

## 5 Regime de Fluxo

O presente capítulo apresenta as simulações das condições de fluxo bidimensional no corpo e na fundação da barragem de Curuá-Una. As análises foram feitas com a utilização do programa Flow 3D (Gerscovich, 1994).

Inicialmente foi realizada a validação do programa para diversas condições de fluxo bidimensional. Em seguida, foram estabelecidas as características geométricas, as condições de contorno e a faixa dos parâmetros hidráulicos dos materiais do maciço e da fundação da barragem de Curuá-Una.

Uma vez analisados os dados da instrumentação (capítulo 04) foi possível reproduzir a condição atual de fluxo e simular o comportamento da barragem para diversas cotas do reservatório. A restituição da condição atual de fluxo teve como objetivo o estabelecimento de um modelo de comportamento do fluxo, com base nos valores dos coeficientes de permeabilidade dos materiais da barragem.

### 5.1. Programa Flow 3D

O Programa Flow 3D é uma ferramenta numérica, baseada no método dos elementos finitos, que permite a simulação de regimes de fluxos permanente, transiente, bidimensional ou tridimensional, em meios saturados e/ou não saturados (Gerscovich, 1994).

Dado ao seu caráter geral, o programa possibilita acompanhar, ao longo do tempo, o processo de saturação de um meio. No caso de simulação de fluxo permanente em barragens de terra, o processo inicia-se com a movimentação de uma frente de saturação vinda do talude de montante em direção ao talude de jusante ou a qualquer sistema interno de drenagem. Durante este processo as cargas de pressão vão se alterando até que o equilíbrio seja atingido.

O programa Flow 3D requer a definição prévia dos seguintes parâmetros:

- i. Geometria - definida pela seção a ser analisada, a qual é discretizada em uma malha de elementos quadrangulares ou triangulares, para o caso de geometrias bidimensionais, ou cúbicos, para geometrias tridimensionais.

- ii. Parâmetros hidráulicos - definem as relações entre condutividade hidráulica relativa ( $k_r$ ), teor de umidade volumétrico ( $\theta$ ) e carga de pressão ( $\psi$ ), para os diversos materiais envolvidos na simulação. A condutividade hidráulica relativa é definida pela razão entre as permeabilidades nas condições não saturada e saturada ( $k_r = k / k_{sat}$ ) e varia entre 0 e 1. O teor de umidade volumétrico pode ser calculado em função da porosidade ( $n$ ) e do grau de saturação ( $S$ ) ( $q = n.S$ ). A Figura 67 mostra curvas típicas normalmente utilizadas em simulações que visam analisar a região saturada resultante de regimes permanentes. Nestes casos, a forma das curvas do trecho não saturado não interfere no resultado final.

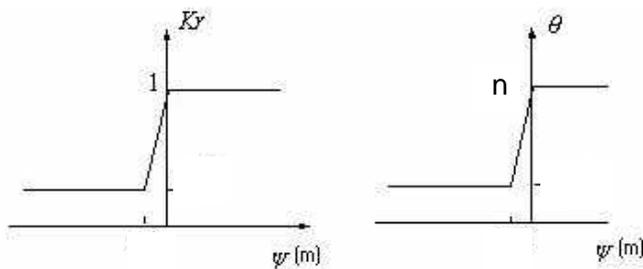


Figura 67 - Parâmetros hidráulicos em simulações de fluxo permanente

- iii. Tempo de execução - define o período a ser analisado. No caso de análises de fluxo permanente, o tempo deve ser tal que os valores de carga de pressão calculados nos nós seja mantido constante. A definição deste tempo depende da magnitude e das relações entre os parâmetros hidráulicos.
- iv. Condições iniciais - definem as cargas de pressão iniciais para cada nó. Esta condição pode ser fornecida de diferentes maneiras: (a) valor nodal constante; (b) cargas de pressão geradas a partir de um valor constante de carga total; (c) cargas de pressão geradas a partir do conhecimento dos valores estipulados em determinados nós da malha.
- v. Condições de contorno - definem as fronteiras da geometria analisada. O programa admite a existência de superfícies impermeáveis, superfícies livres e regiões com carga ou fluxo prescritos. No caso de superfície com fluxo prescrito, o valor da vazão, aplicado ao nó, pode variar ao longo do tempo, possibilitando a simulação de diferentes intensidades de vazão. Na fronteira definida como superfície livre, admite-se inicialmente que a carga de

pressão é nula e, dependendo das vazões calculadas, esta condição é alterada.

