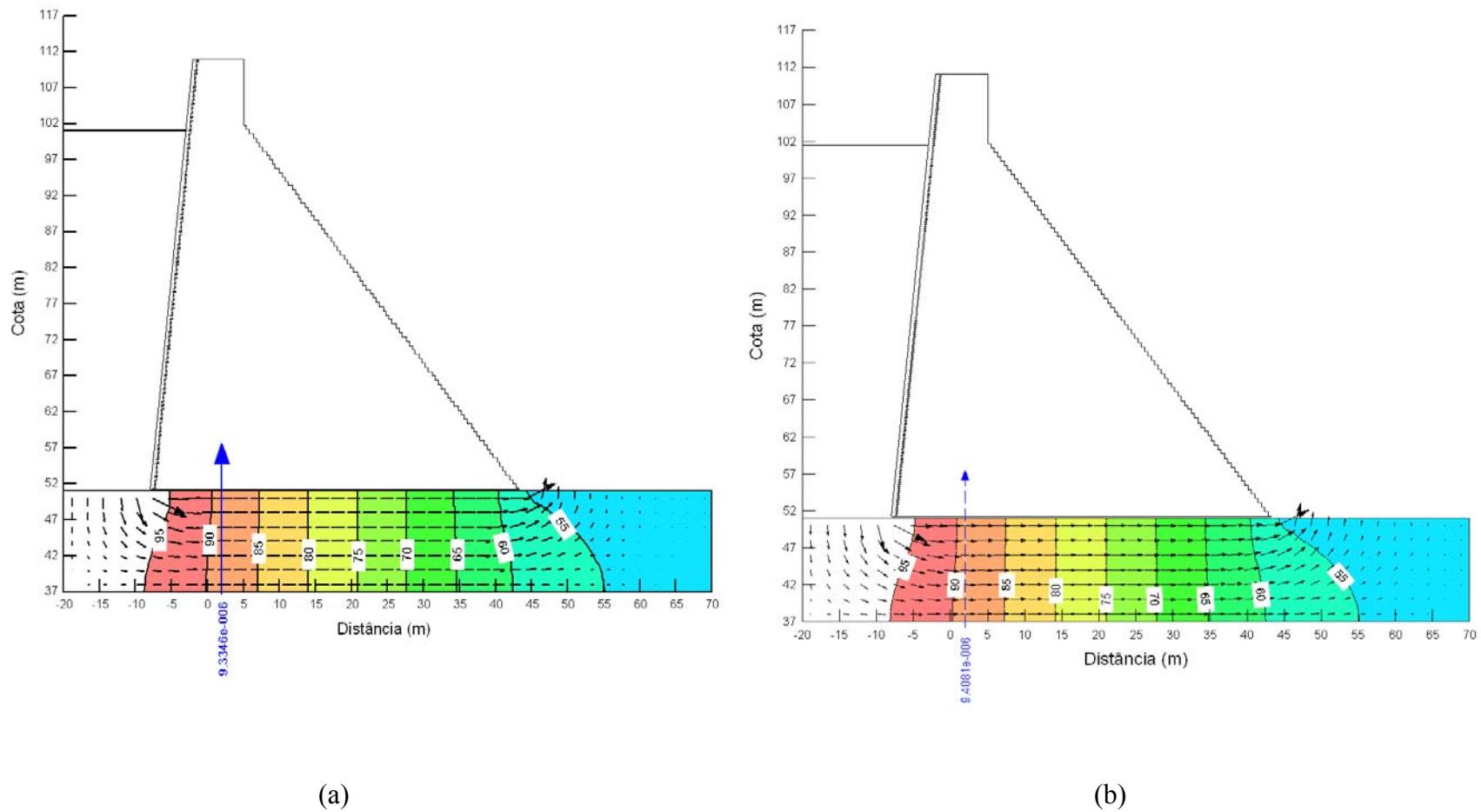


Figura B 32 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

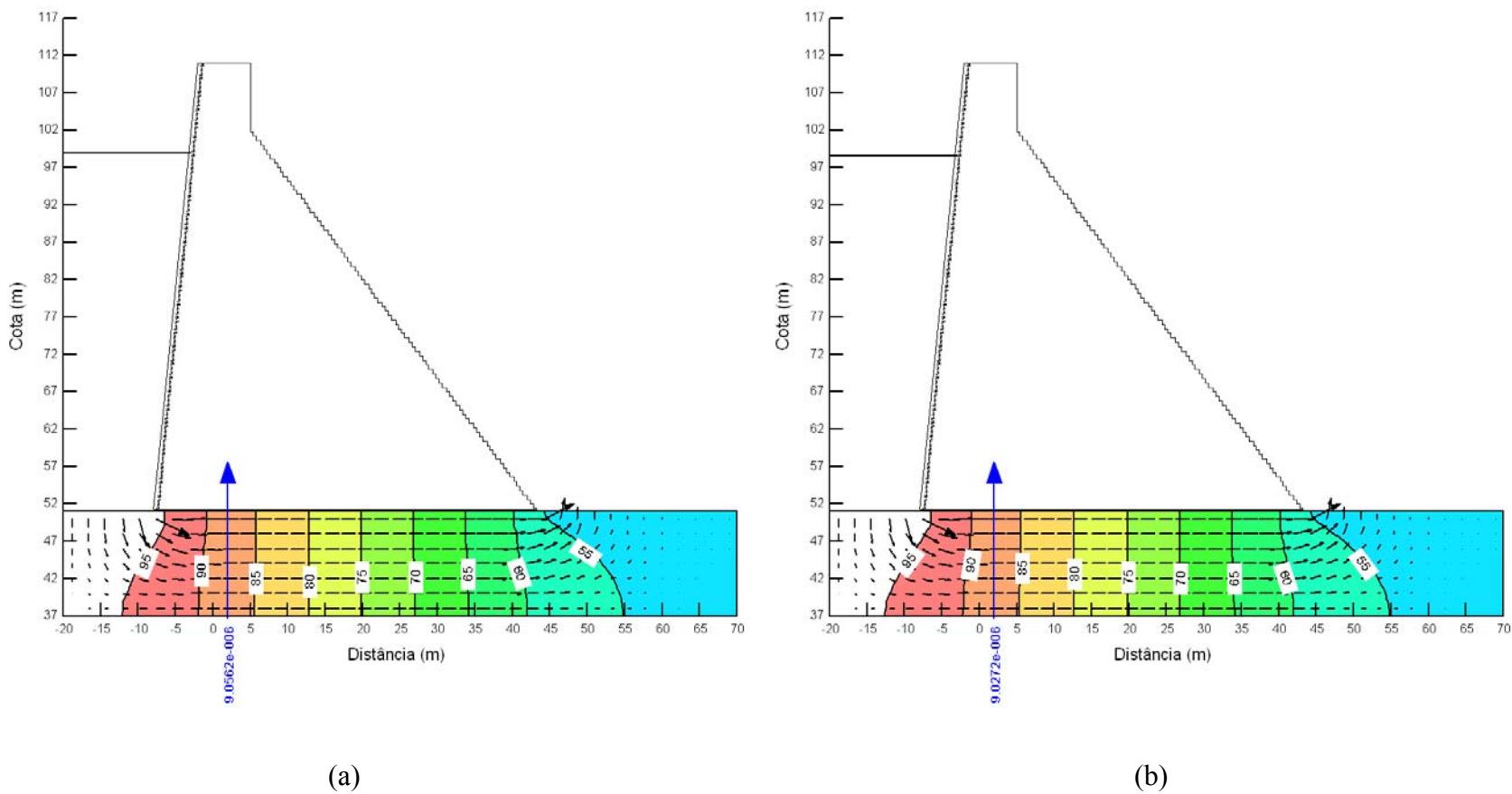


Figura B 33 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

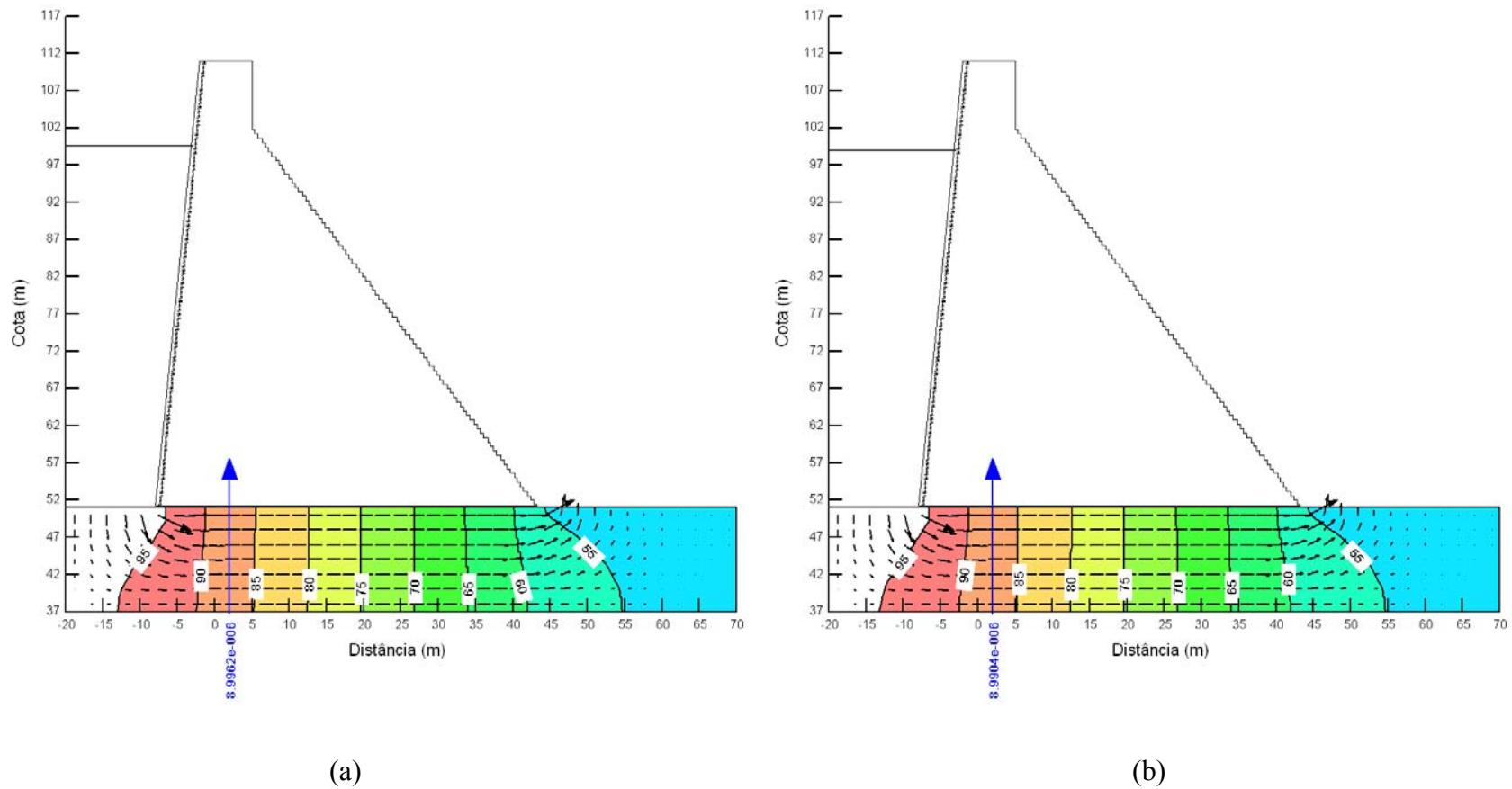


Figura B 34 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

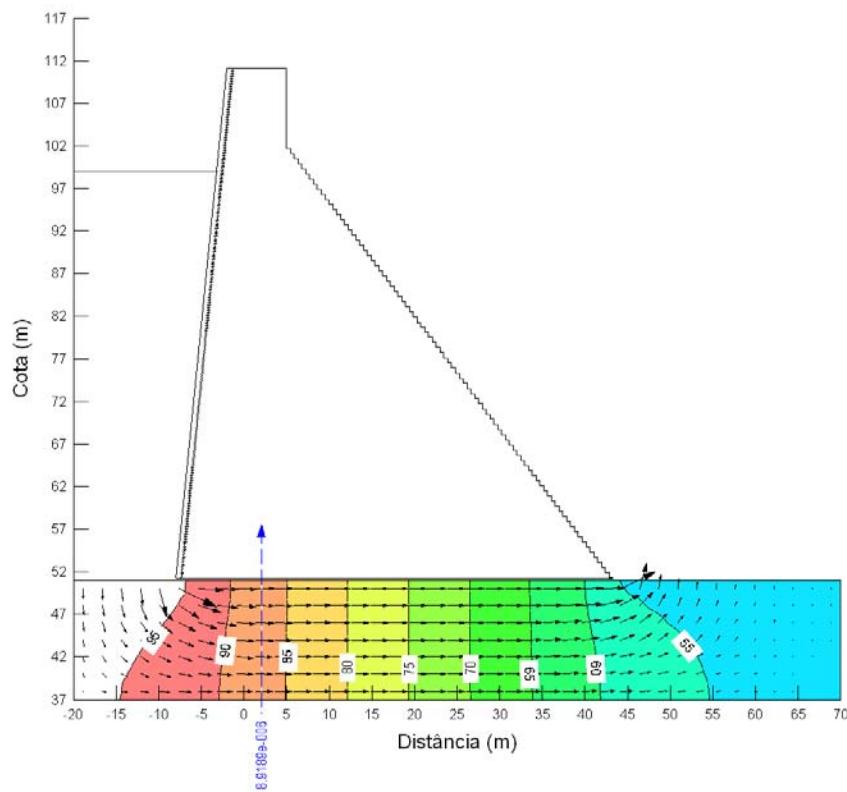


Figura B 35 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, setembro de 2005

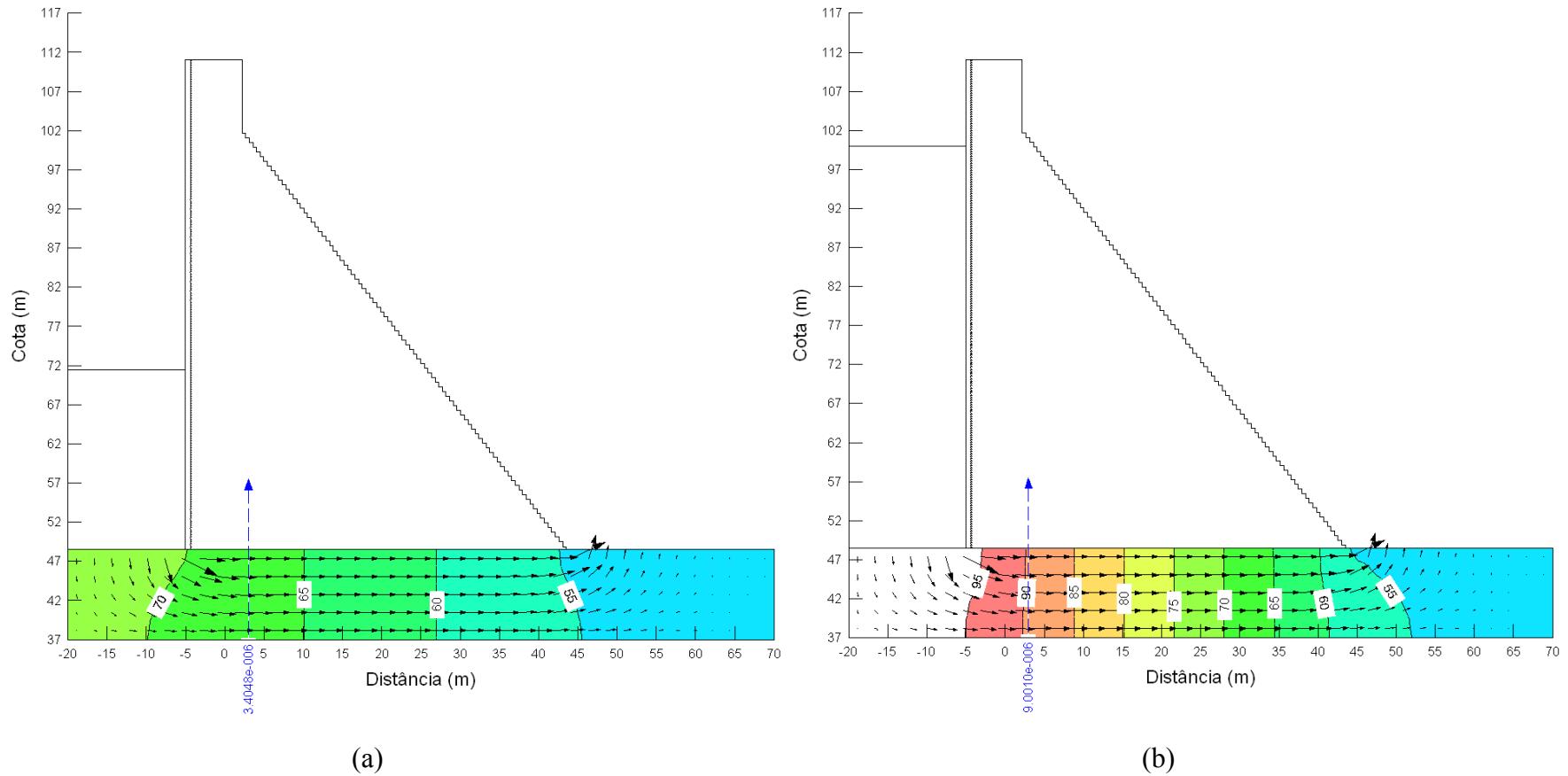


Figura B 36 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

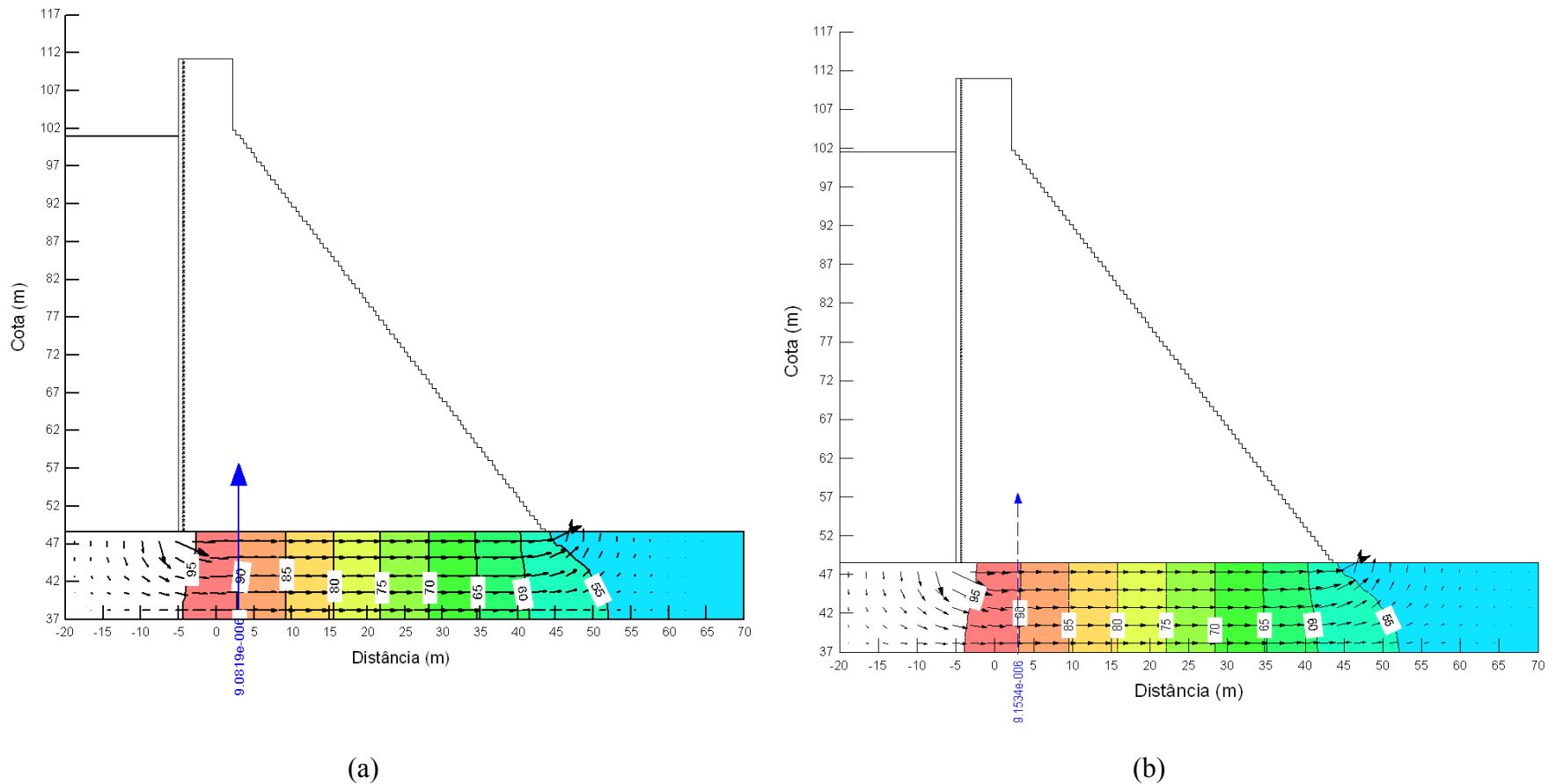


Figura B 37 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) Maio de 2004 e (b) Julho de 2004

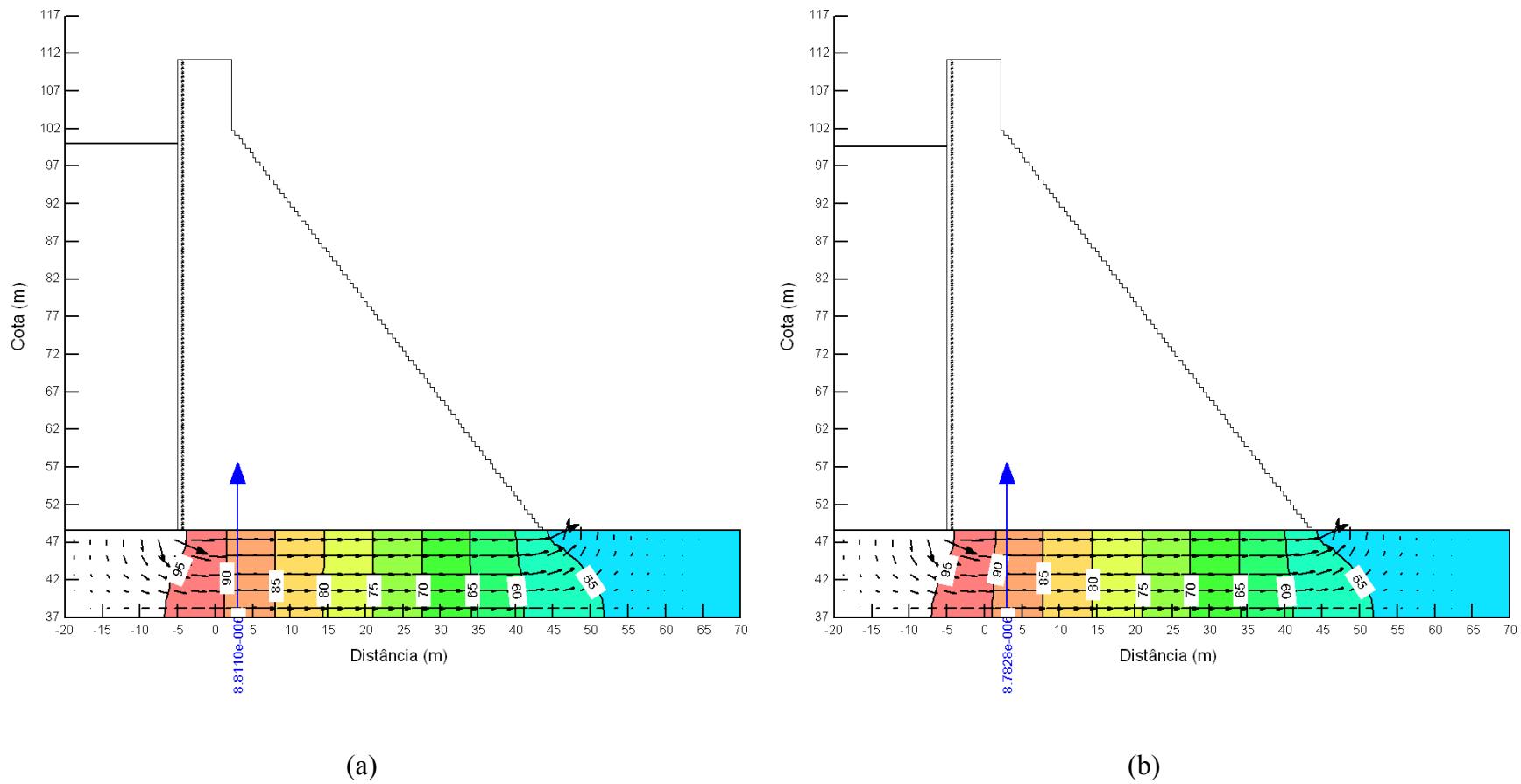


Figura B 38 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) janeiro de 2005 e (b) Fevereiro de 2005

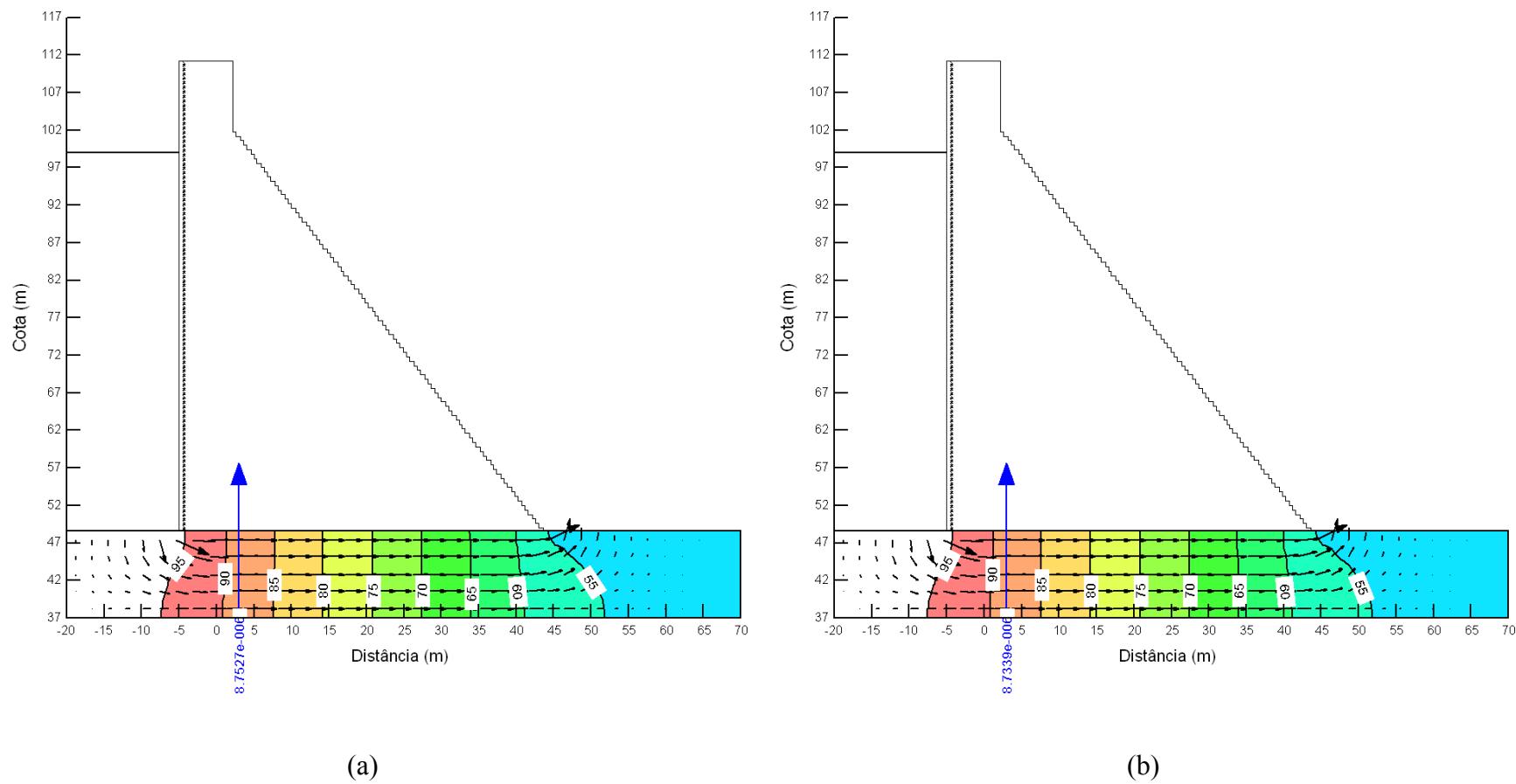


Figura B 39 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

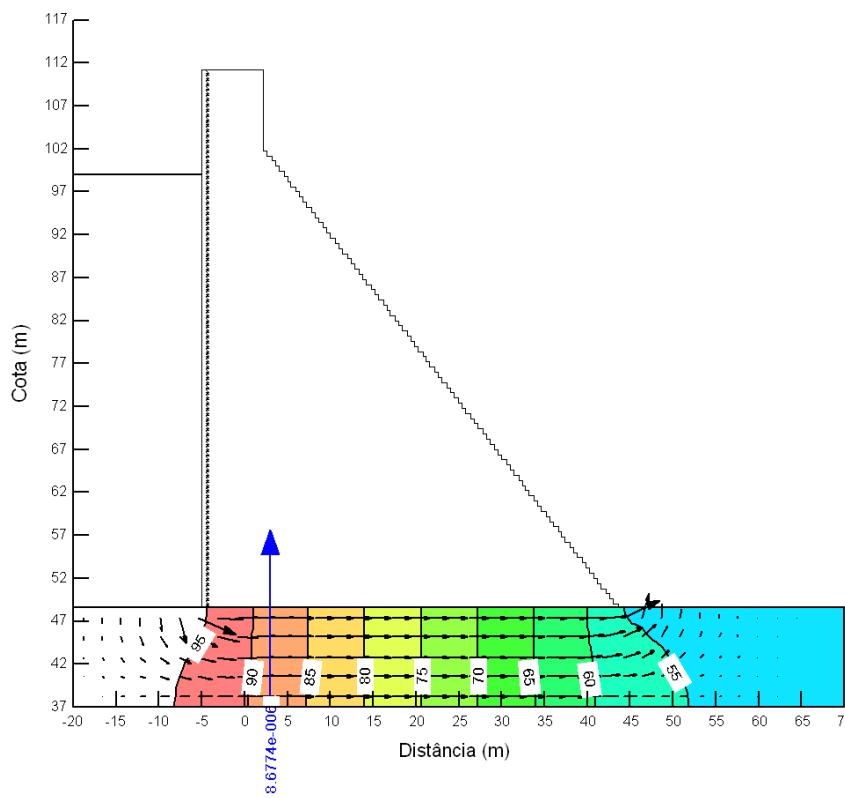


Figura B 40 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, setembro de 2005

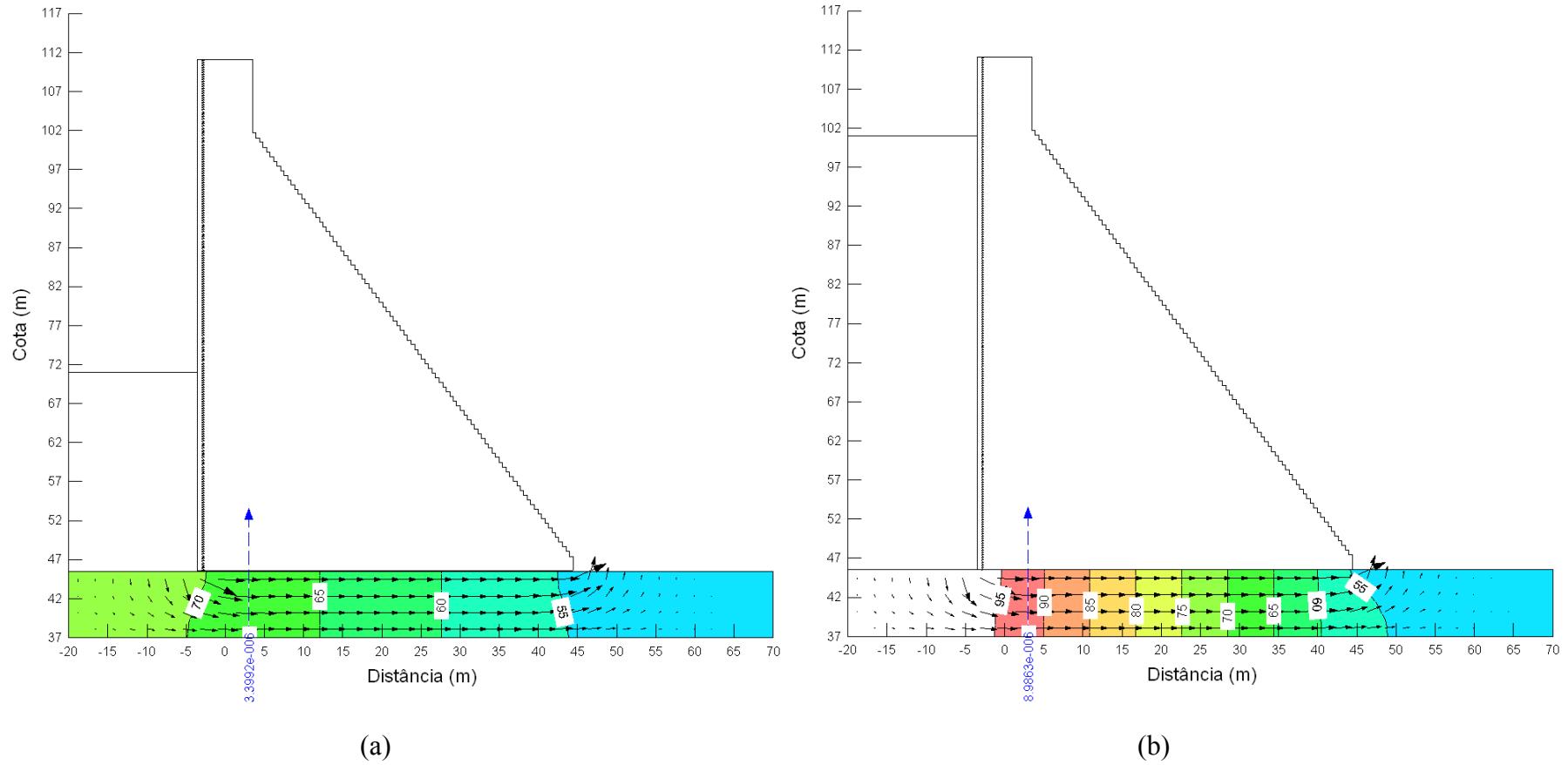


Figura B 41 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

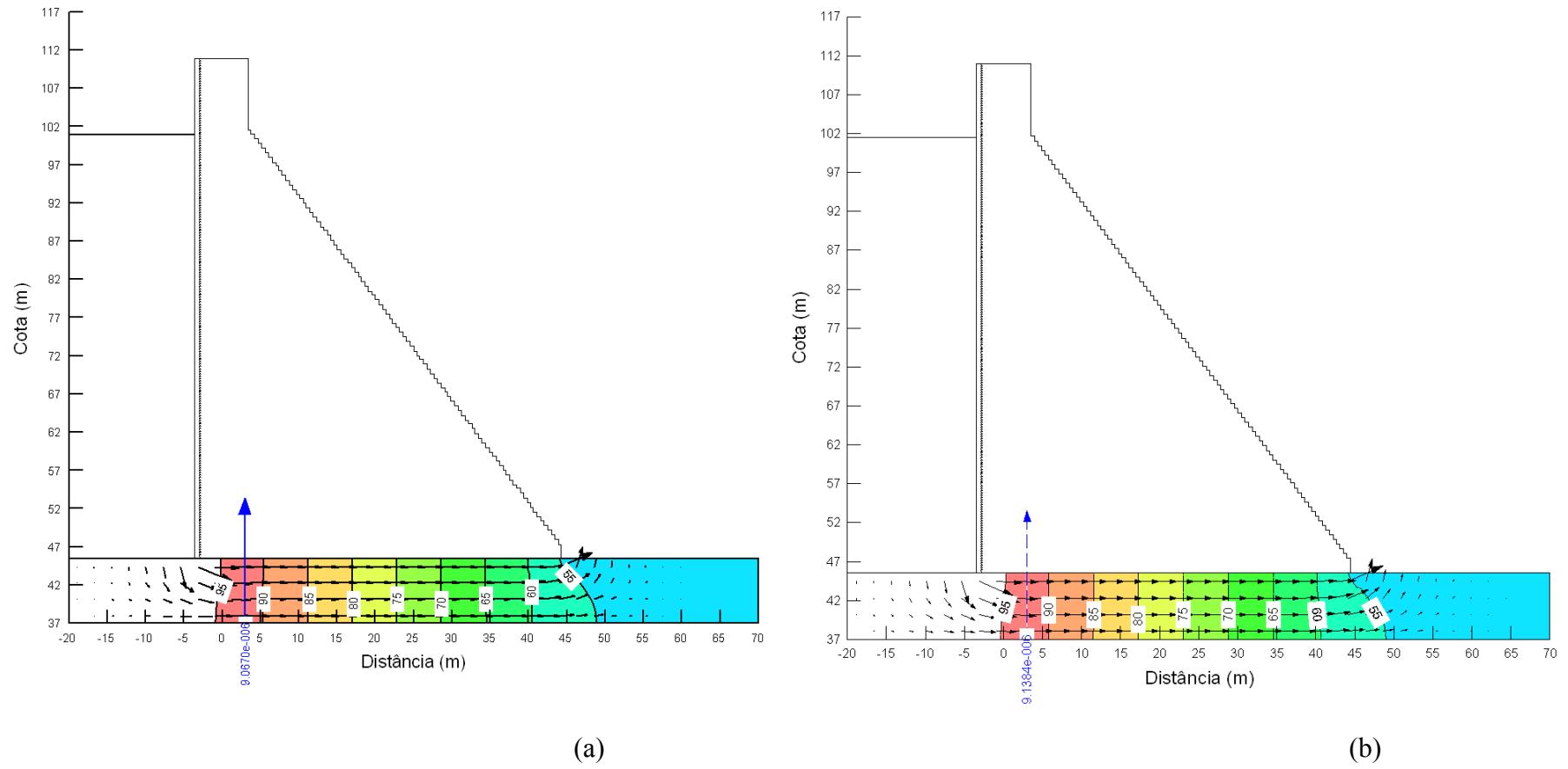


Figura B 42 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

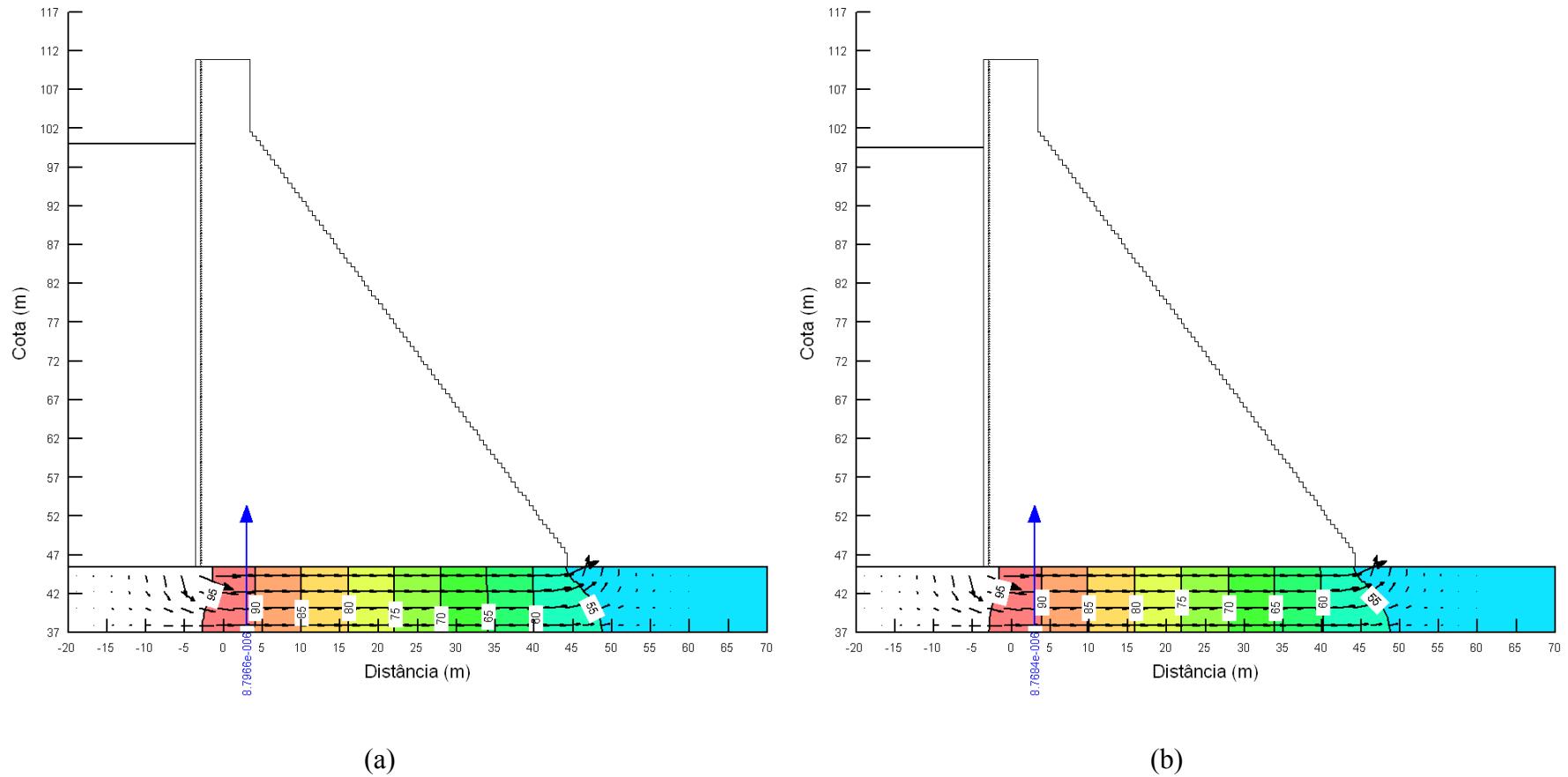


Figura B 43 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

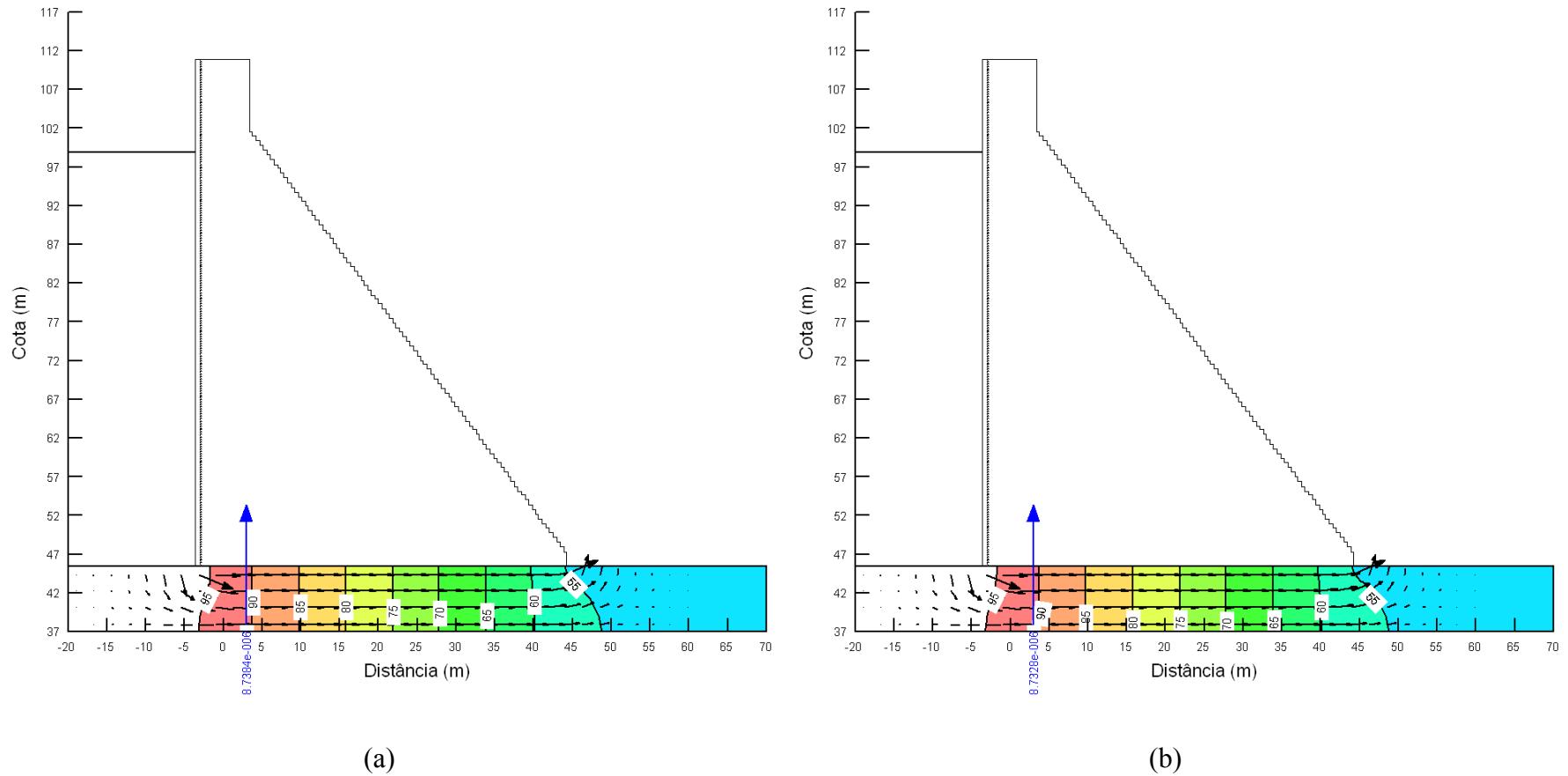


Figura B 44 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

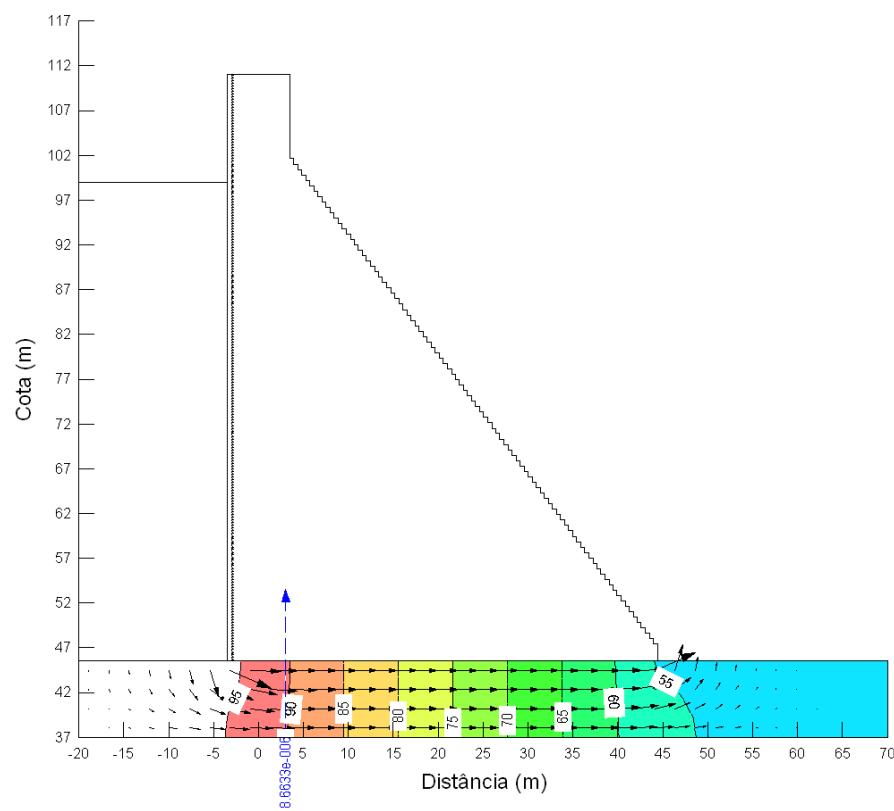


Figura B 45 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, setembro de 2005