O programa FLOW3D foi escrito na linguagem FORTRAN e não possui rotinas de geração de malha e pós-processamento. Portanto, para a definição de geometria e geração da malha, foi utilizado o programa EGMTB. Este programa fornecia um arquivo de dados que deveria ser ajustado para um visualizador de malhas – POS3D. Parte deste ajuste era feita através de programa (Dados.exe) especialmente desenvolvido para este fim. Os programas EGMTB e POS3D foram desenvolvidos na PUC-Rio (Gerscovich, 1994).

Uma vez visualizada a malha, eram identificadas as regiões e os nós com condição de contorno ou carregamento a ser imposto no problema. Foi utilizado um programa (Dad\_fl.exe) para ajustar o arquivo de dados. Depois de ajustado, o arquivo de dados deveria receber as informações pertinentes ao fluxo. Uma vez pronto, o arquivo de dados era processado pelo programa FLOW3D. Nesta fase era definida a condição inicial do problema. O arquivo de saída fornecido pelo programa era novamente ajustado para que fosse possível a visualização dos resultados da análise.

## 5.2. Validação do programa

Com o objetivo de avaliar a eficiência do programa FLOW3D, foram simuladas três condições para uma mesma geometria de barragem: (a) isotrópica e homogênea; (b) anisotrópica e homogênea; e (c) isotrópica e heterogênea. As distribuições de carga de pressão previstas pelo programa foram comparadas com os dados obtidos por meio de solução gráfica.

Em todos os casos considerou-se uma barragem com 12,5m de altura, 43,0m de comprimento e nível d'água a 12,0m de altura. A malha de elementos finitos (Figura 68) possui 204 nós e 172 elementos.

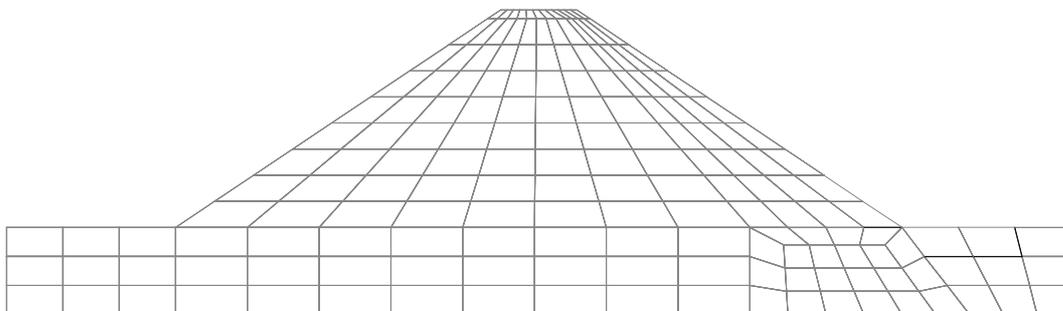


Figura 68 - Malha utilizada na validação do programa

A barragem foi dividida em três regiões distintas: corpo da barragem, dreno do pé de jusante e fundação (Figura 69).

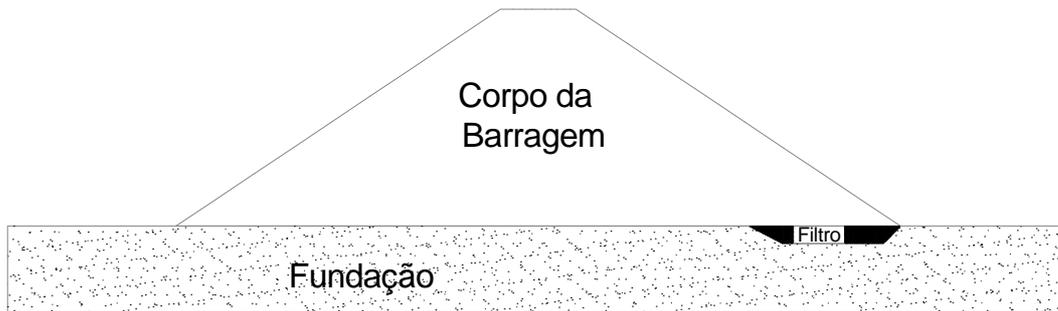


Figura 69 - Regiões da barragem consideradas na validação

Visando simular o reservatório da barragem, foram atribuídos valores prescritos de carga de pressão nos nós localizados na face de montante. O valor da carga de pressão atribuída para cada nó refere-se ao nível d'água a 12,0m de altura.

A jusante estabeleceu-se uma região com condição de contorno livre; isto é, os nós nesta região não possuem uma condição de fluxo pré-estabelecida. Com isto a linha freática calculada pelo programa poderá ou não interceptar esta superfície livre. Para isto, cinco nós localizados no pé de jusante foram admitidos como nós de superfície livre (Figura 70).

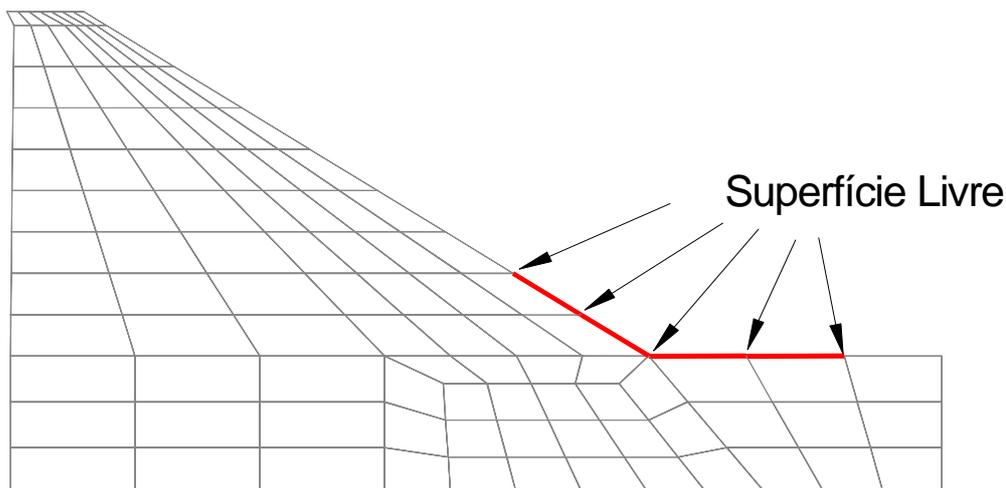


Figura 70 - Superfície livre adotada na validação

As permeabilidades na condição saturada variaram em função de cada um dos casos analisados, mas as relações entre  $k_r$ ,  $\theta$  e  $\psi$  foram mantidas constantes conforme mostra a Figura 71.

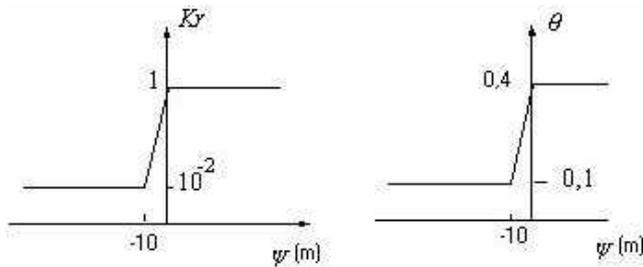


Figura 71 - Parâmetros hidráulicos da validação:  $\psi$  (carga de pressão),  $\theta$  (teor de umidade volumétrica) e  $k_r$  (condutividade hidráulica relativa)

### 5.2.1. Homogênea e Isotrópica

O primeiro caso simulado considera que os materiais da barragem e fundação são homogêneos e isotrópicos. A Tabela 33 mostra os valores utilizados para os coeficientes de permeabilidade na condição saturada.