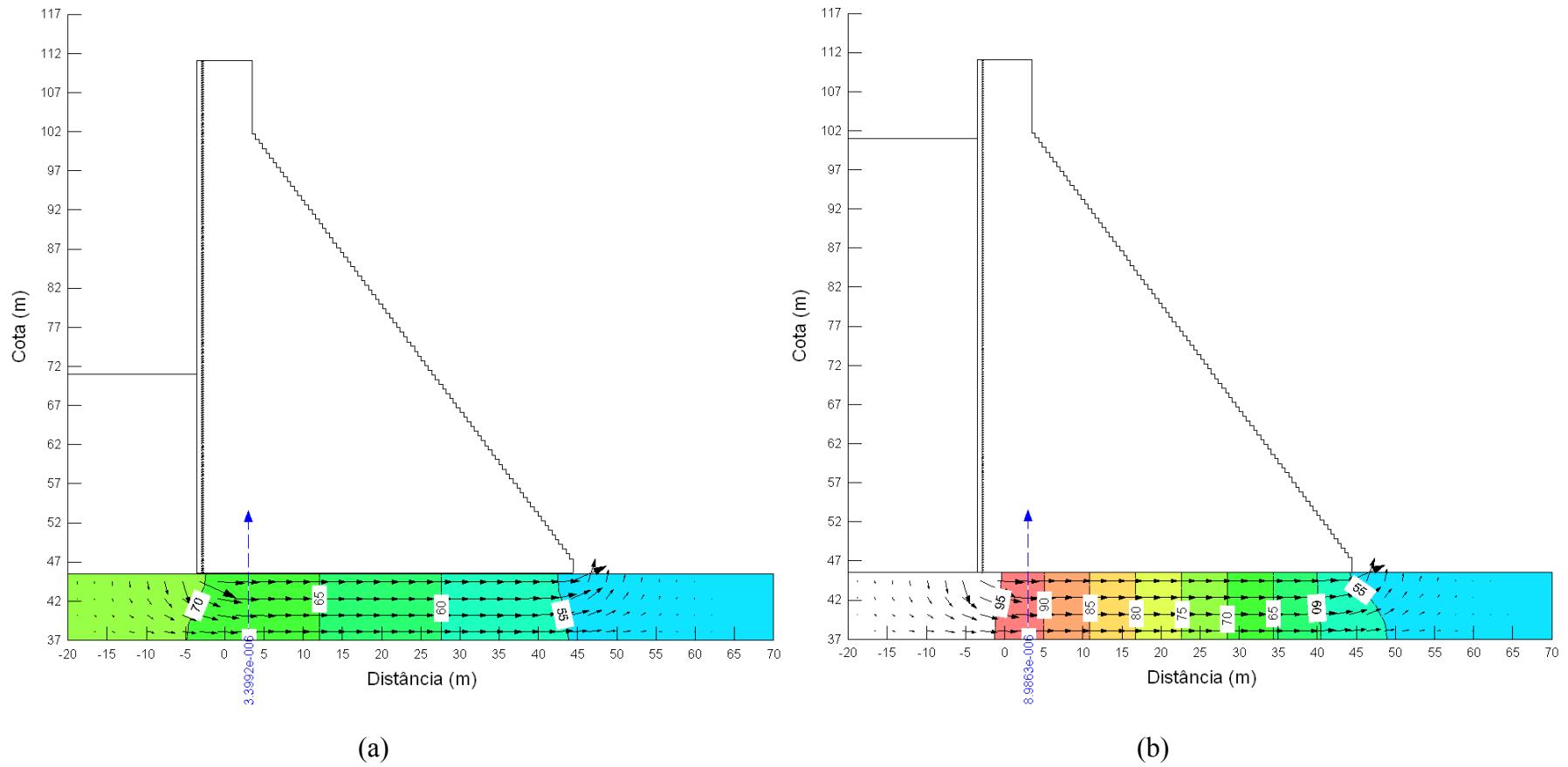


Figura B 46 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

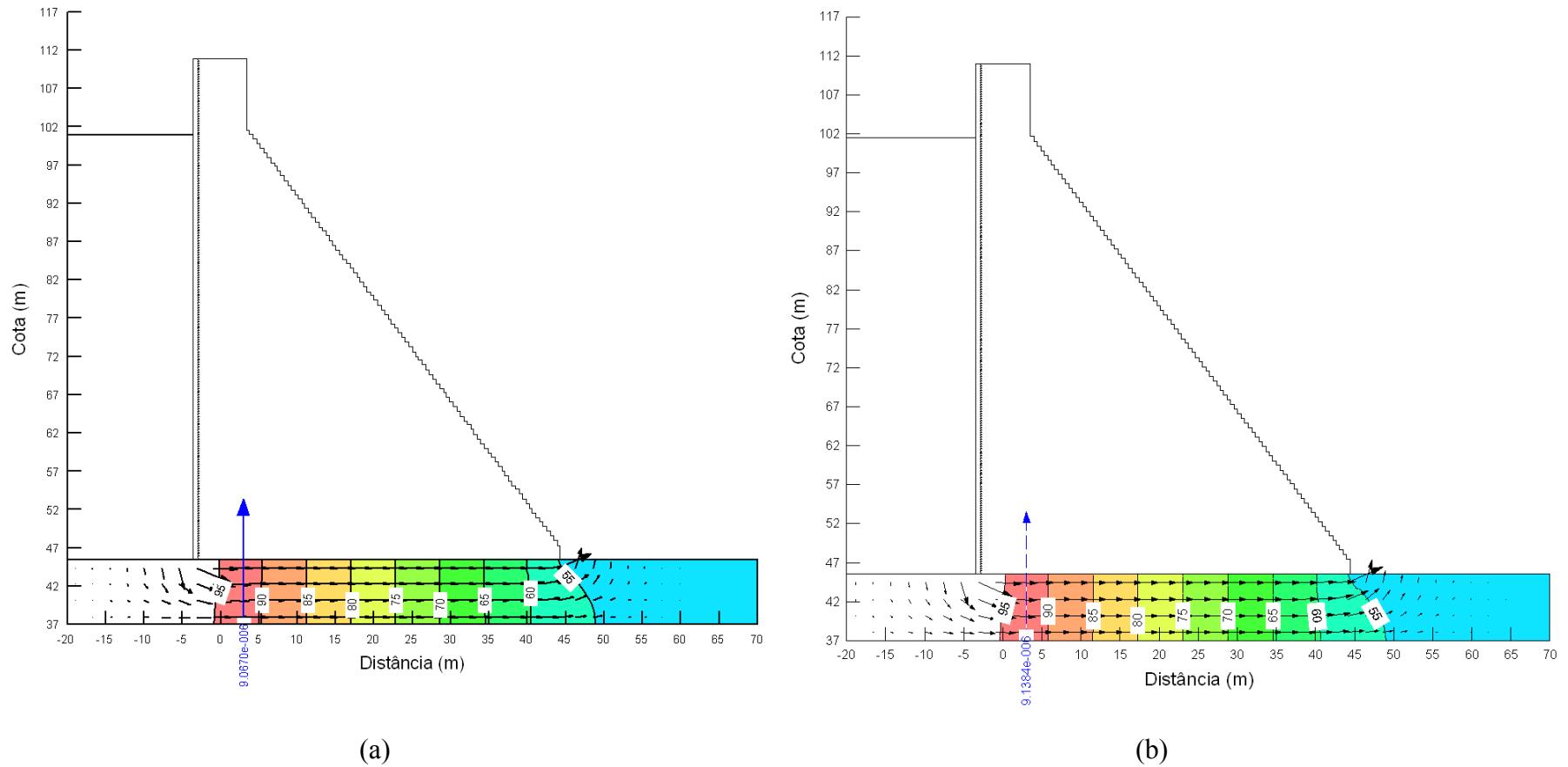


Figura B 47 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

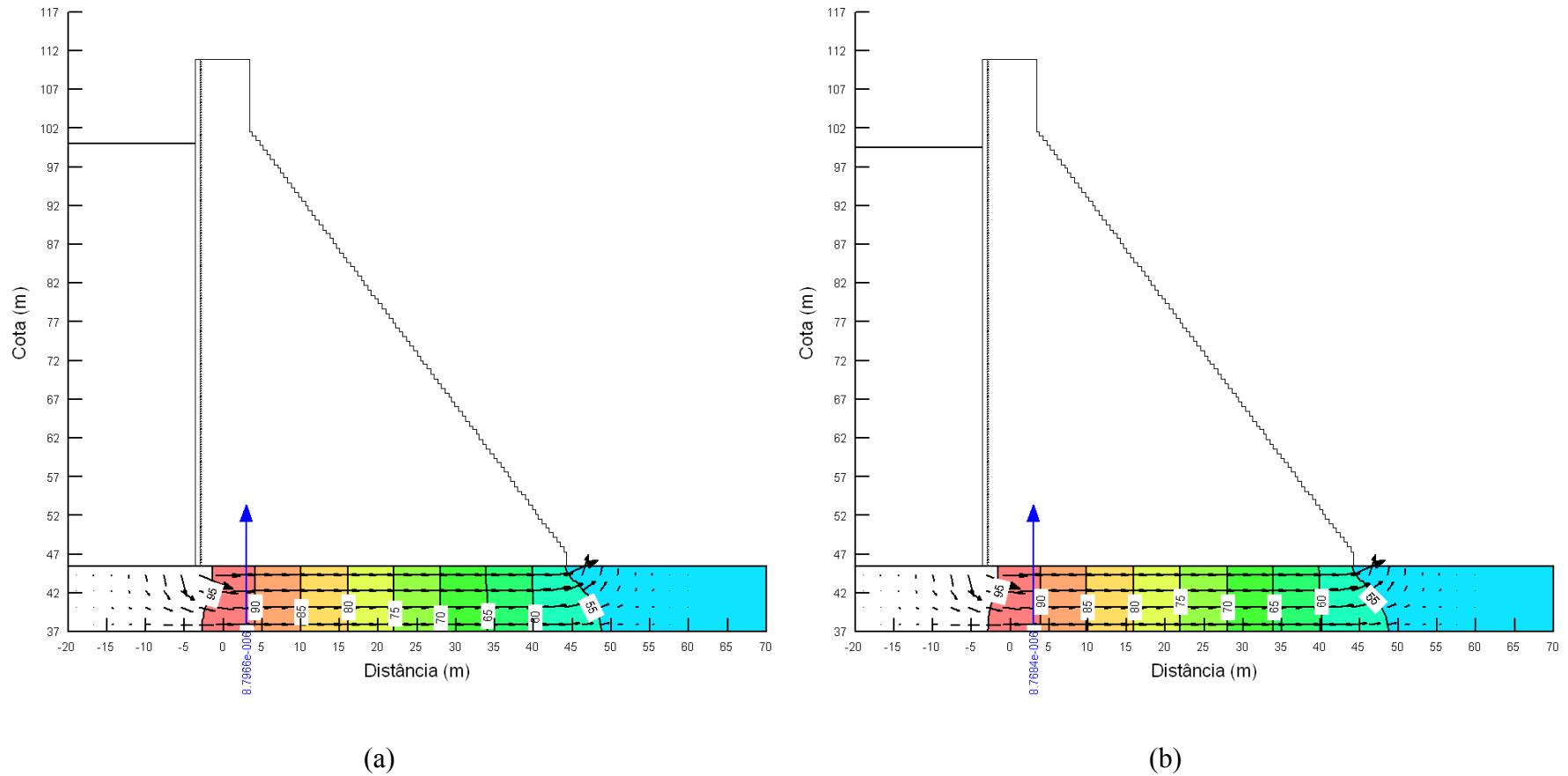


Figura B 48 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

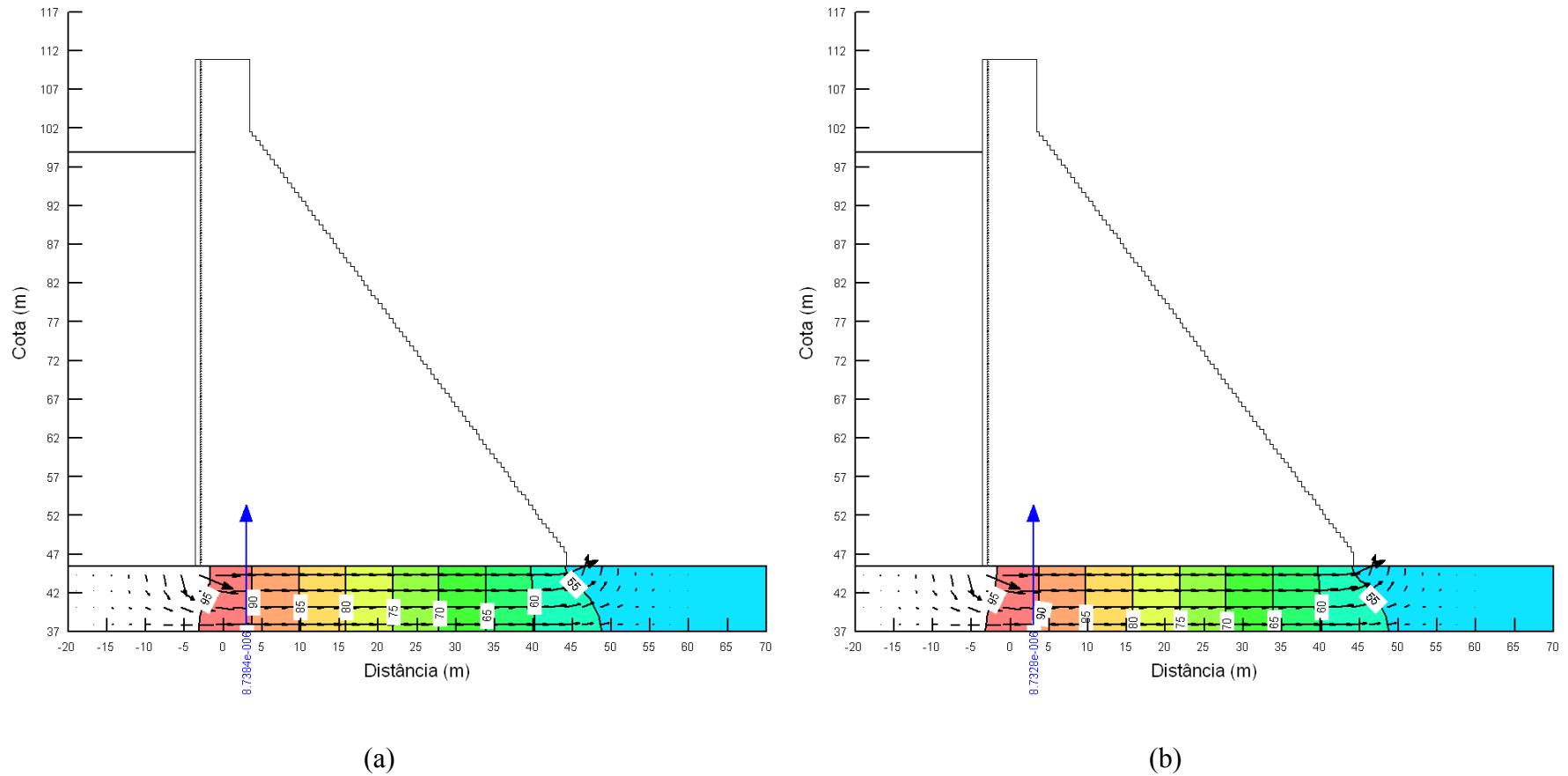


Figura B 49 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

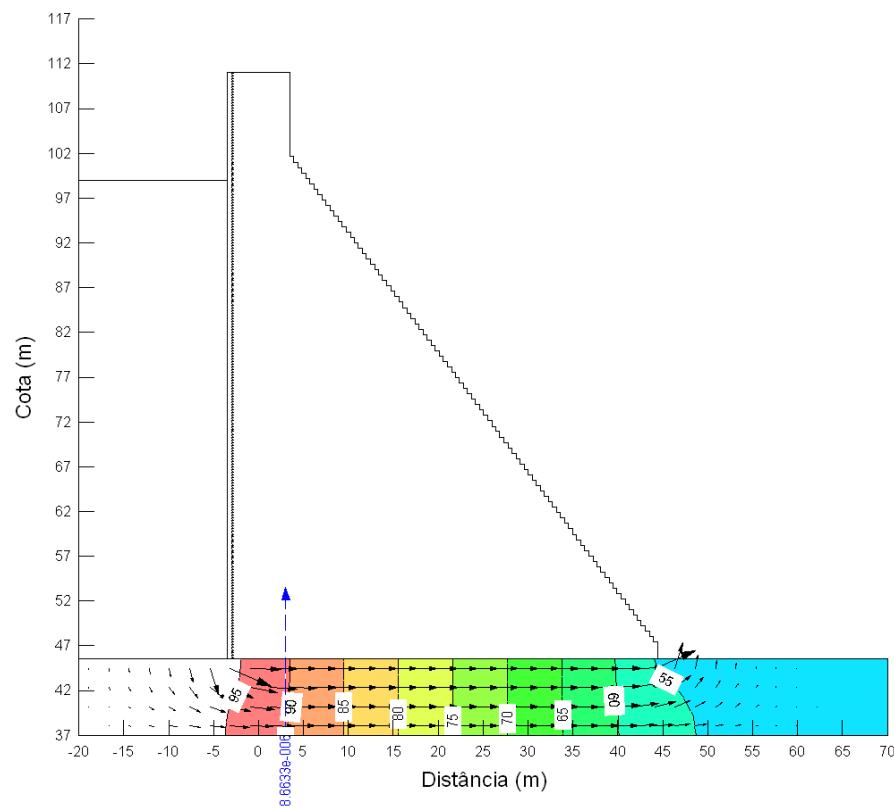


Figura B 50 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, setembro de 2005

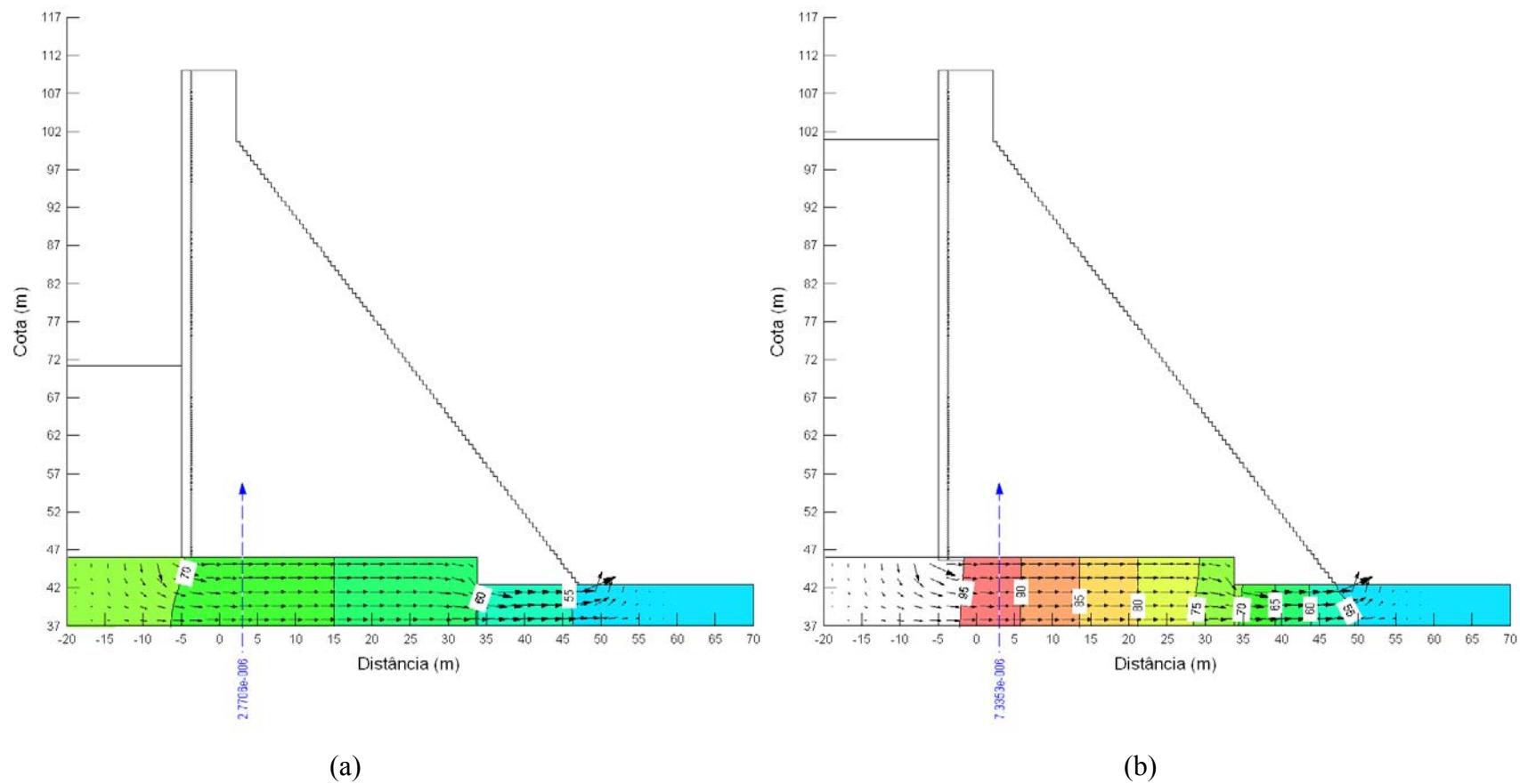


Figura B 51 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

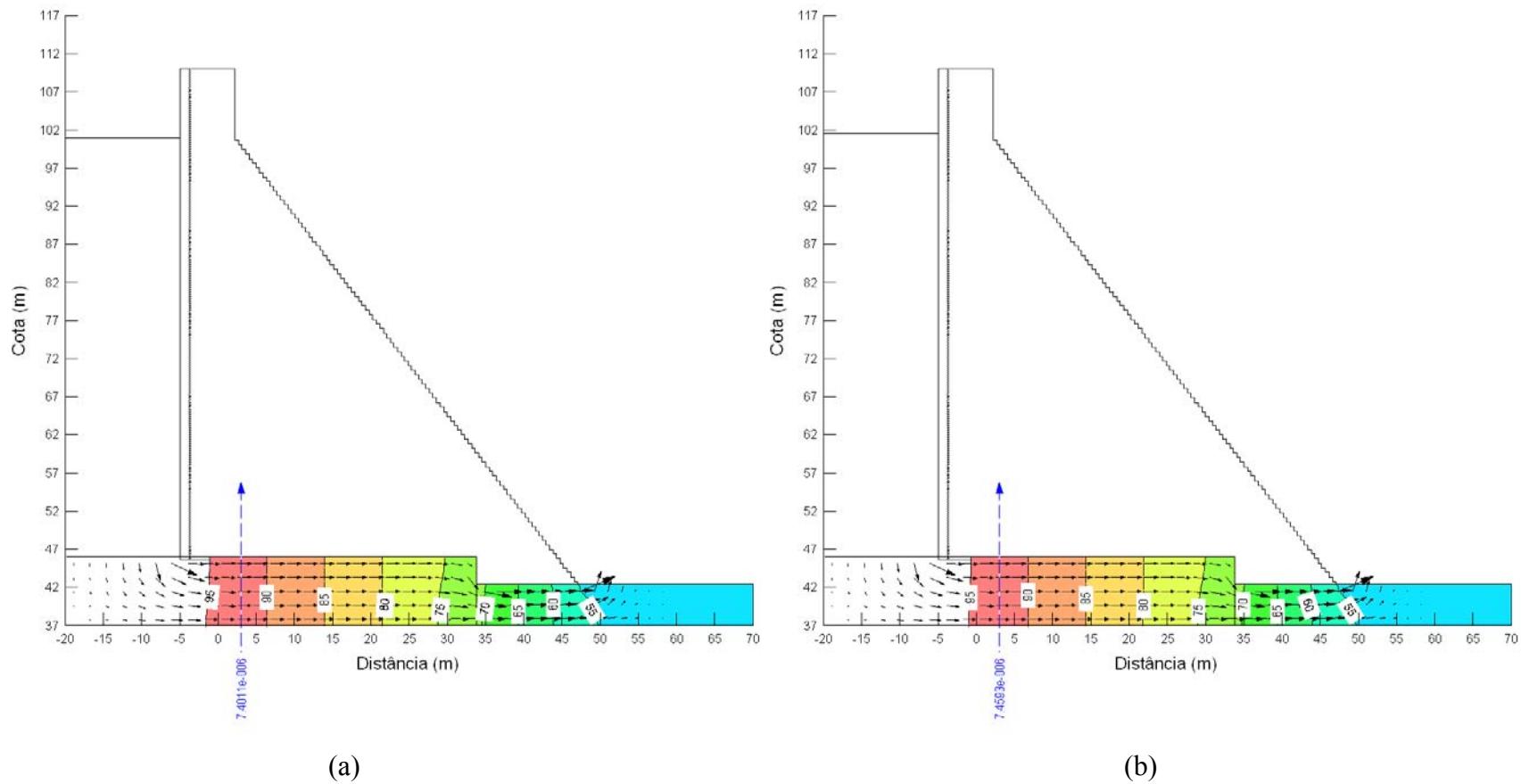


Figura B 52 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

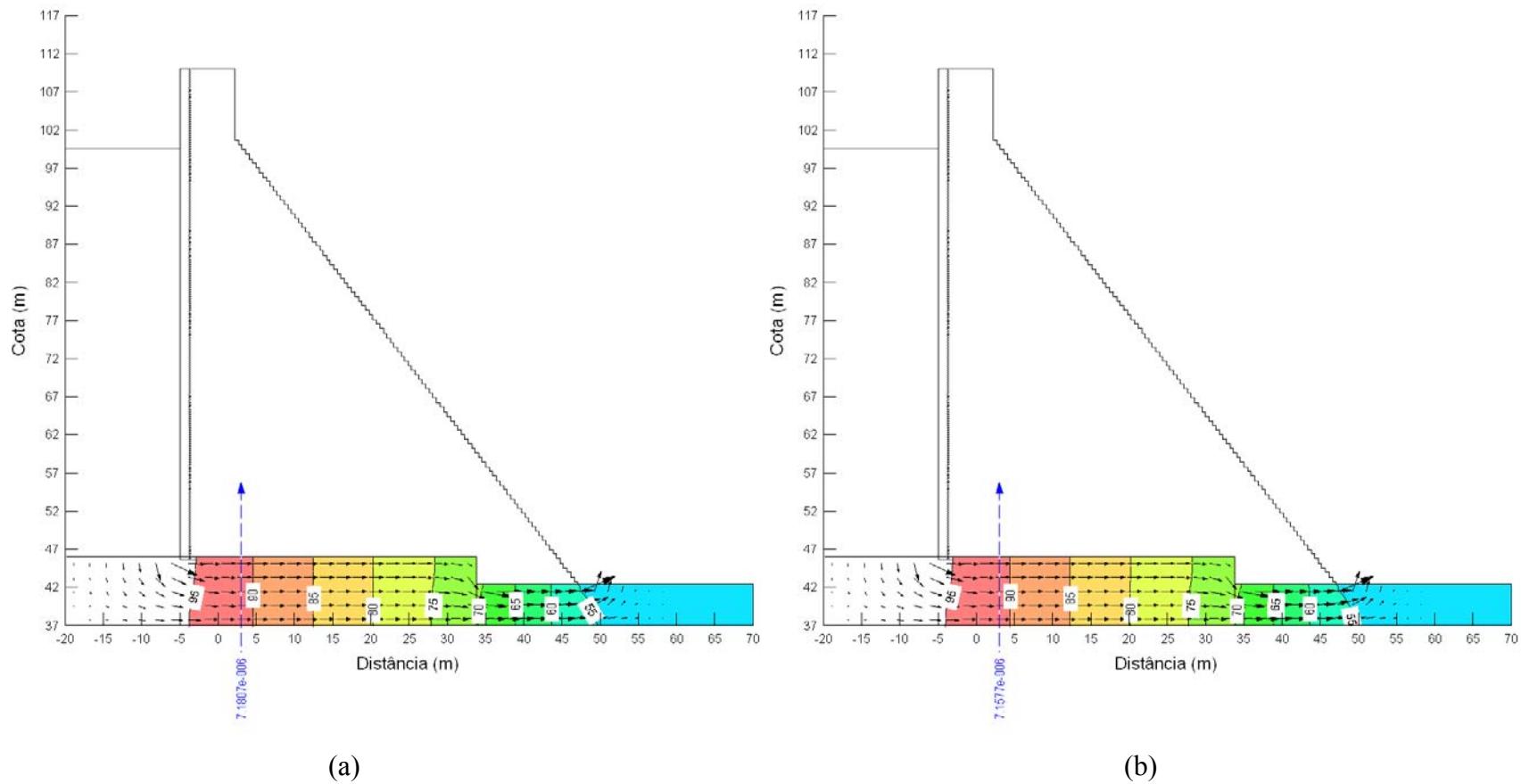


Figura B 53 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

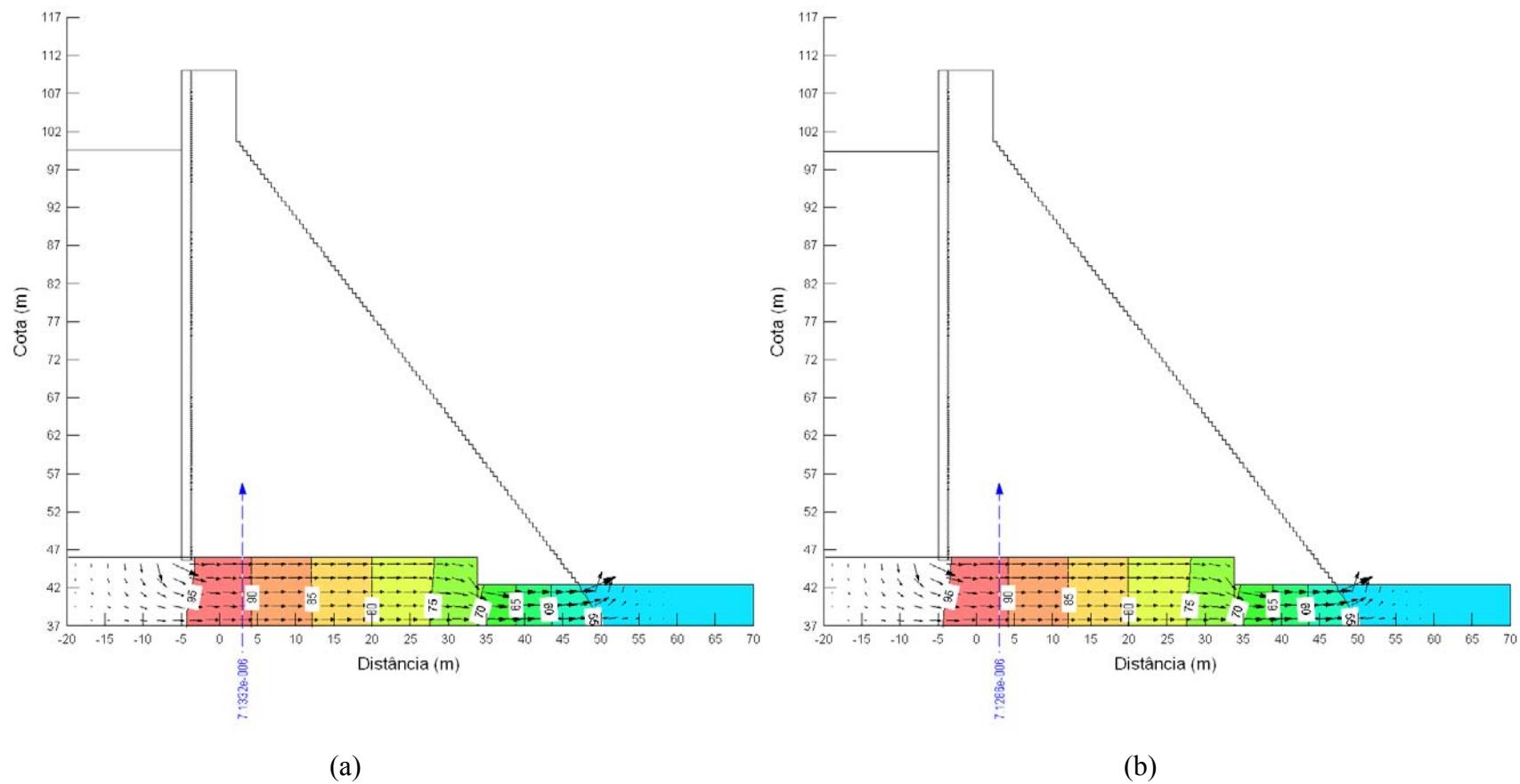


Figura B 54 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

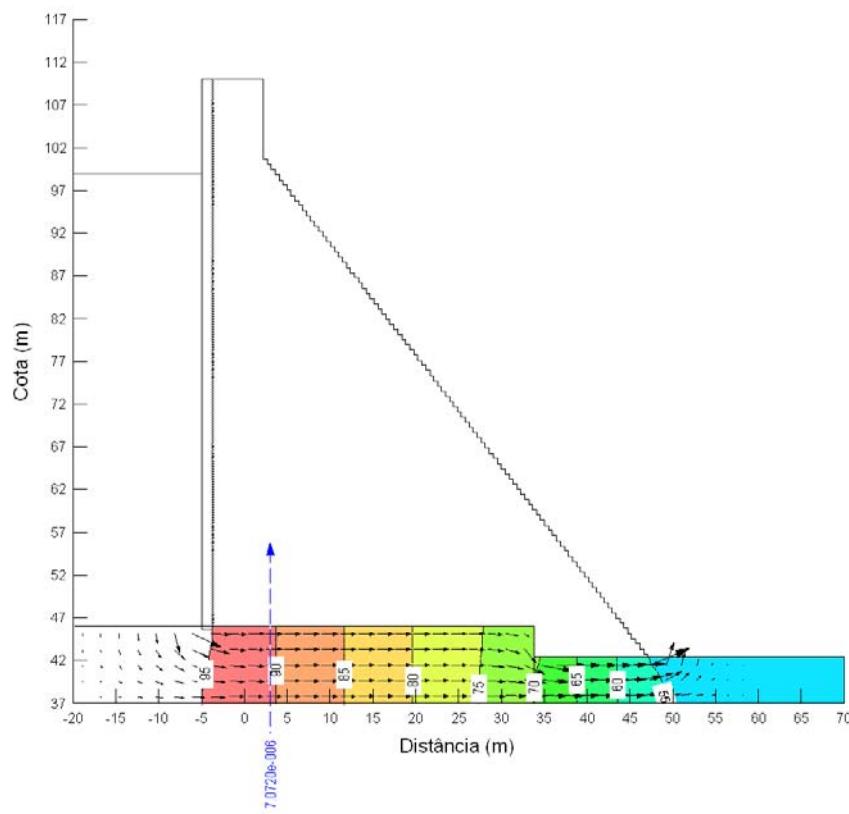


Figura B 55 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, setembro de 2005

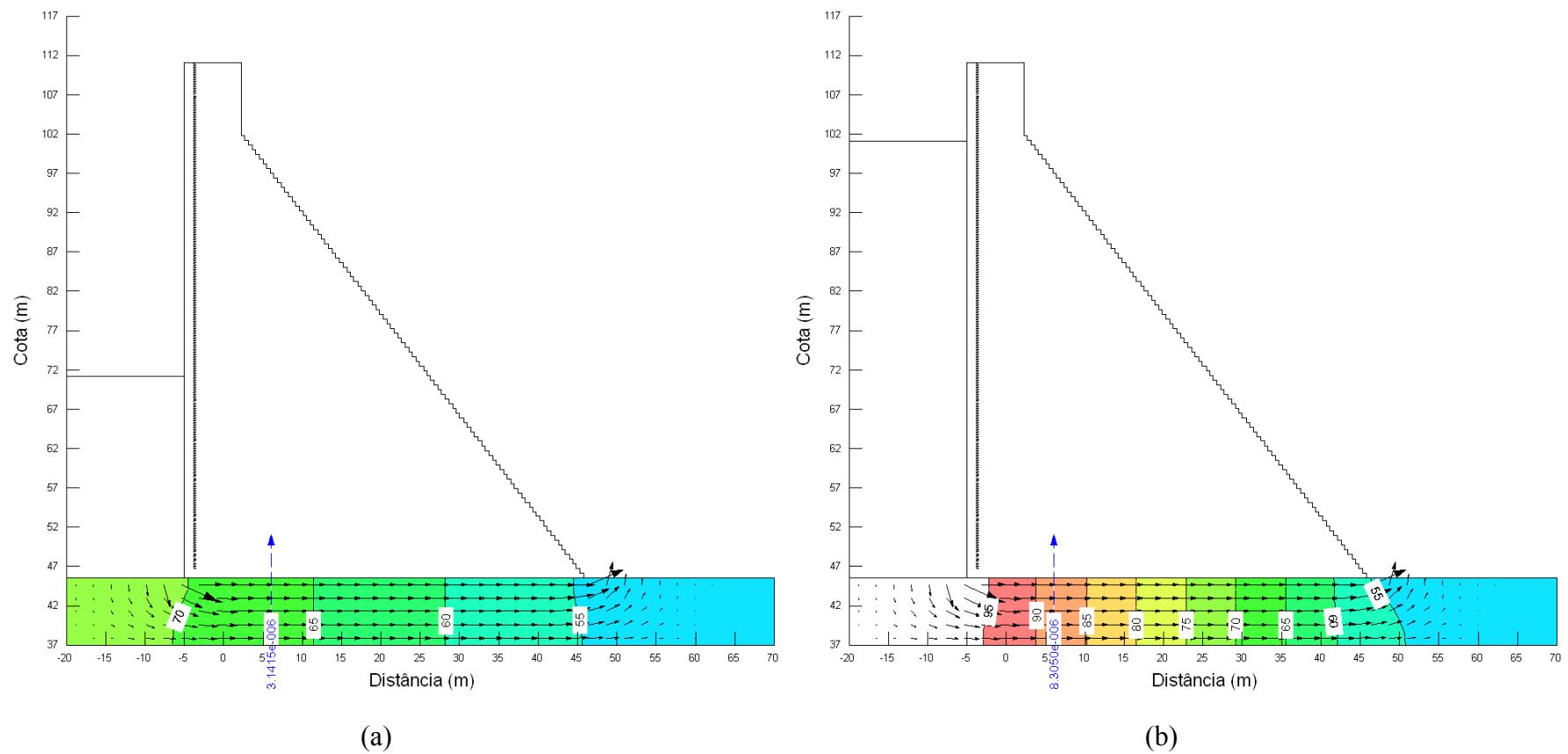


Figura B 56 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

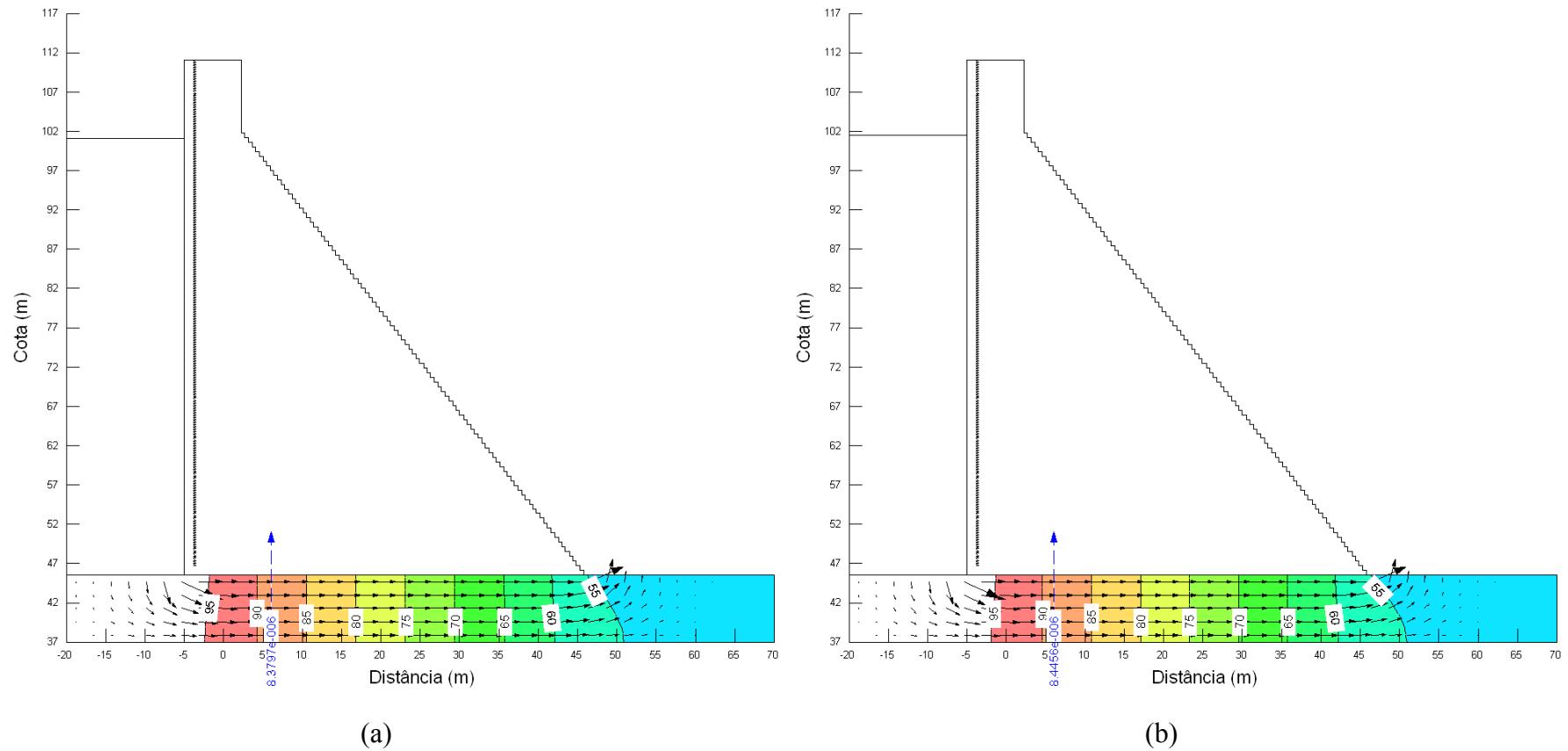


Figura B 57 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

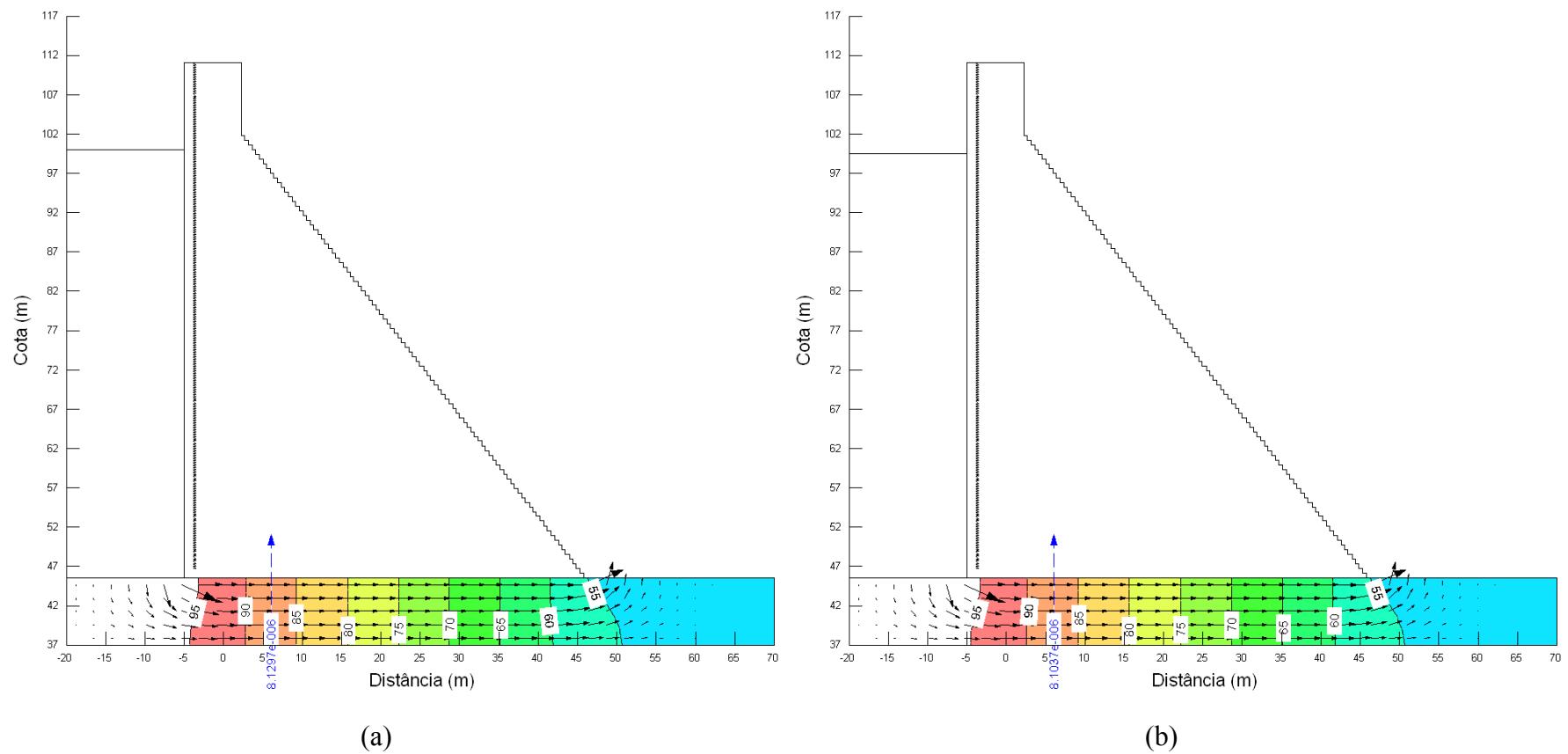


Figura B 58 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

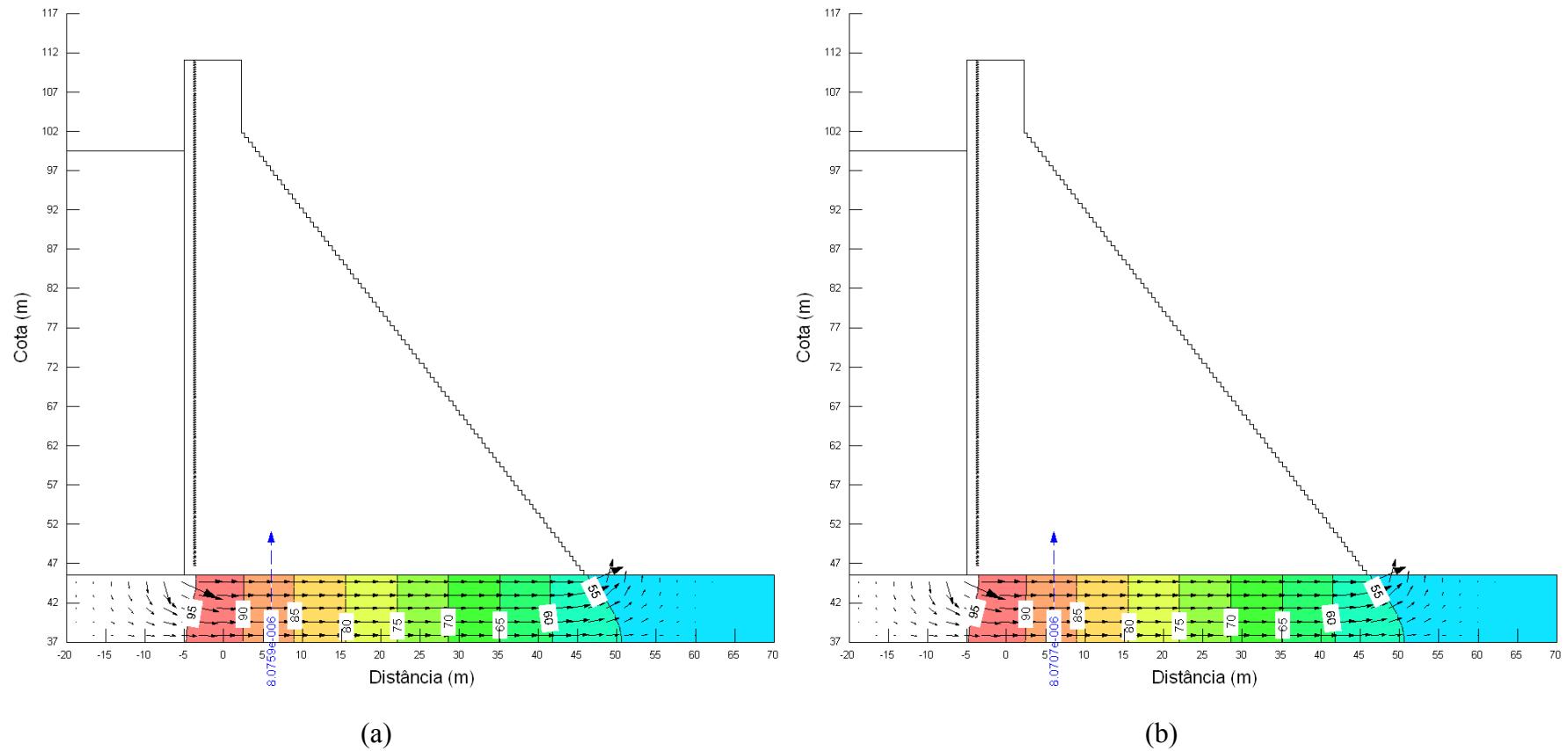


Figura B 59 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

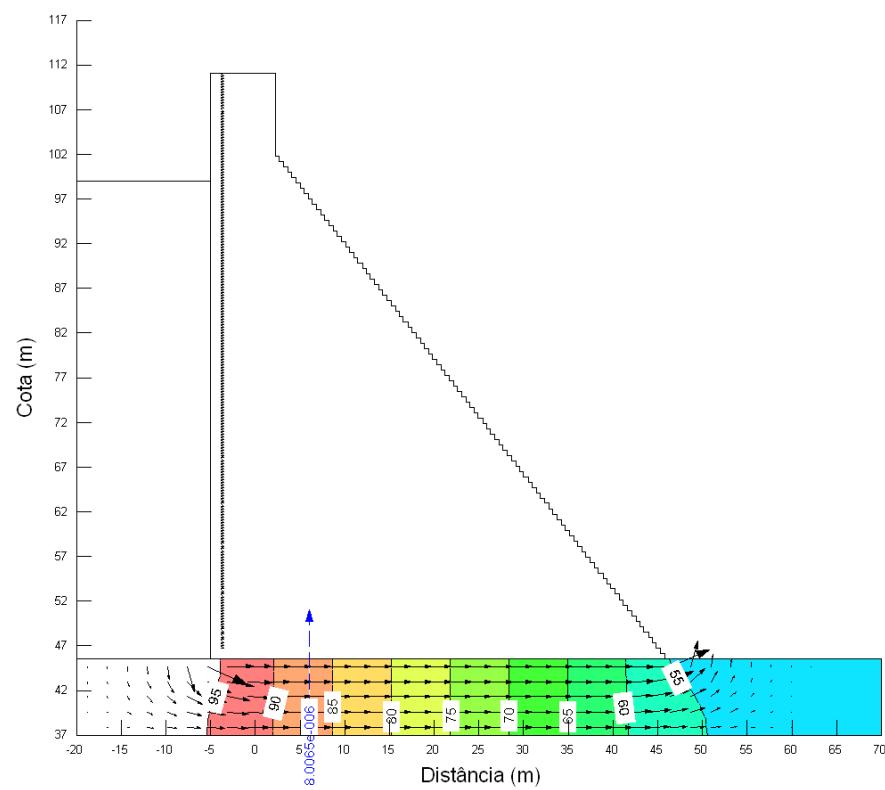


Figura B 60 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, setembro de 2005