Tabela 33 - Coeficientes de permeabilidade para barragem homogênea e isotrópica

Material	Localização	$k_x$ (m/dia)	$k_y$ (m/dia)
01	Corpo	8,64	8,64
02	Fundação	0,00864	0,00864
03	Dreno	8640	8640

$k_x$ : coeficiente de permeabilidade na direção horizontal  
 $k_y$ : coeficiente de permeabilidade na direção vertical

A Figura 72 traz a distribuição de carga de pressão, considerando um tempo de percolação igual a 200 dias. Este tempo foi estipulado para que o regime de fluxo atingisse a condição permanente.

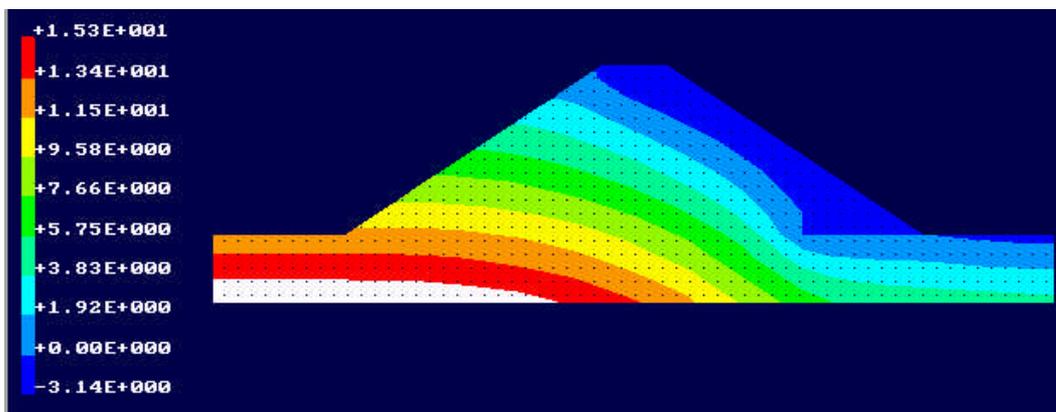


Figura 72 - Distribuição de carga de pressão: homogênea isotrópica (escala em metros)

A Tabela 34 e a Figura 73 comparam os resultados obtidos a partir do traçado da rede de fluxo com os calculados pelo programa FLOW3D. Na Tabela

34 estão apresentadas as magnitudes de carga de pressão para diversos pontos em uma mesma horizontal no interior da barragem. Já a Figura 73 apresenta a linha freática obtida por ambos os métodos. A comparação entre resultados indica uma excelente concordância.

Tabela 34- Comparação dos métodos numérico e gráfico: Homogênea e Isotrópica

Nó	Posição Horizontal (m)	Cota de Instalação (m)	Cota Piezométrica (m)		
			Numérica	Gráfica	Erro (%)
91	23,68	6,50	16,09	16,00	0,6
92	27,47	6,50	15,22	15,10	0,8
93	31,26	6,50	14,00	13,90	0,7
94	35,06	6,50	12,43	12,30	1,1
95	38,85	6,50	10,41	10,30	1,1
96	42,64	6,50	7,42	7,40	0,3
97	44,65	6,50	6,09	6,10	0,2