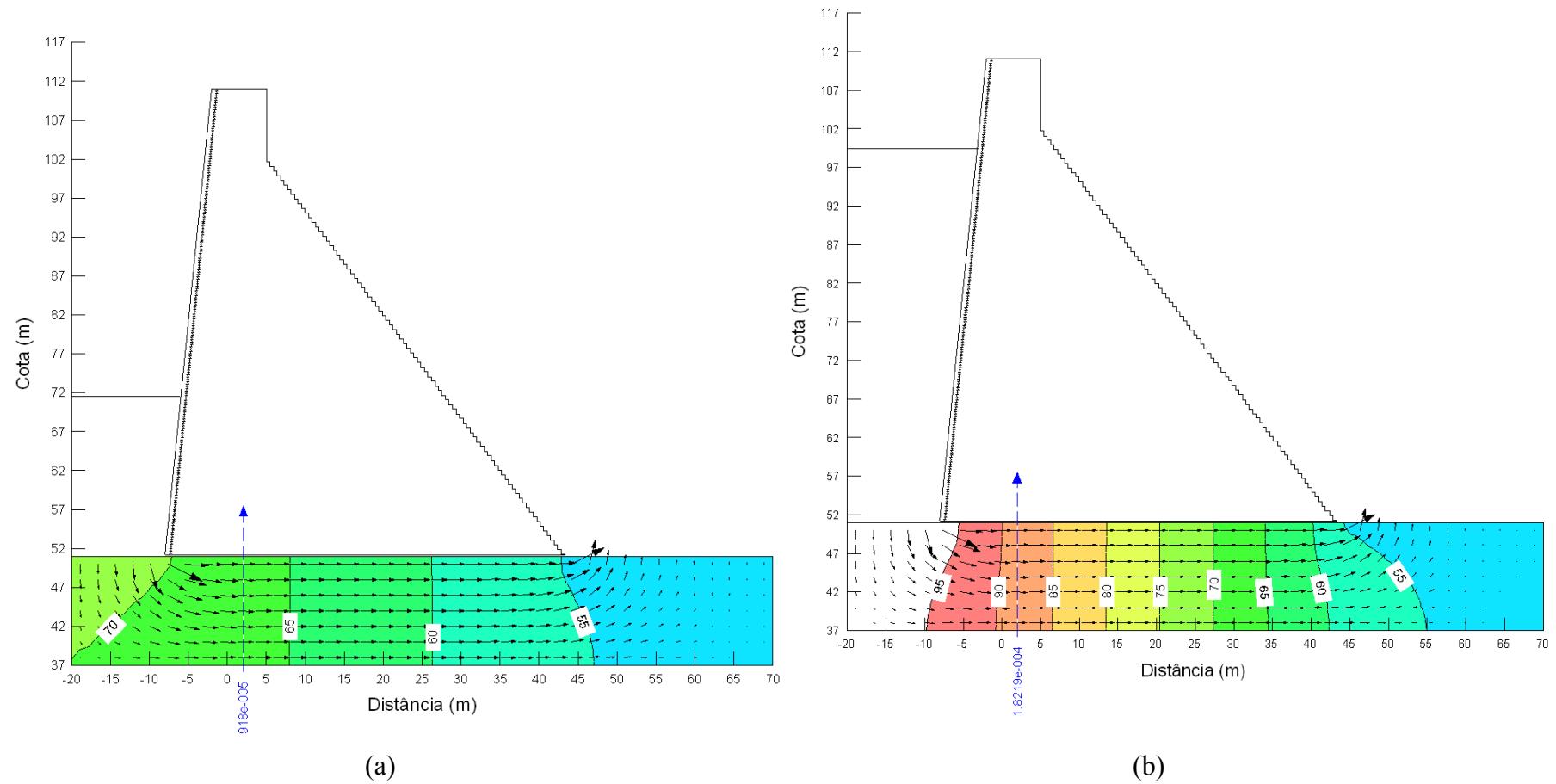


Figura B 61 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

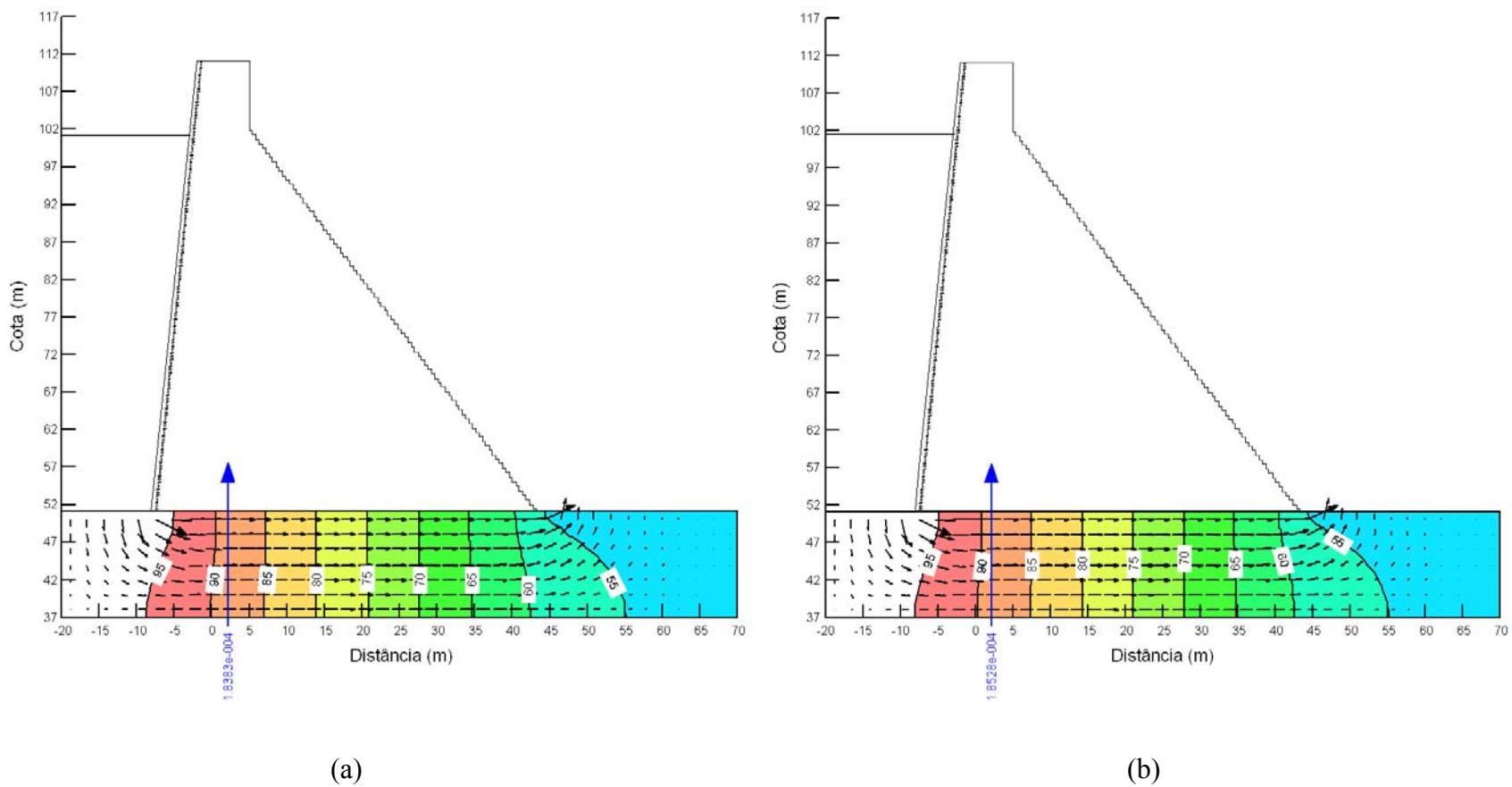


Figura B 62 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

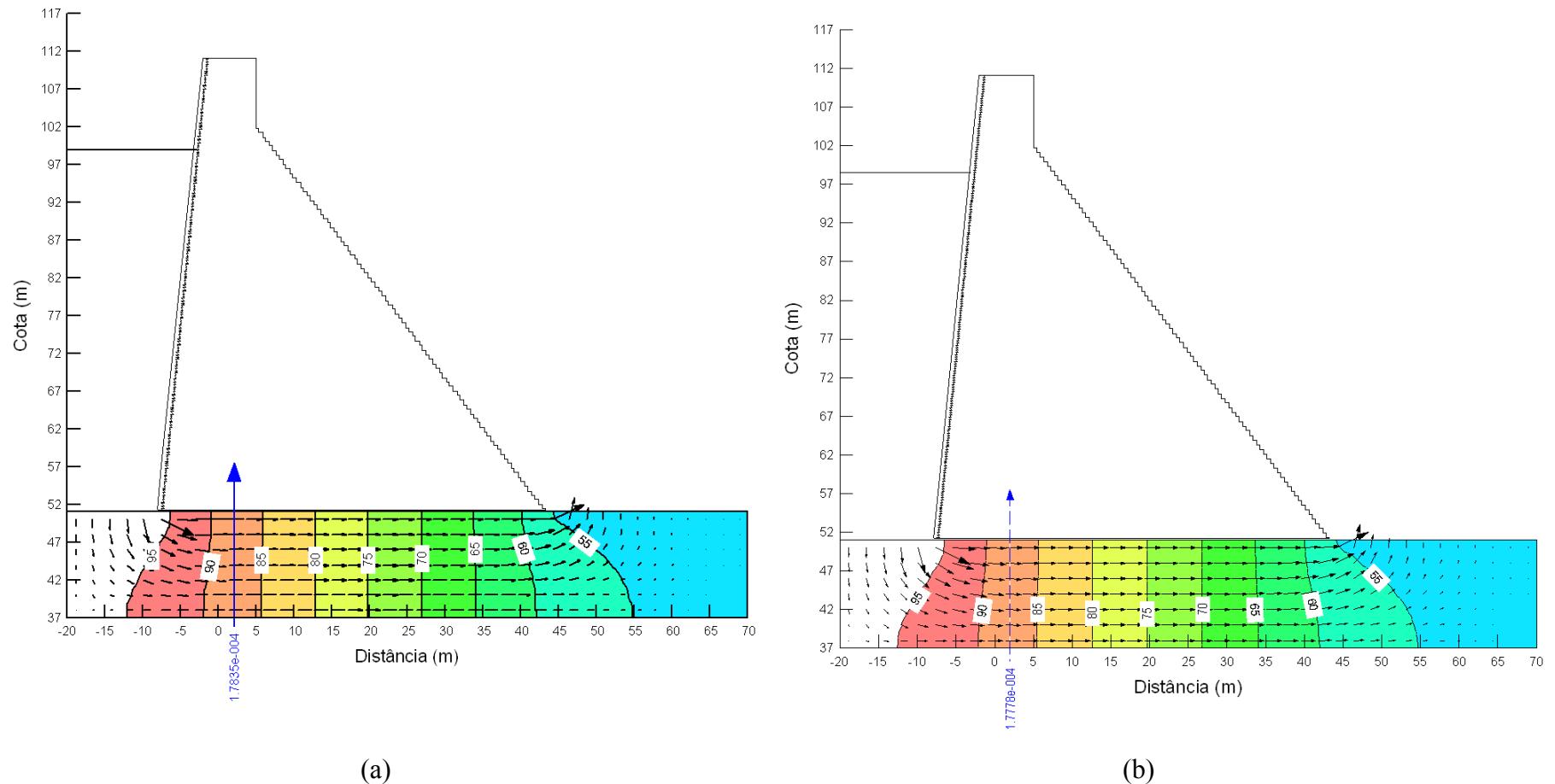


Figura B 63 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

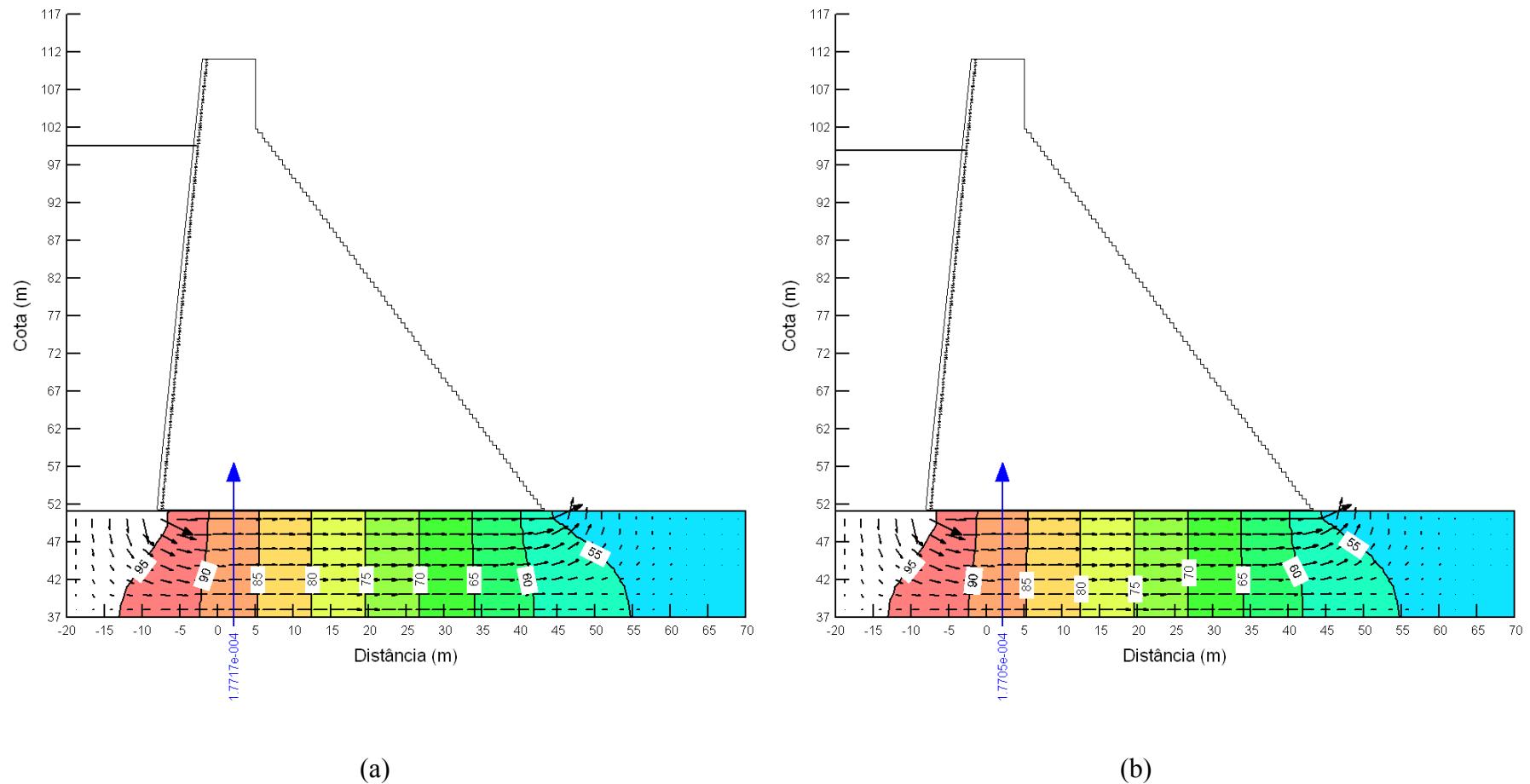


Figura B 64 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

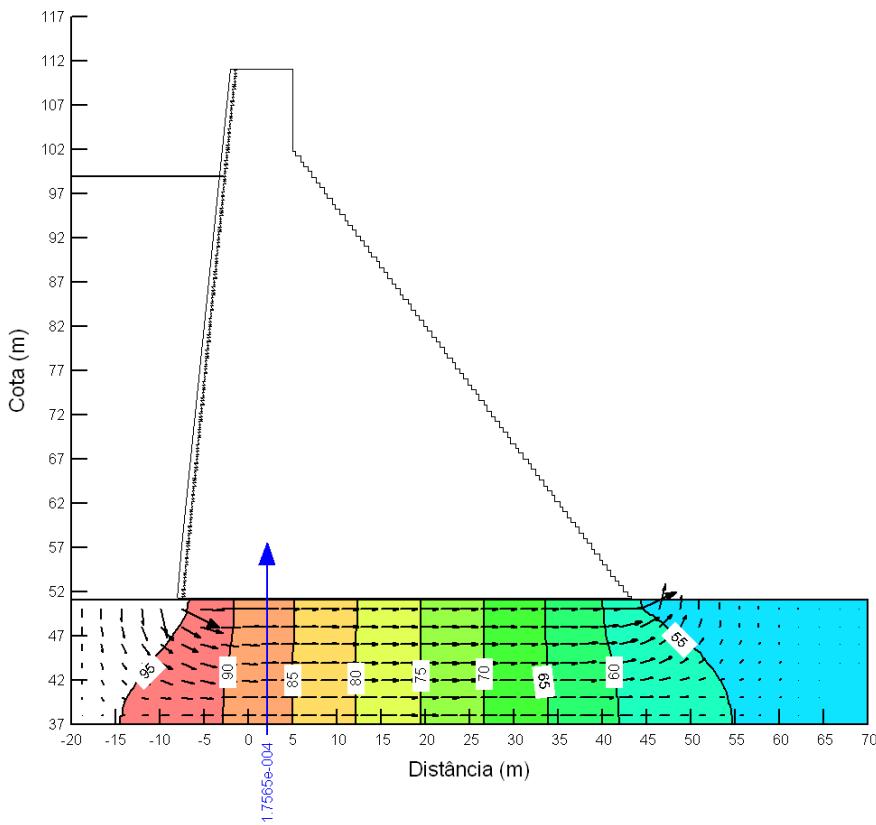


Figura B 65 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, setembro de 2005

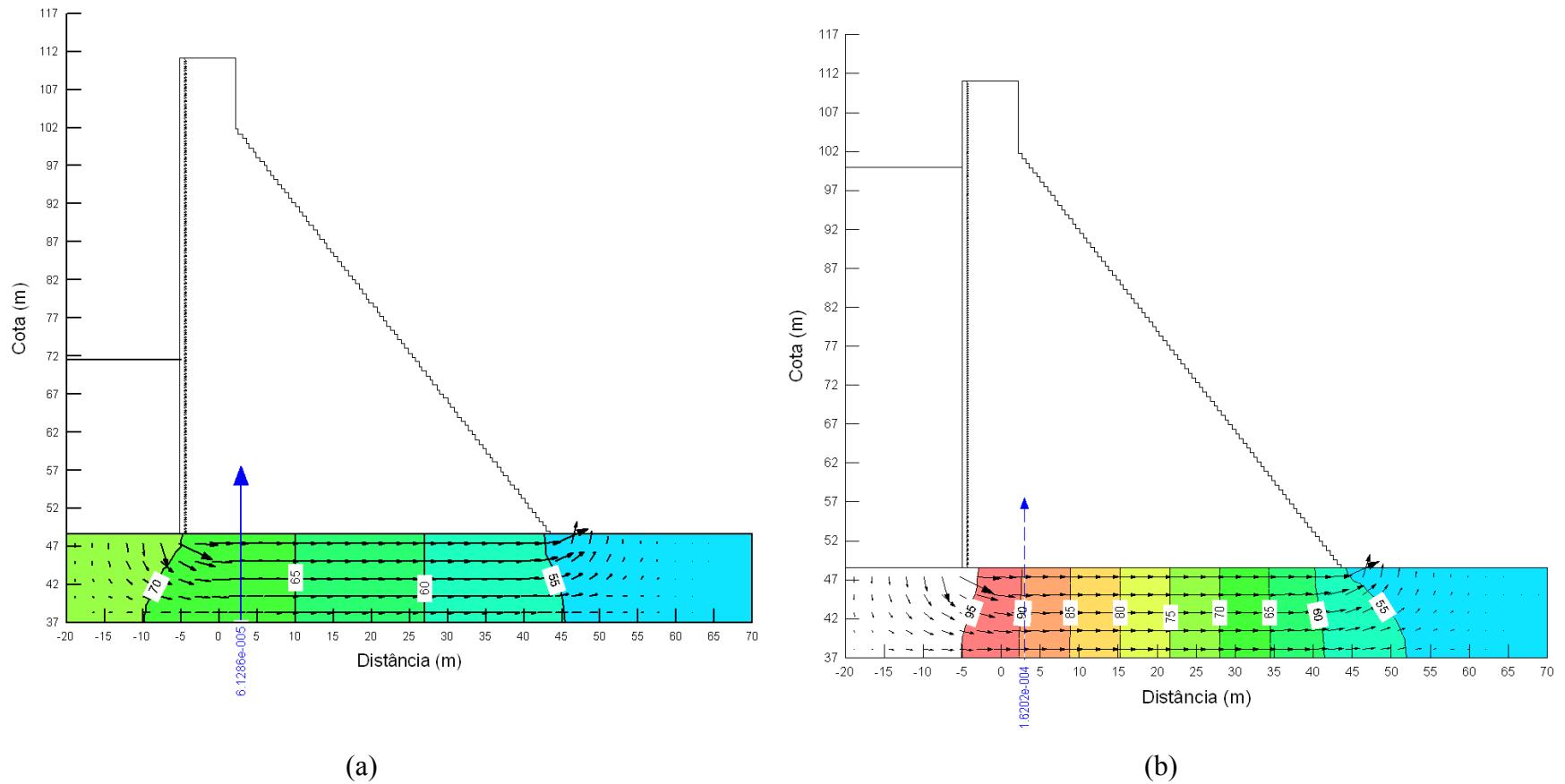


Figura B 66 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

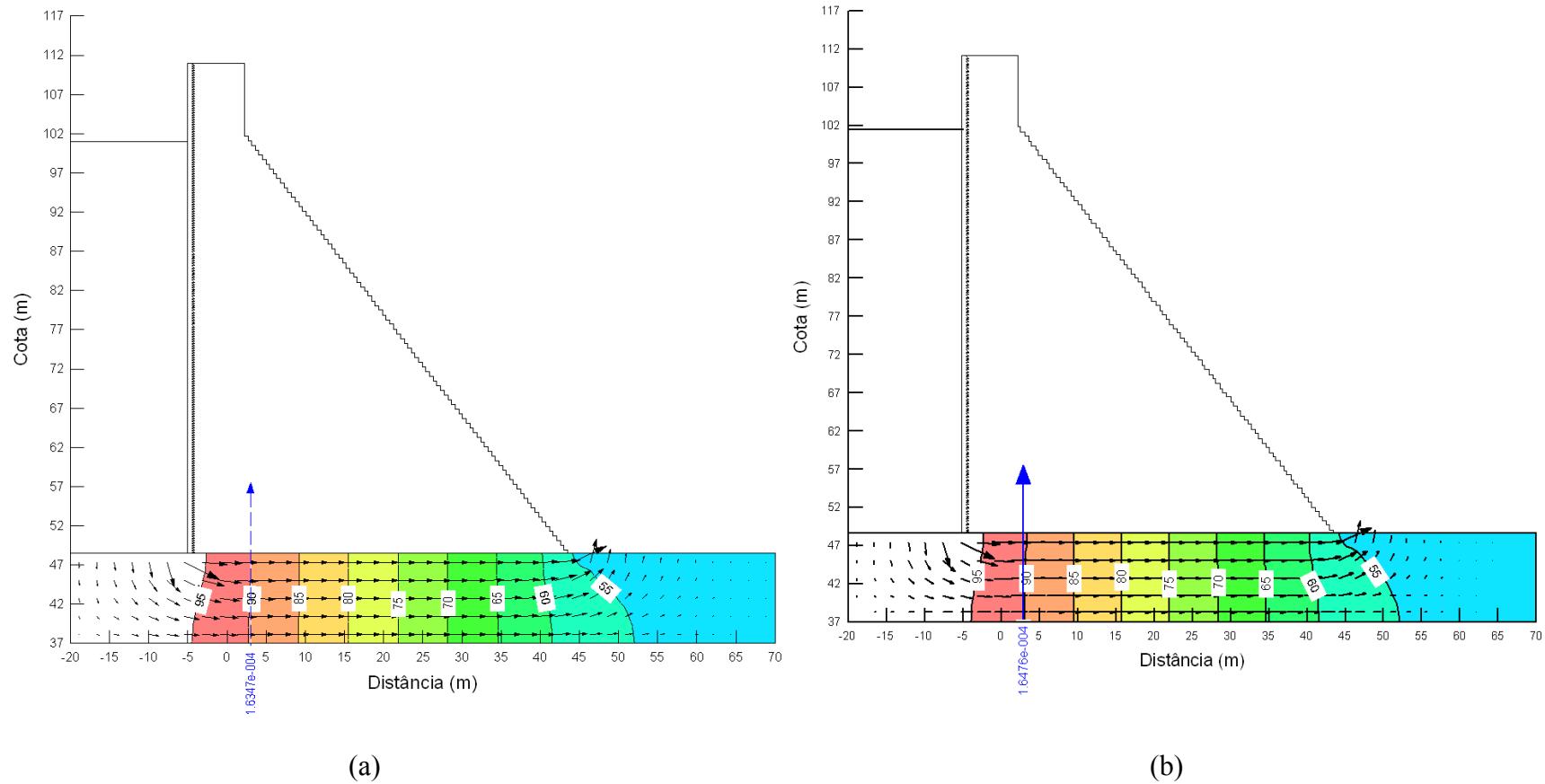


Figura B 67 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

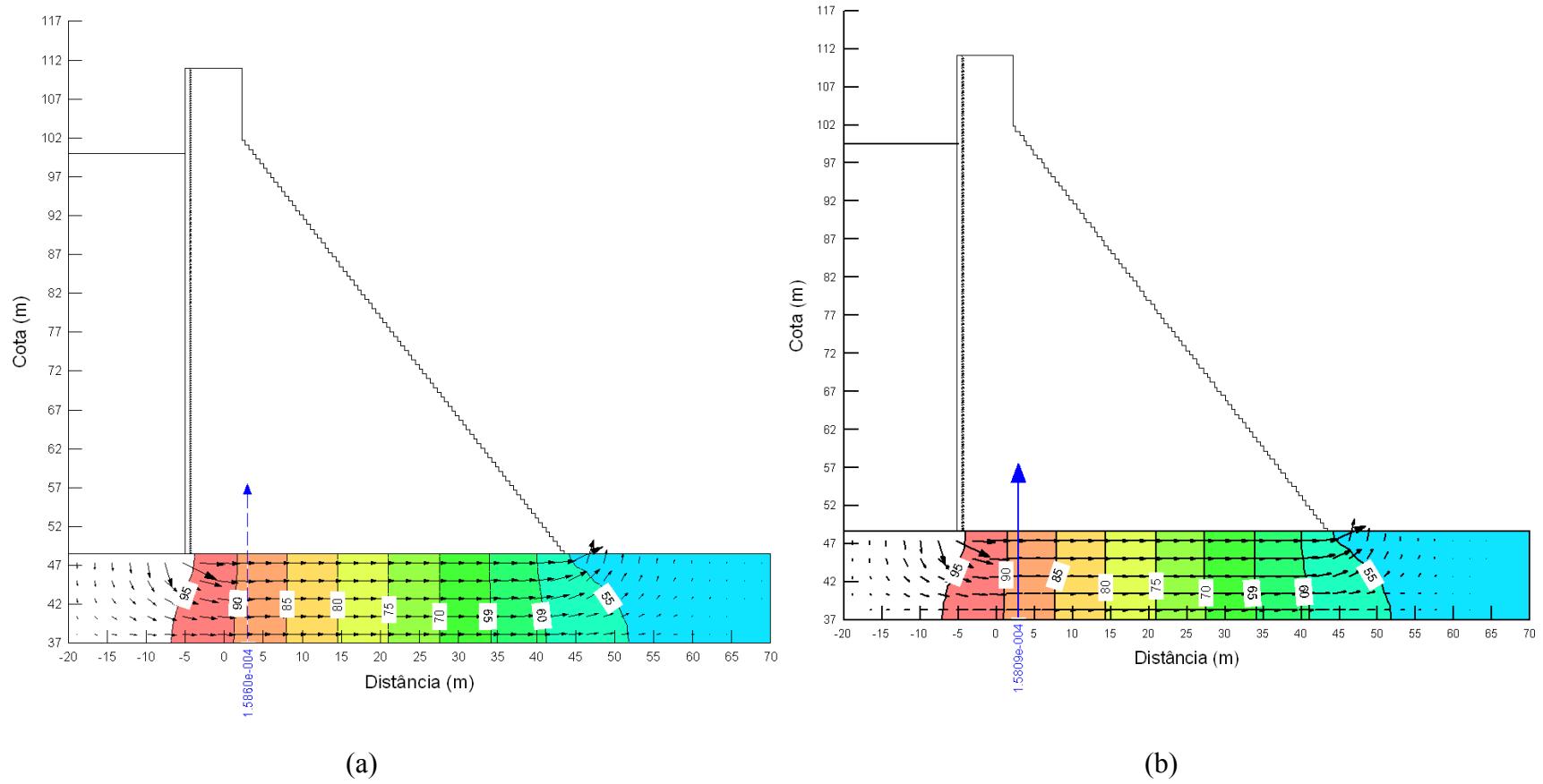


Figura B 68 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

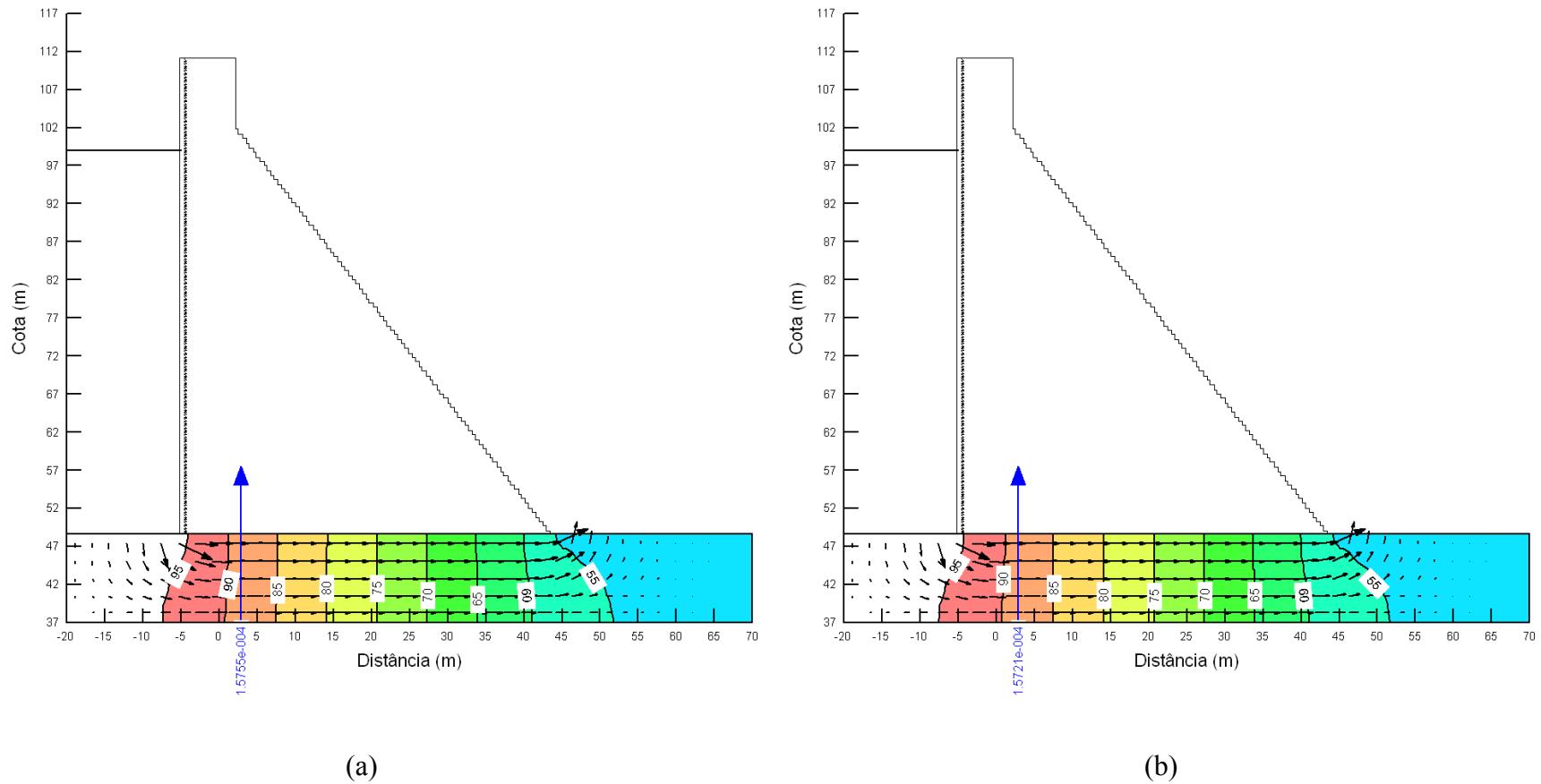


Figura B 69 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

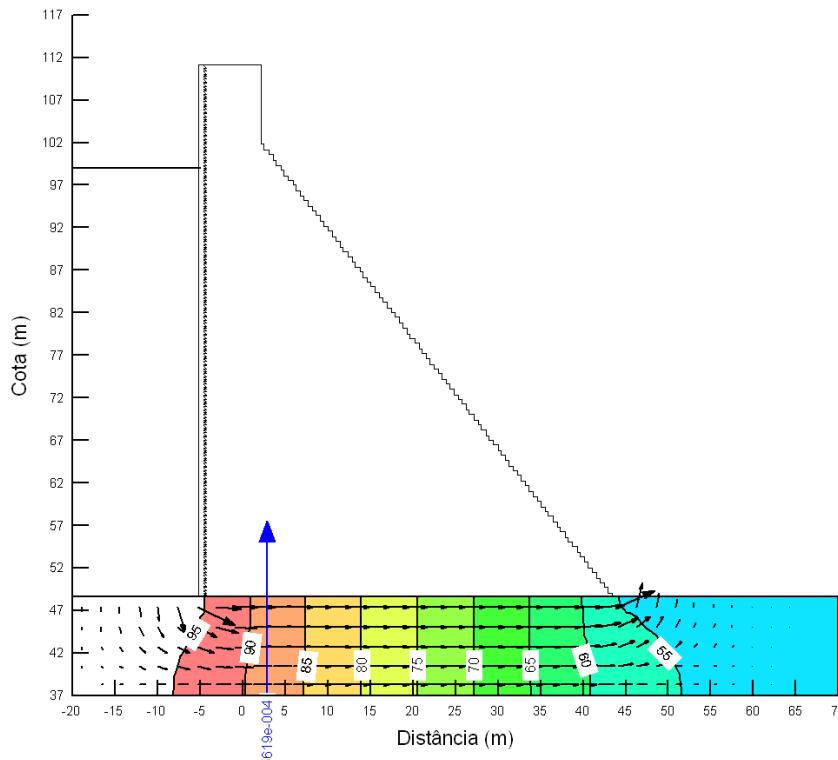


Figura B 70 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, setembro de 2005

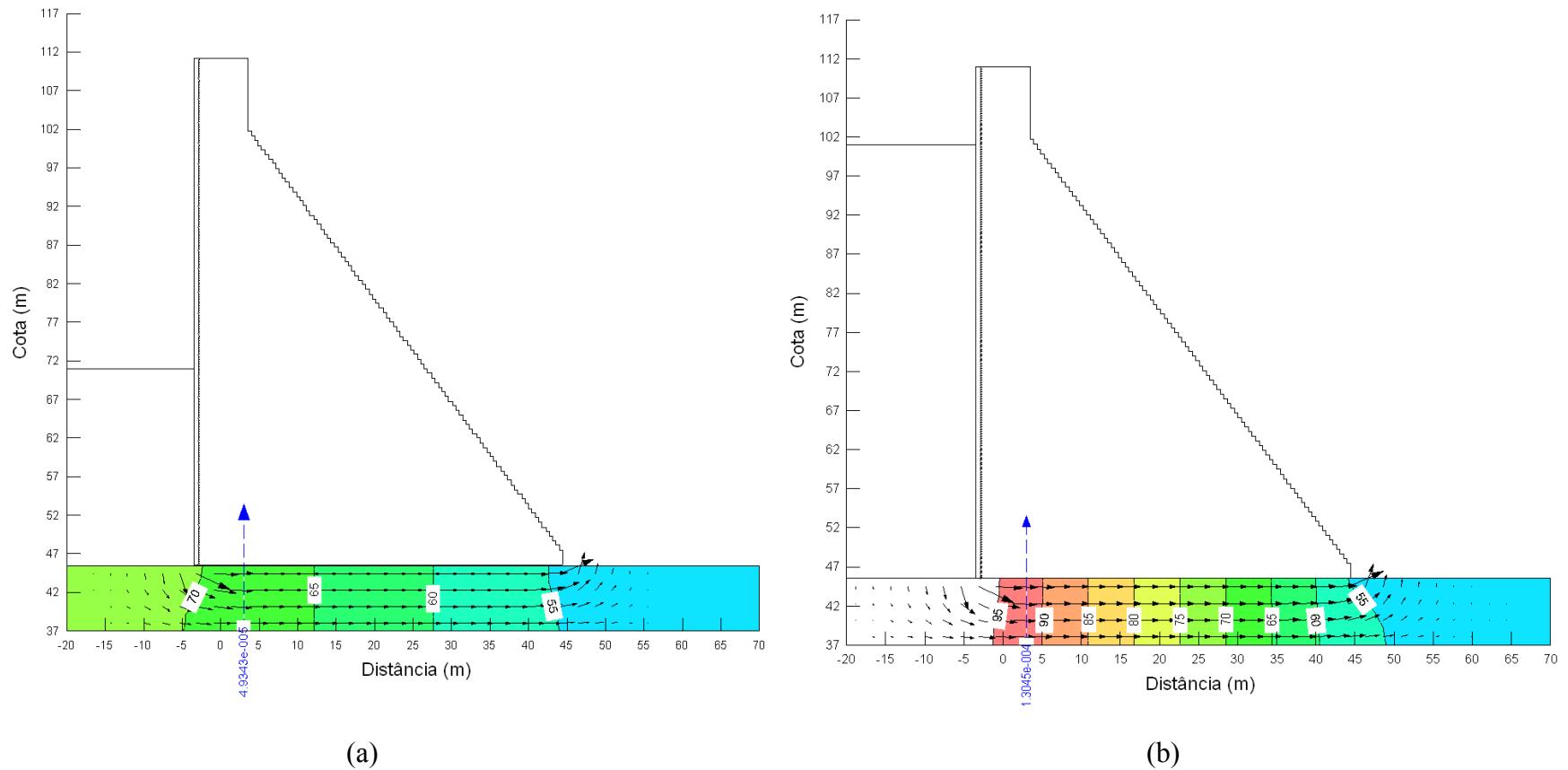


Figura B 71 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

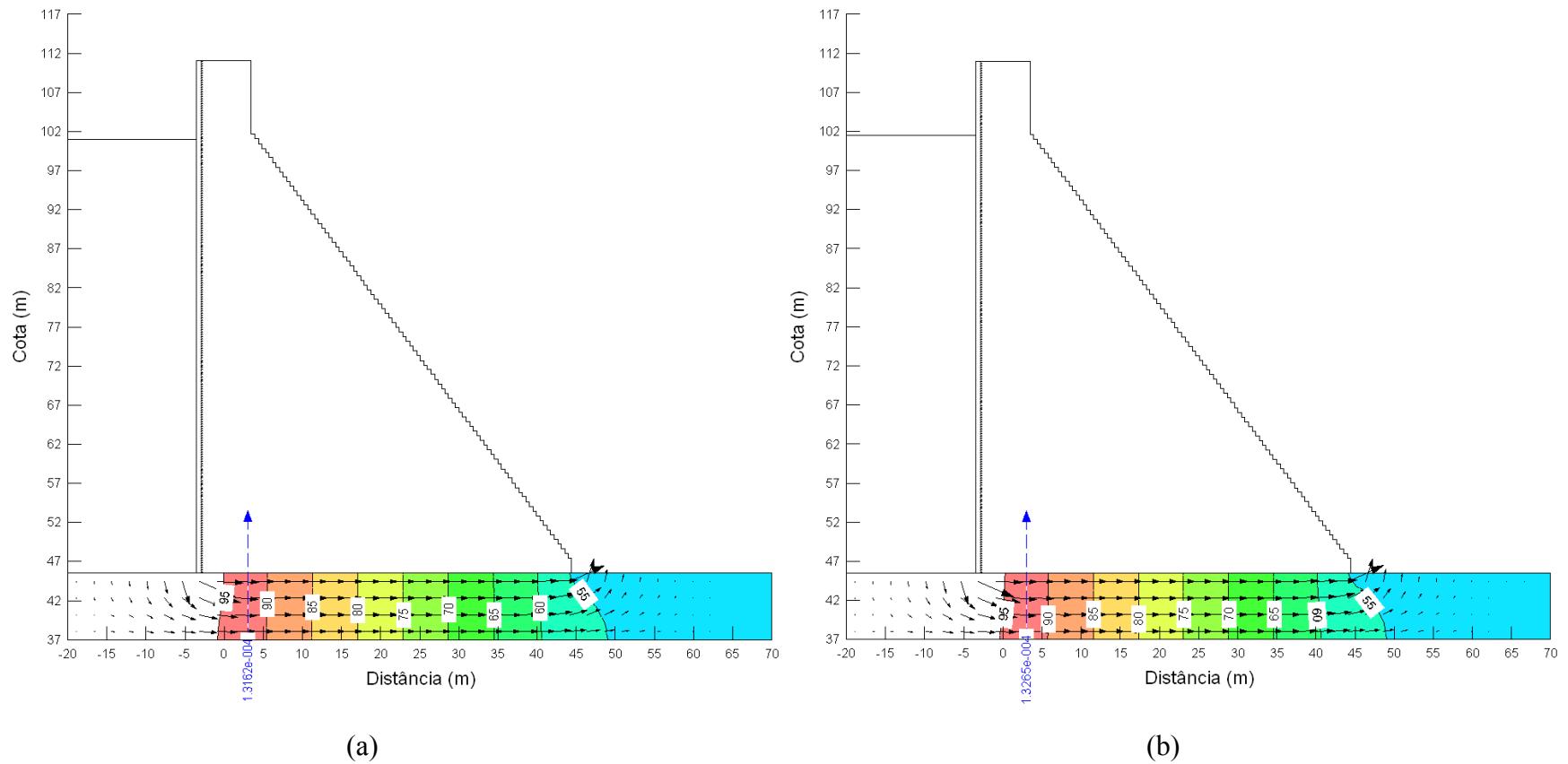


Figura B 72 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

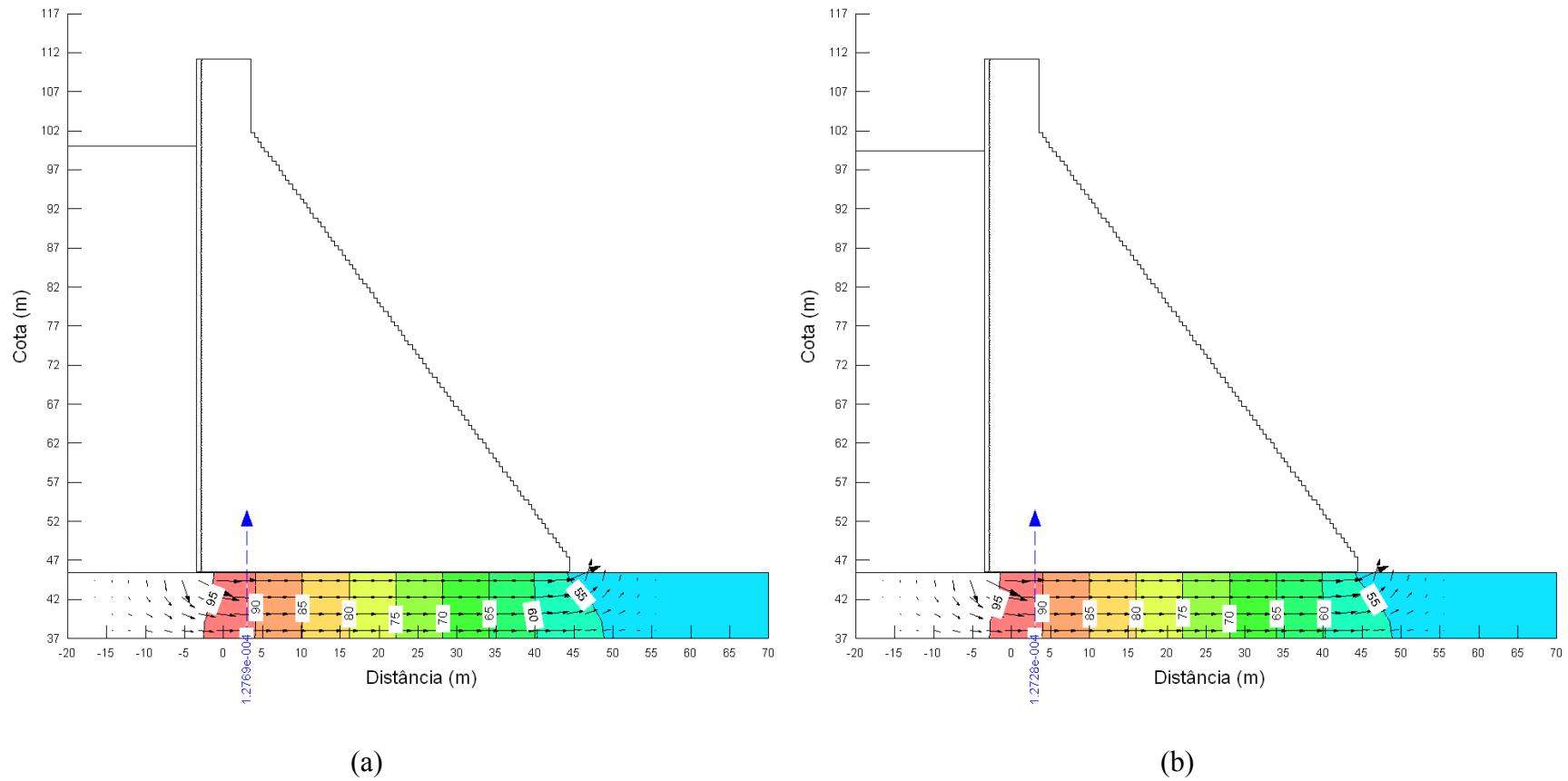


Figura B 73 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

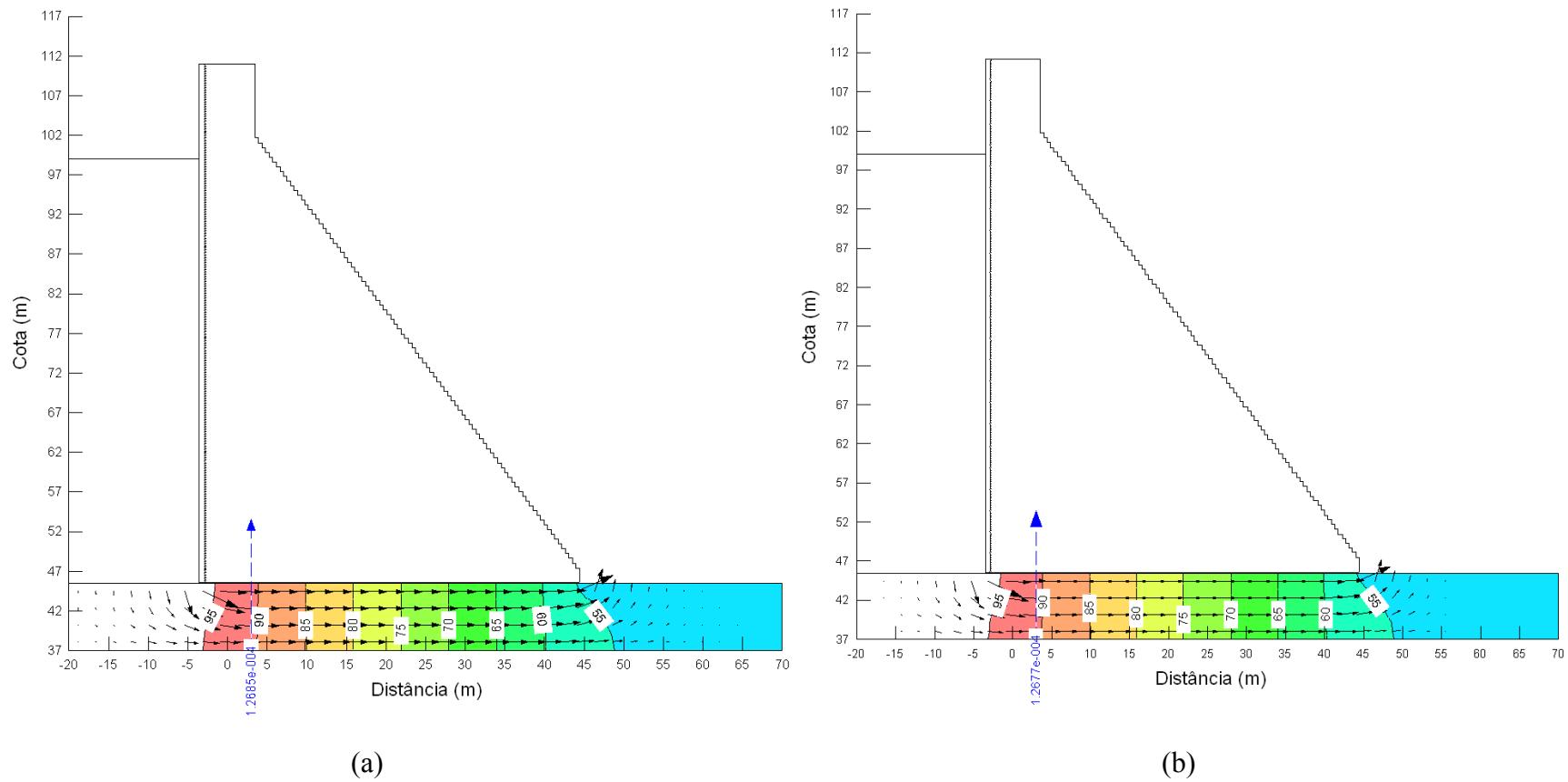


Figura B 74 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

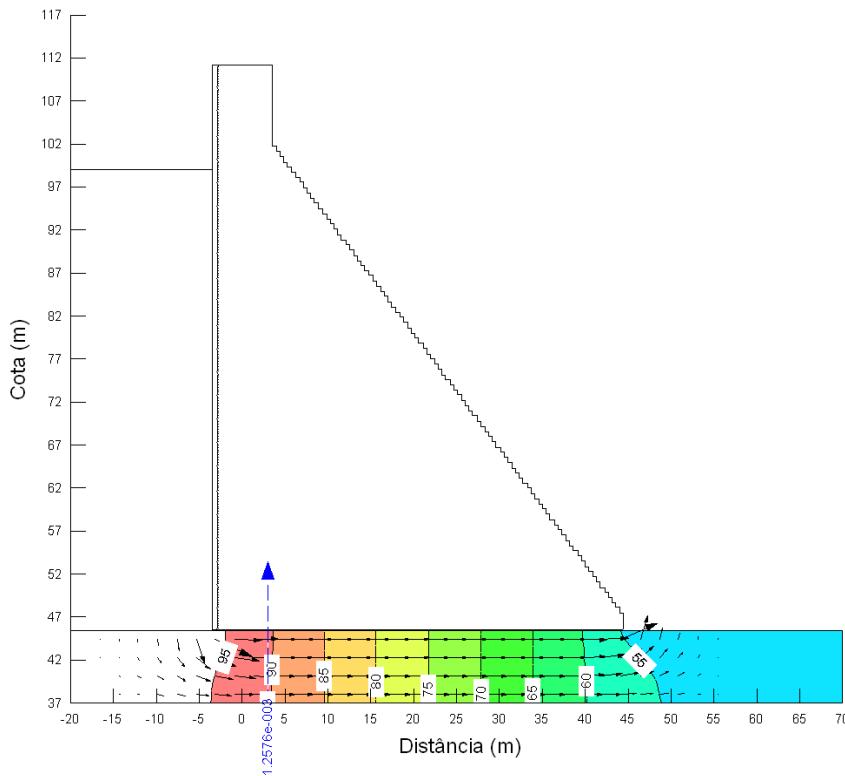


Figura B 75 – Segundo cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, setembro de 2005