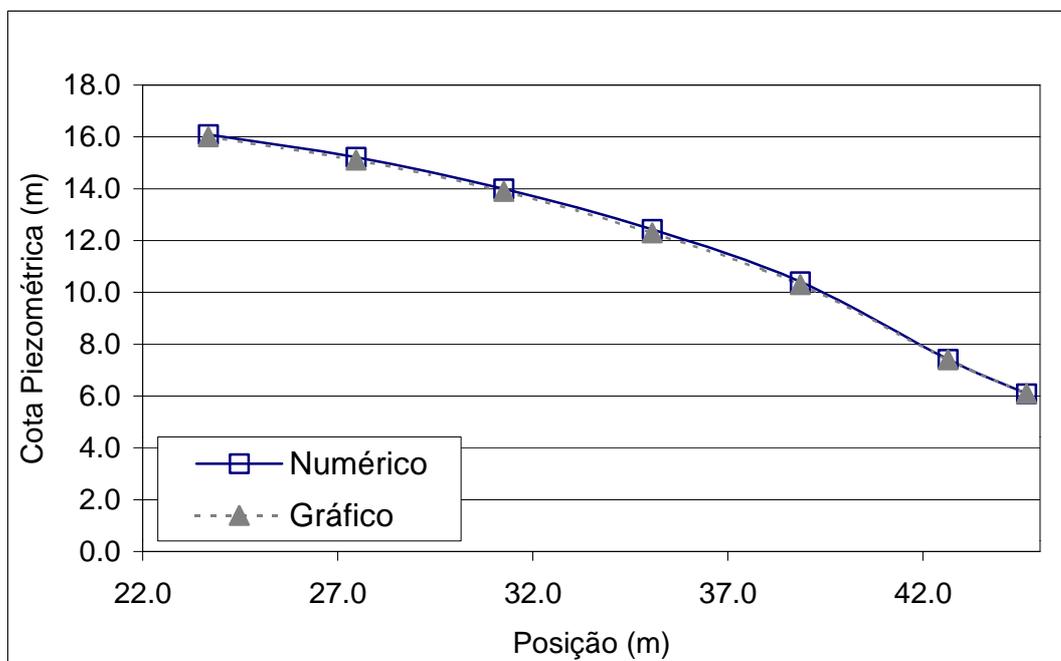


Figura 73 - Comparação das cotas piezométricas obtidas pelos métodos numérico e gráfico (Barragem Homogênea e Isotrópica)

### 5.2.2. Homogênea e Anisotrópica

Neste caso utilizou-se uma seção homogênea, porém com um grau de anisotropia  $k_x = 2k_y$ . A Tabela 35 mostra os valores utilizados para os coeficientes de permeabilidade na condição saturada.

Tabela 35 - Coeficientes de permeabilidade para barragem homogênea anisotrópica

Material	Localização	$k_x$ (m/dia)	$k_y$ (m/dia)
01	Corpo	17,28	8,64
02	Fundação	0,00864	0,00864
03	Dreno	8640	8640

$k_x$ : coeficiente de permeabilidade na direção horizontal  
 $k_y$ : coeficiente de permeabilidade na direção vertical

A Figura 74 apresenta a distribuição de carga de pressão. Nesta simulação também foi necessário um tempo de 200 dias para se atingir a condição de fluxo permanente.

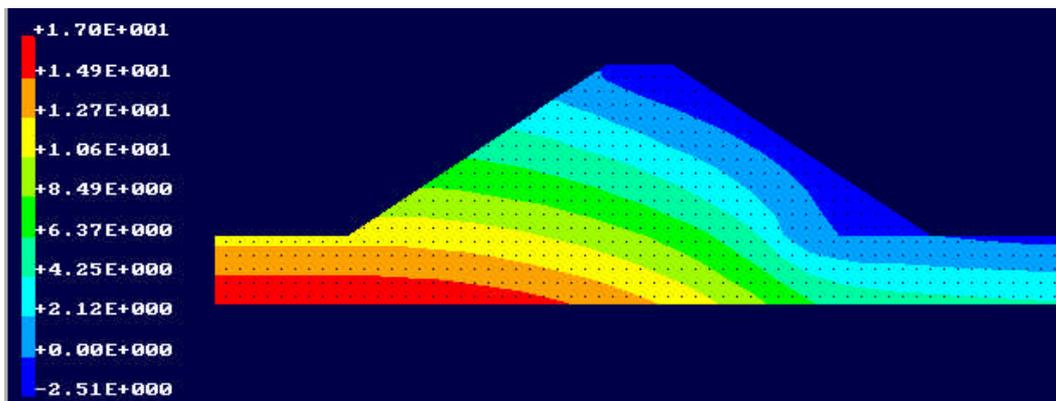


Figura 74 - Distribuição de carga de pressão: homogênea anisotrópica (escala em metros)

A maior permeabilidade na direção horizontal acarreta uma distribuição de carga de pressão com forma mais alongada para jusante, se comparada com a obtida na barragem isotrópica (mostrada anteriormente).

Da mesma forma que o caso anterior, utilizou-se também o método gráfico (rede de fluxo) para a resolução do problema. A Tabela 36 e a Figura 75 comparam as cargas piezométricas obtidas pelas soluções numérica e gráfica. Os resultados mostram-se coerentes e validam a utilização do programa como ferramenta de solução de problemas de fluxo bidimensional em barragens homogêneas e anisotrópicas.

Tabela 36 - Comparação do métodos numérico e gráficos: Homogênea e Anisotrópica

Nó	Posição Horizontal (m)	Cota de Instalação (m)	Cota Piezométrica (m)		
			Numérica	Gráfica	Erro (%)
91	23,68	6,50	15,73	15,60	0,8
92	27,47	6,50	14,83	14,60	1,6
93	31,26	6,50	13,68	13,50	1,3
94	35,06	6,50	12,24	11,90	2,9
95	38,85	6,50	10,37	10,00	3,7
96	42,64	6,50	7,79	7,60	2,5
97	44,65	6,50	7,56	7,30	3,6

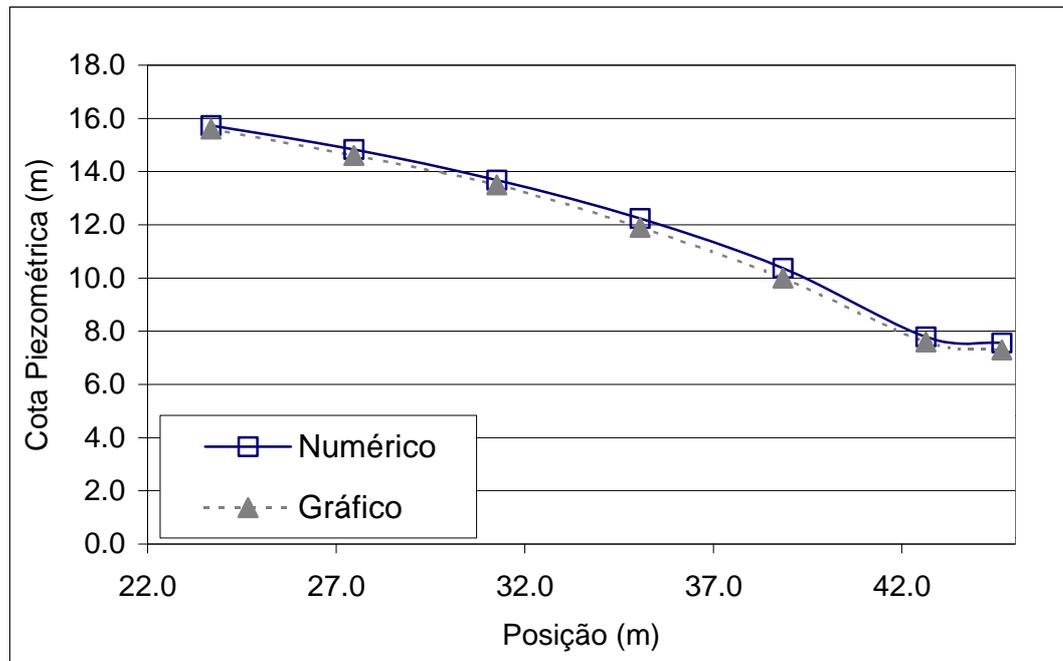


Figura 75 - Comparação das cotas piezométricas obtidas pelos métodos numérico e gráfico (Barragem Homogênea e Anisotrópica)

### 5.2.3. Heterogênea e Isotrópica

Neste caso o corpo da barragem foi dividido em duas regiões com materiais distintos (Figura 76), porém isotrópicos em relação à permeabilidade.