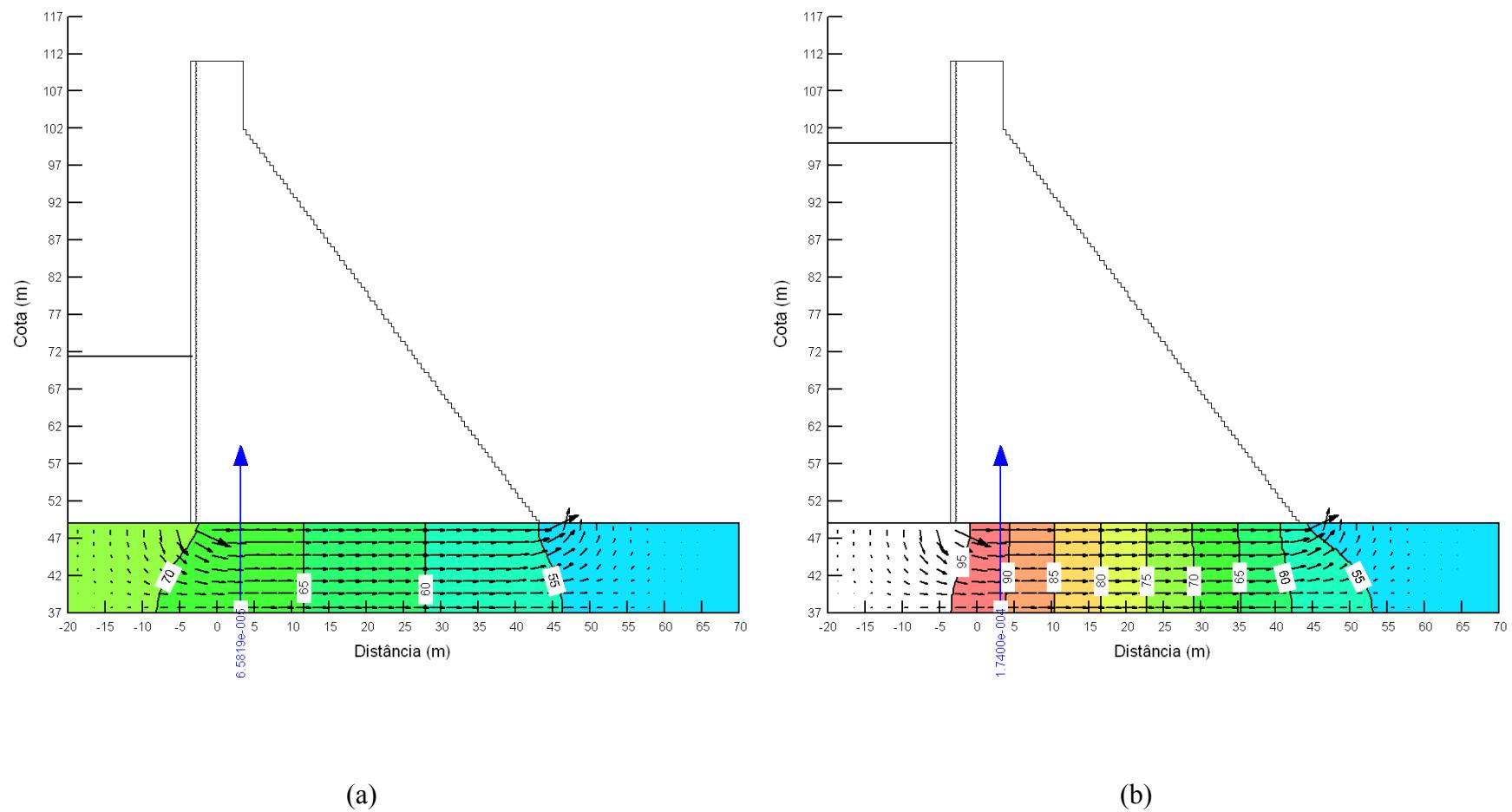


Figura B 76 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

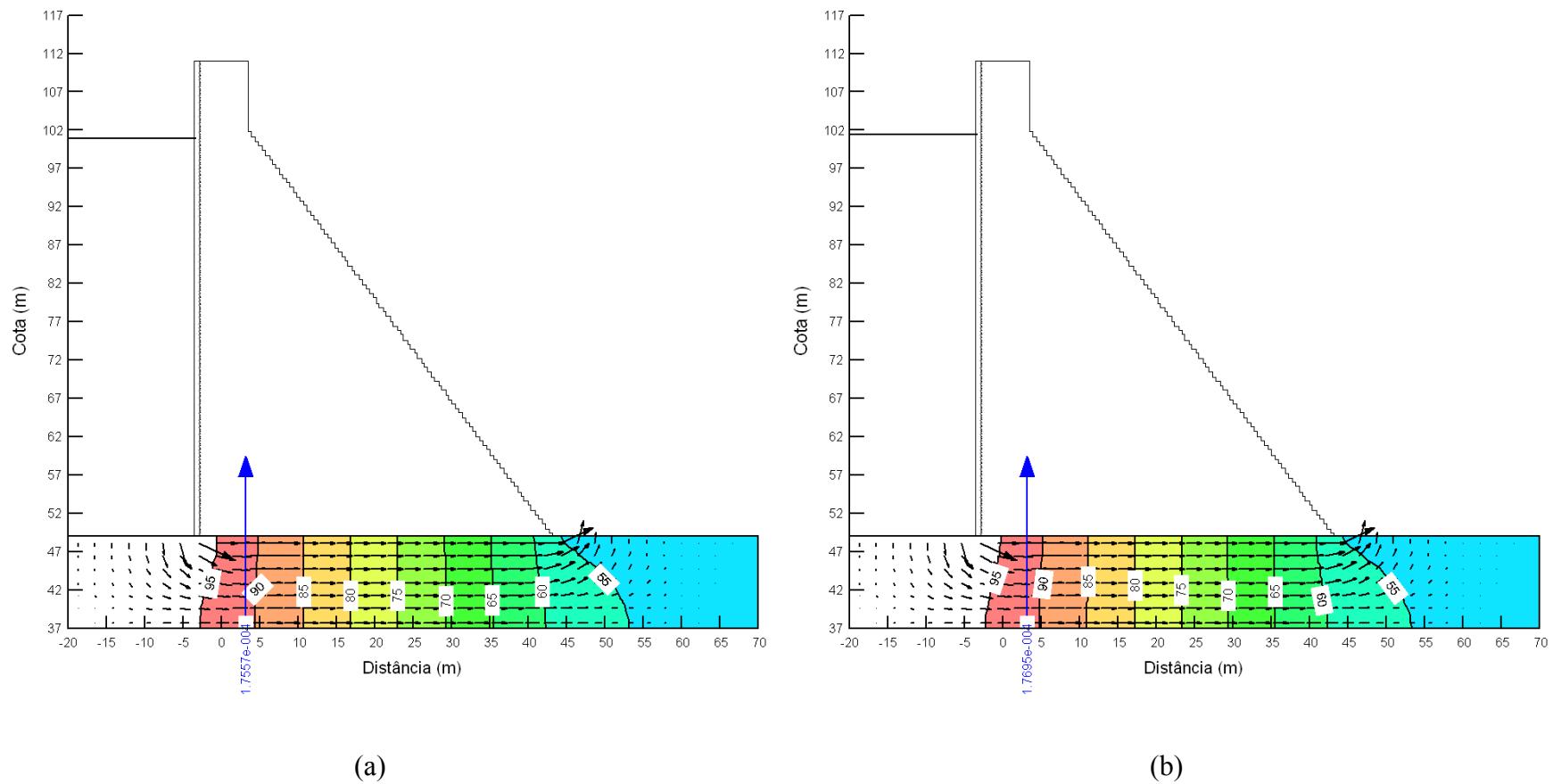


Figura B 77 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

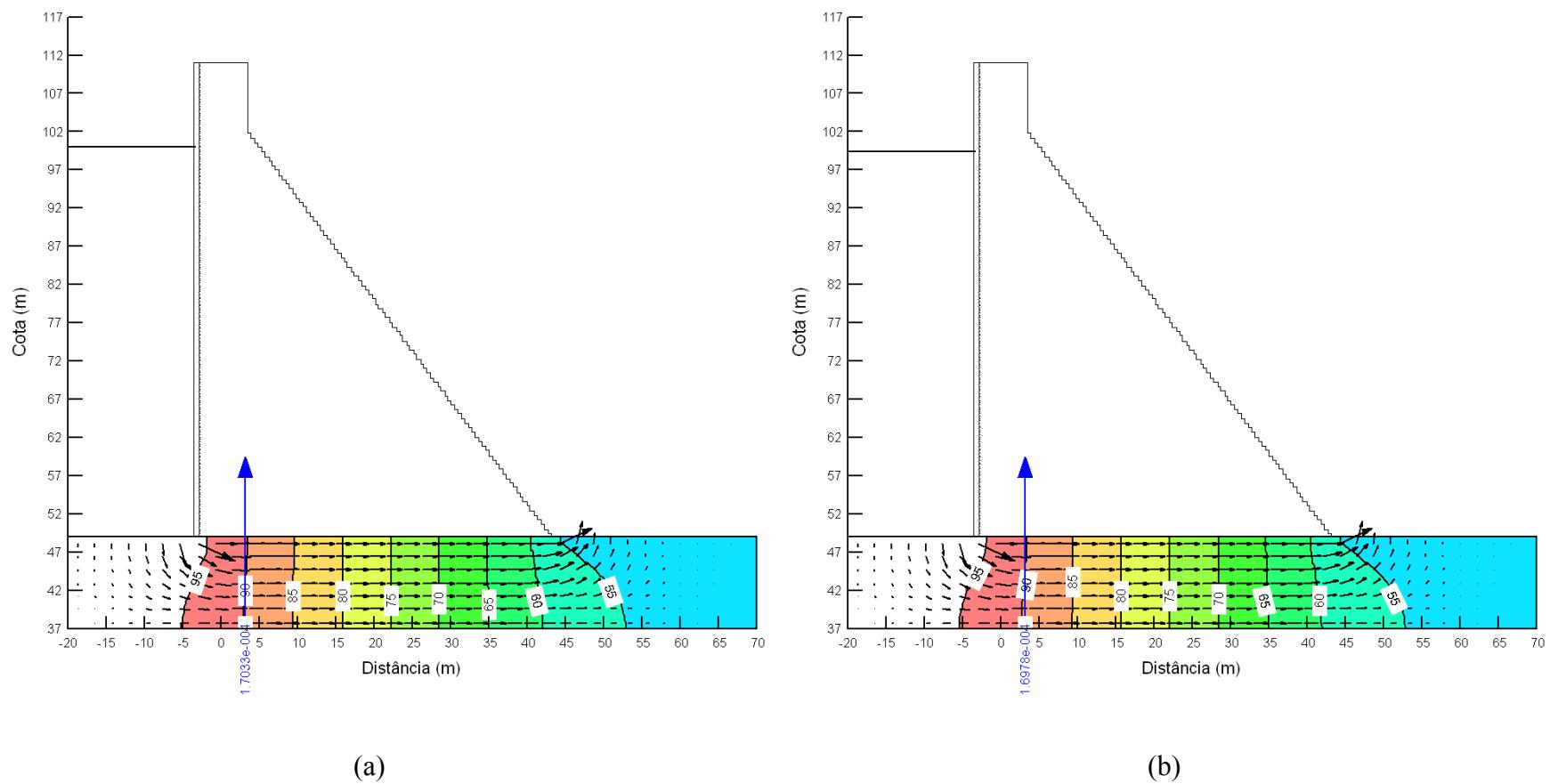


Figura B 78 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

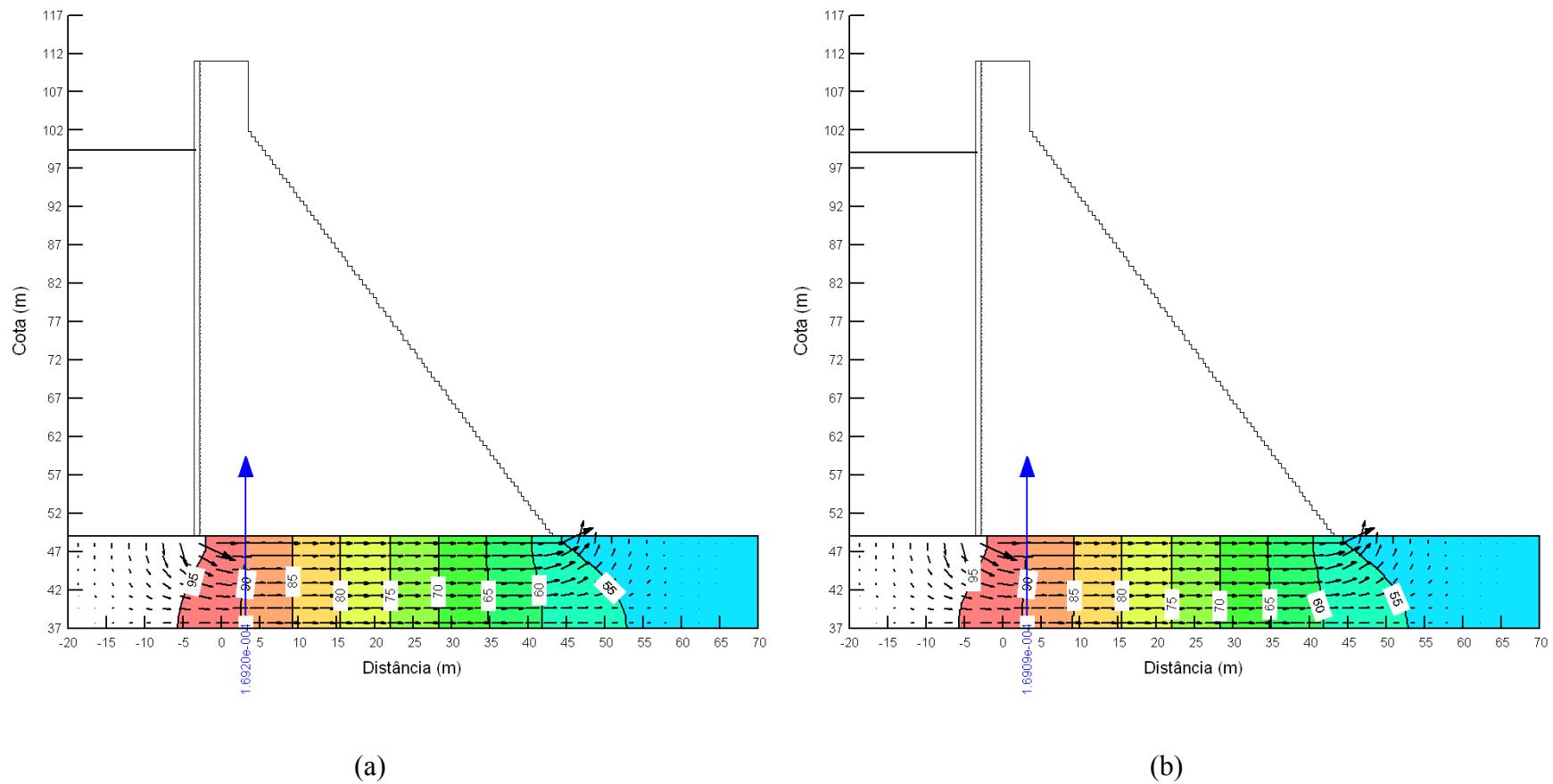


Figura B 79 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

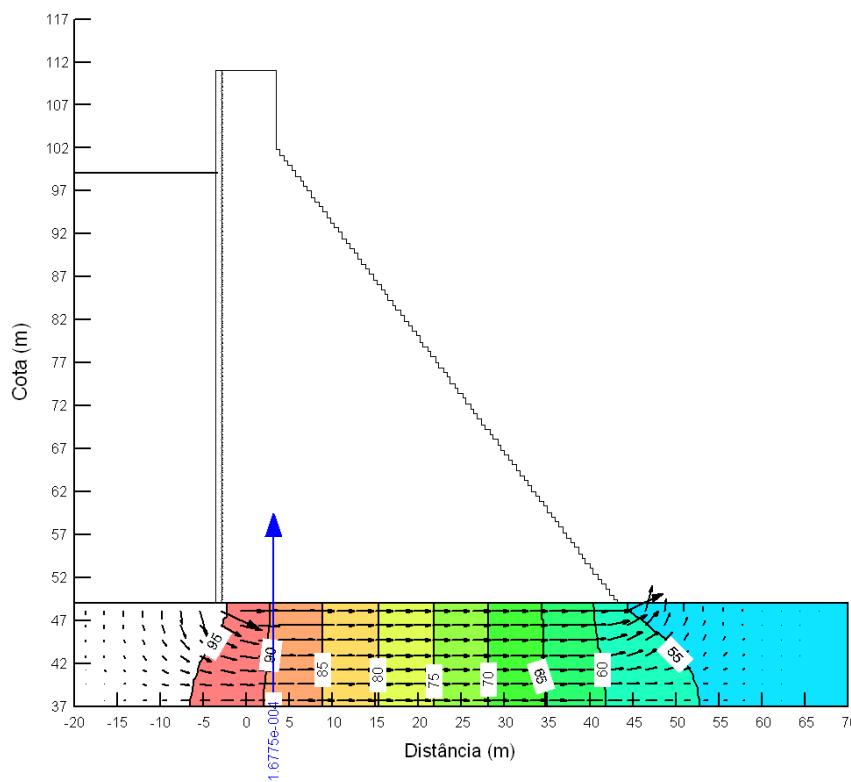


Figura B 80 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, setembro de 2005

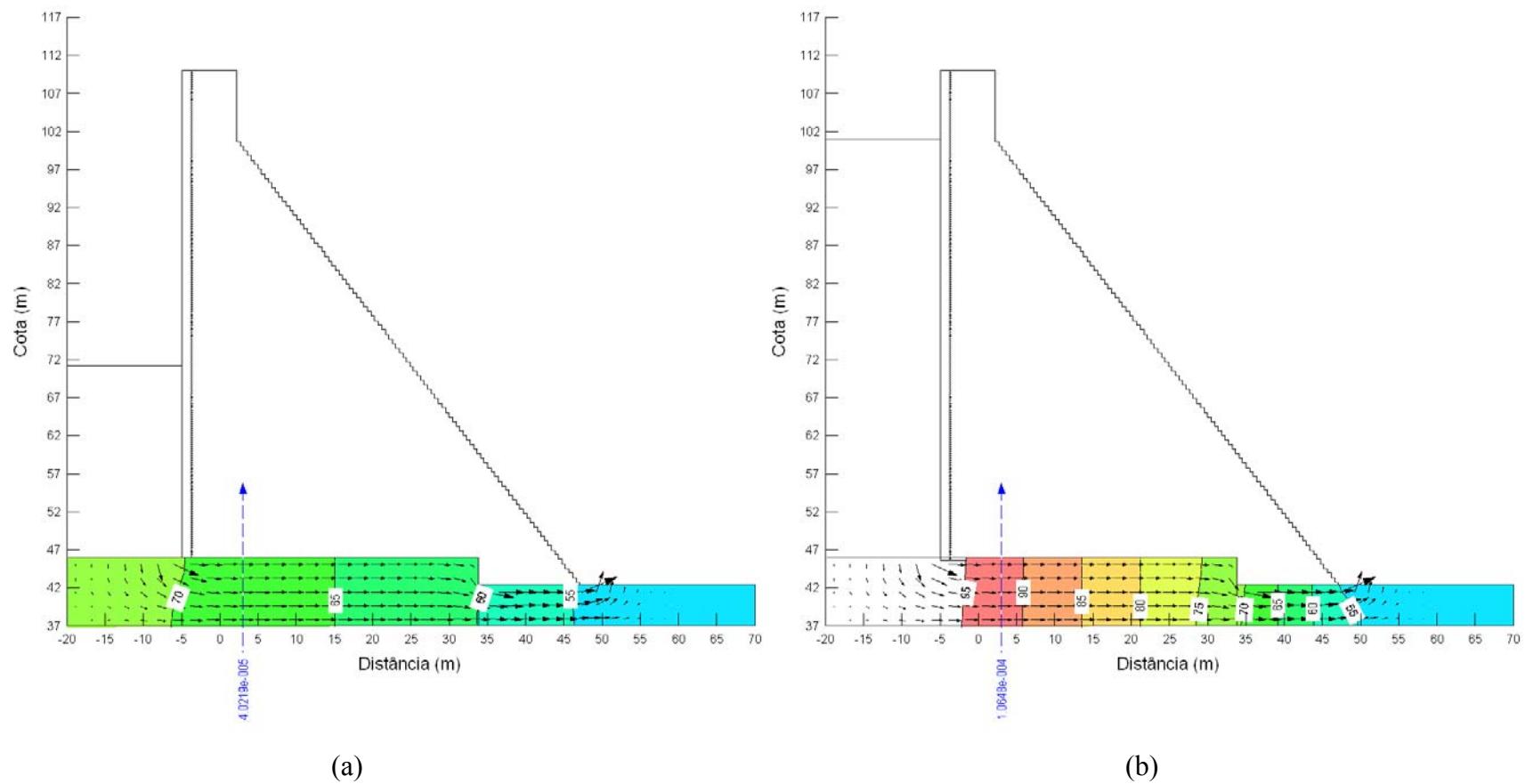


Figura B 81 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

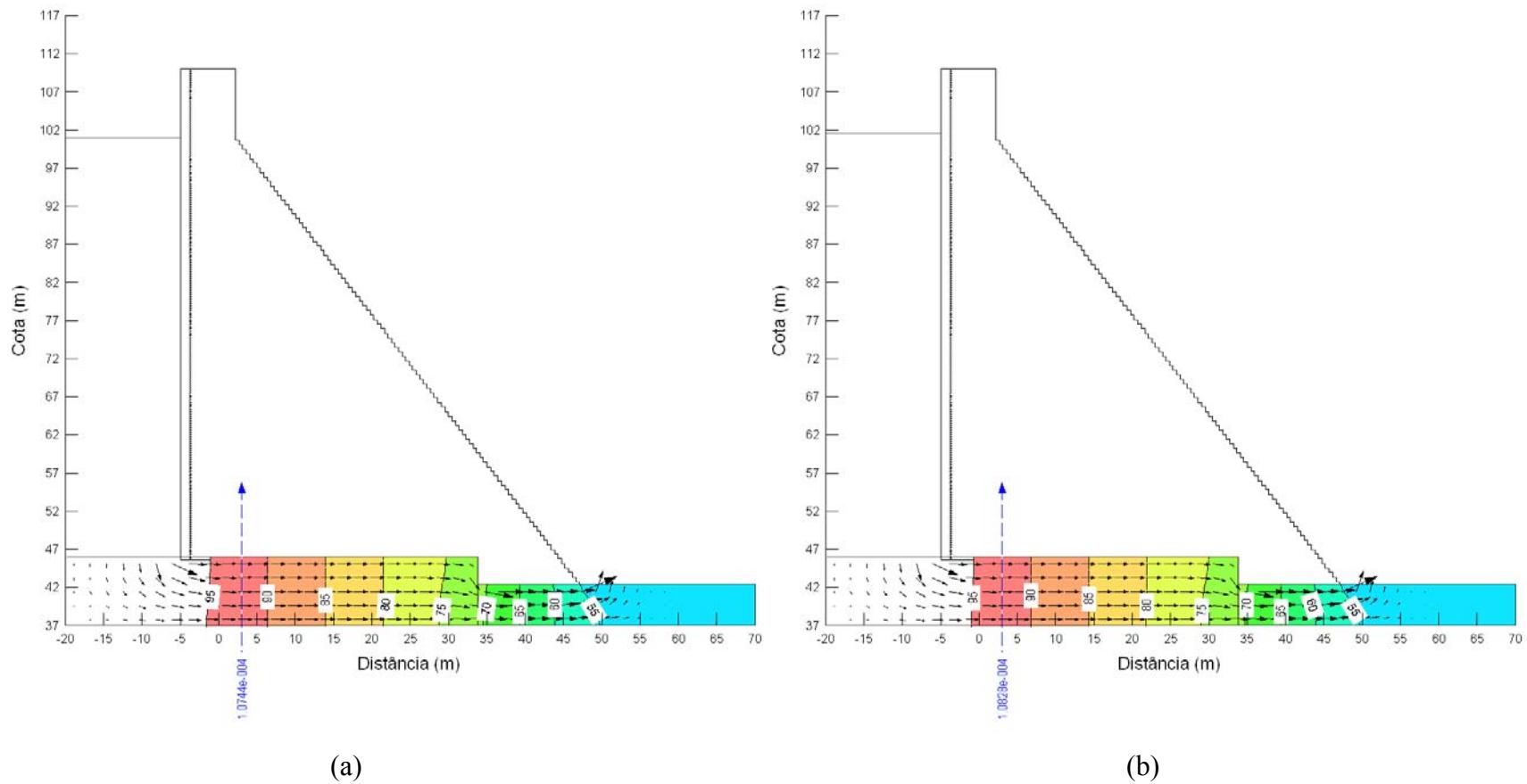


Figura B 82 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

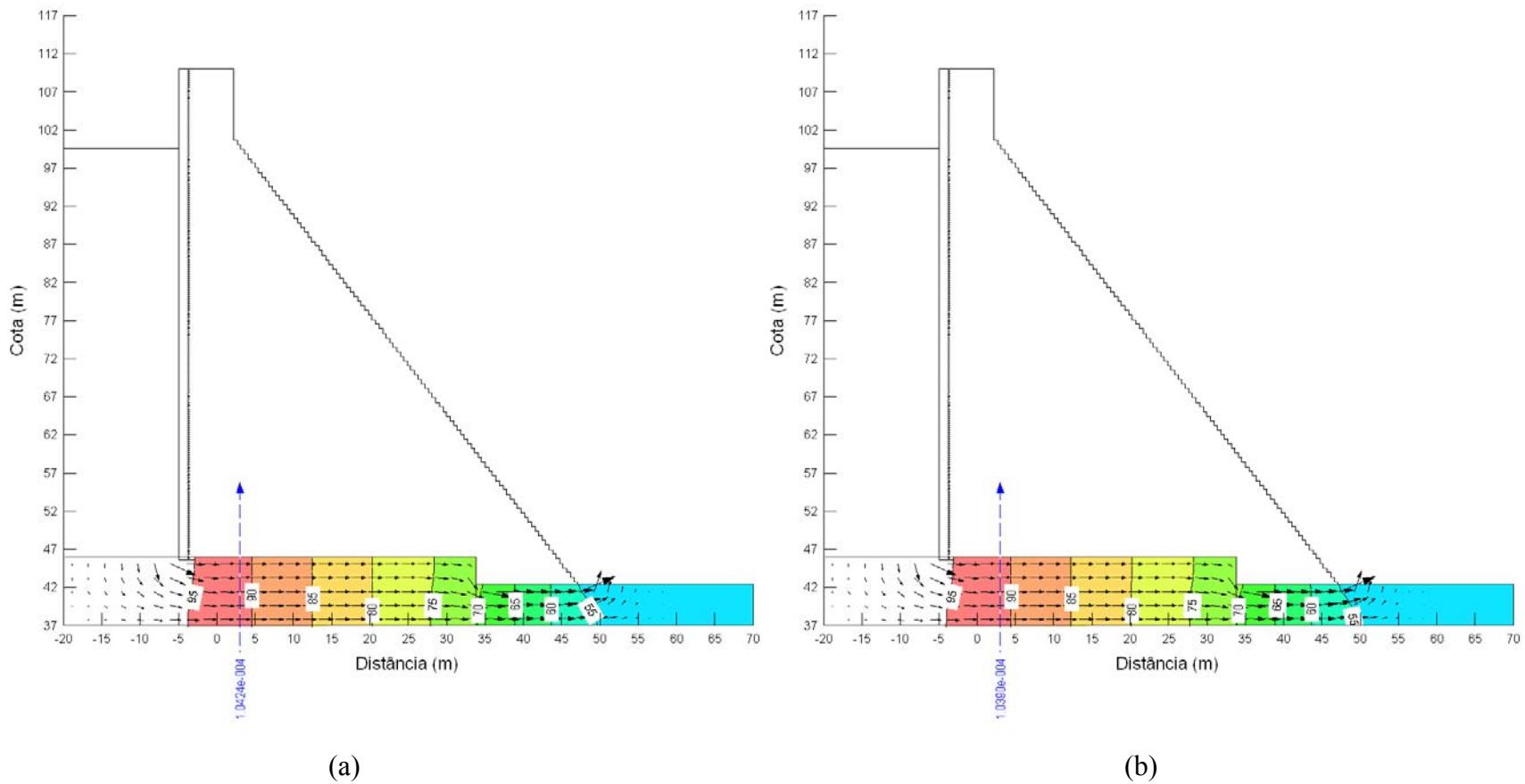


Figura B 83 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

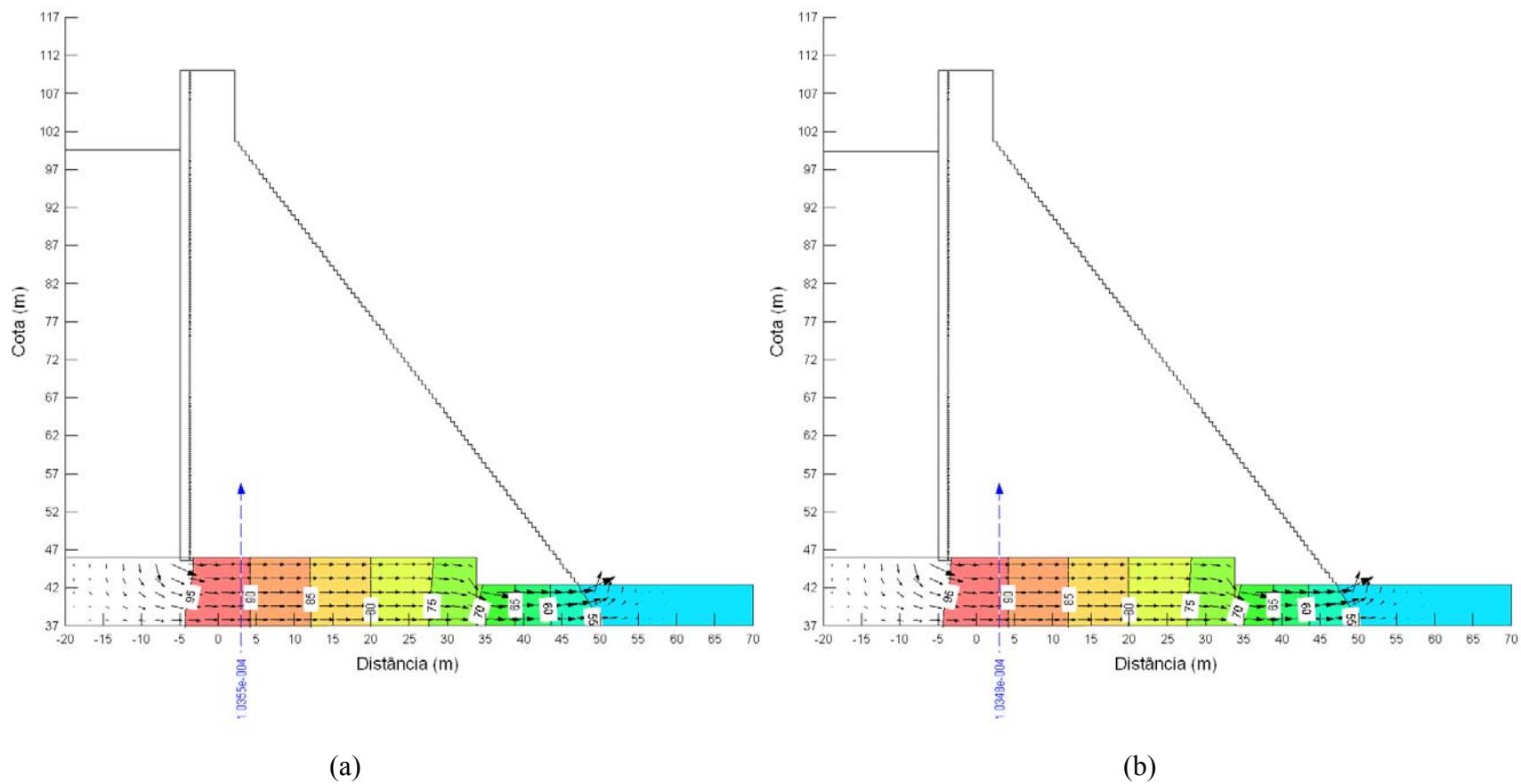


Figura B 84 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

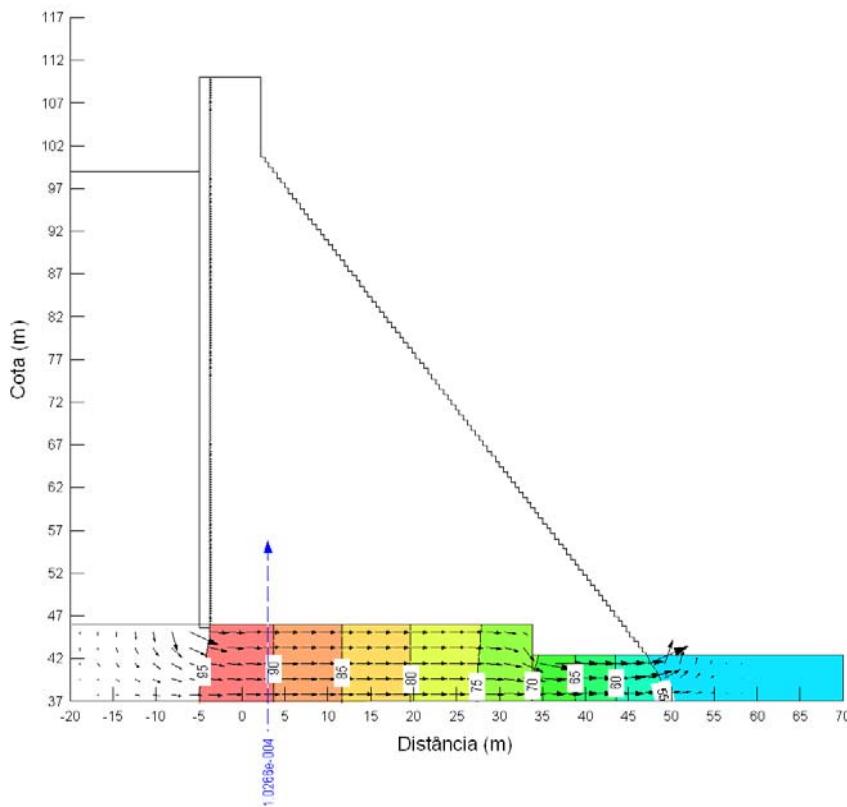


Figura B 85 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, setembro de 2005

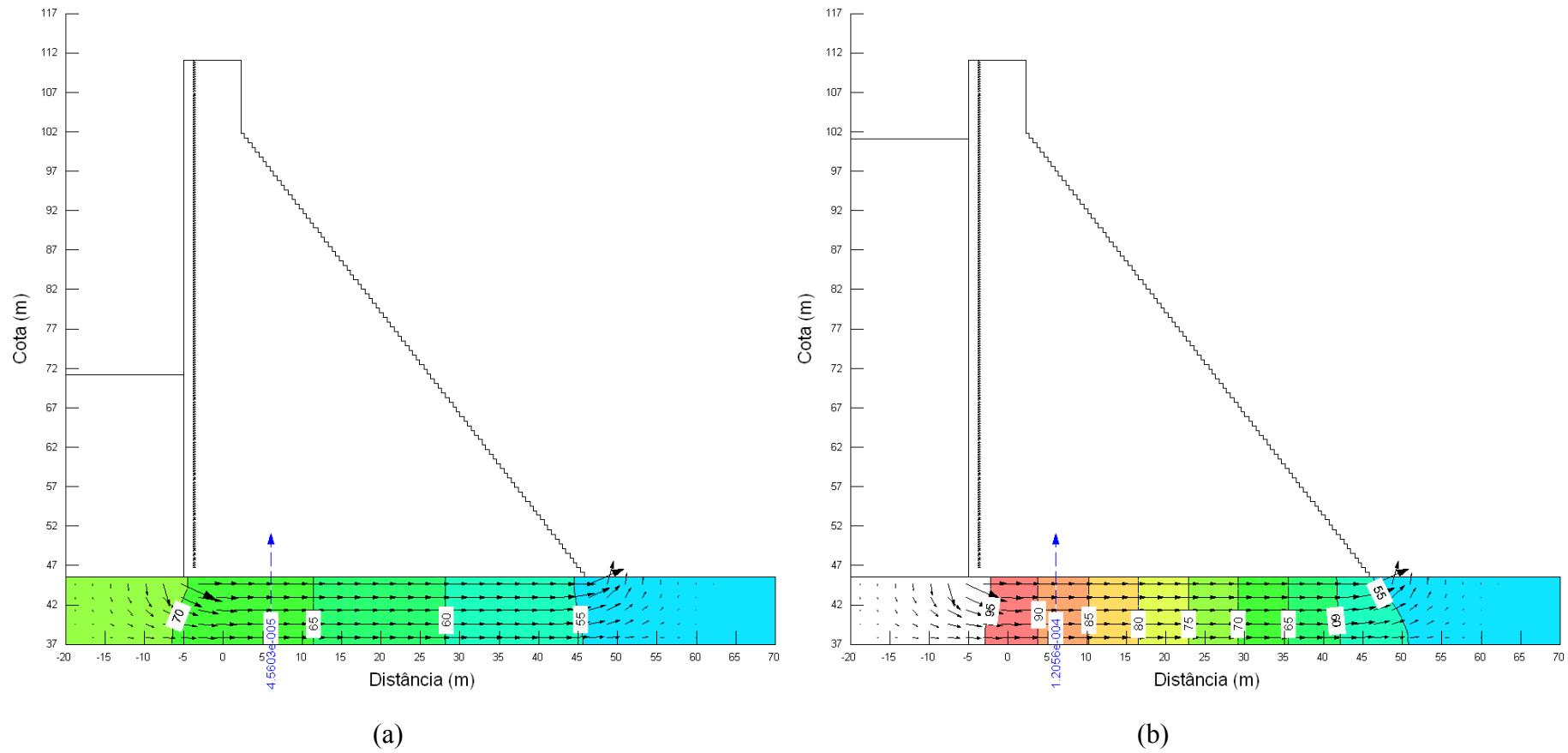


Figura B 86 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

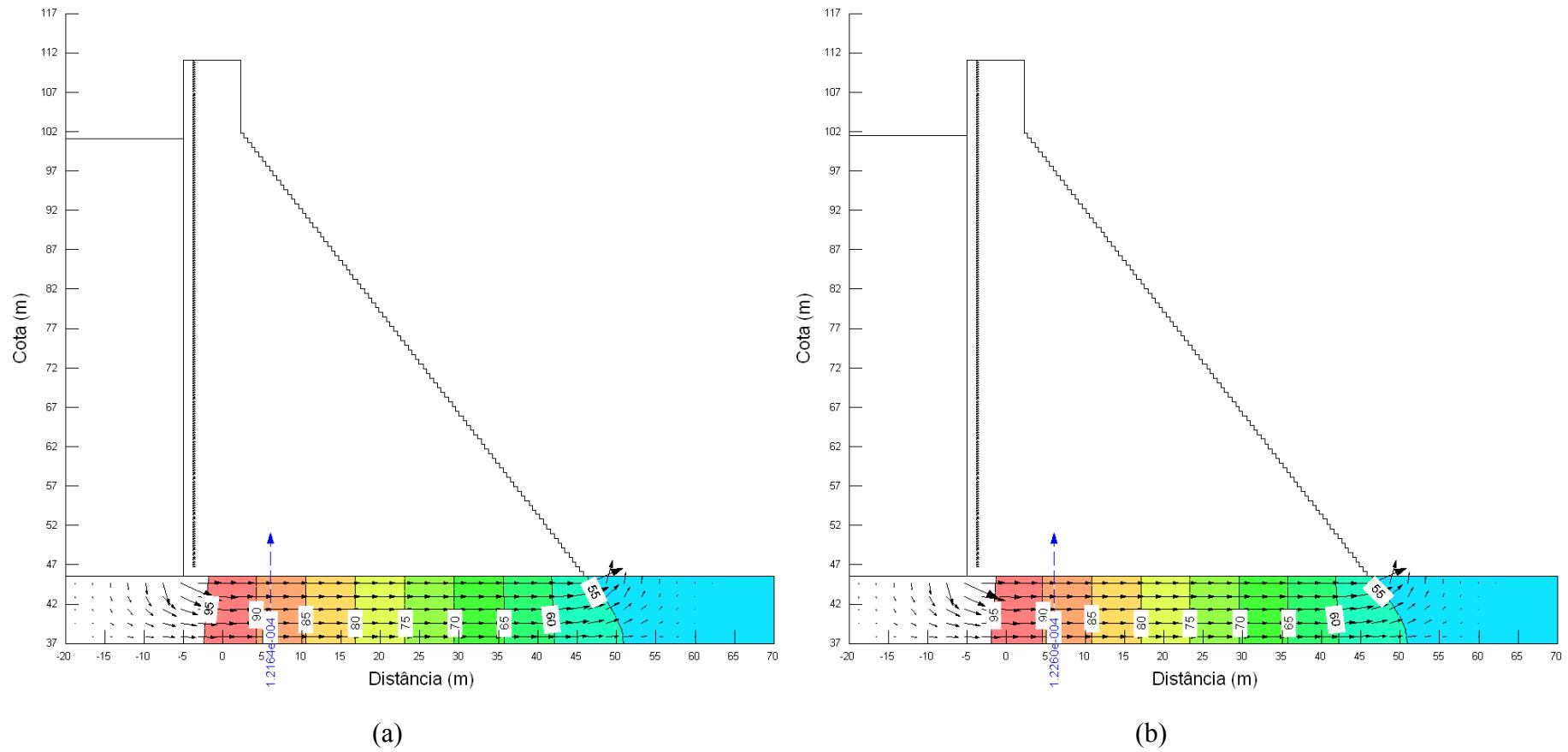


Figura B 87 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

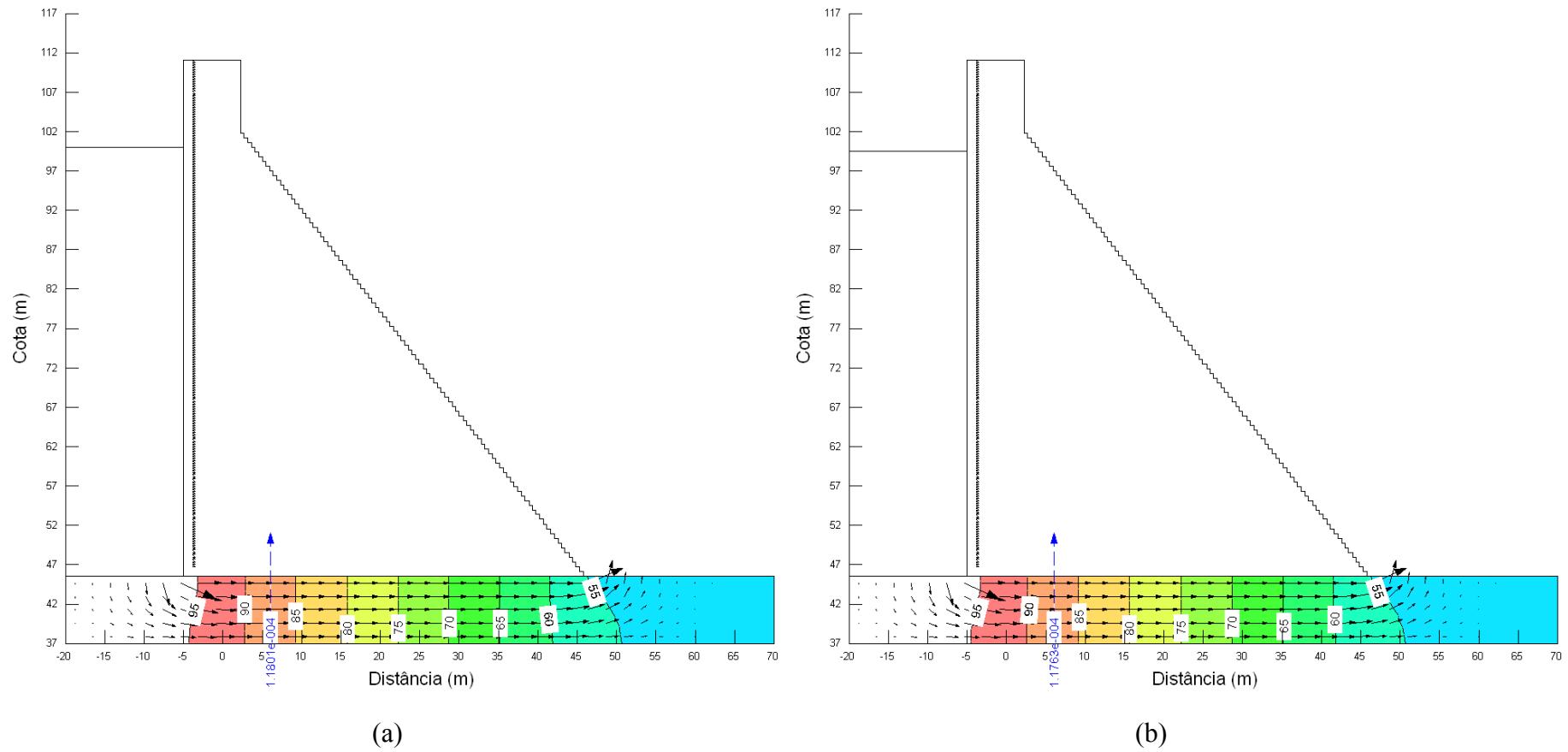


Figura B 88 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

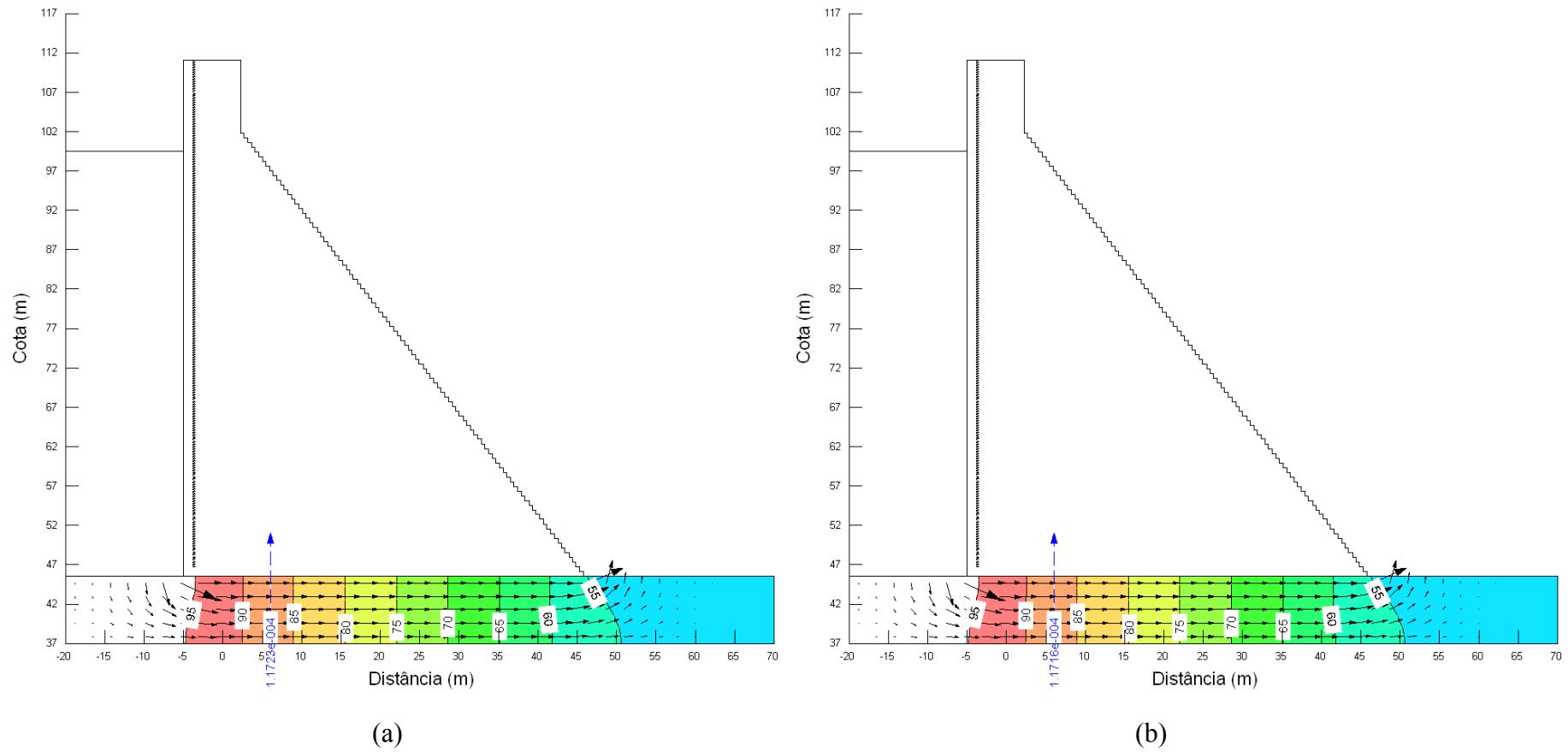


Figura B 89 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

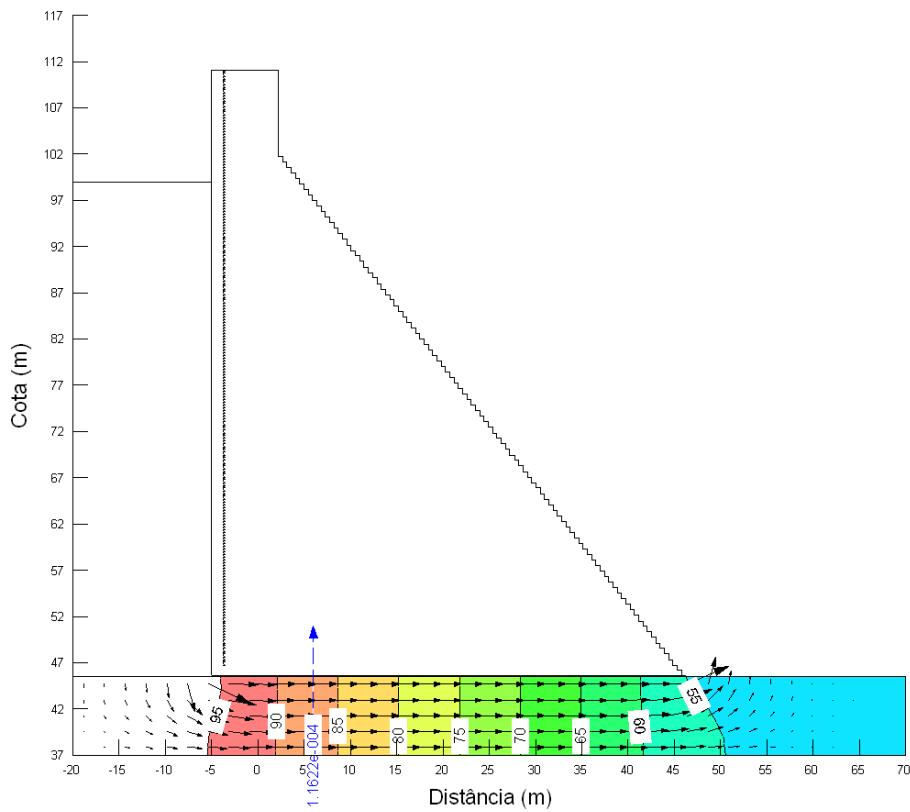


Figura B 90 – Terceiro cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, setembro de 2005

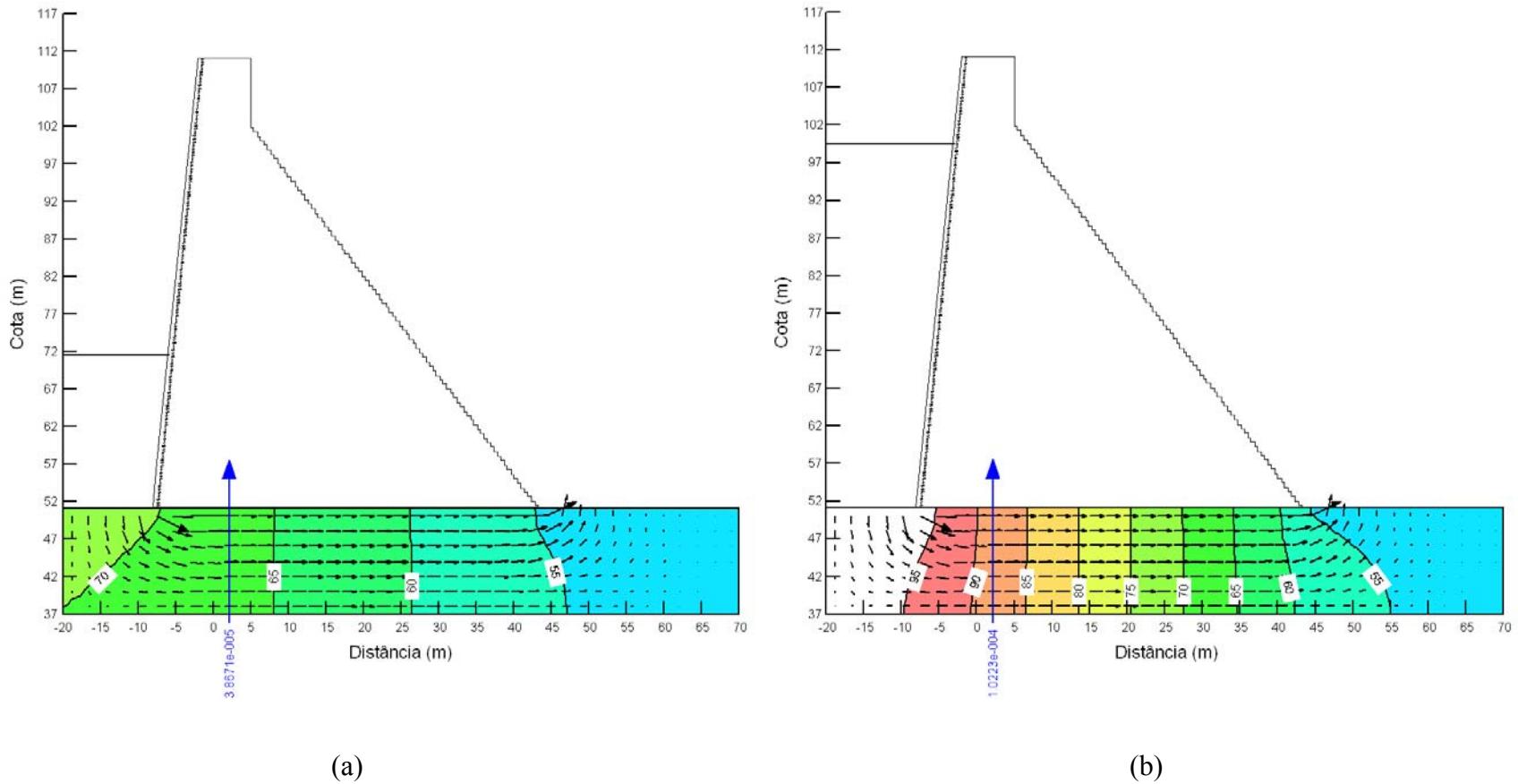


Figura B 91 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

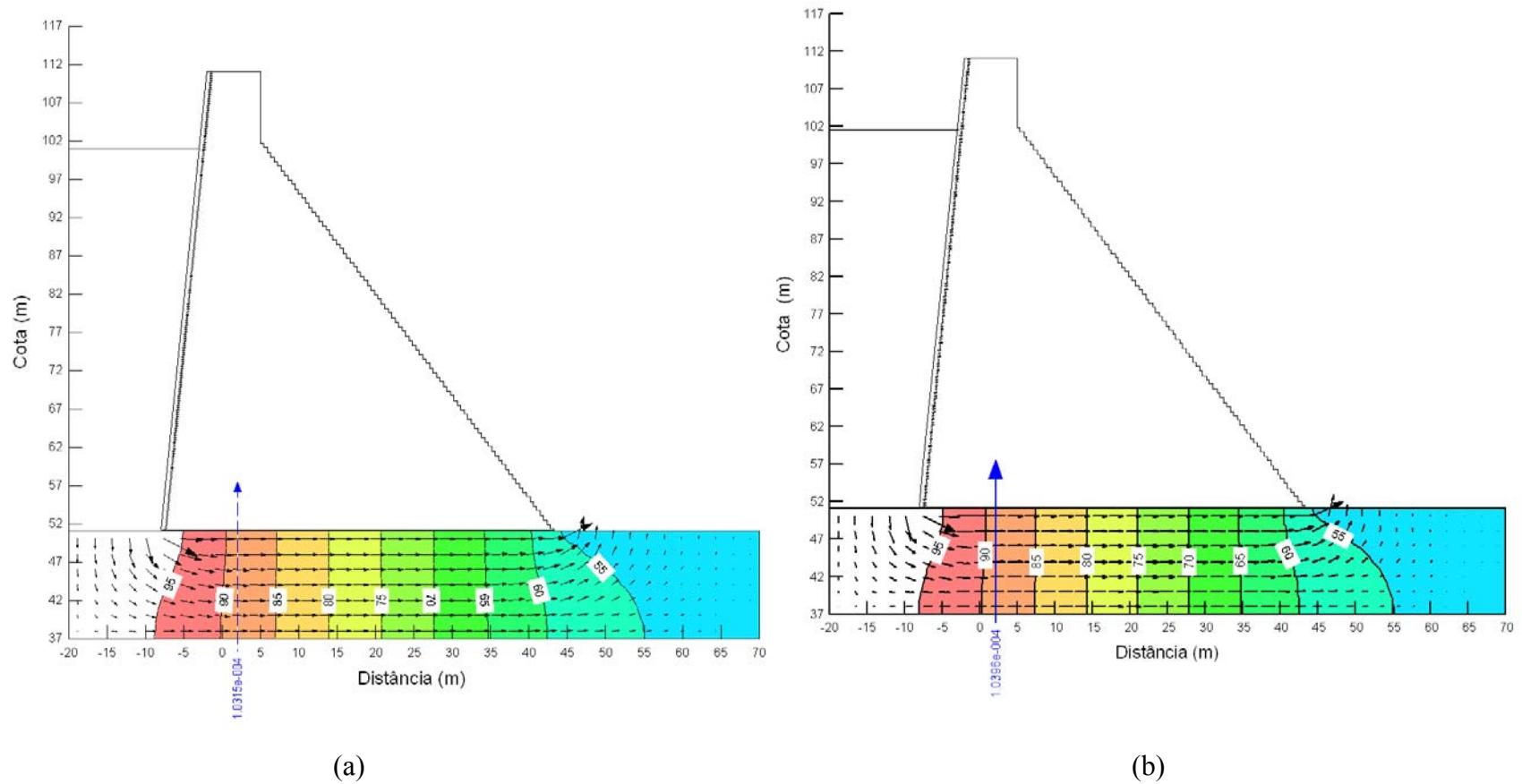


Figura 92 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

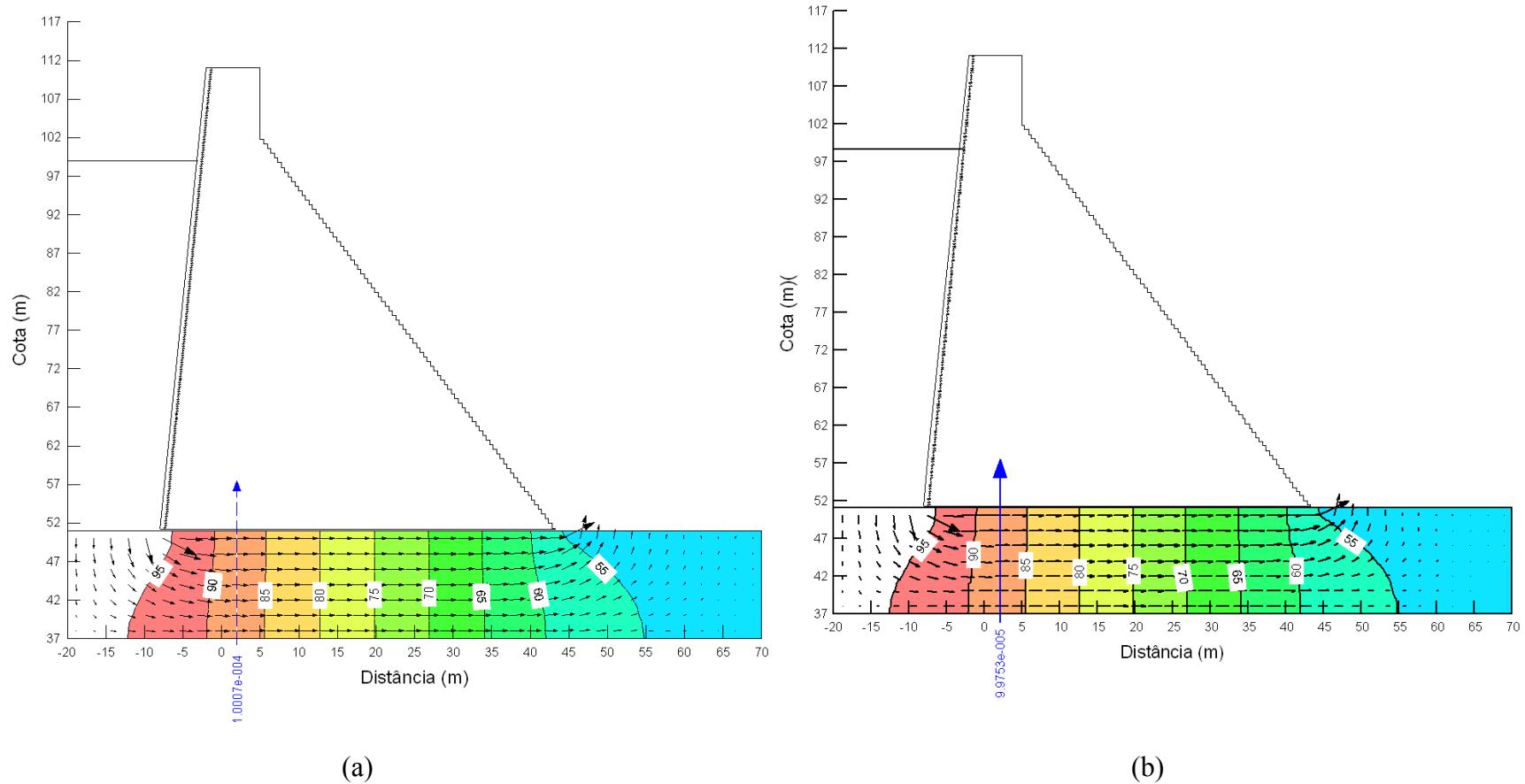


Figura B 93 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

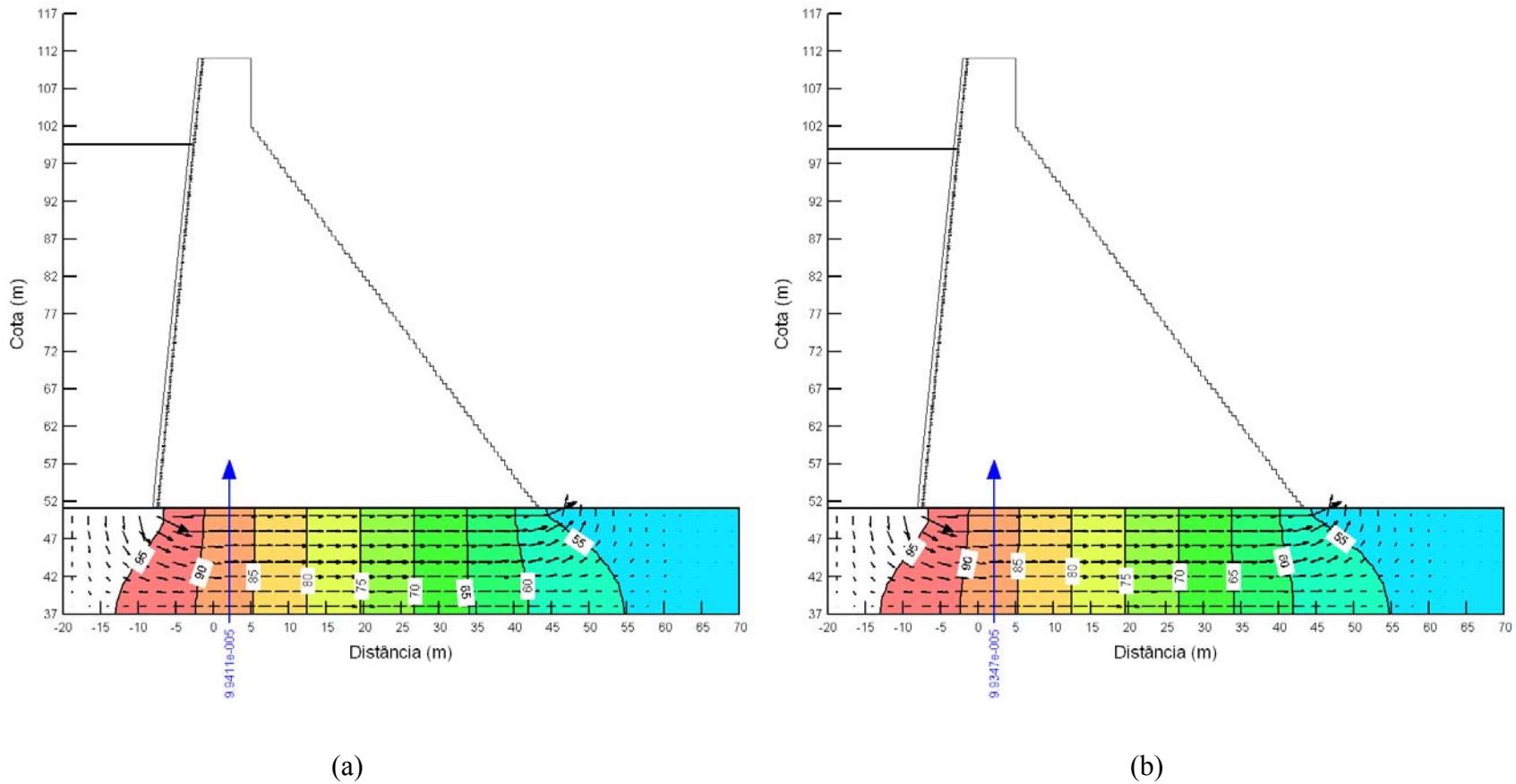


Figura B 94 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

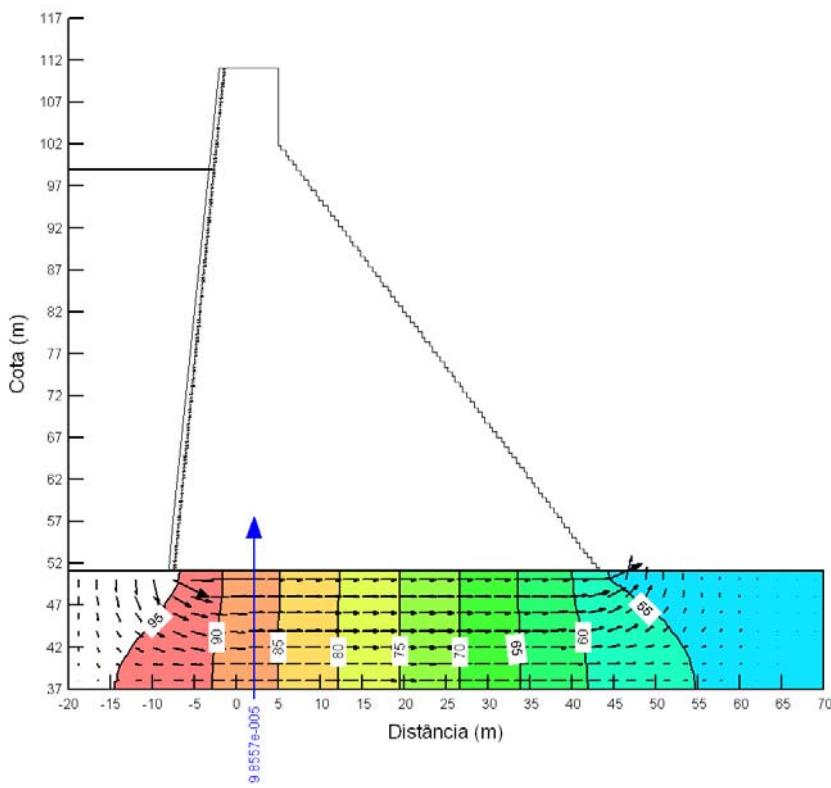


Figura B 95 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, setembro de 2005

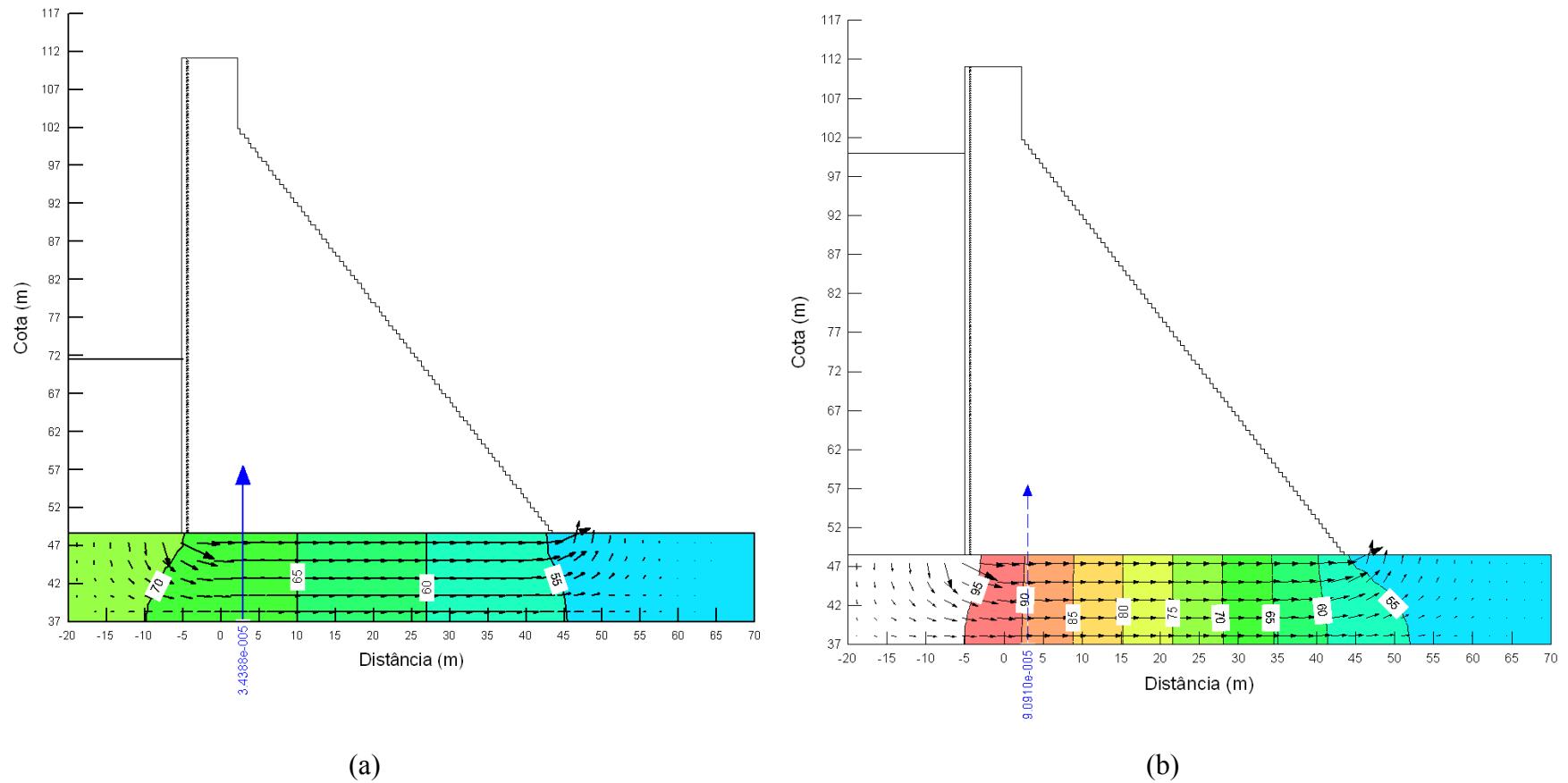


Figura B 96 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

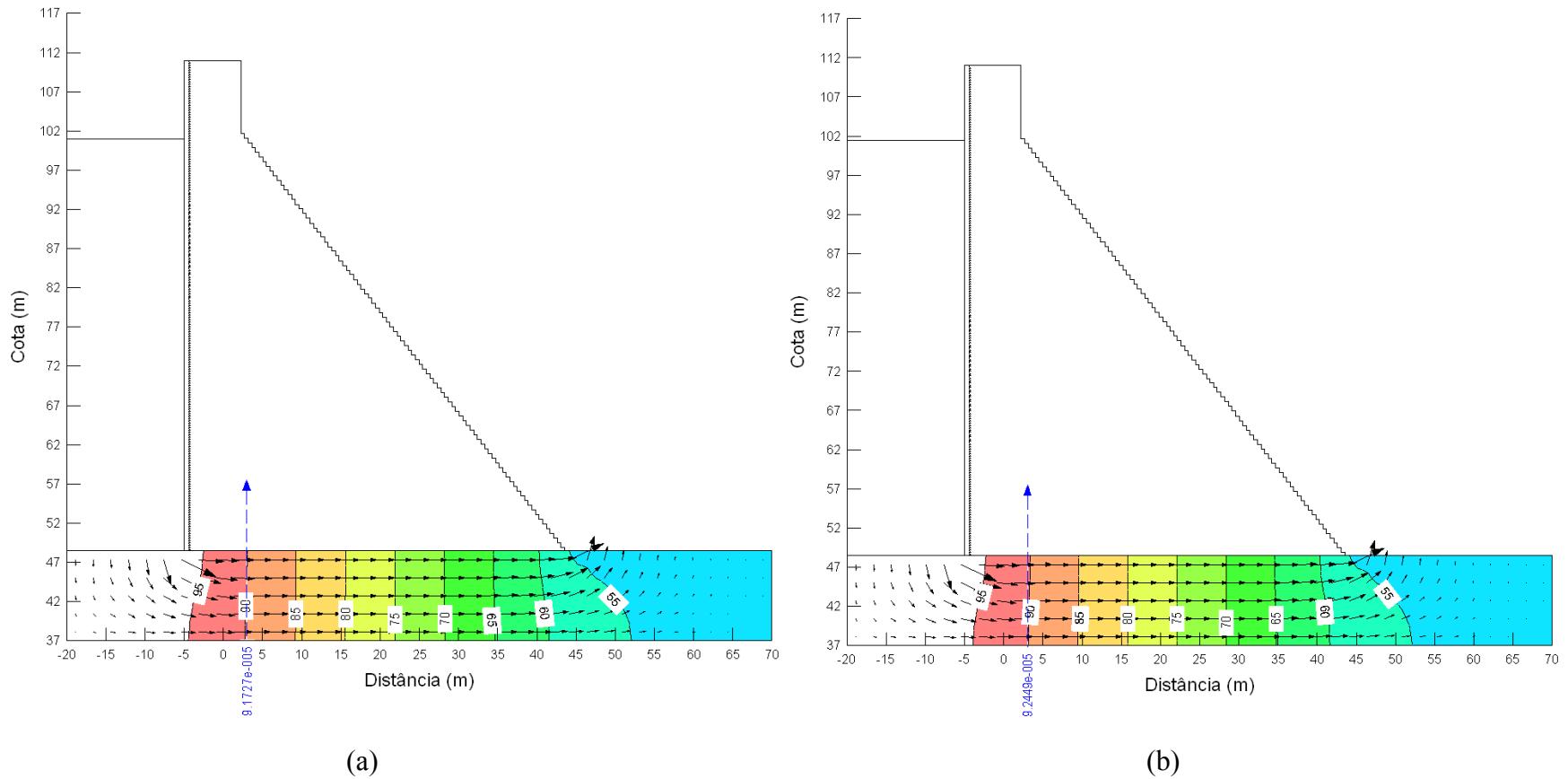


Figura B 97 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

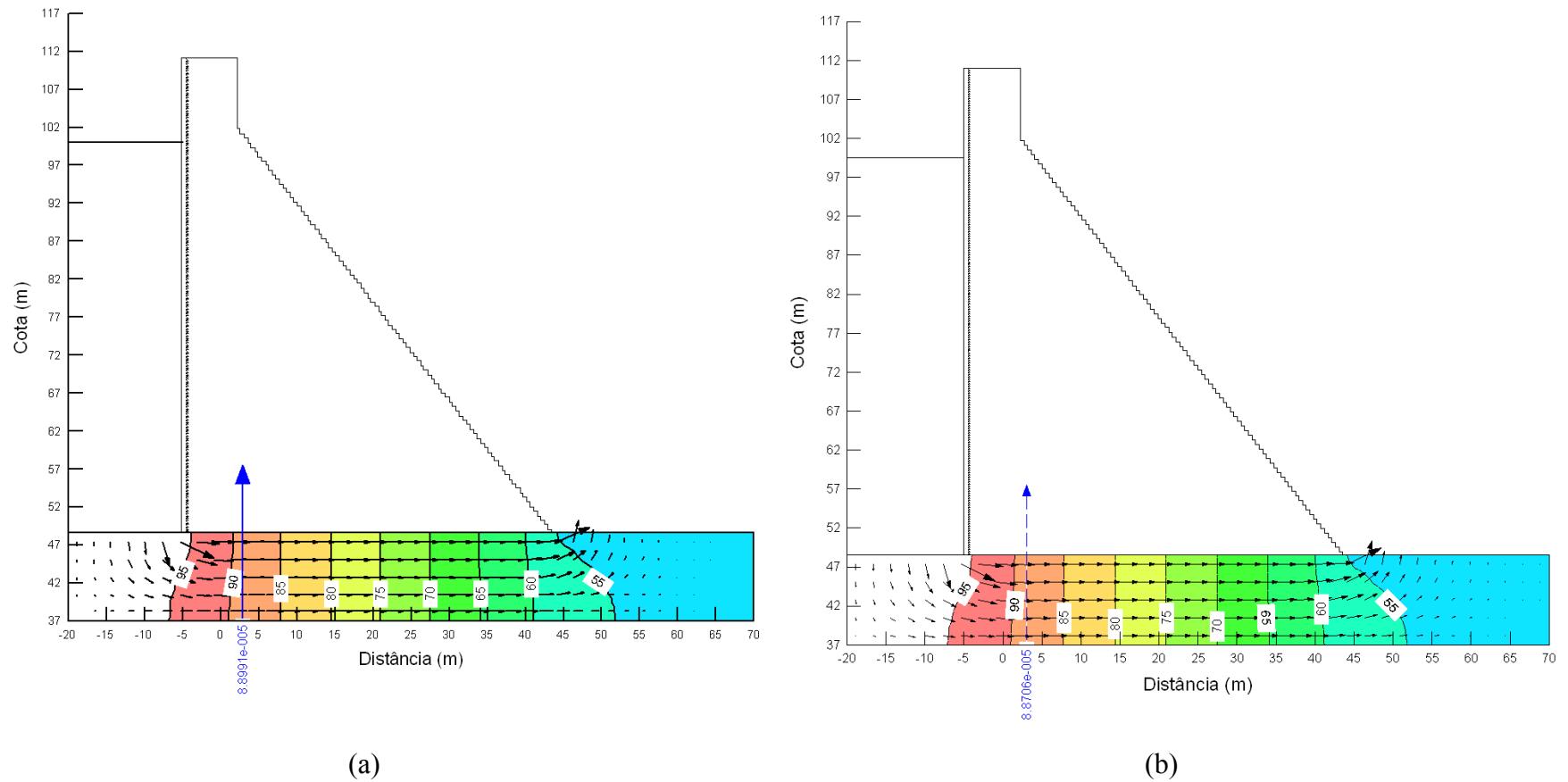


Figura B 98 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

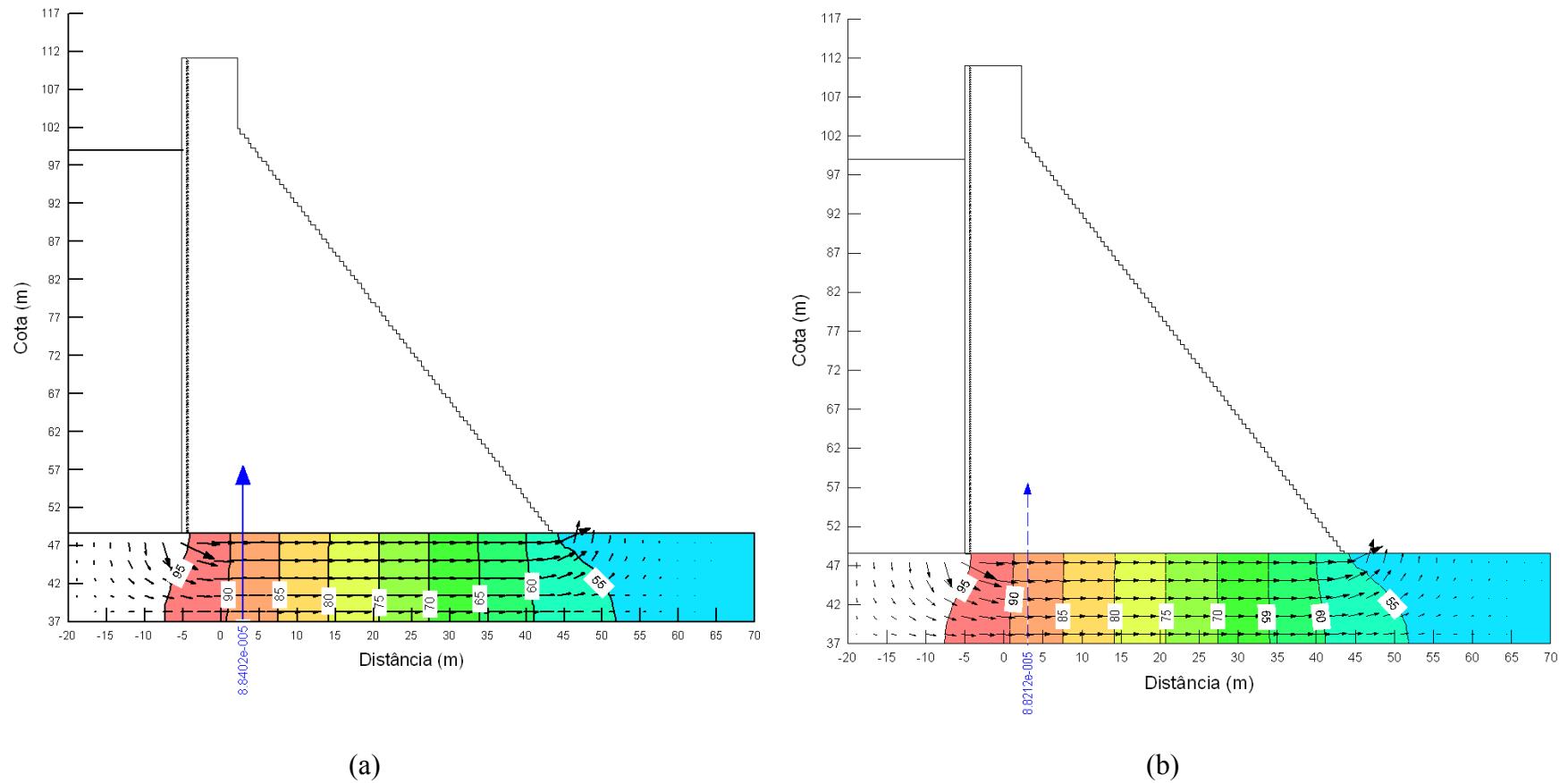


Figura B 99 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

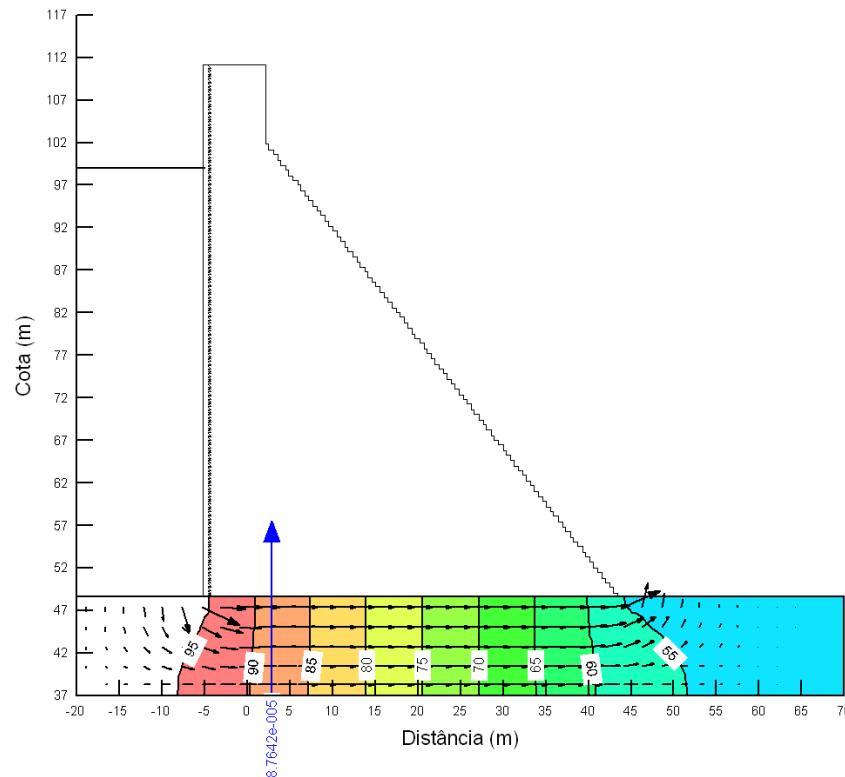


Figura B 100 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, setembro de 2005

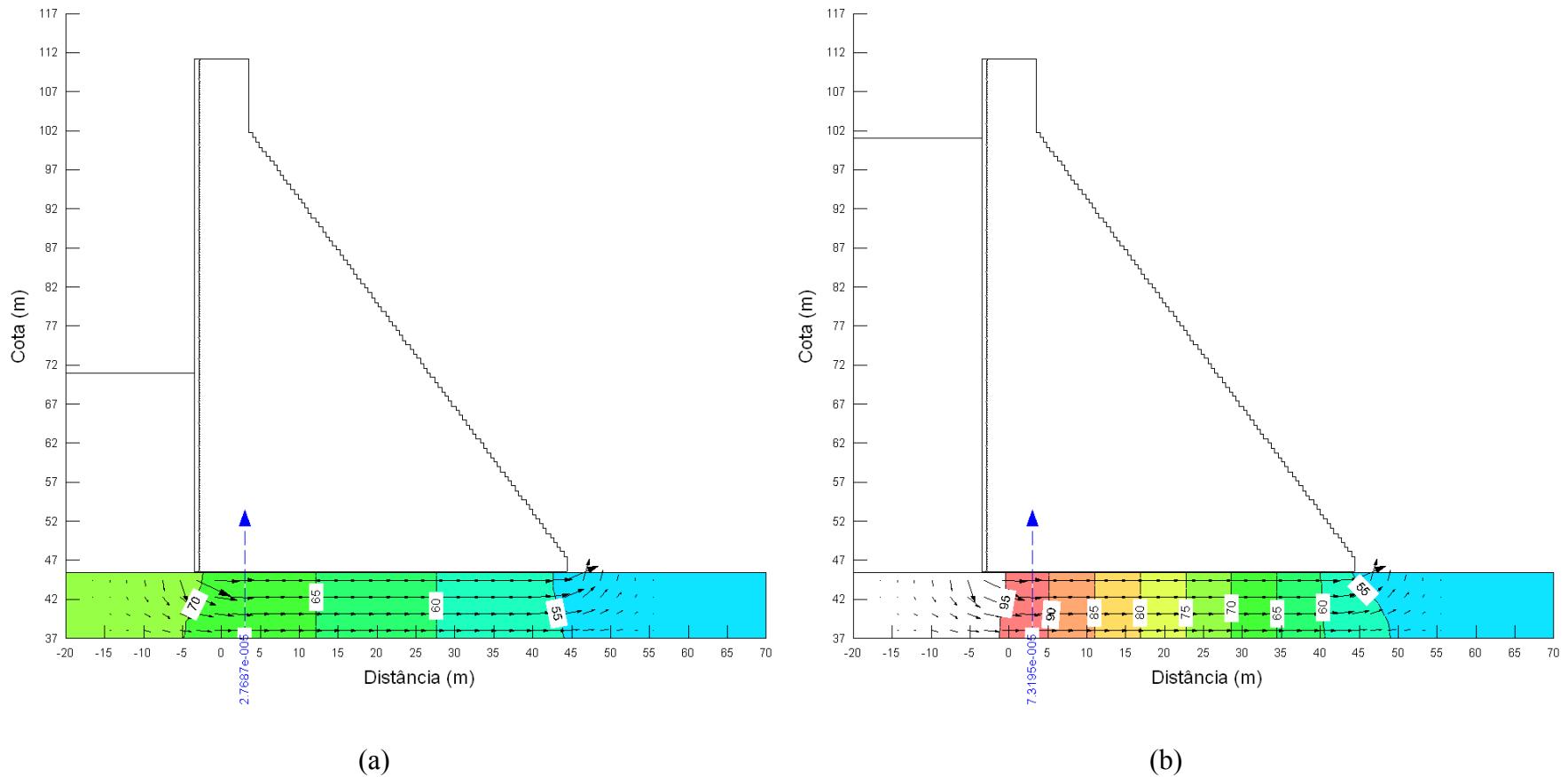


Figura B 101 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

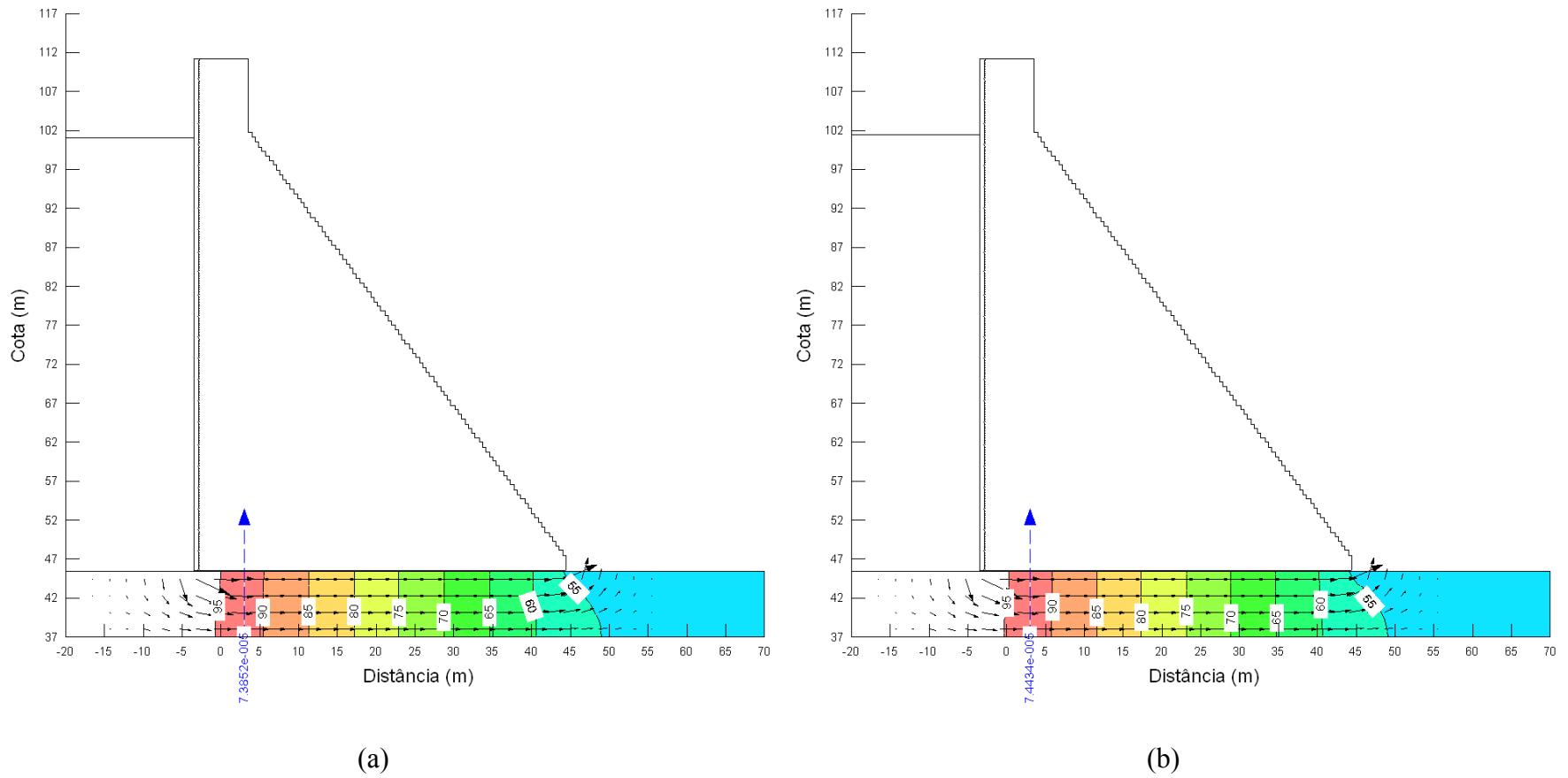


Figura B 102 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

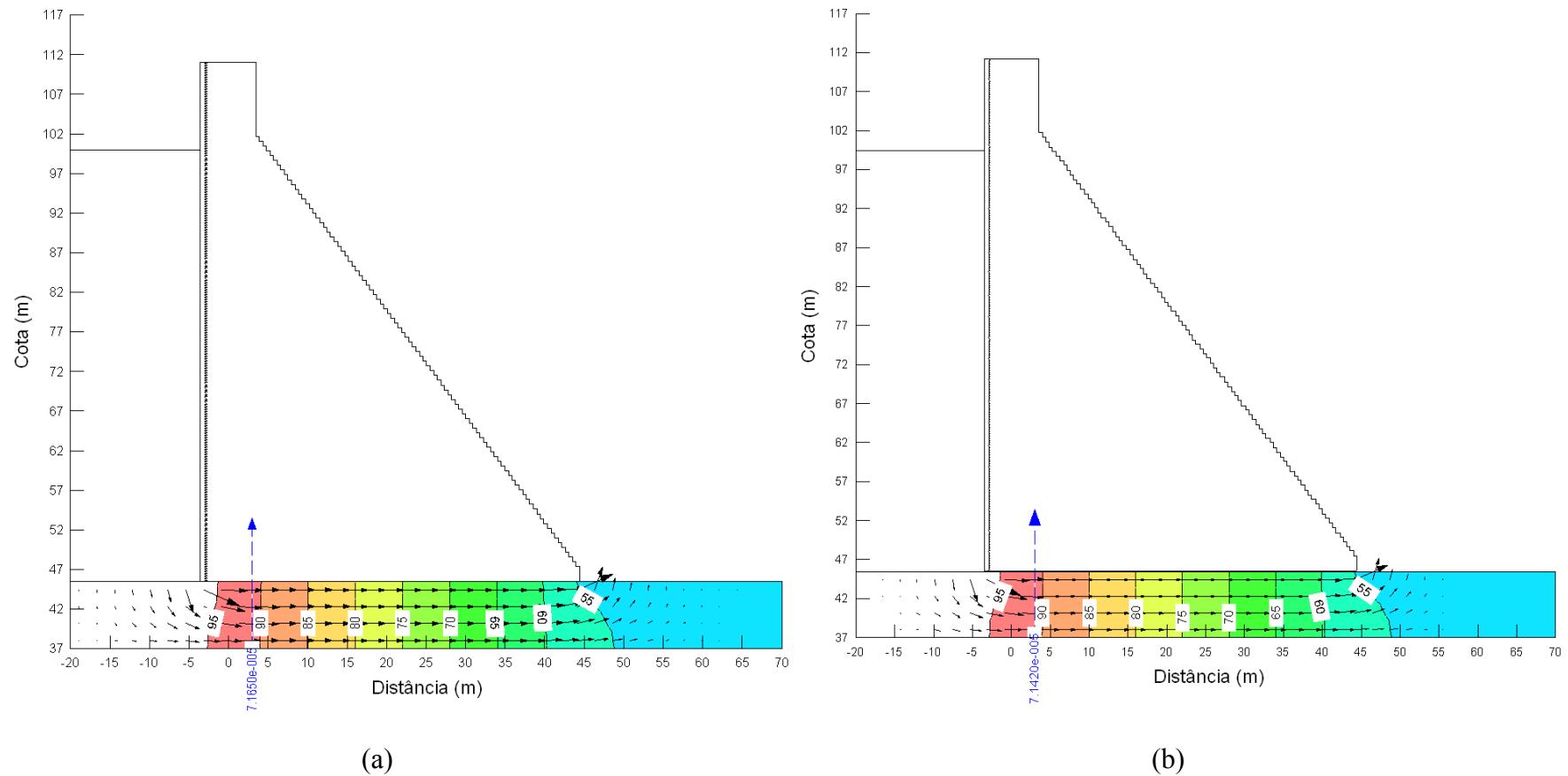


Figura B 103 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

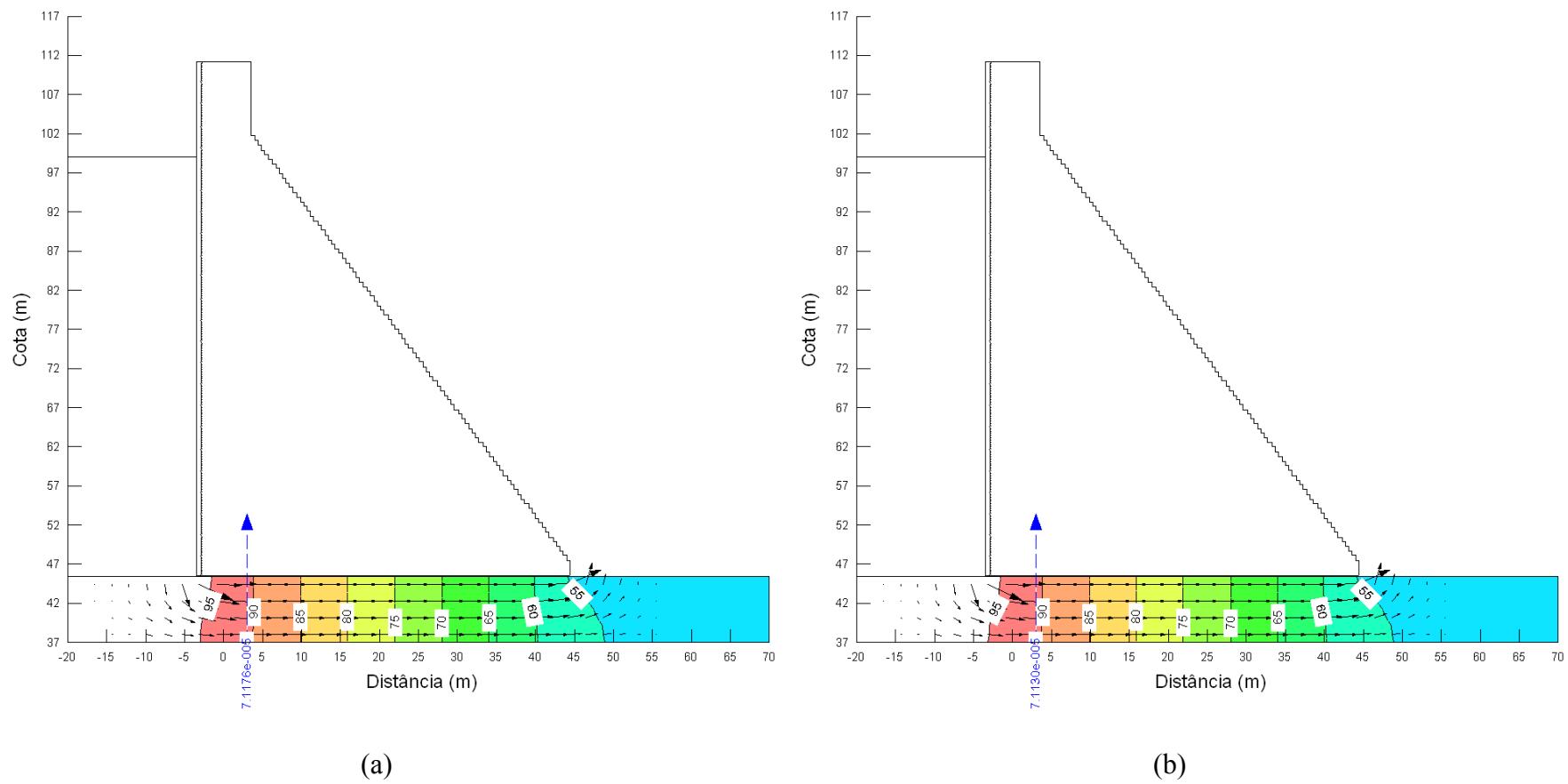


Figura B 104 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

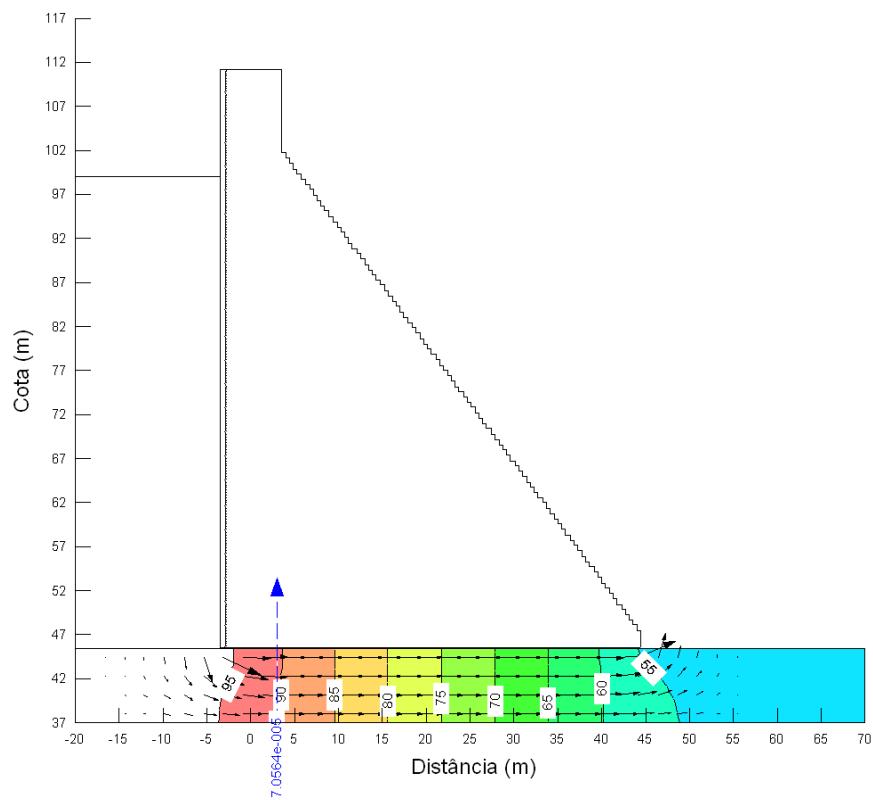


Figura B 105 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, setembro de 2005