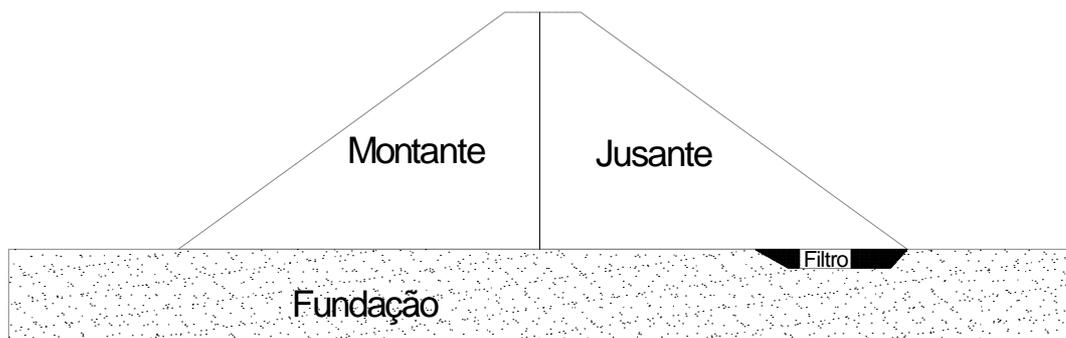


Figura 76 - Regiões consideradas para a barragem heterogênea e isotrópica

A Tabela 37 mostra os materiais utilizados para a barragem heterogênea e respectivos coeficientes de permeabilidade, na condição saturada. O material de montante é 5 vezes mais permeável que o de jusante.

A Figura 77 mostra a distribuição de carga de pressão, para um tempo de percolação igual a 200 dias, necessário para se atingir a condição de regime permanente. A perda de carga na primeira metade do corpo da barragem é praticamente nula, tendo em vista o contraste de permeabilidades entre as 2

regiões. No solo de menor permeabilidade, verifica-se uma perda de carga significativa.

Tabela 37 - Coeficientes de permeabilidade para barragem homogênea anisotrópica

Material	Localização	$k_x$ (m/dia)	$K_y$ (m/dia)
01	Montante	8,64	8,64
02	Jusante	1,728	1,728
03	Fundação	0,00864	0,00864
04	Dreno	8640	8640

$k_x$ : coeficiente de permeabilidade na direção horizontal  
 $k_y$ : coeficiente de permeabilidade na direção vertical

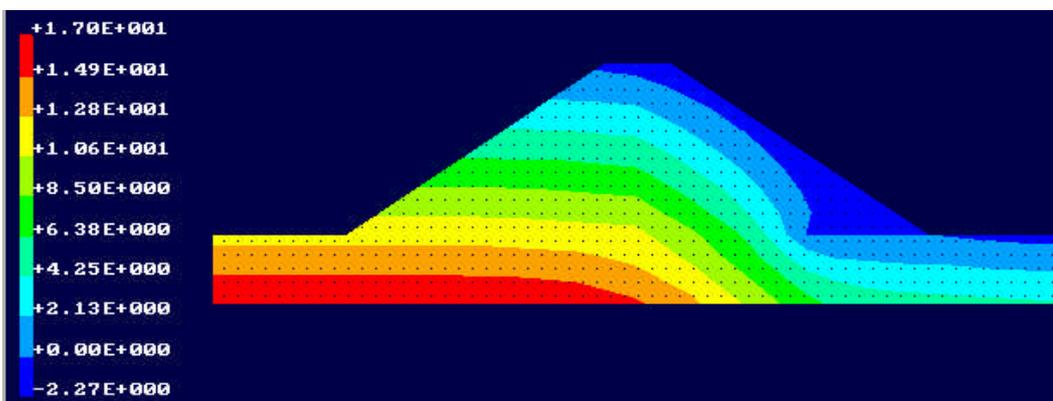


Figura 77 - Distribuição de carga de pressão: heterogênea isotrópica (escala em metros)

O método gráfico foi mais uma vez utilizado para avaliar a eficiência do programa. A Tabela 38 e a Figura 78 mostram a comparação entre as soluções numérica e gráfica (rede de fluxo). Este caso foi o que apresentou maiores diferenças nas cotas piezométricas obtidas pelos dois métodos. No entanto estas diferenças podem ser atribuídas à imprecisão no traçado da rede, que é bastante dificultado na região de contato entre os dois materiais. Apesar destas diferenças, o erro máximo da ordem de 7% pode ser considerado aceitável e portanto válida a utilização do programa como ferramenta para análise das condições de fluxo de uma barragem heterogênea e isotrópica.