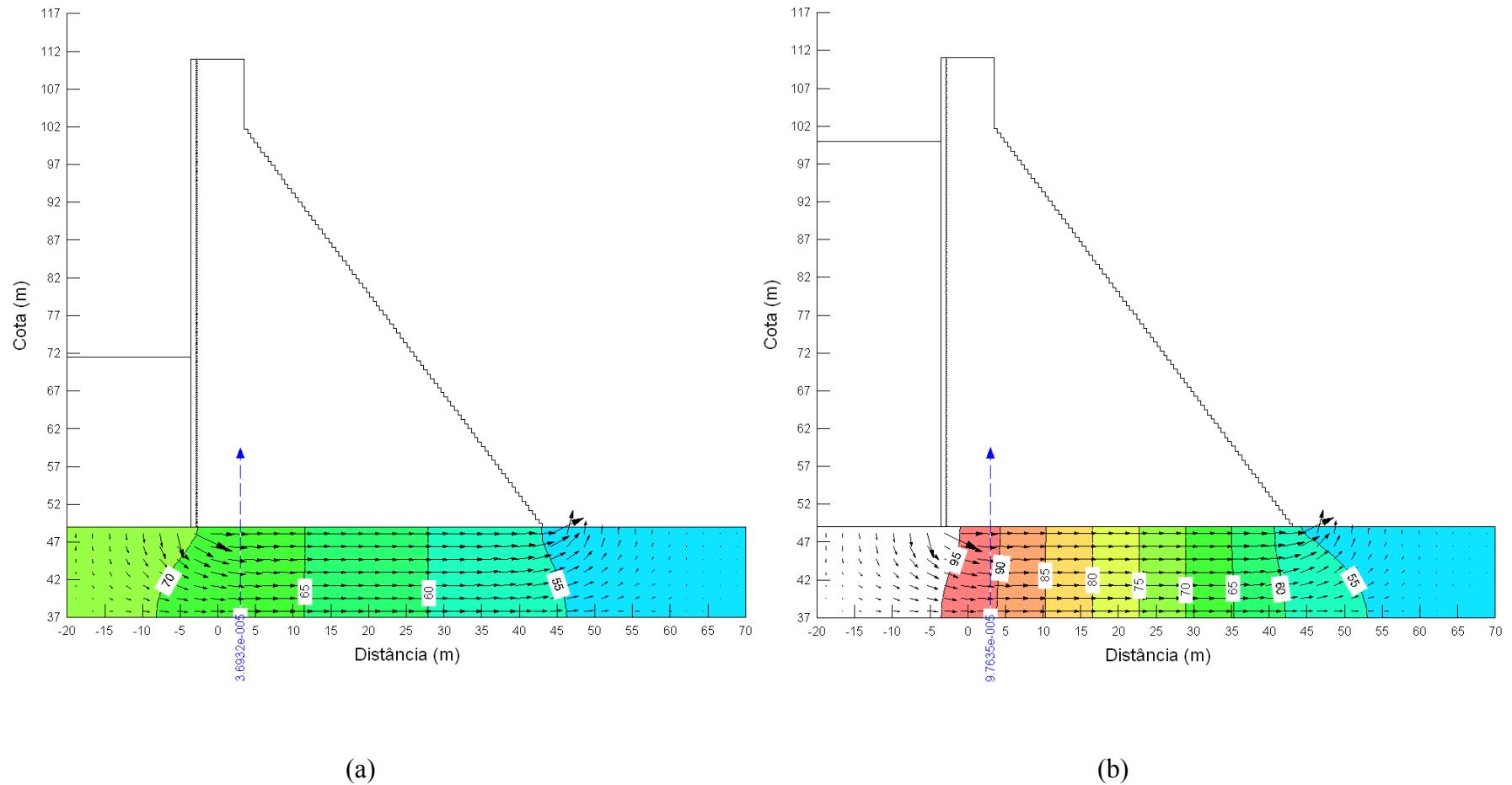


Figura B 106 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

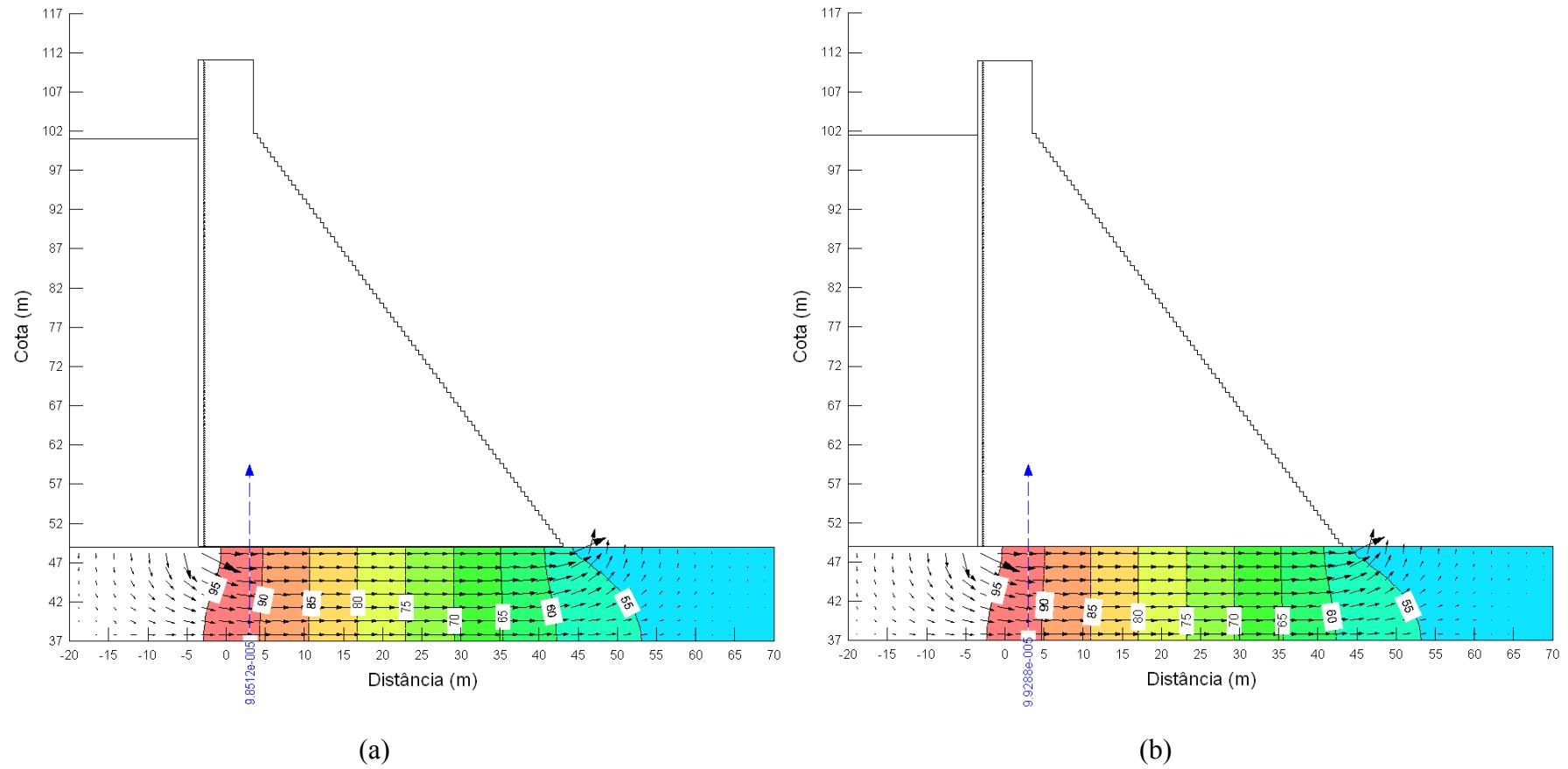


Figura B 107 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

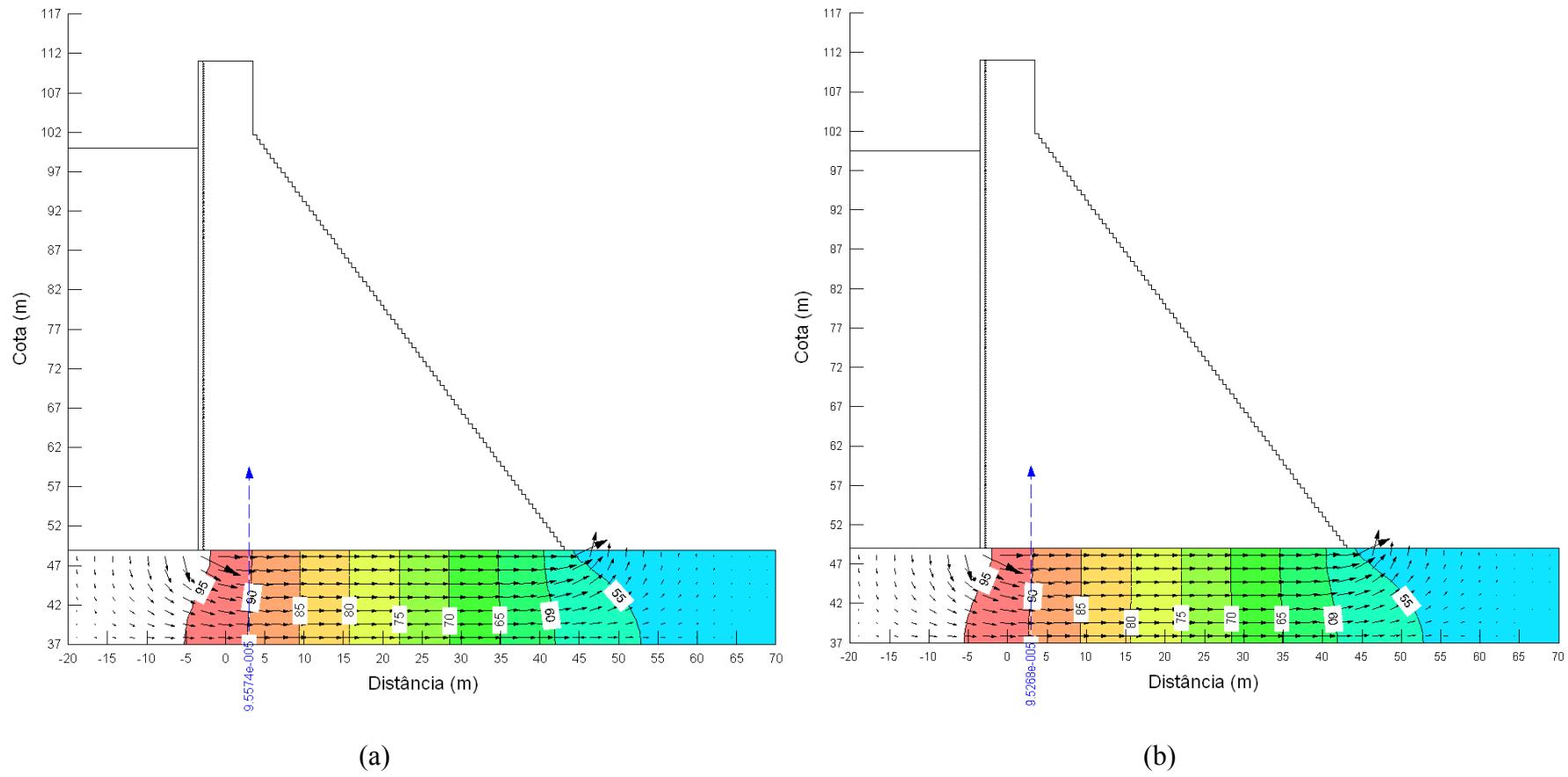


Figura B 108 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

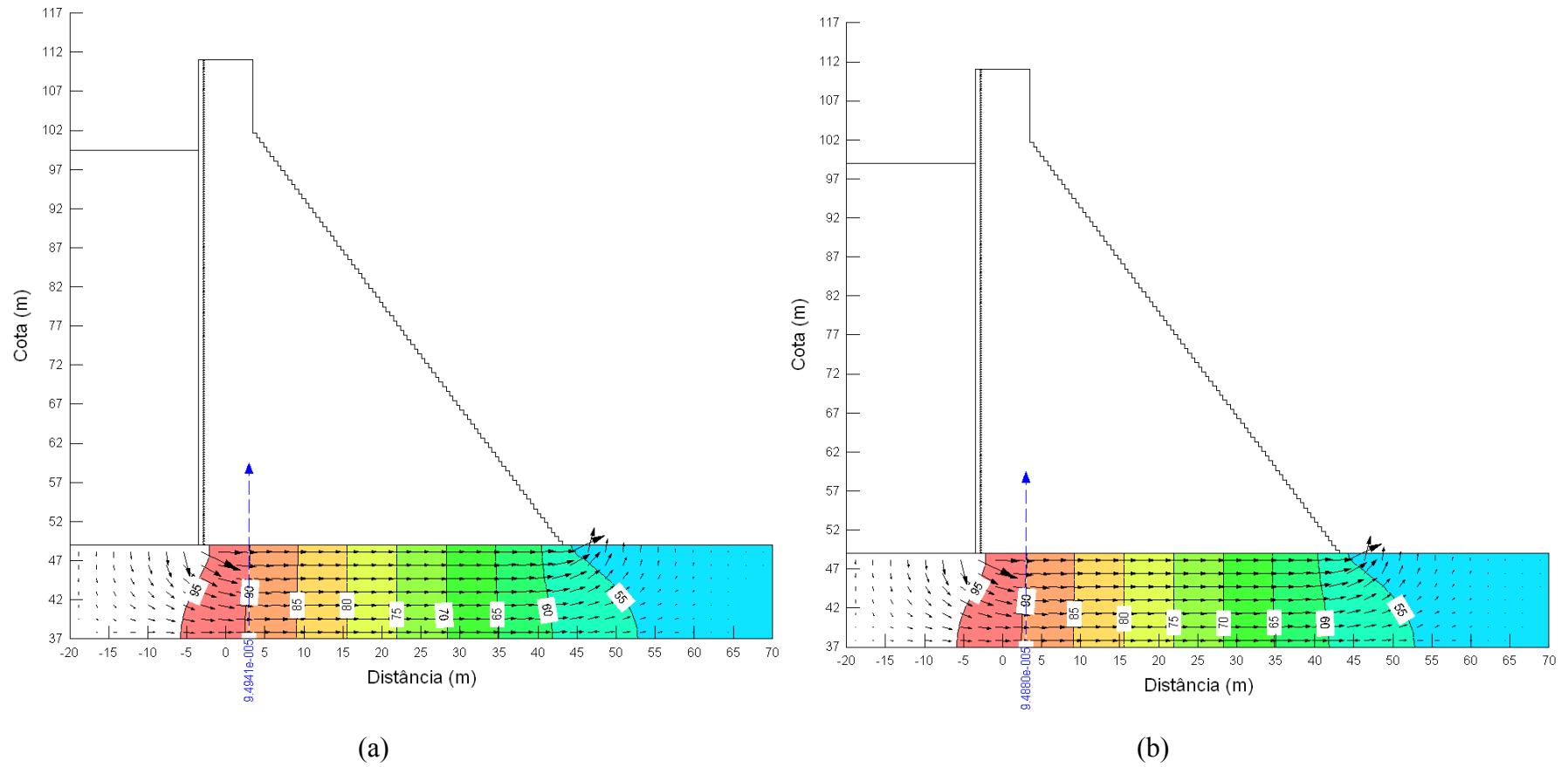


Figura B 109 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

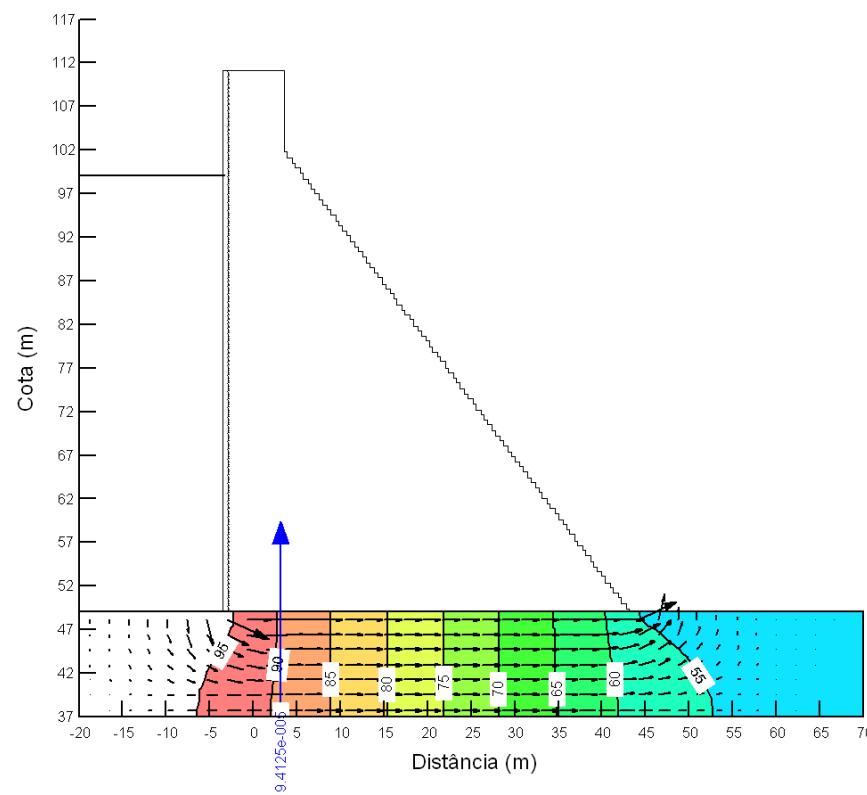


Figura B 110 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, setembro de 2005

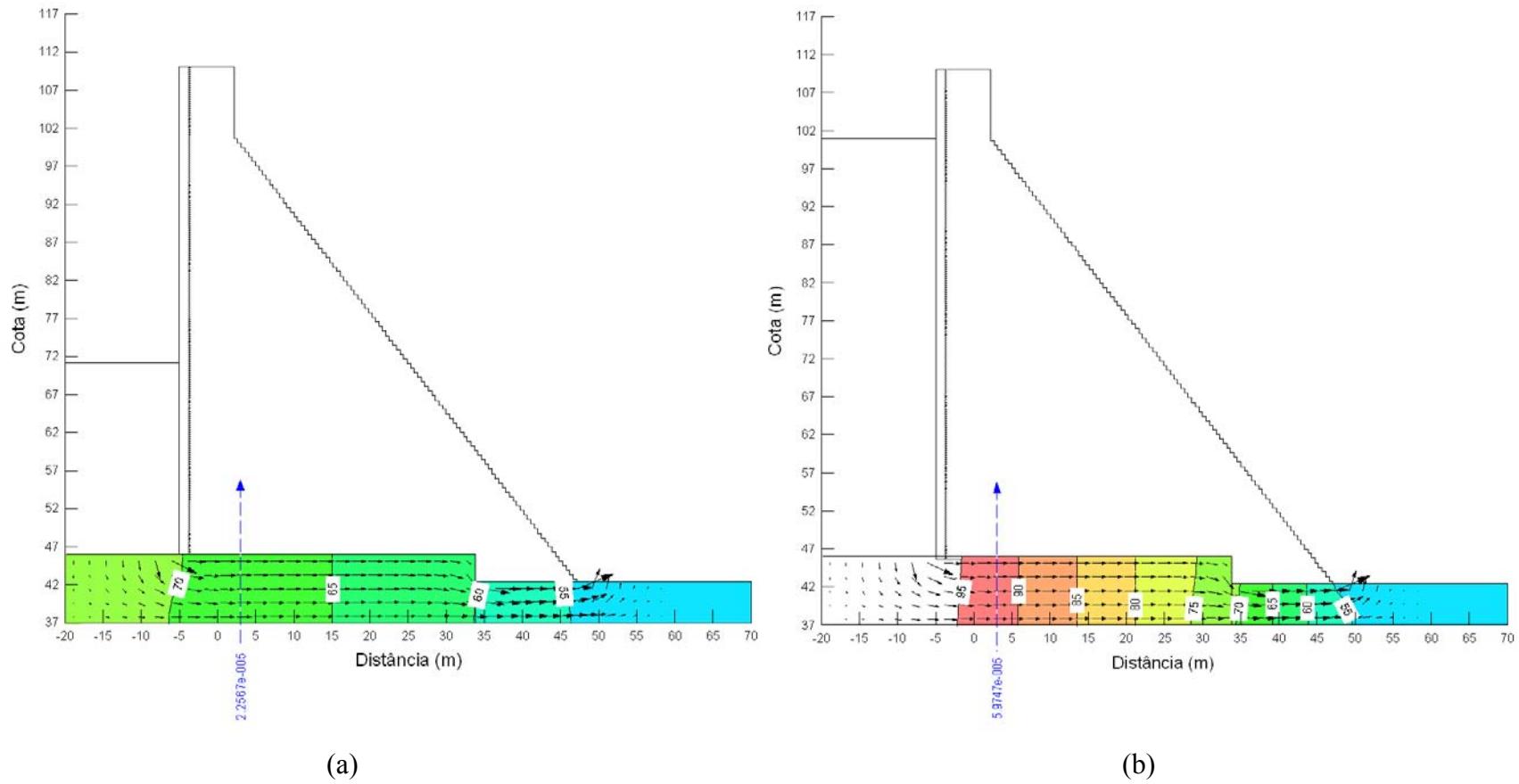


Figura B 111 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

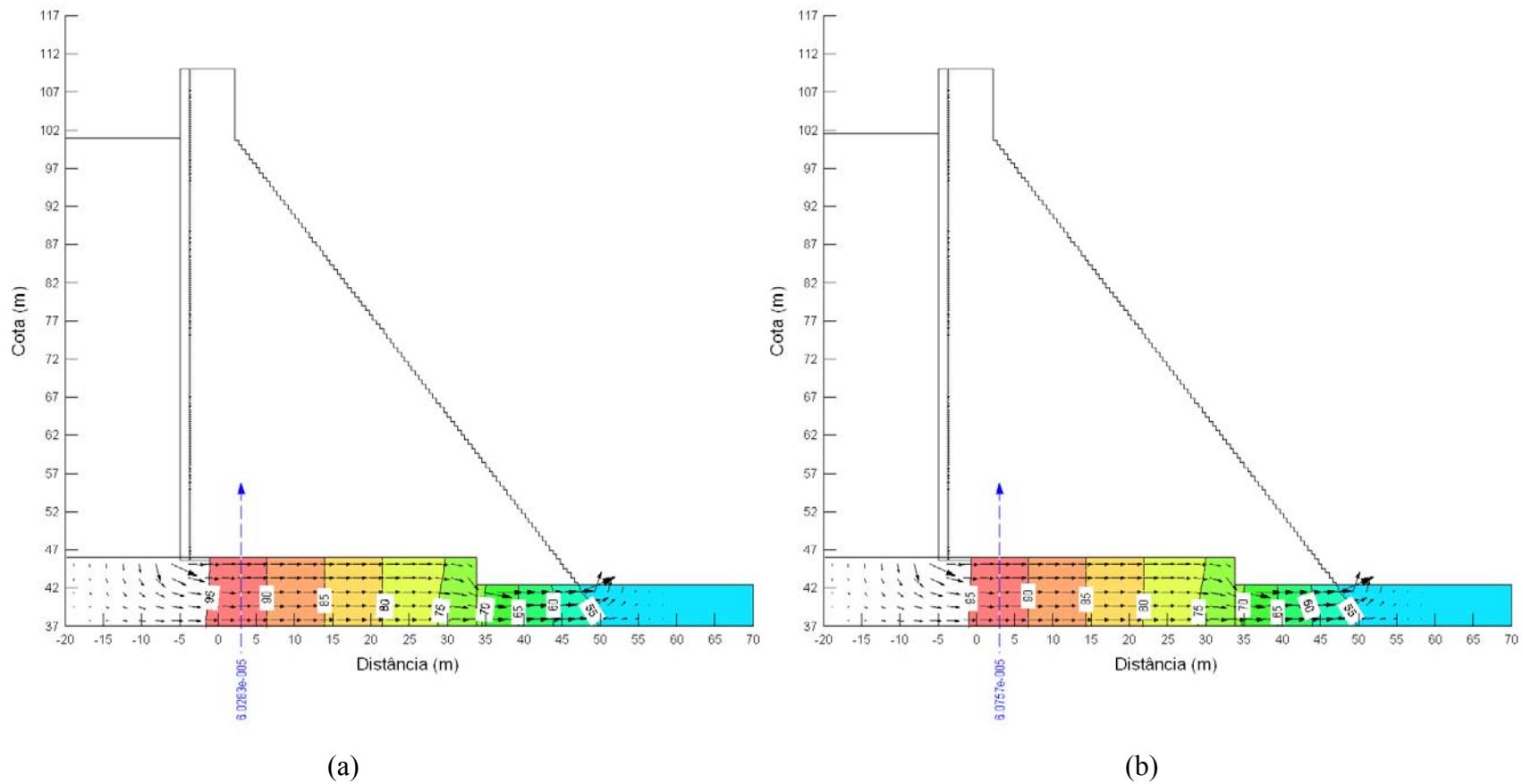


Figura B 112 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

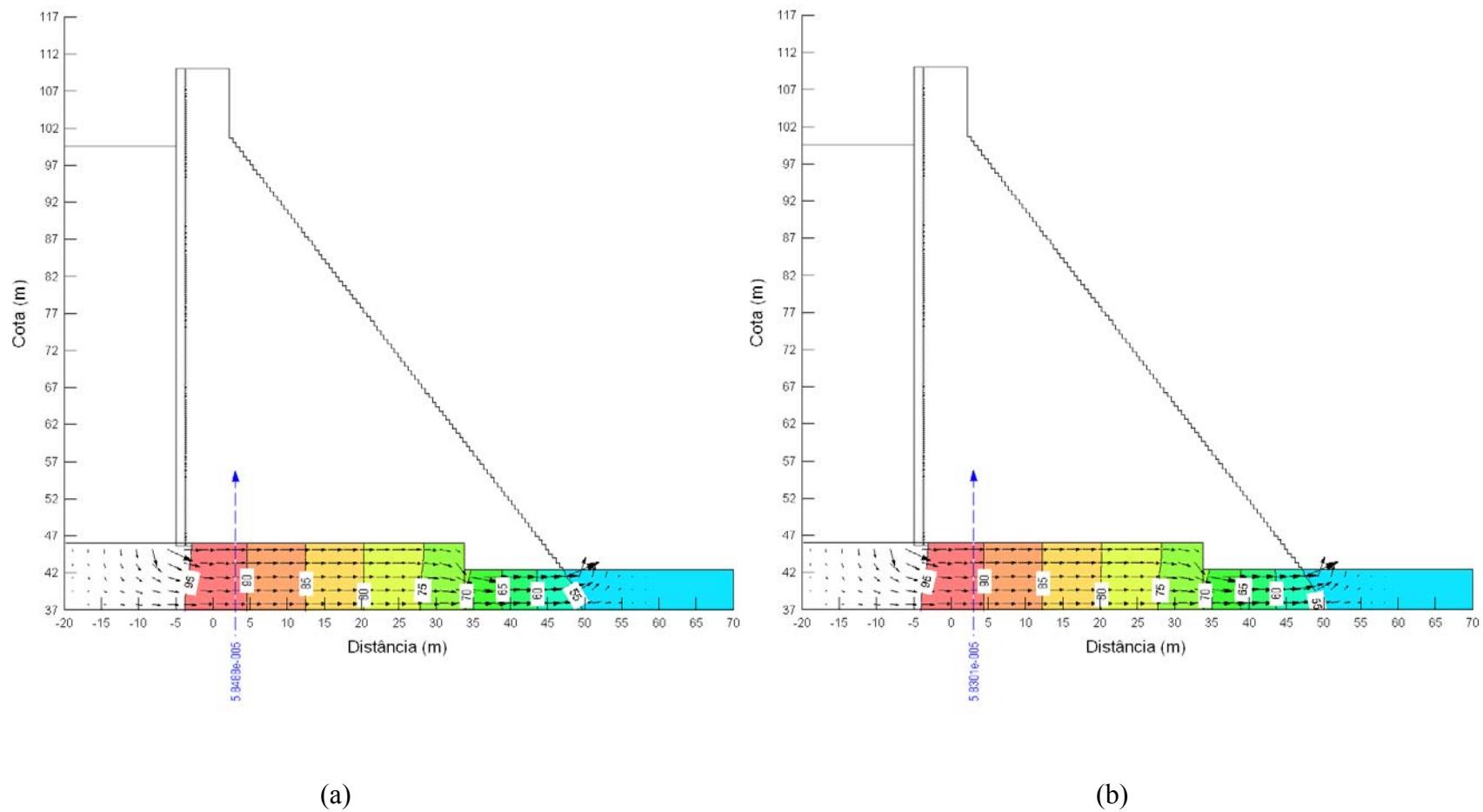


Figura B 113 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

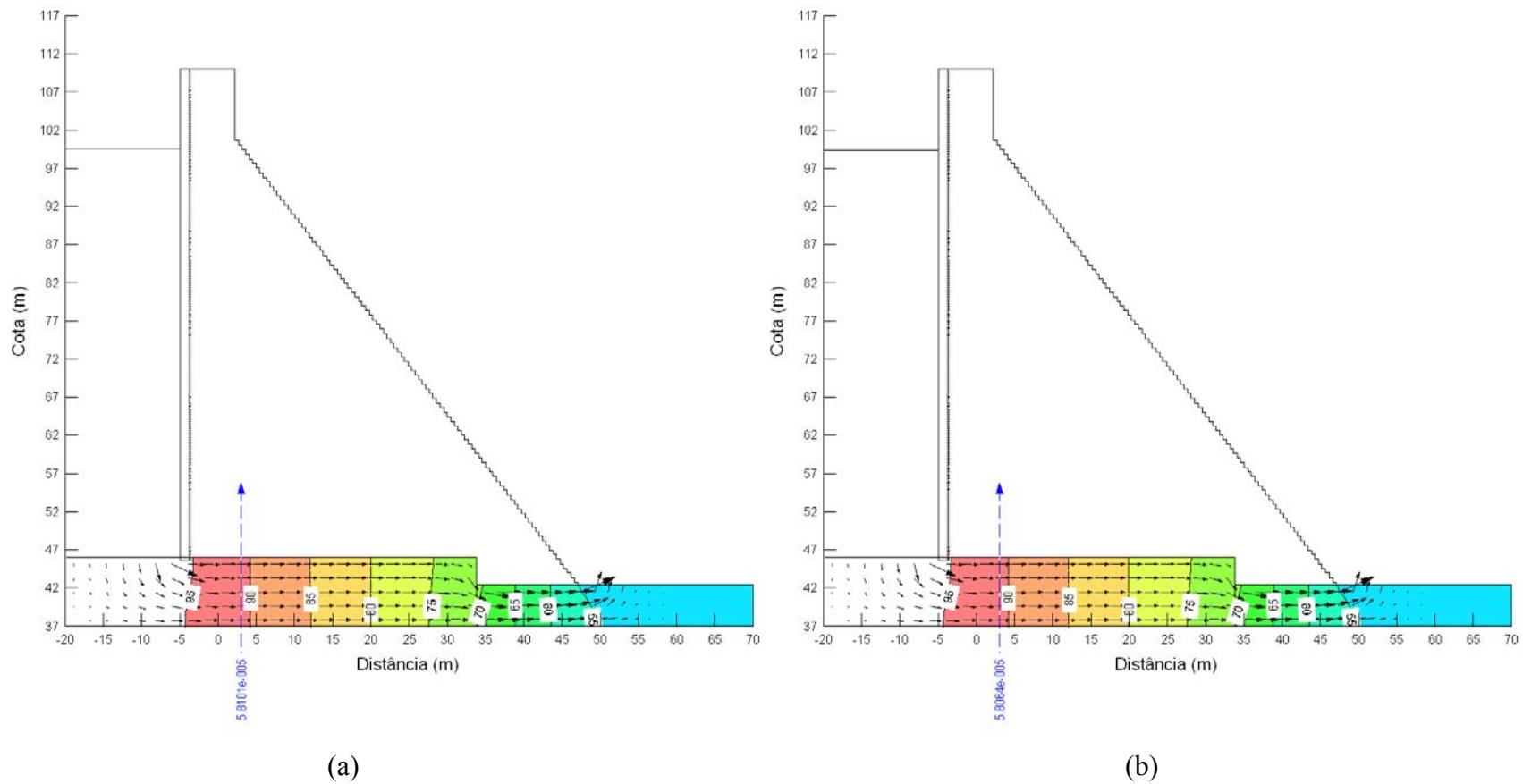


Figura B 114 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

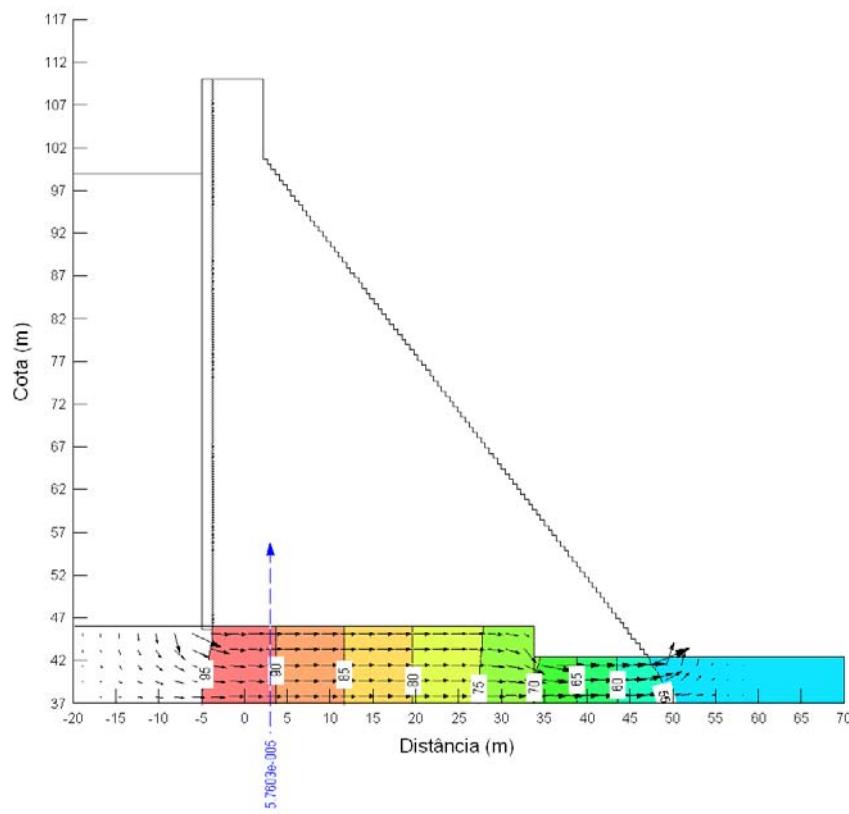


Figura B 115 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, setembro de 2005

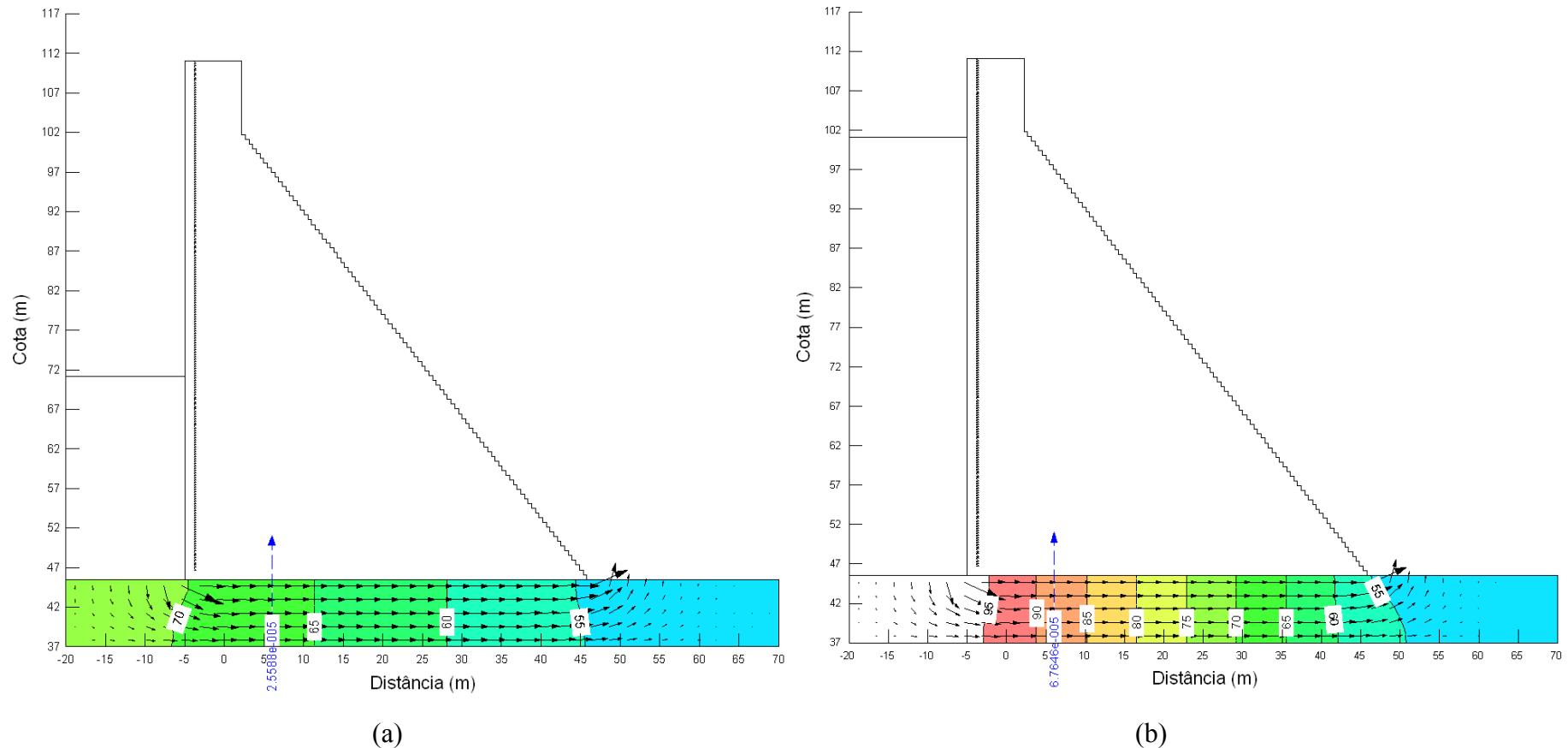


Figura B 116 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

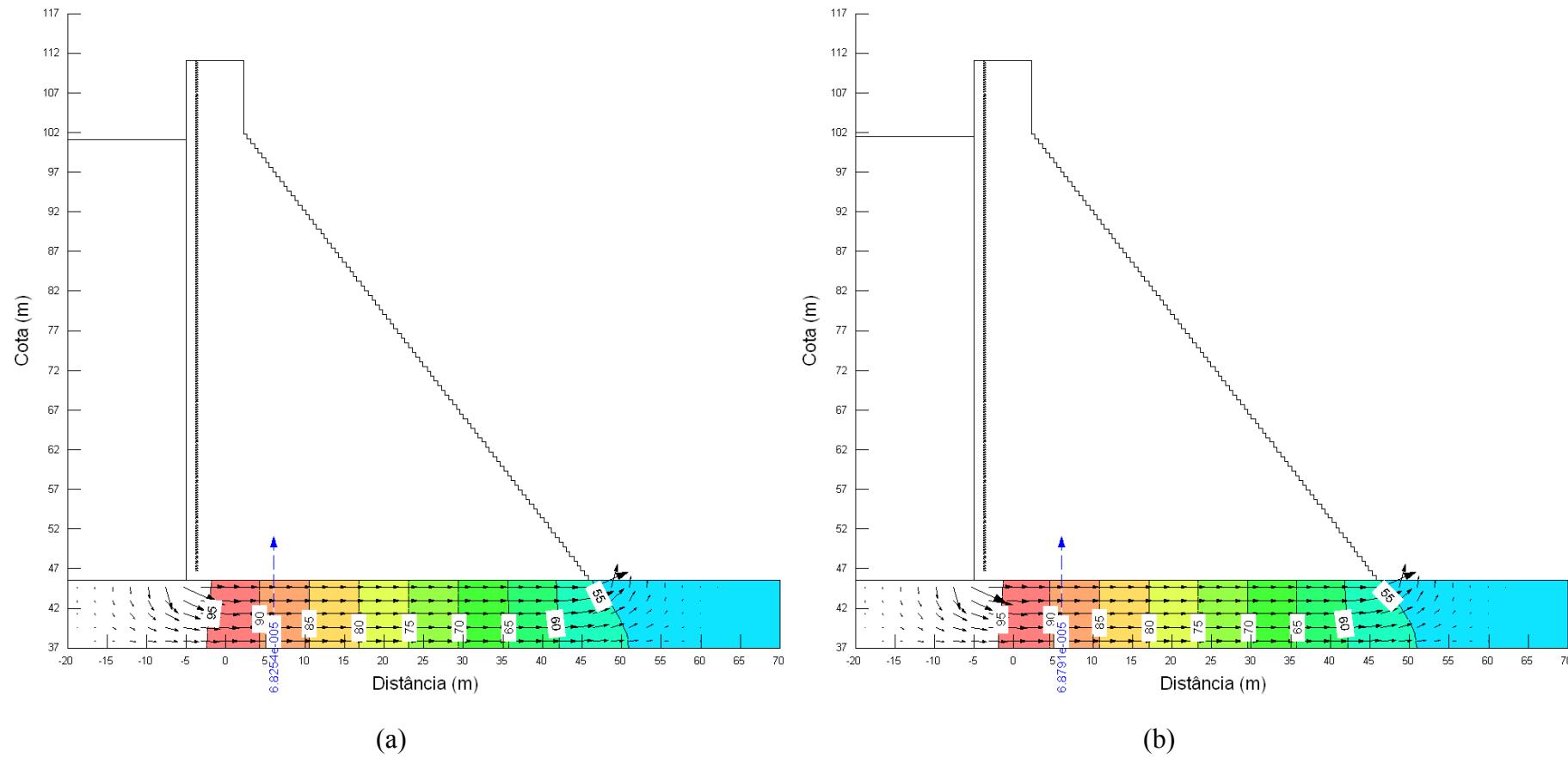


Figura B 117 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

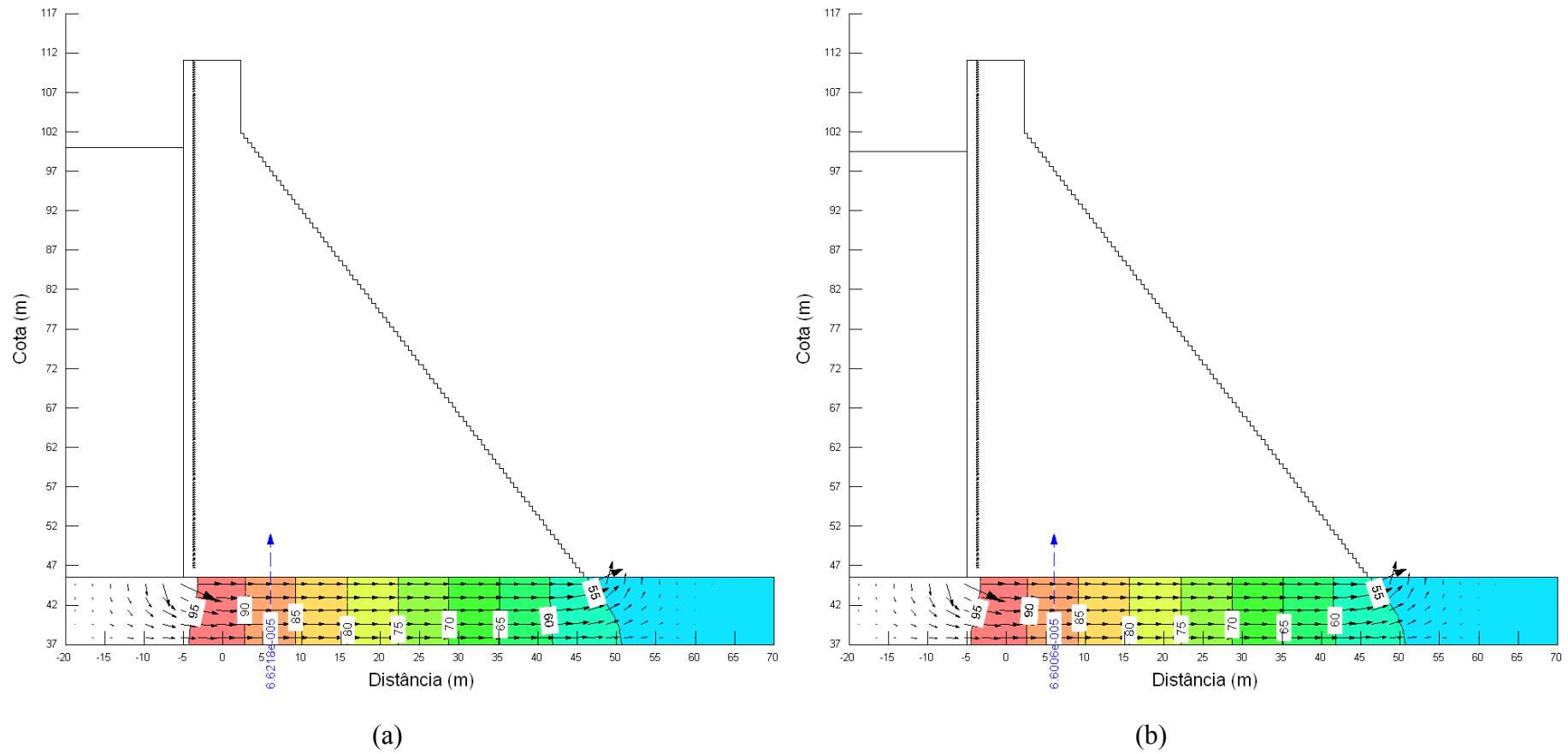


Figura B 118 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

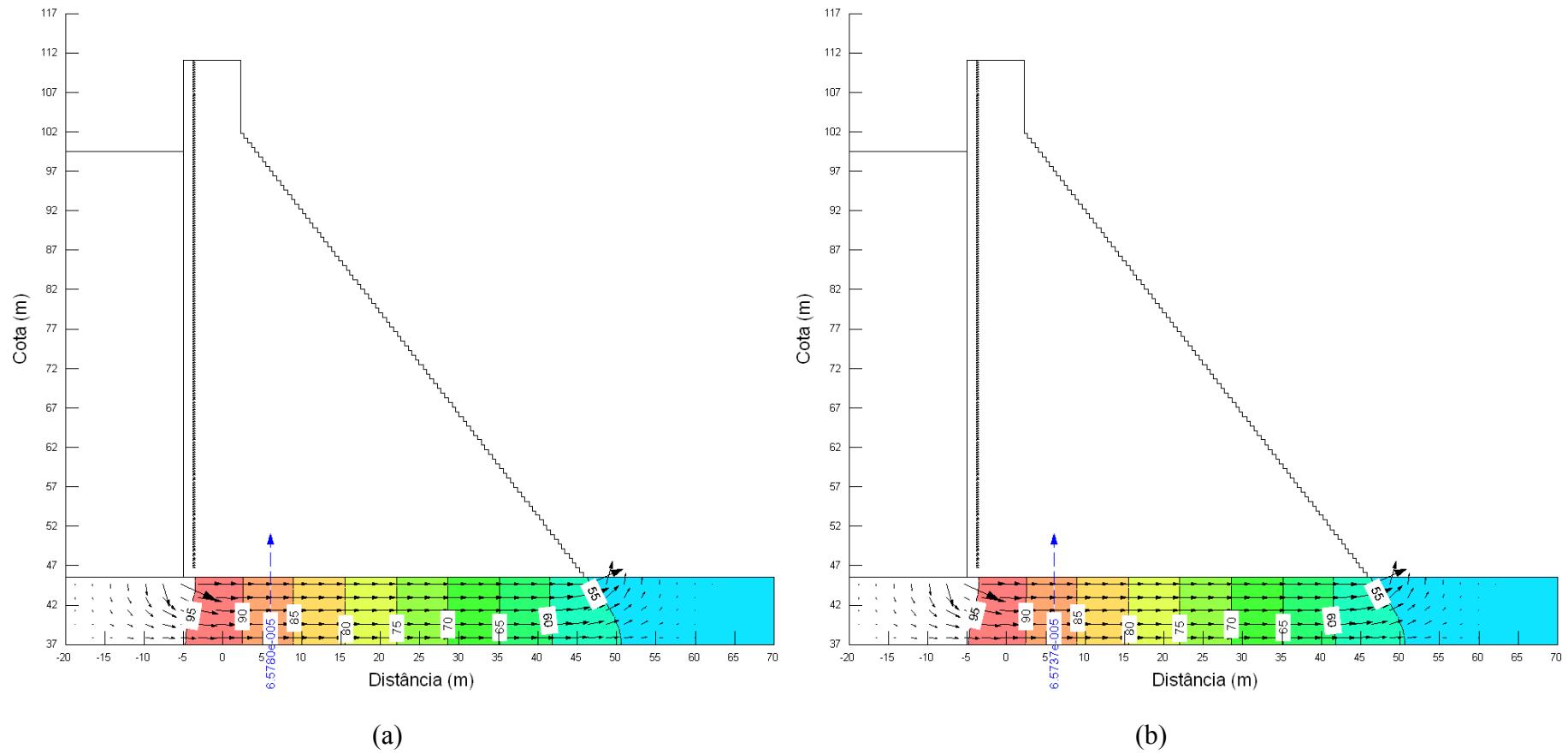


Figura B 119 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

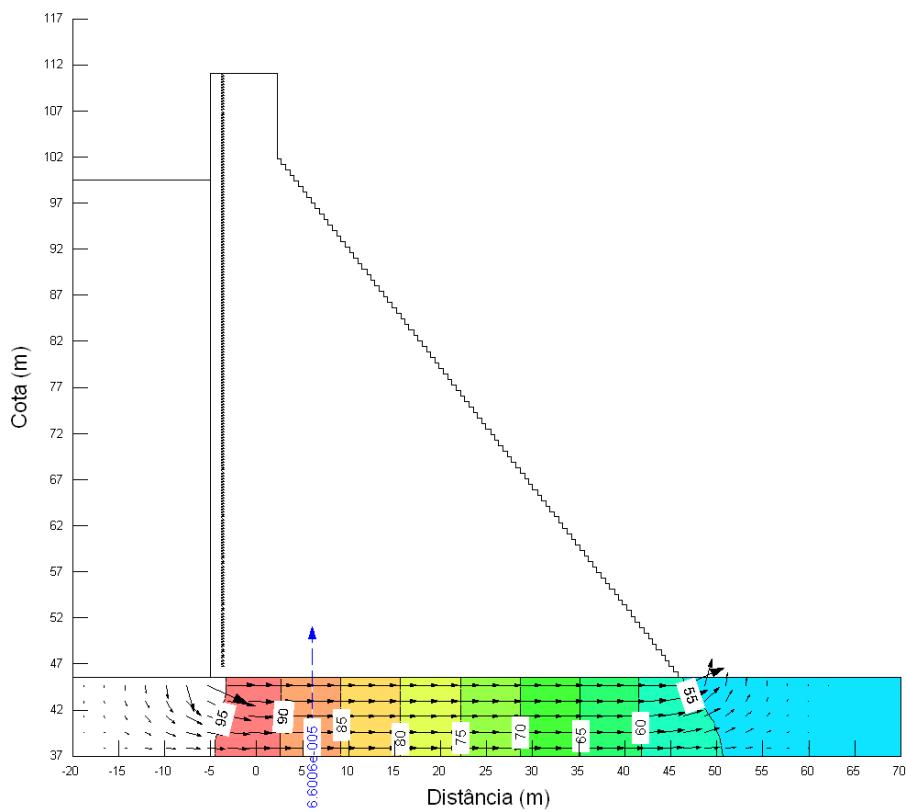


Figura B 120 – Quarto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, setembro de 2005

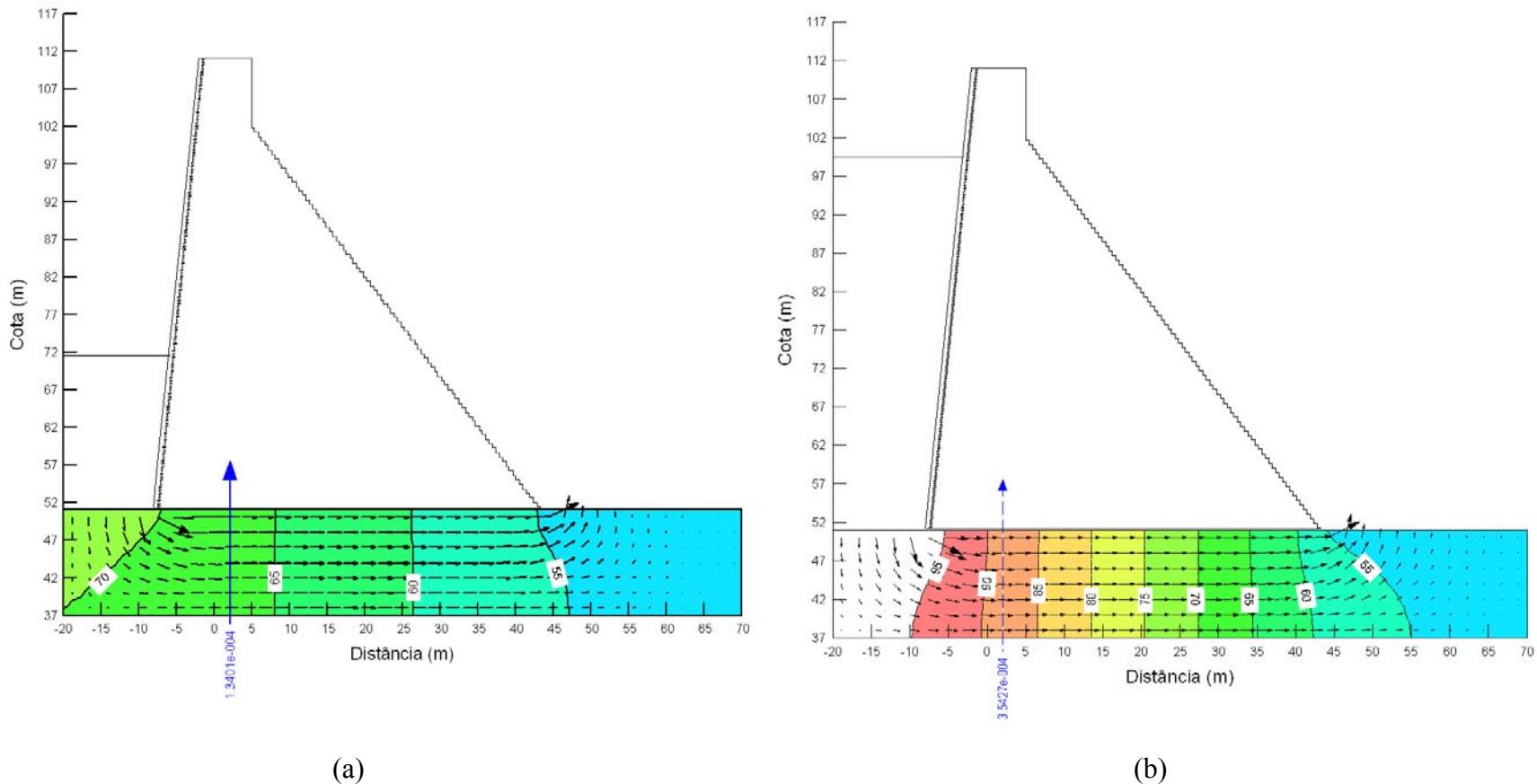


Figura B 121 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

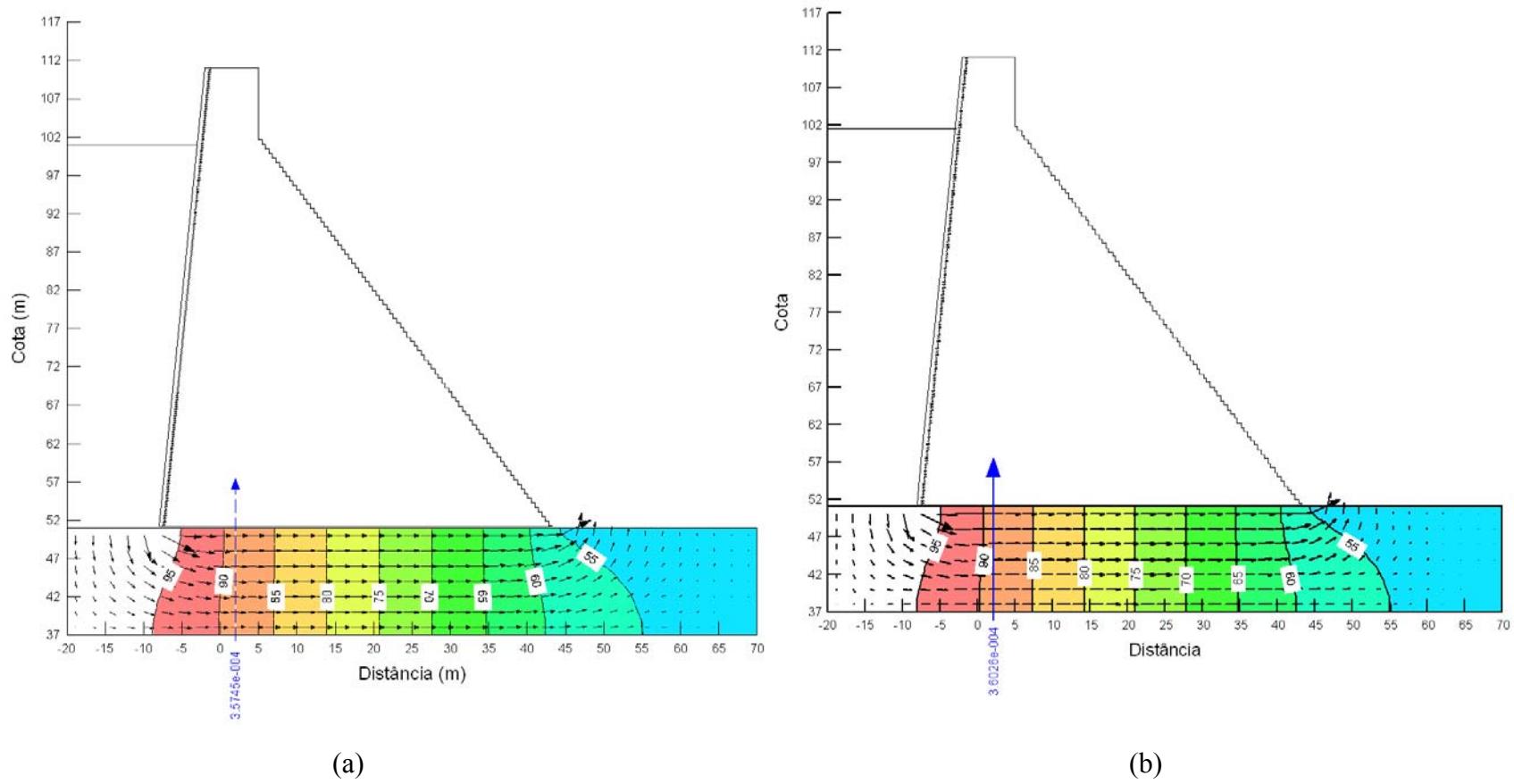


Figura 122 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

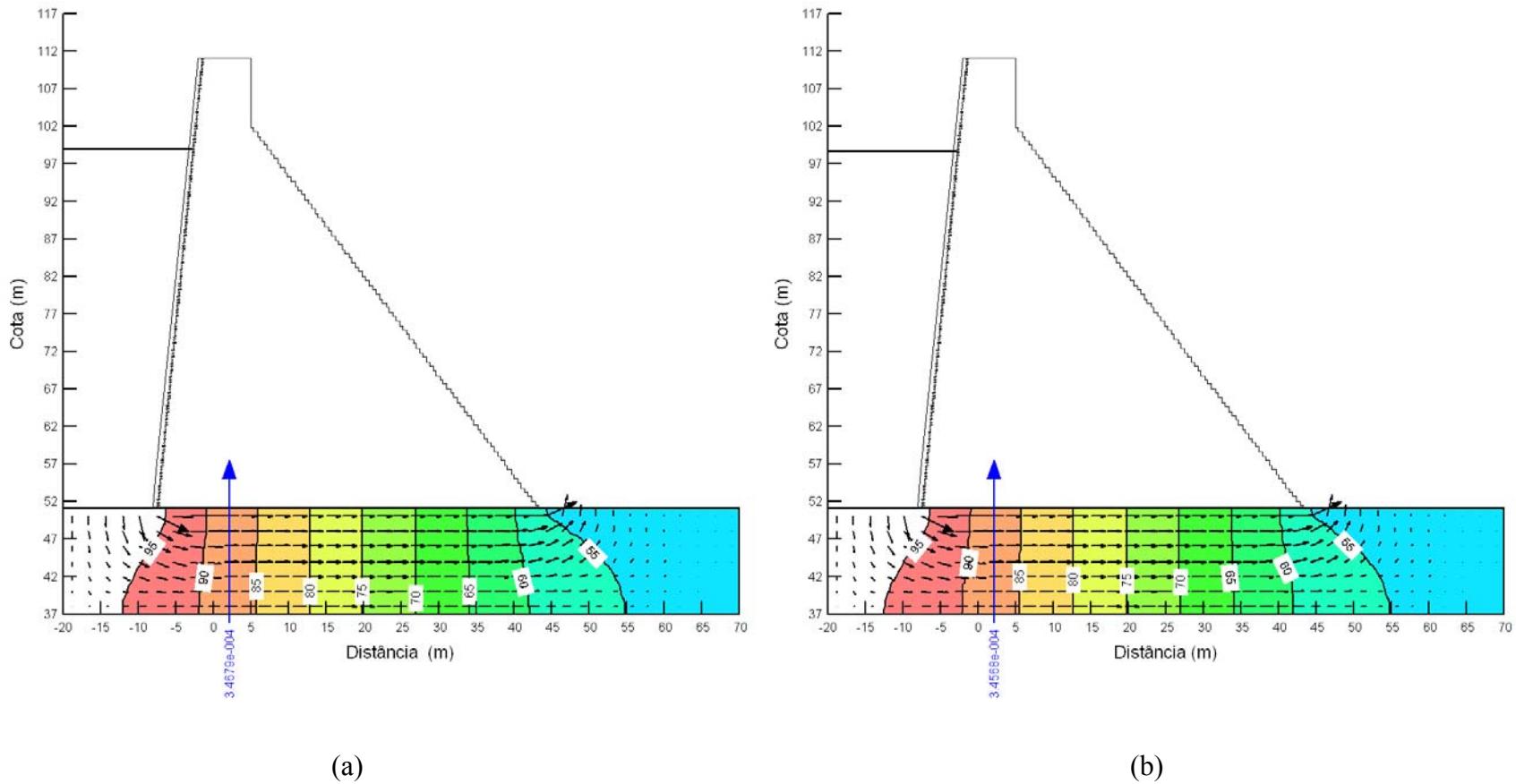


Figura B 123 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

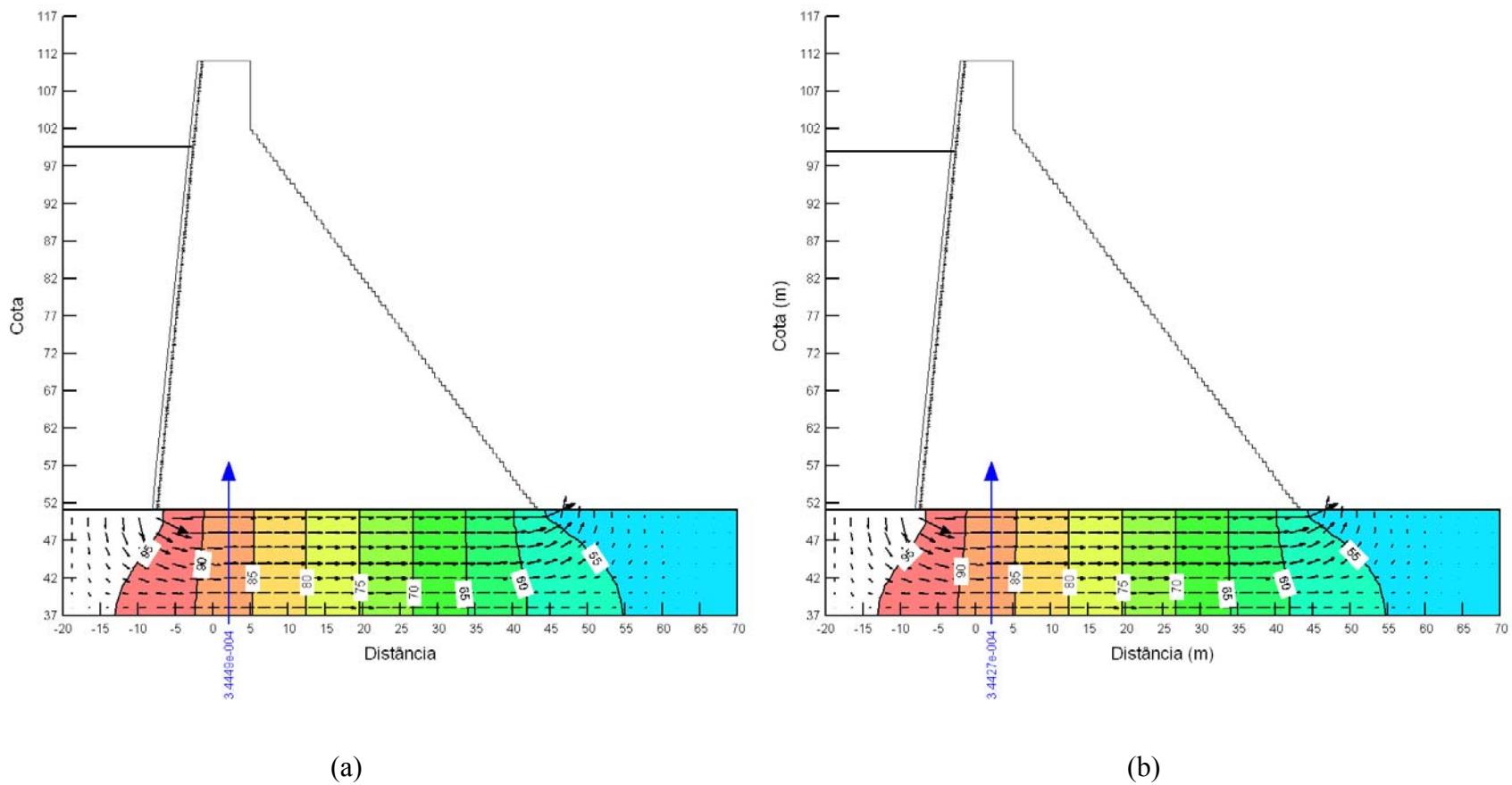


Figura B 124 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

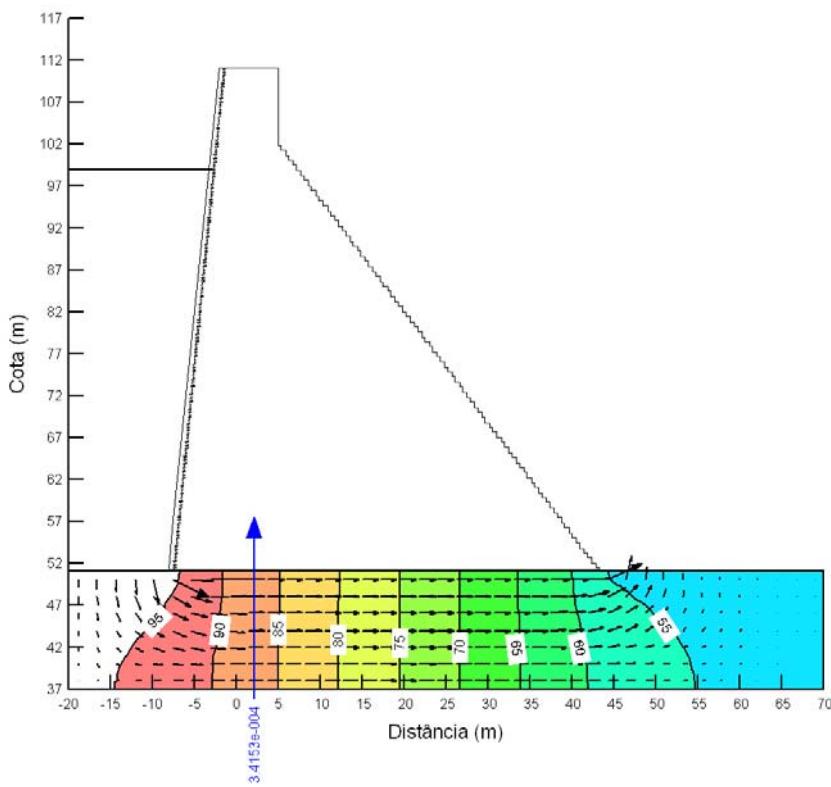


Figura B 125 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 06, setembro de 2005

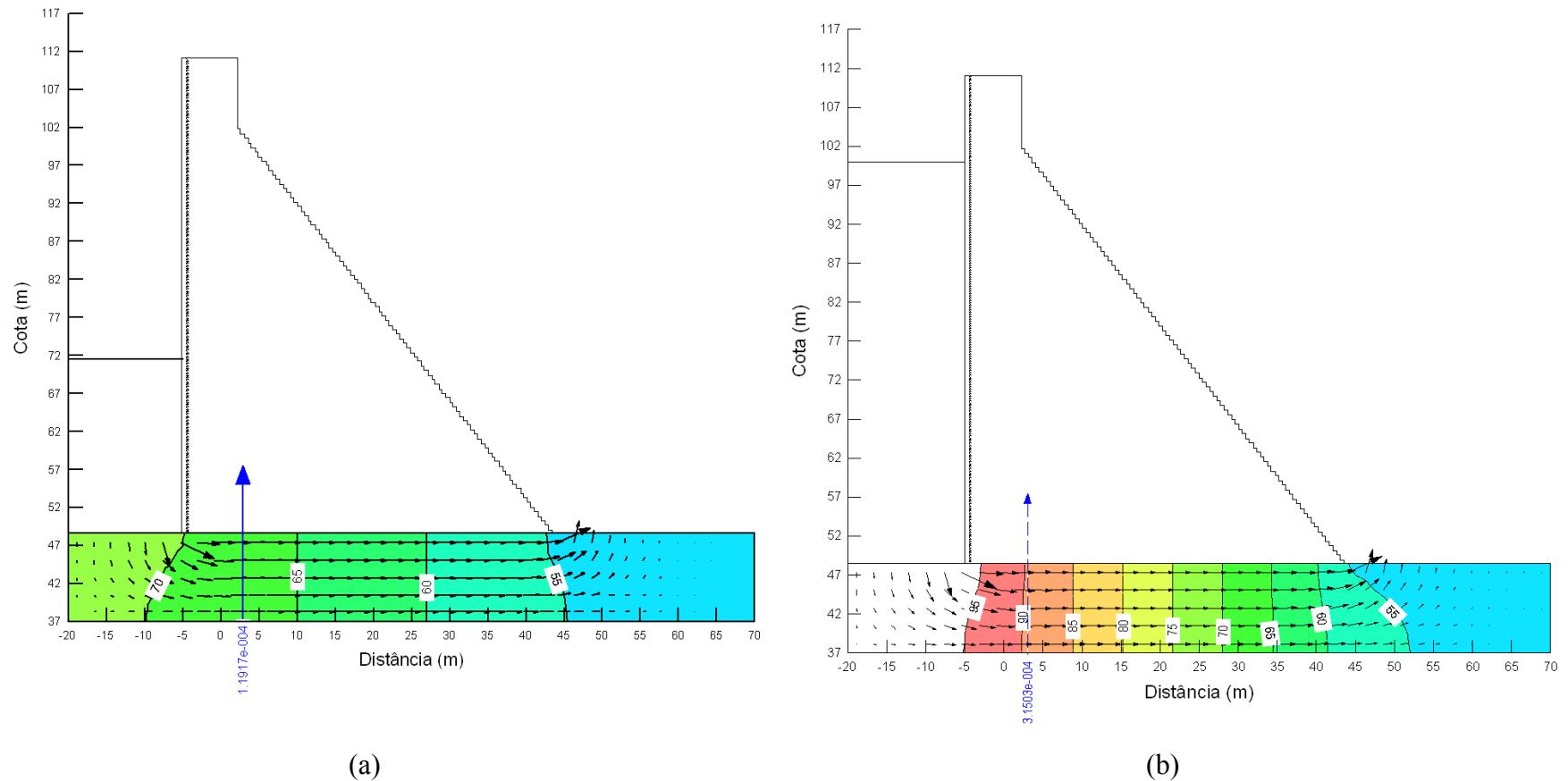


Figura B 126 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

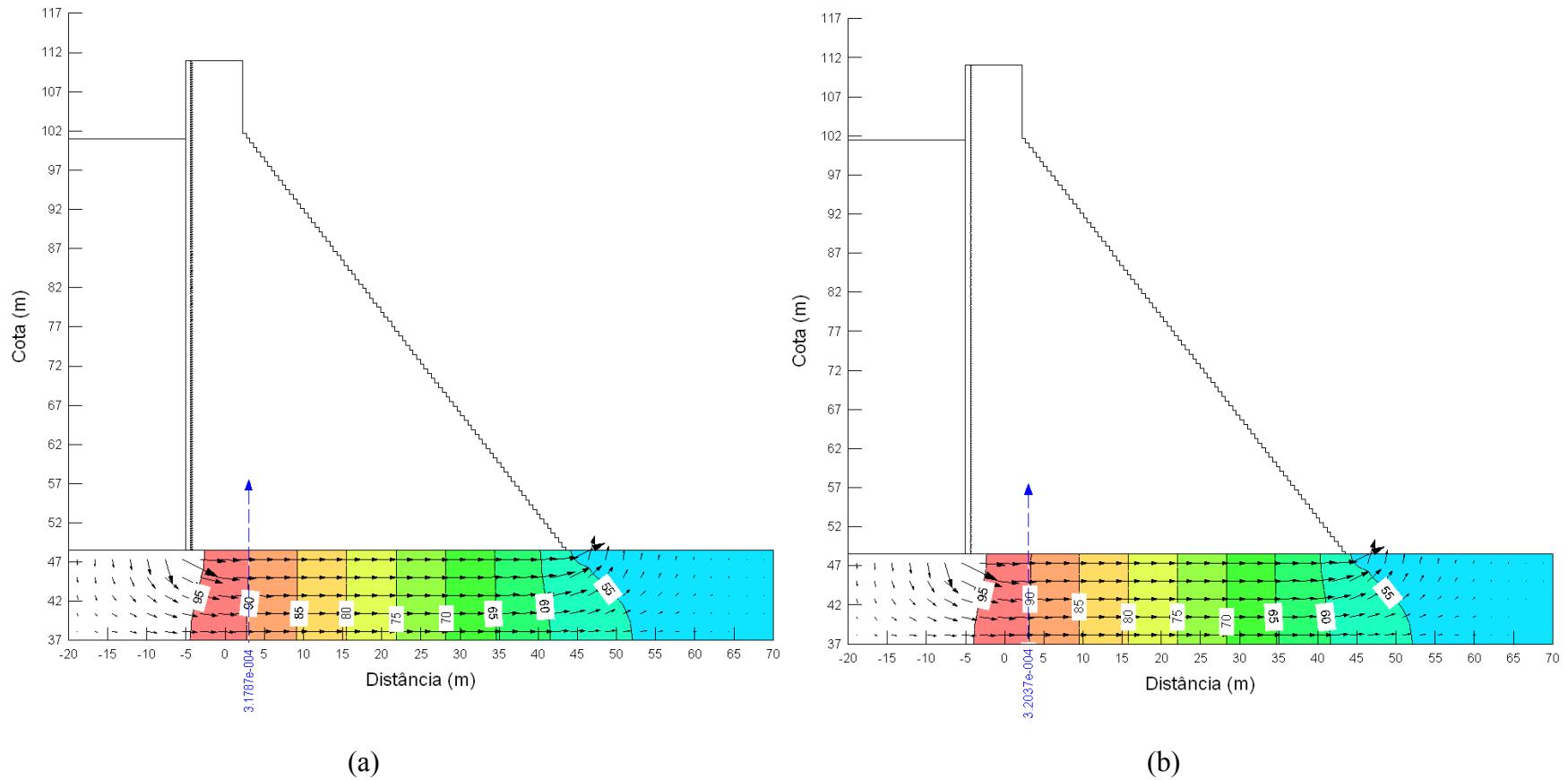


Figura B 127 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

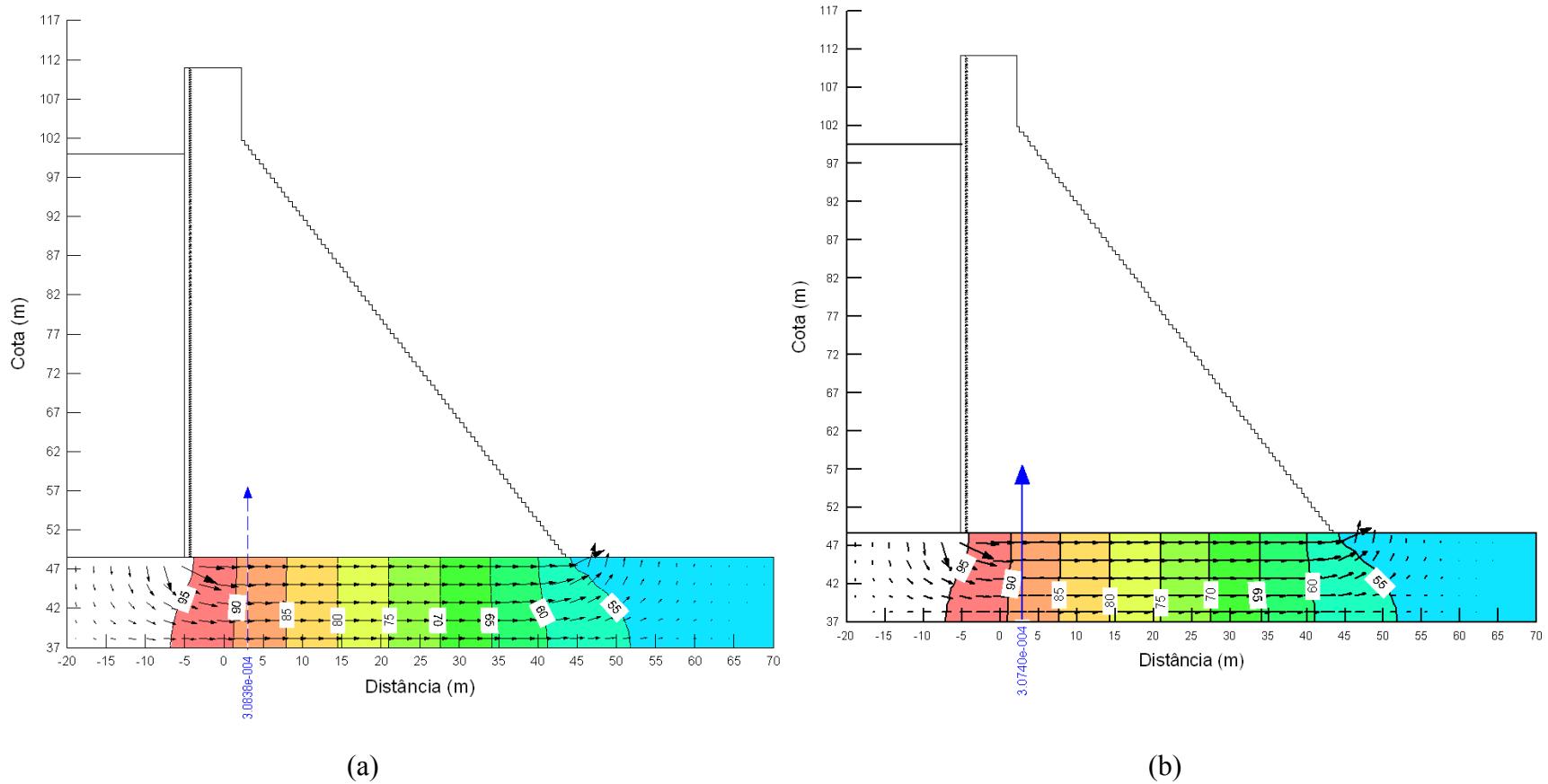


Figura B 128 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

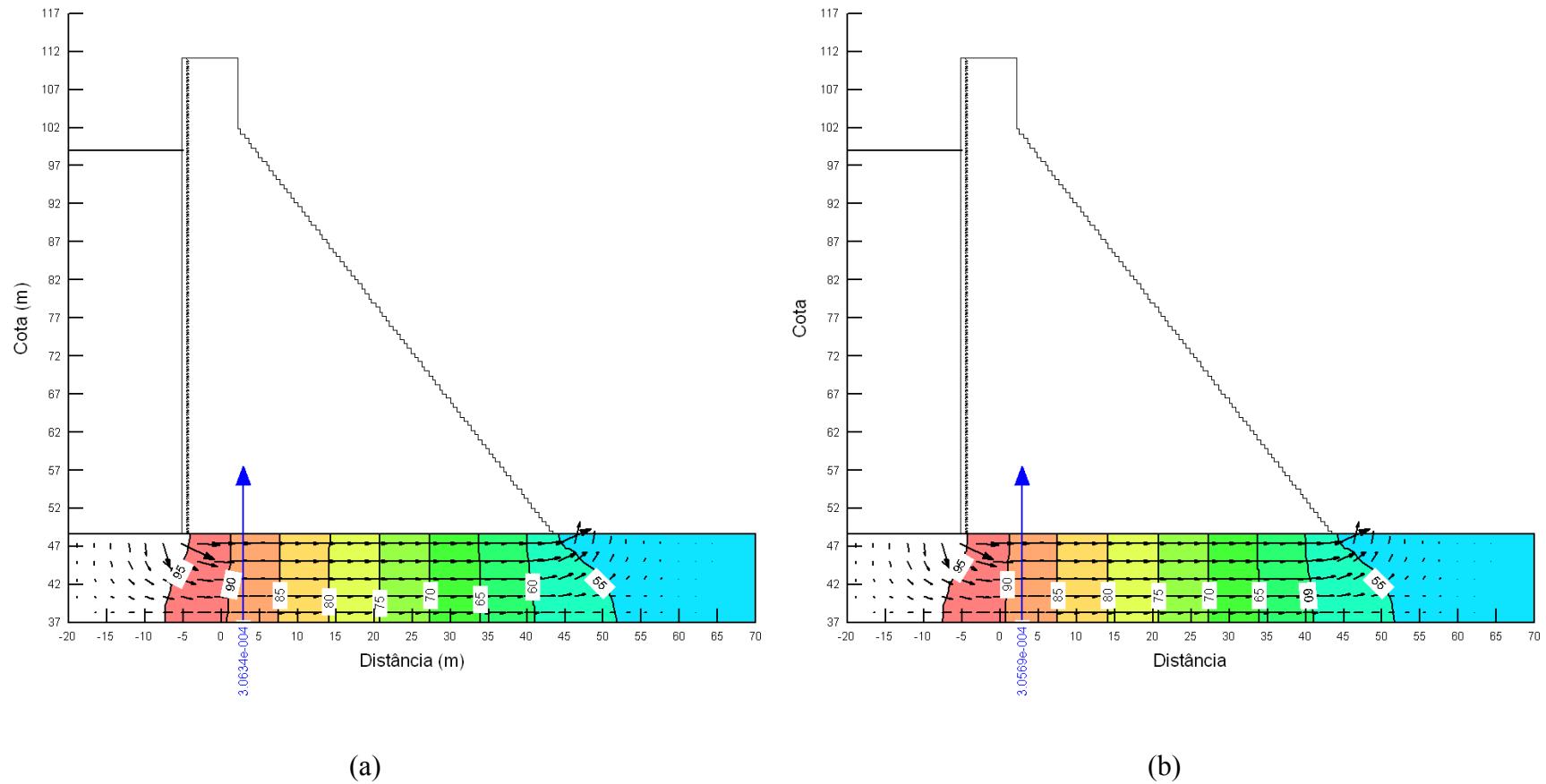


Figura B 129 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

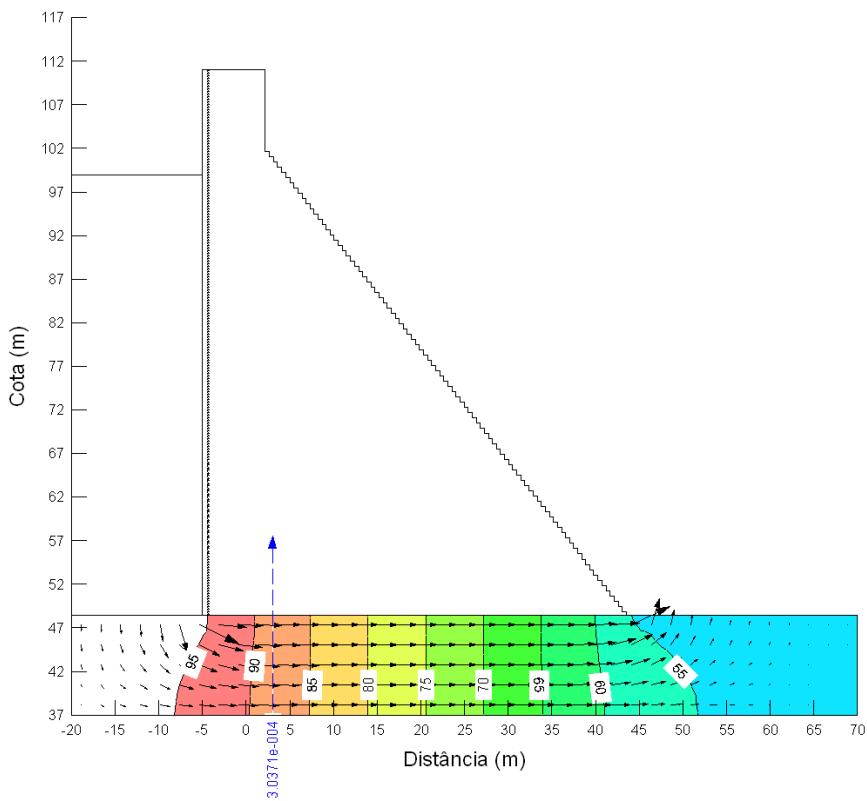


Figura B 130 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 11, setembro de 2005

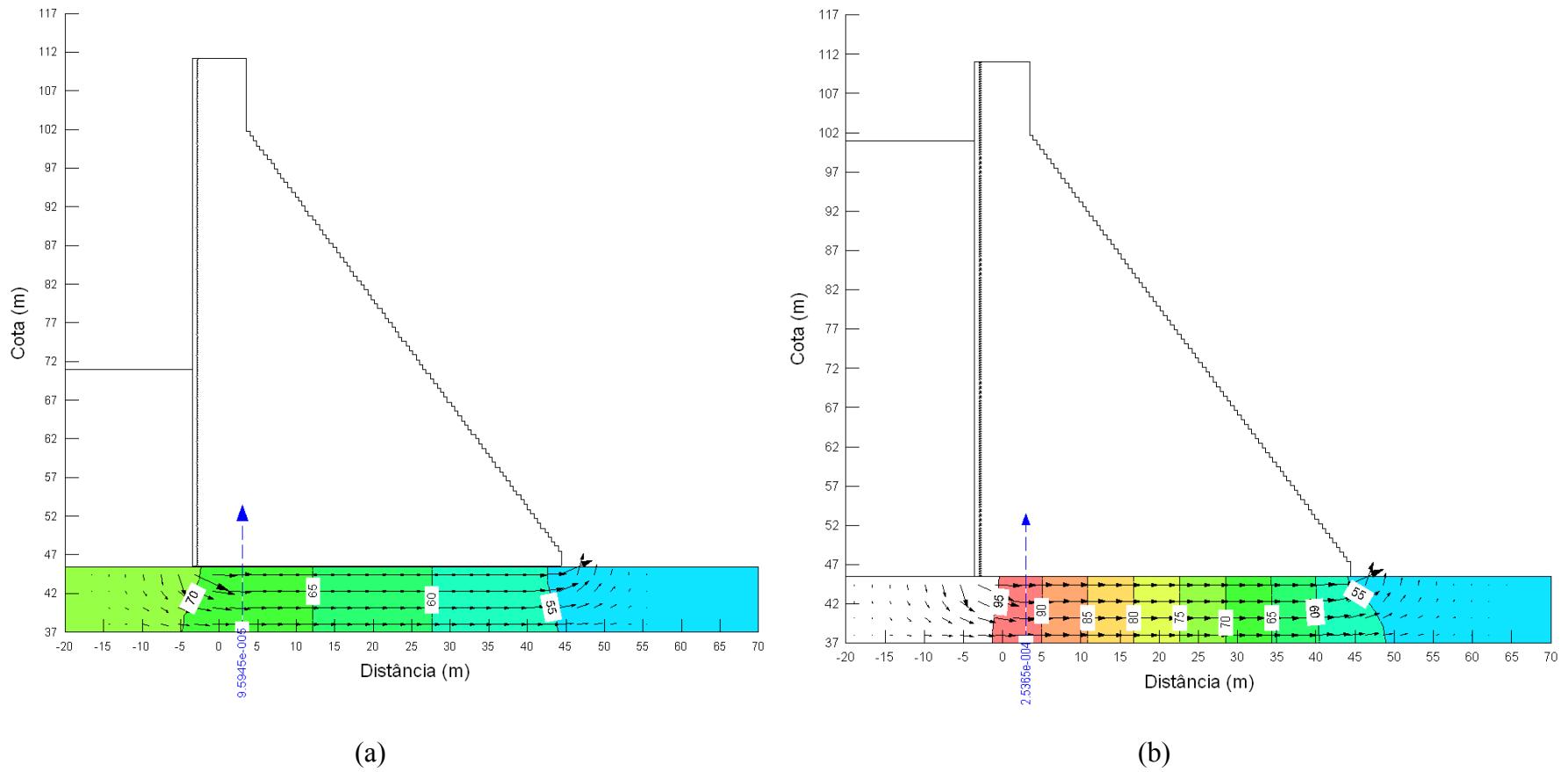


Figura B 131 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

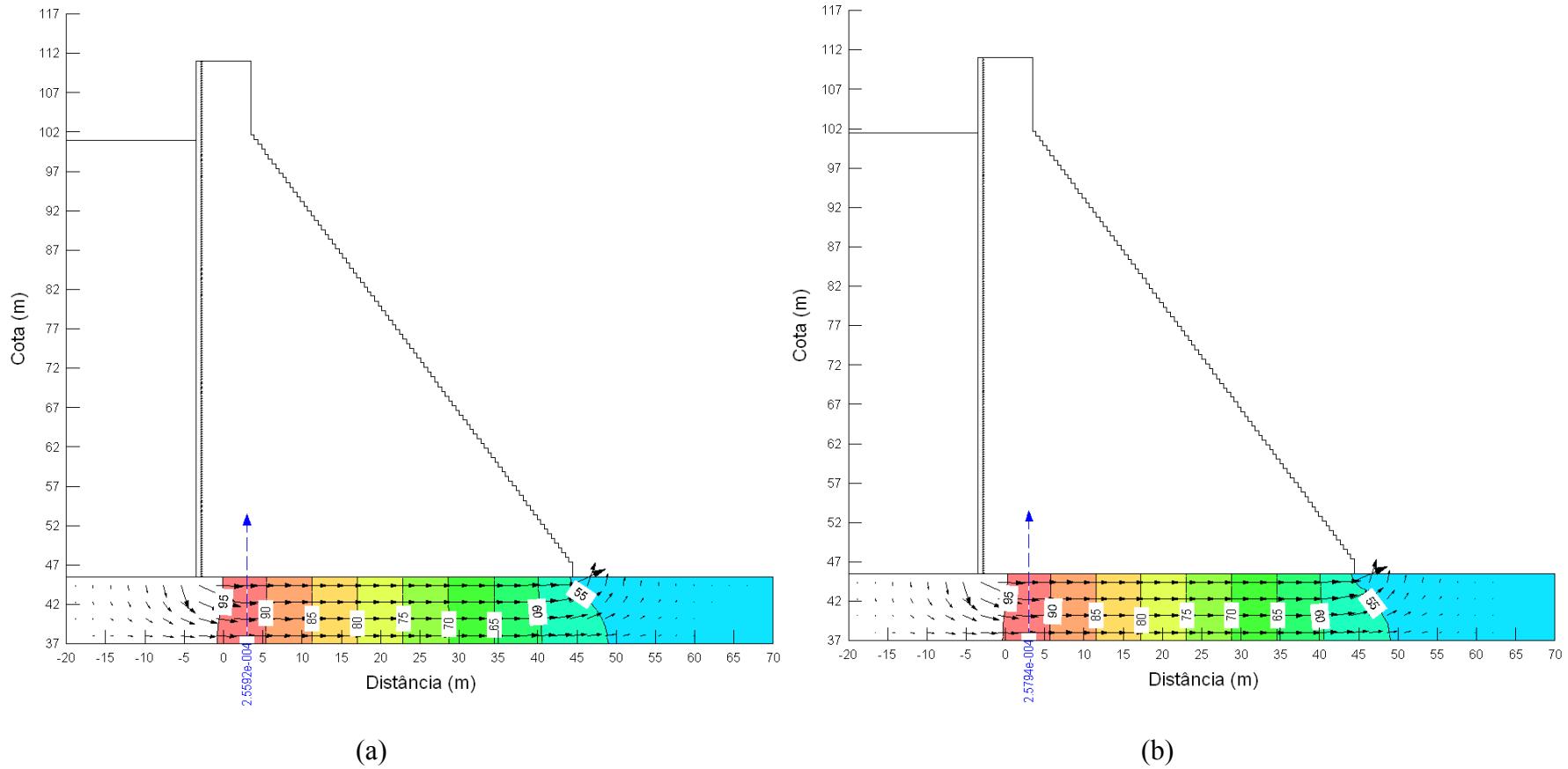


Figura B 132 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

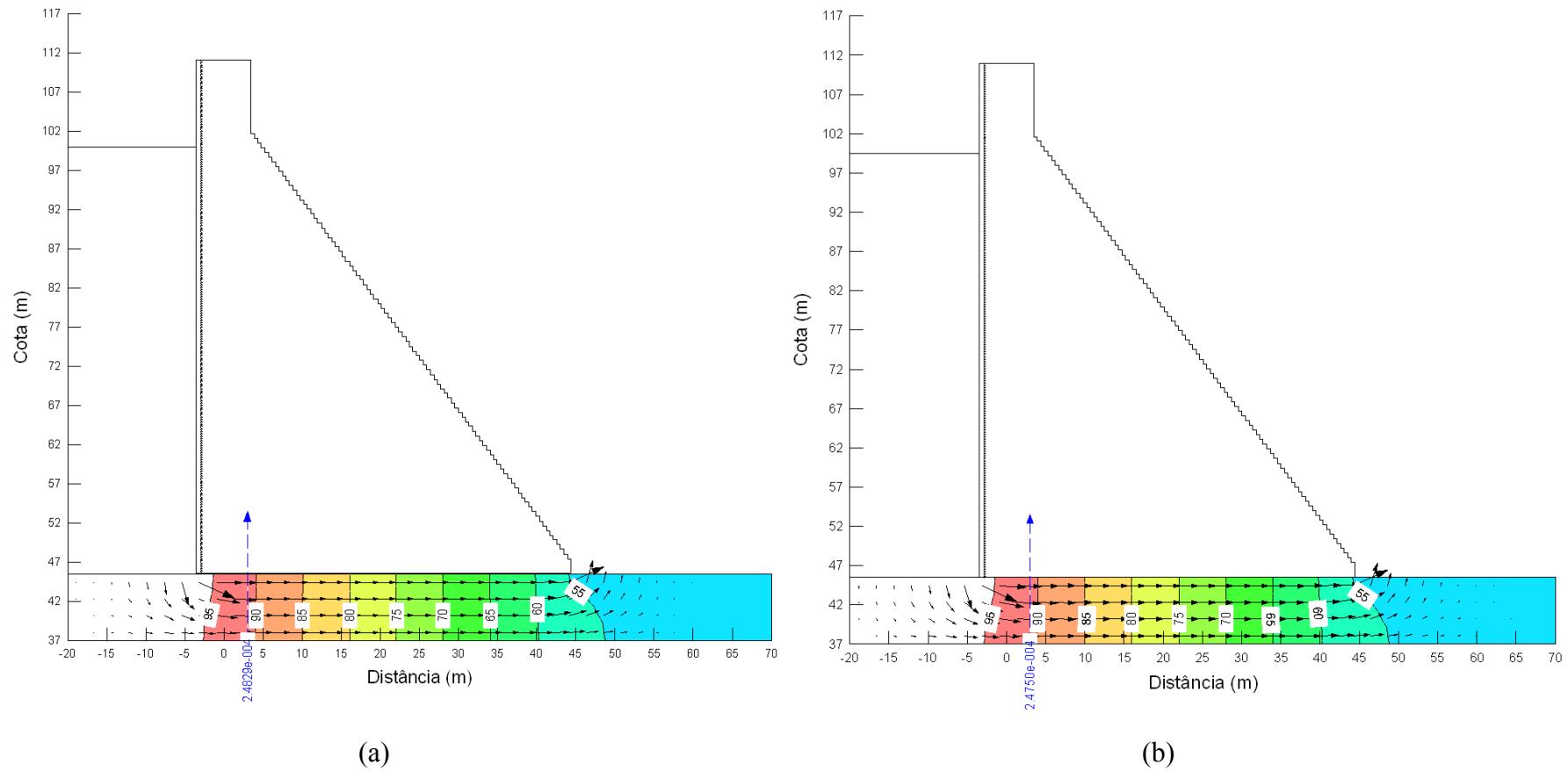


Figura B 133 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

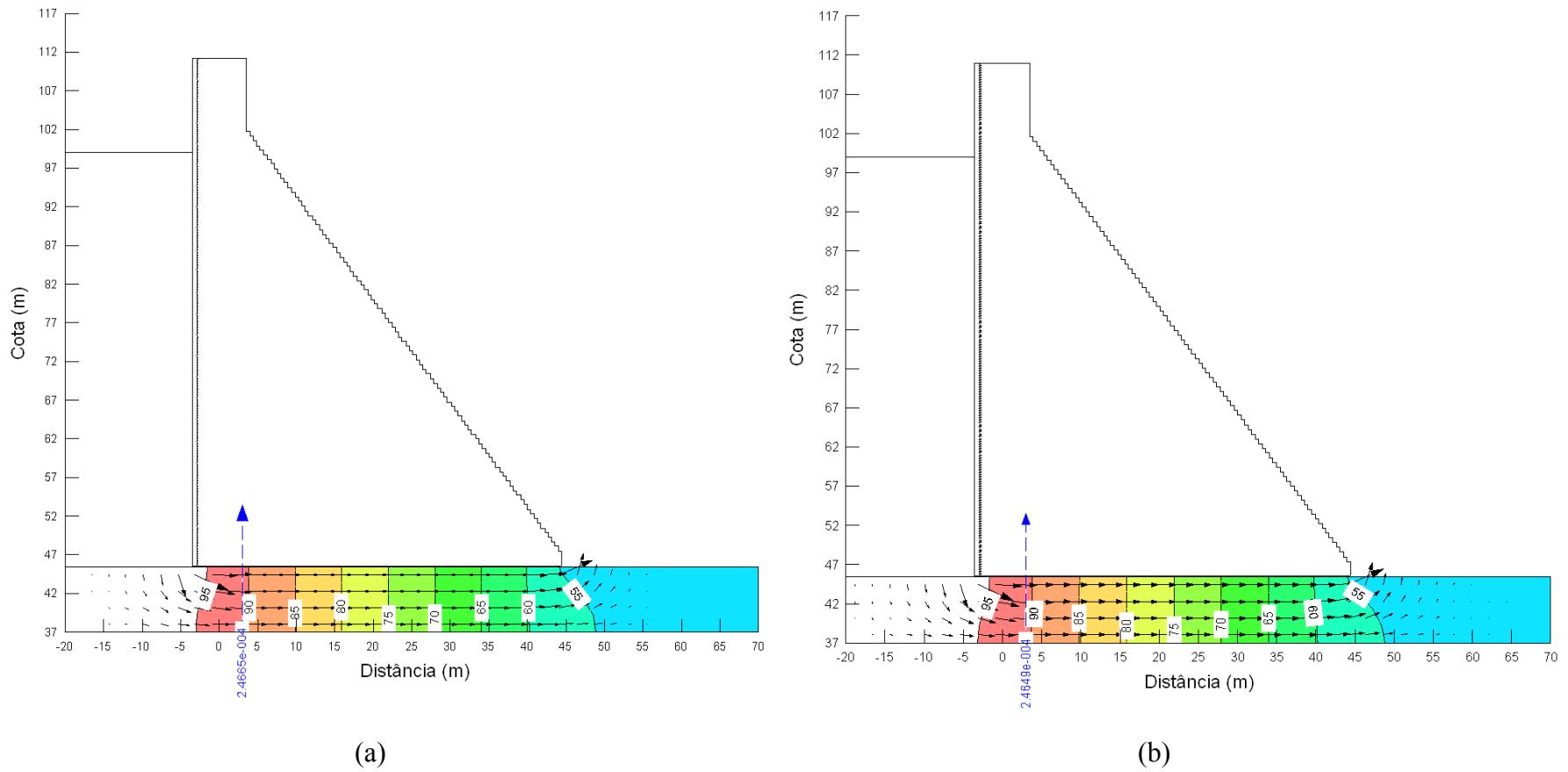


Figura B 134 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

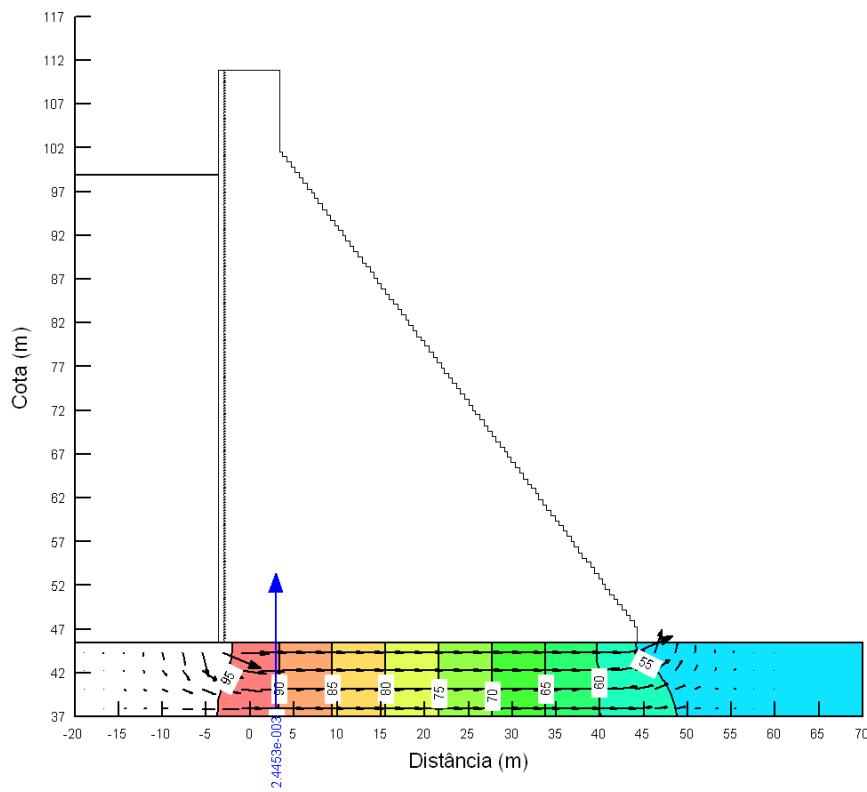


Figura B 135 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 16, setembro de 2005

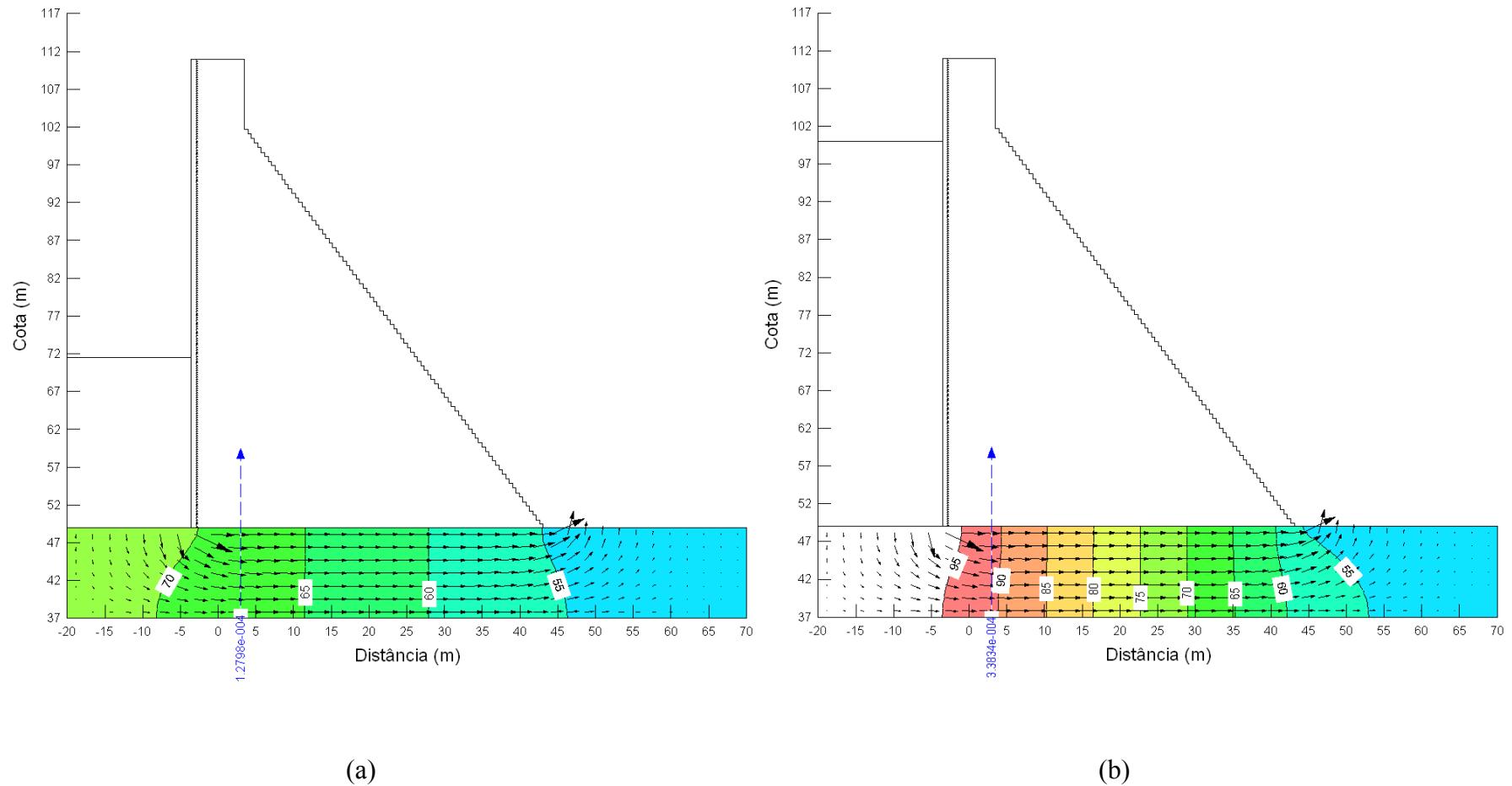


Figura B 136 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

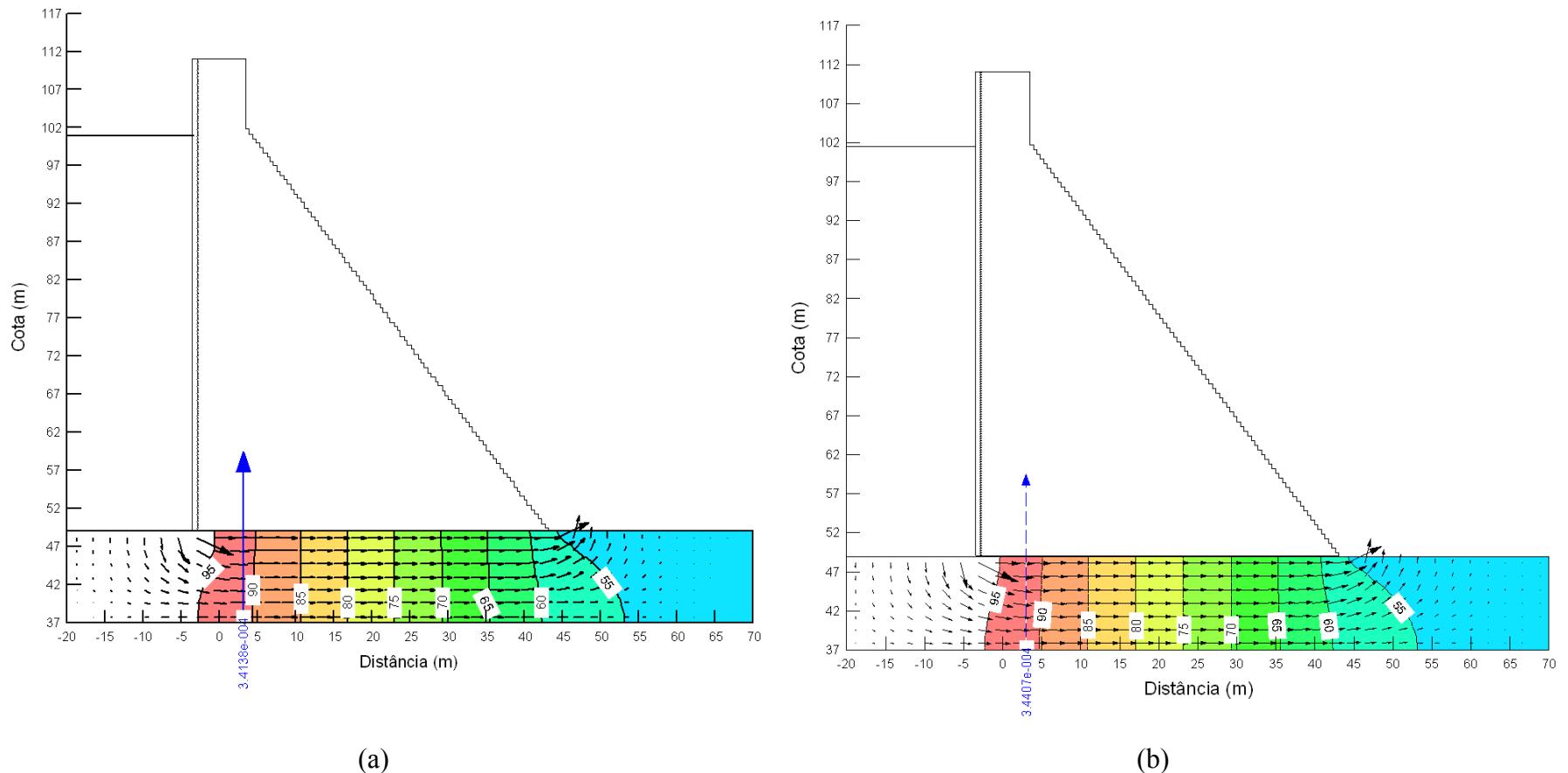


Figura B 137 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

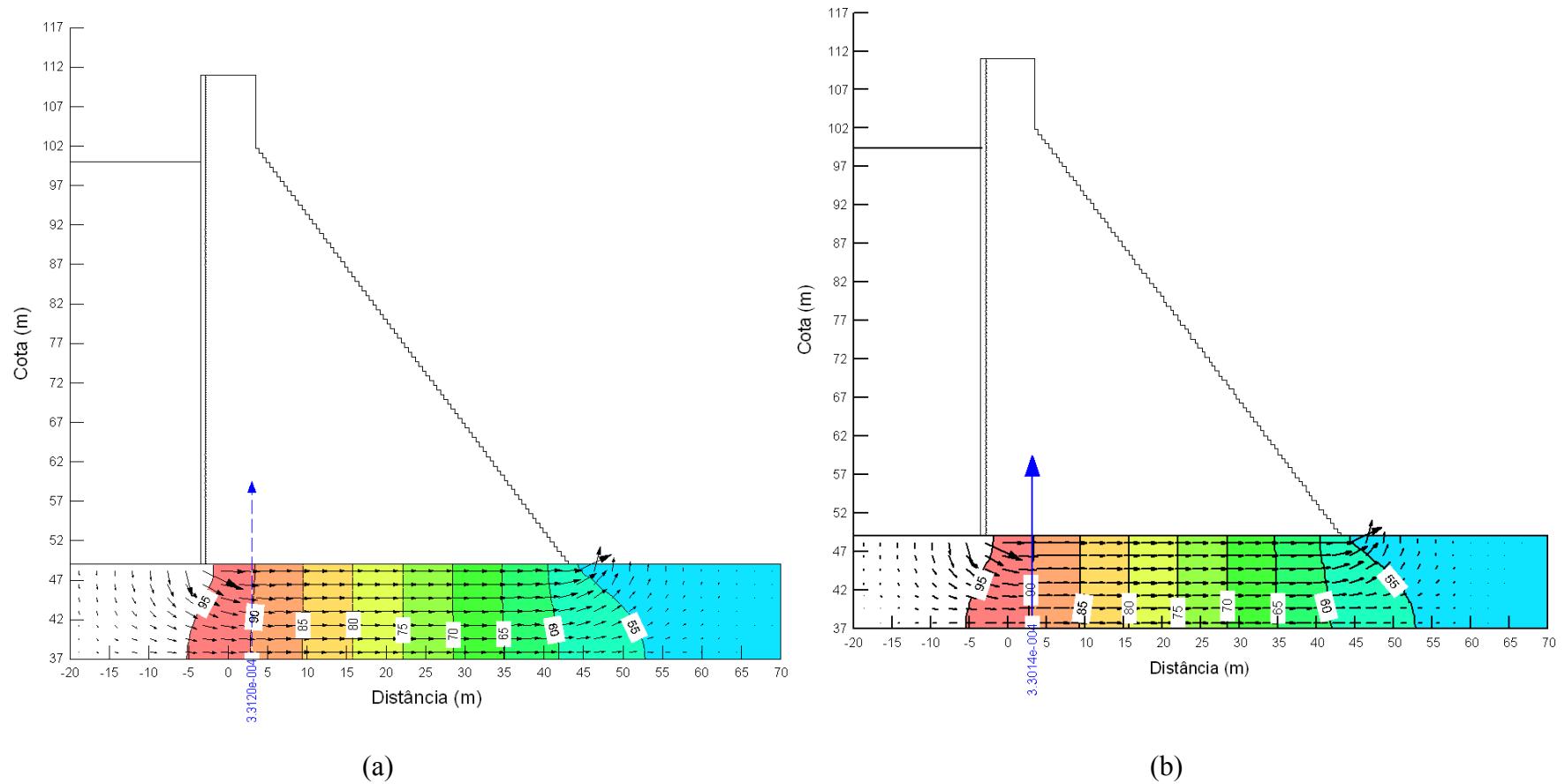


Figura B 138 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

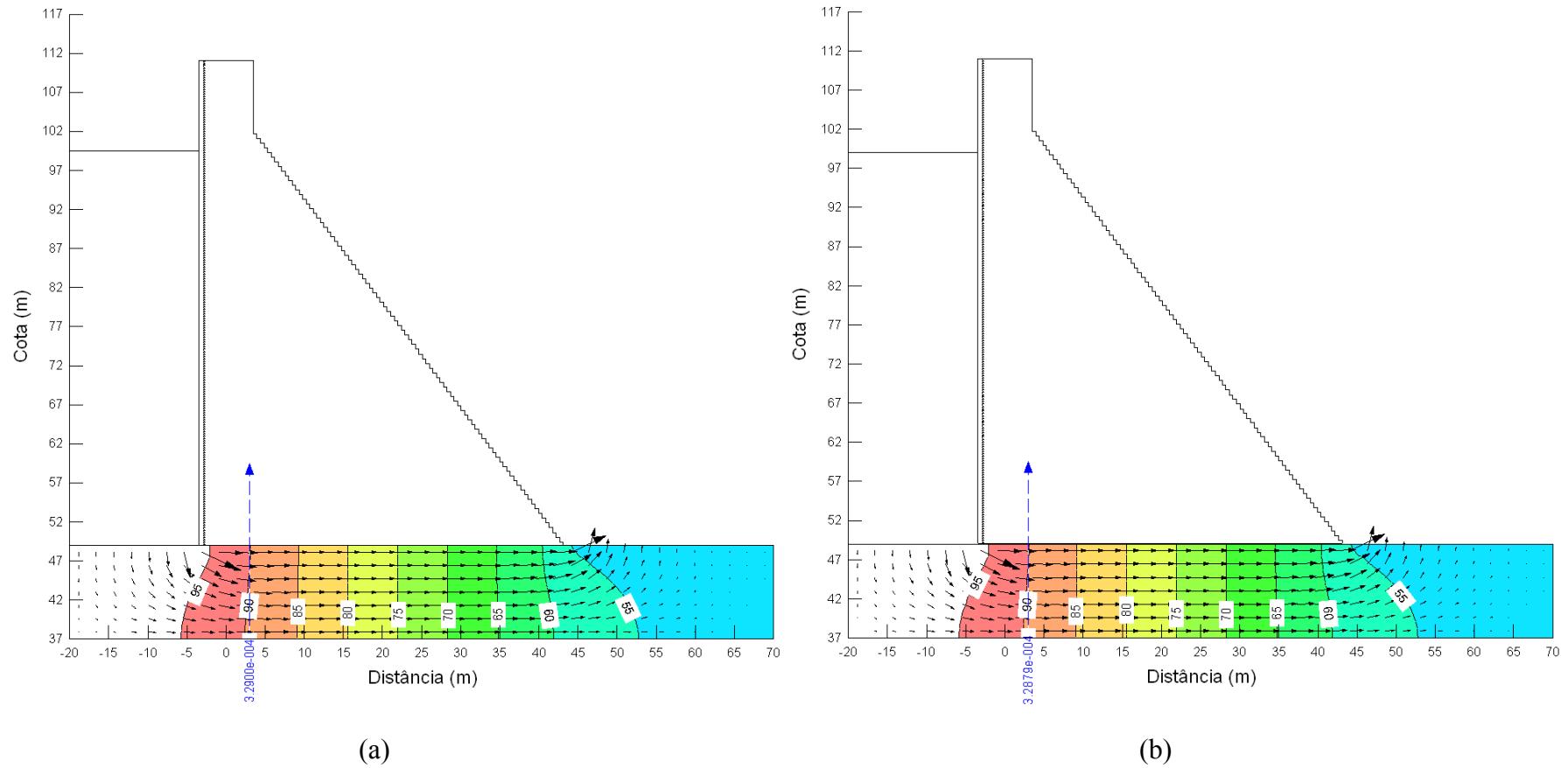


Figura B 139 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

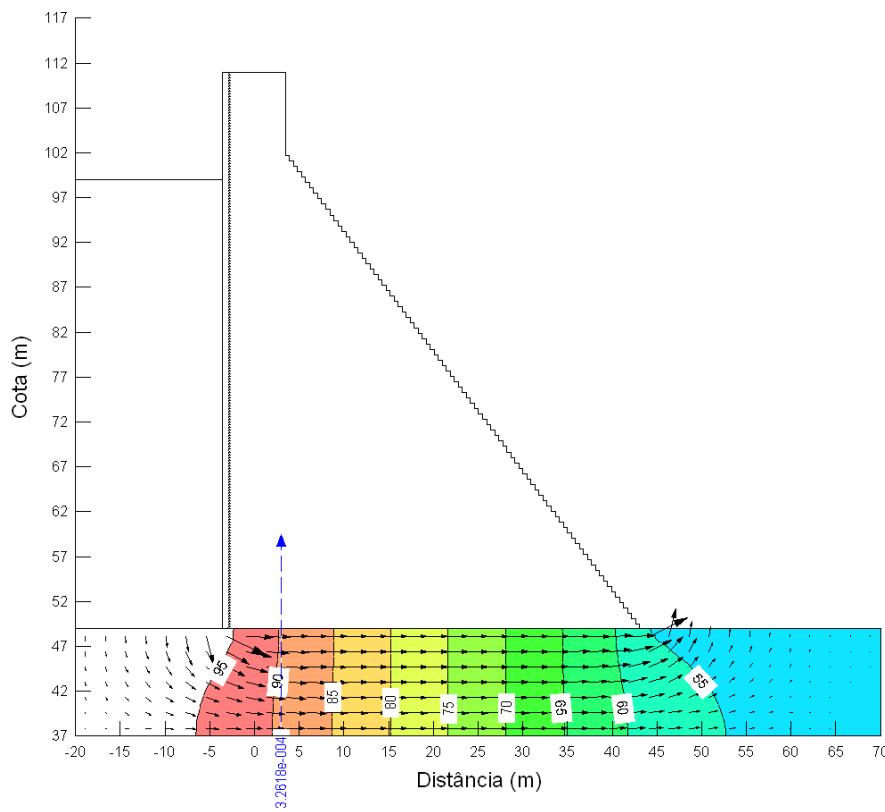


Figura B 140 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 21, setembro de 2005

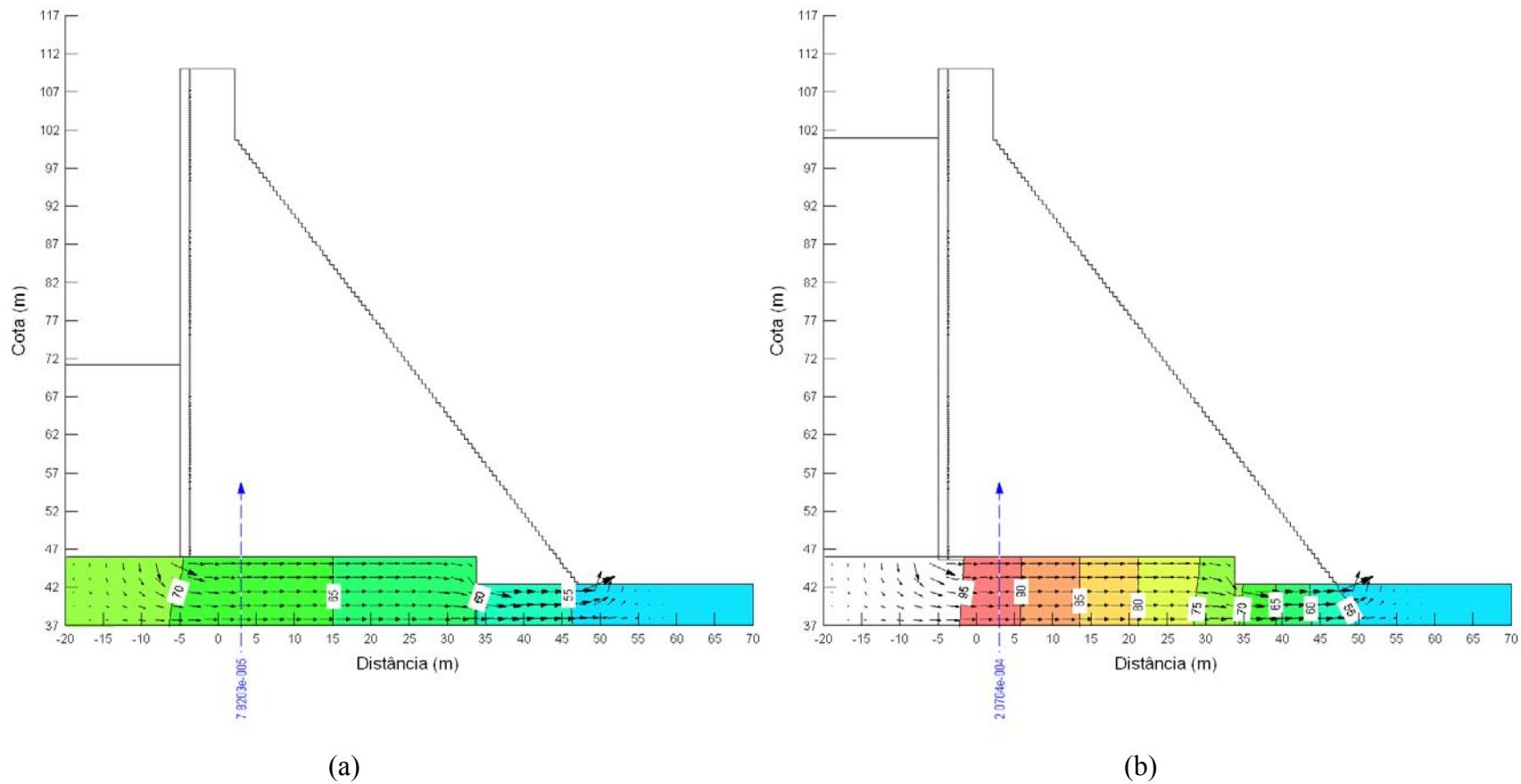


Figura B 141 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

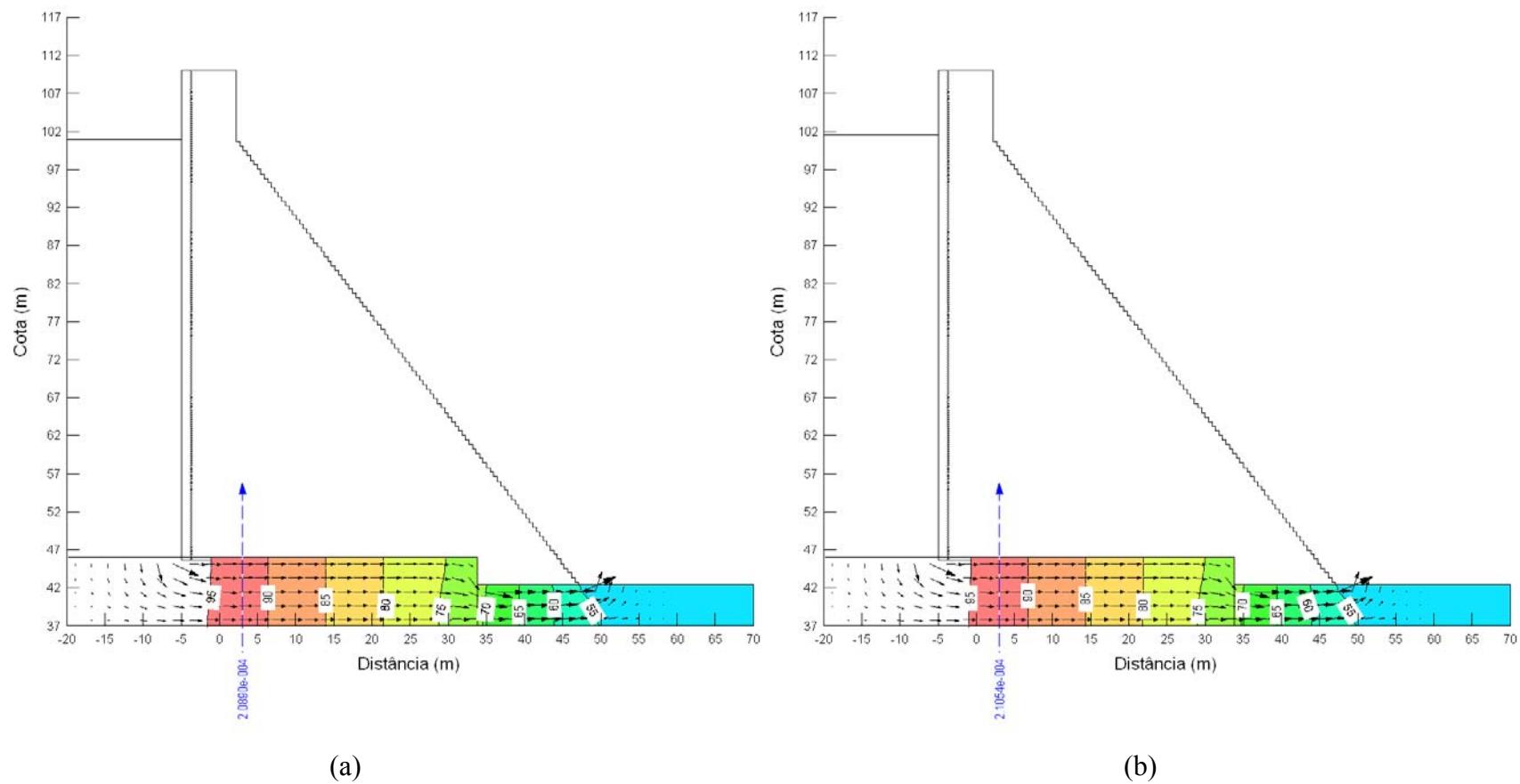


Figura B 142 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

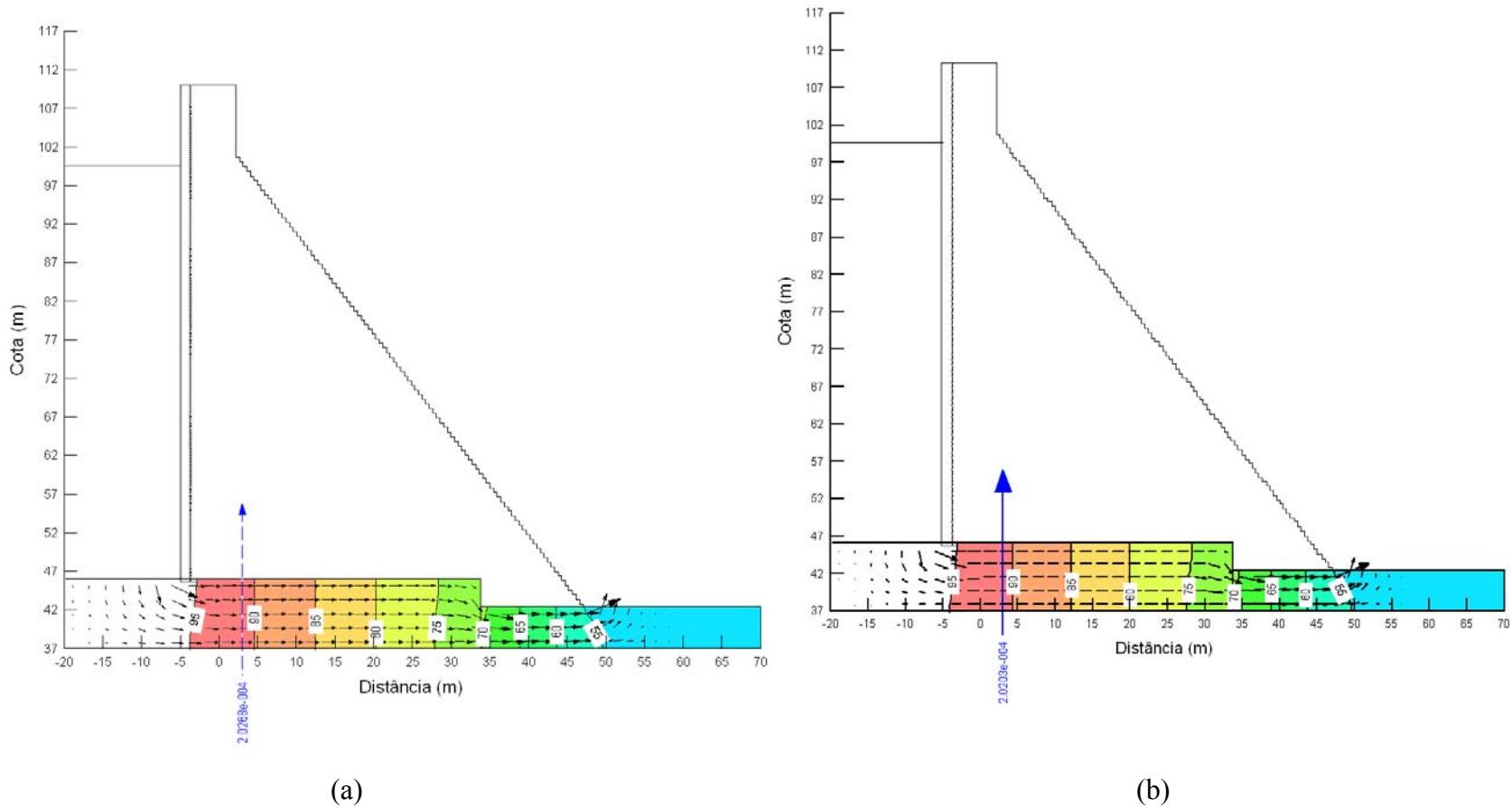


Figura B 143 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

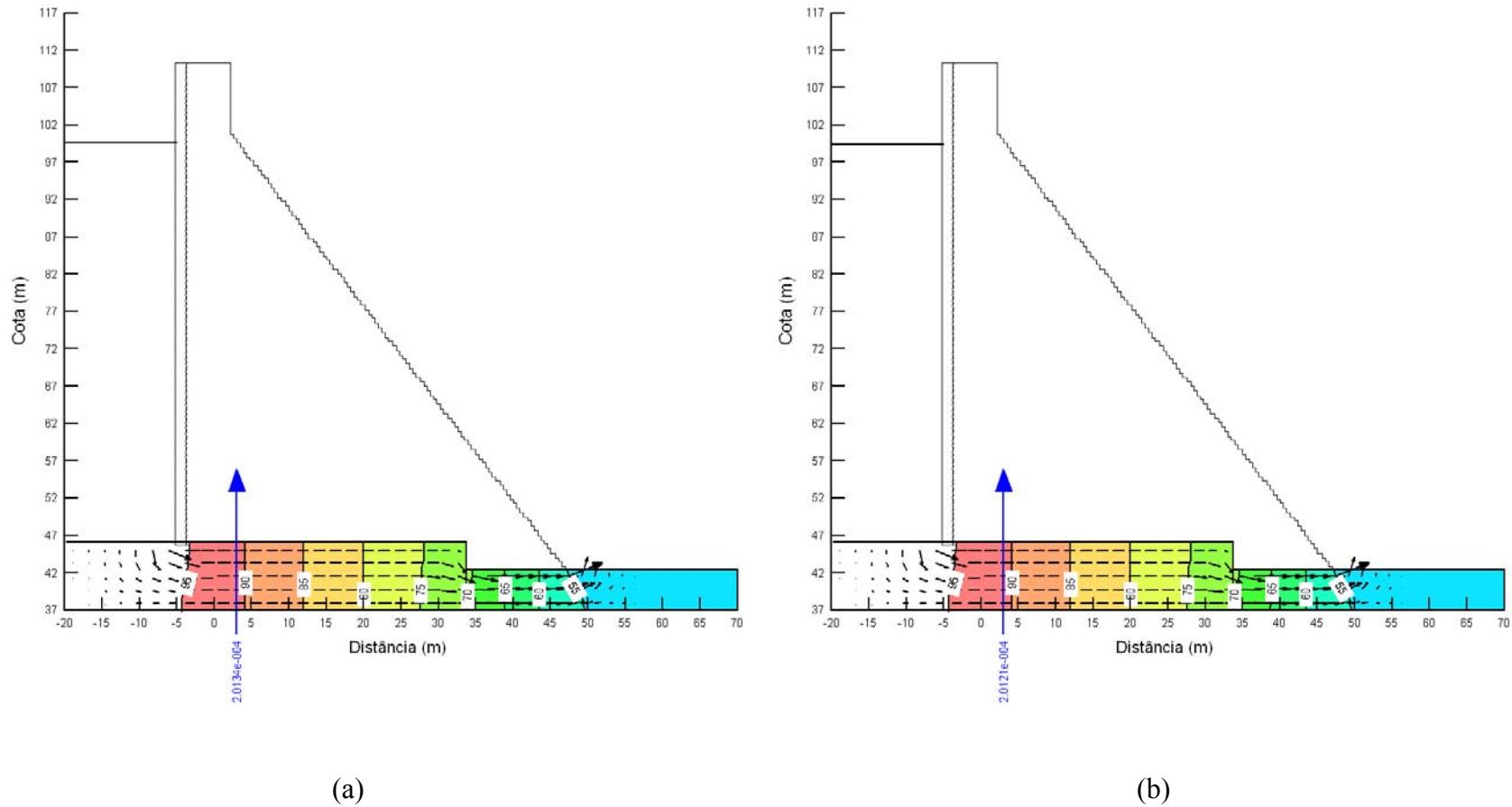


Figura B 144 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

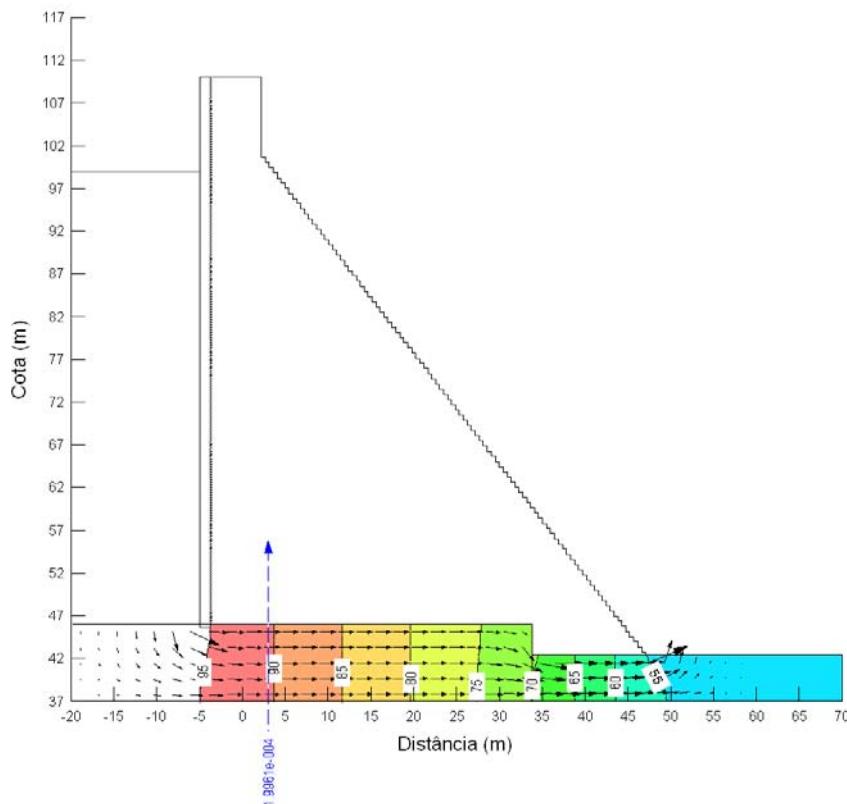


Figura B 145 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 26, setembro de 2005

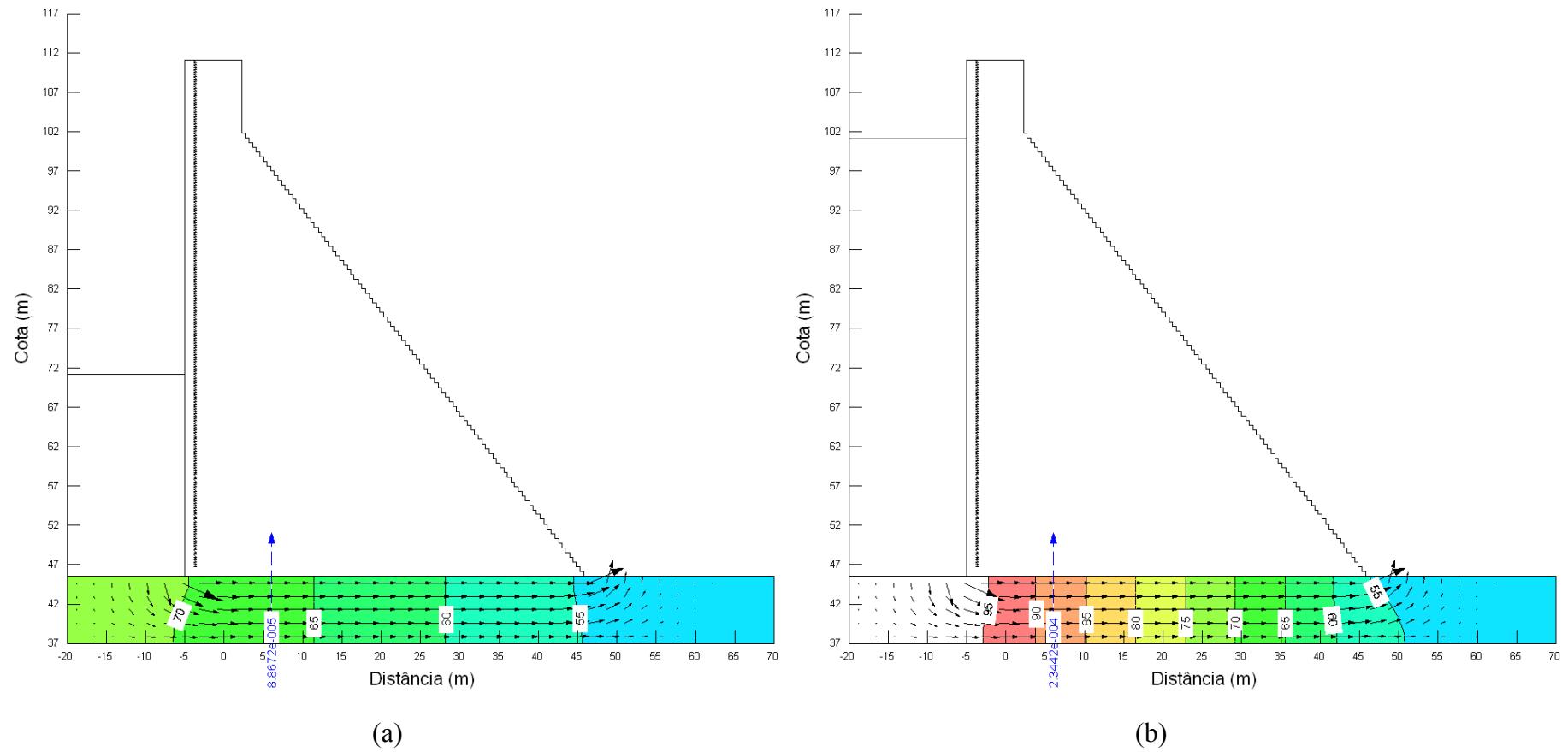


Figura B 146 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) janeiro de 2004 e (b) abril de 2004

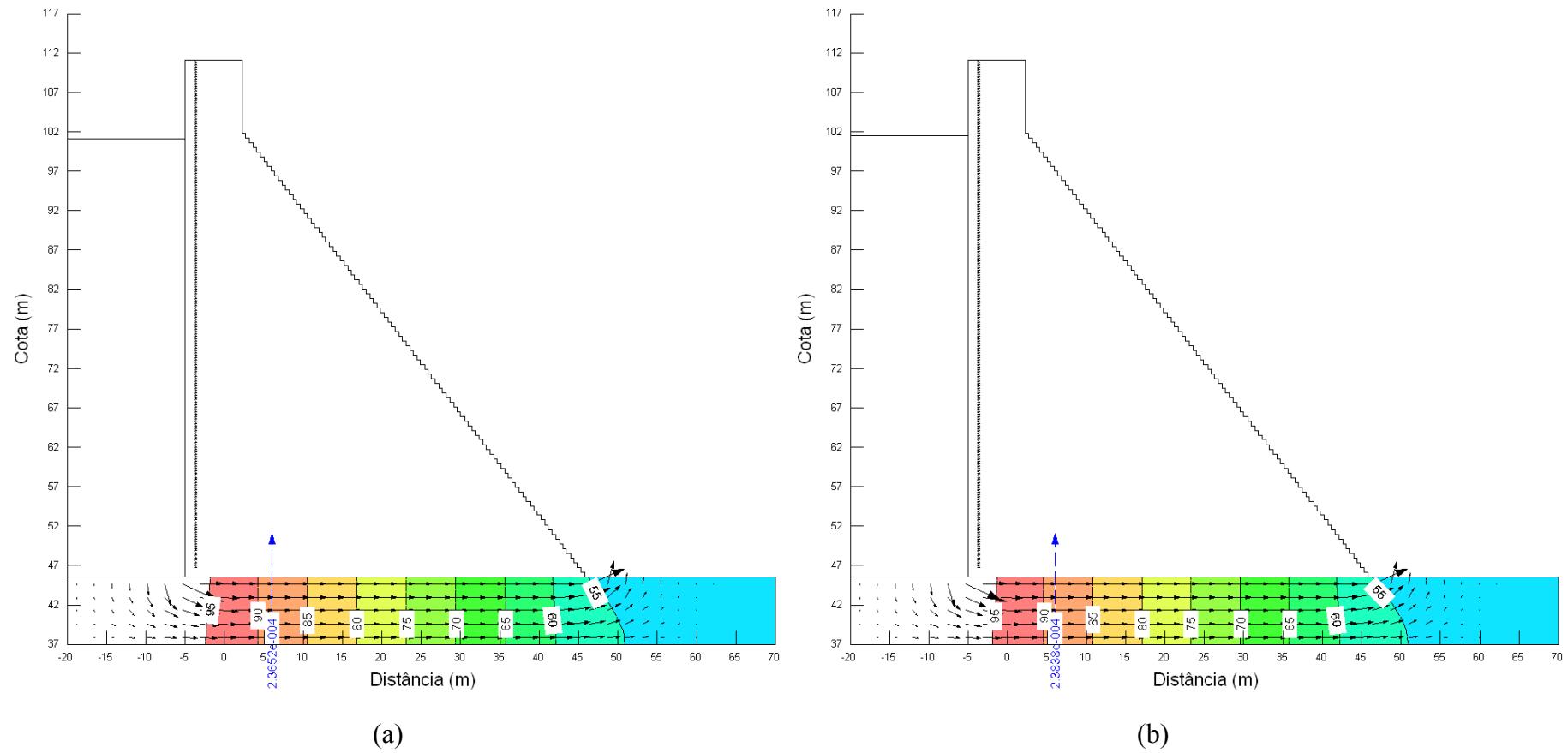


Figura B 147 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) maio de 2004 e (b) julho de 2004

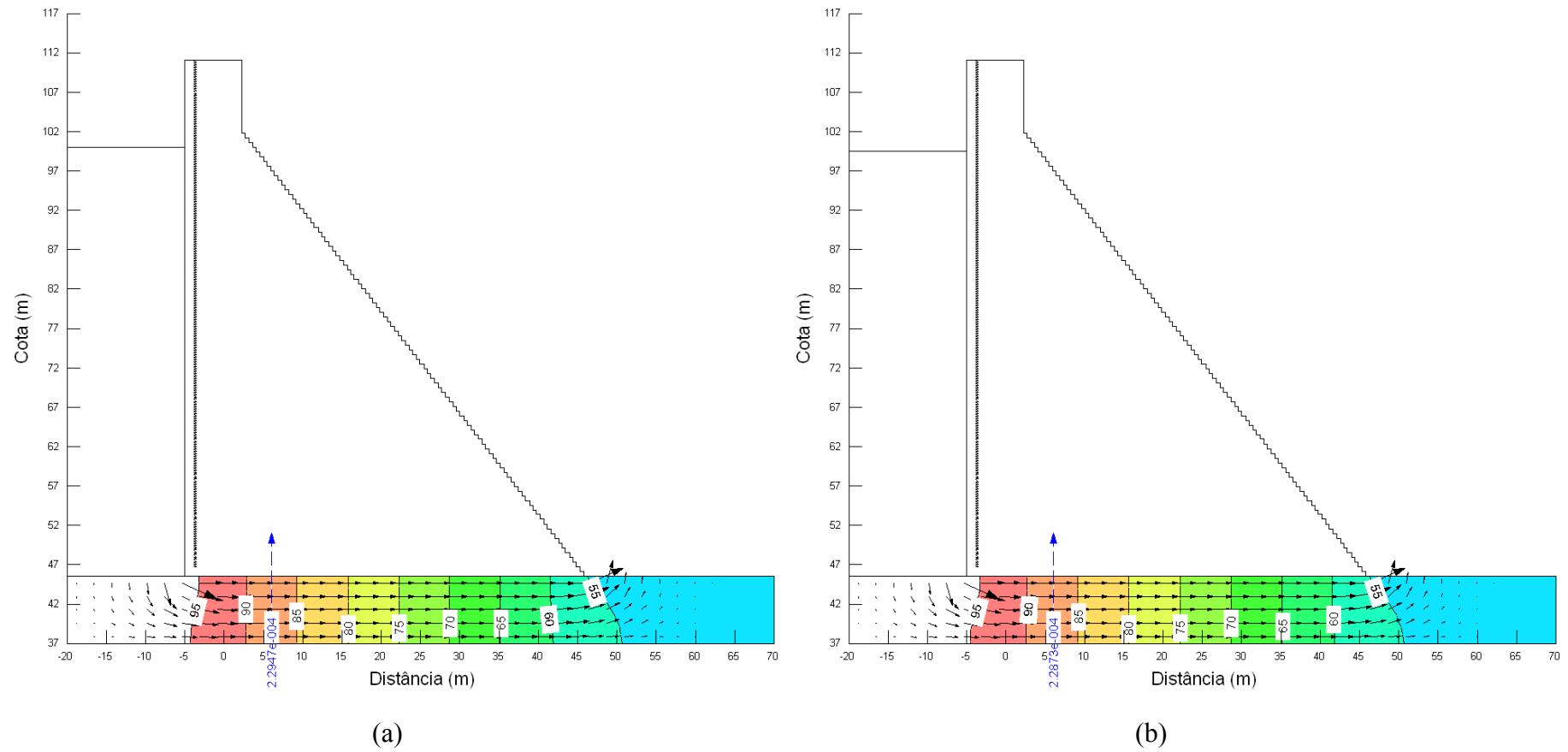


Figura B 148 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) janeiro de 2005 e (b) fevereiro de 2005

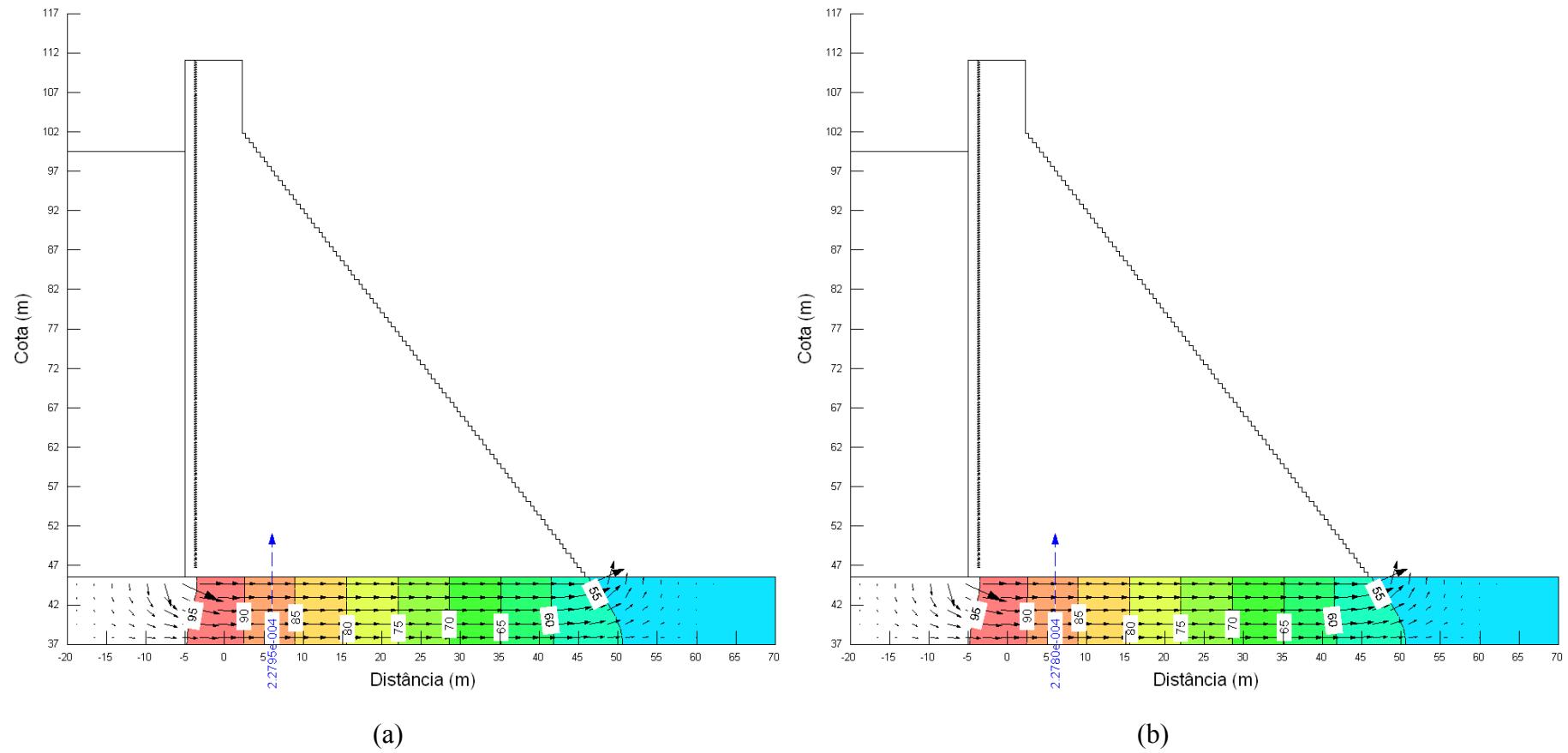


Figura B 149 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, (a) março de 2005 e (b) agosto de 2005

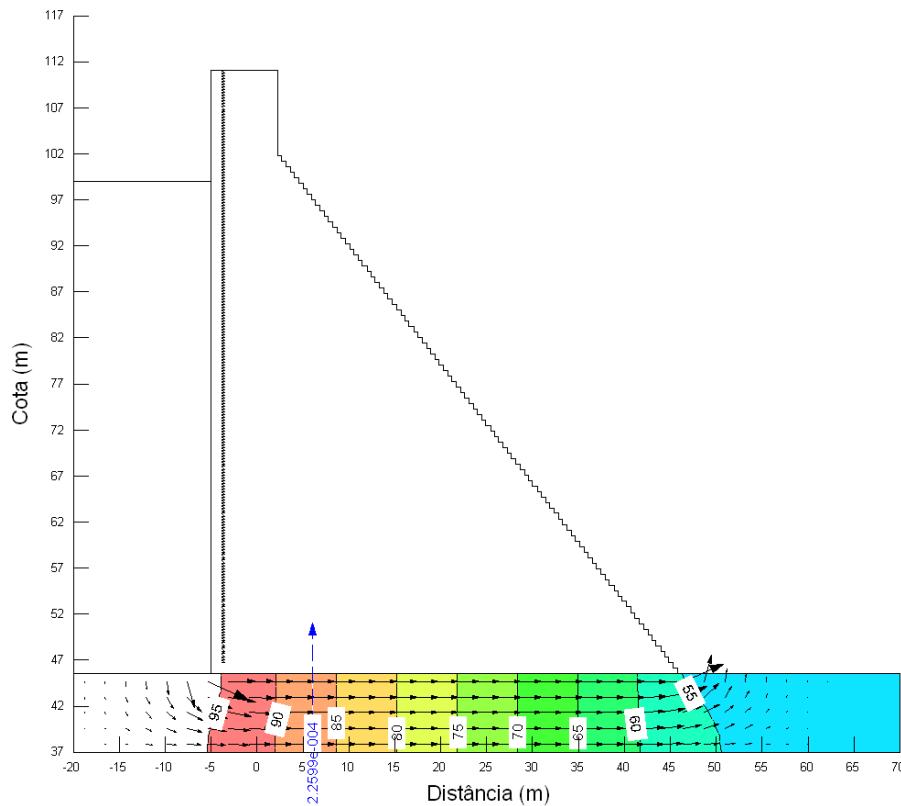


Figura B 150 – Quinto cenário da simulação da rede de fluxo referente à Seção 31, setembro de 2005