Os três casos apresentados revelam uma concordância adequada das soluções fornecidas pelo programa Flow 3D com as do método gráfico. Gerscovich (1994) também validou o programa simulando diversos casos para condições de fluxo permanente / transiente e 2D / 3D, em meios saturado e não saturado.

Tabela 38 - Comparação do métodos numérico e gráfico: Homogênea e Anisotrópica

Cota Piezométrica (m)					
Nó	Posição Horizontal (m)	Cota de Instalação (m)	Numérica	Gráfica	Erro (%)
91	23,68	6,50	16,76	16,60	1,0
92	27,47	6,50	16,53	16,20	2,0
93	31,26	6,50	16,18	15,80	2,4
94	35,06	6,50	14,07	13,60	3,5
95	38,85	6,50	11,56	10,90	6,1
96	42,64	6,50	7,94	7,40	7,3
97	44,65	6,50	6,40	6,00	6,7

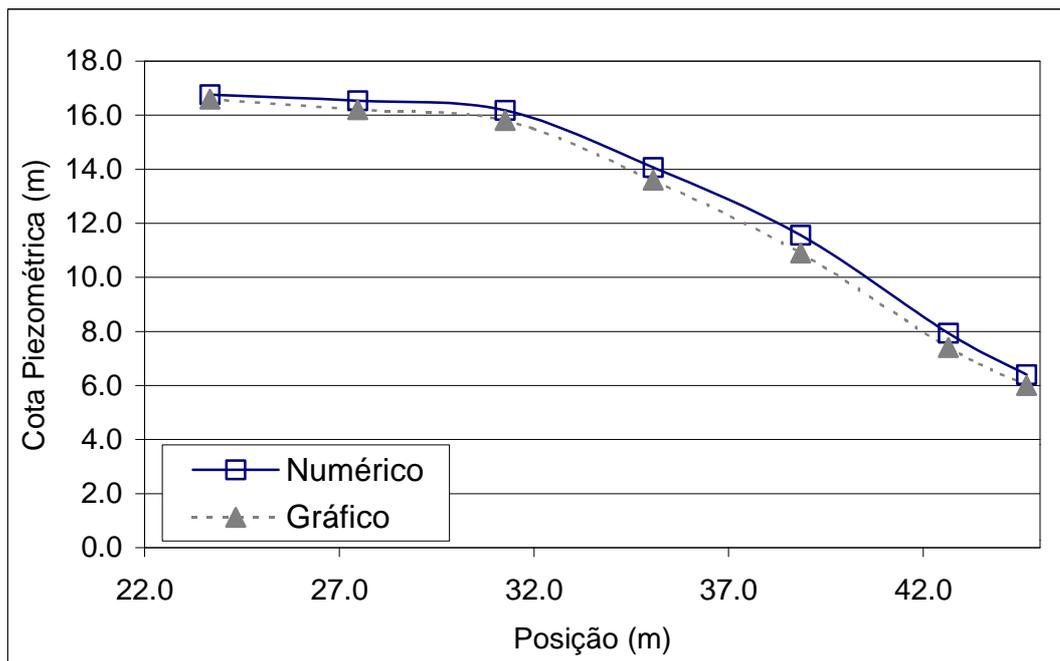


Figura 78 - Comparação das cotas piezométricas obtidas pelos métodos numérico e gráfico (Barragem Heterogênea e Isotrópica)

### 5.3. Definição dos Dados de Entrada

#### 5.3.1. Geometria

As análises tiveram como base a seção da estaca 38 (Figura 79), considerada típica para a Barragem de Curuá-Una. De forma aproximada, pode-se considerar que a barragem está fundada na cota 49m.

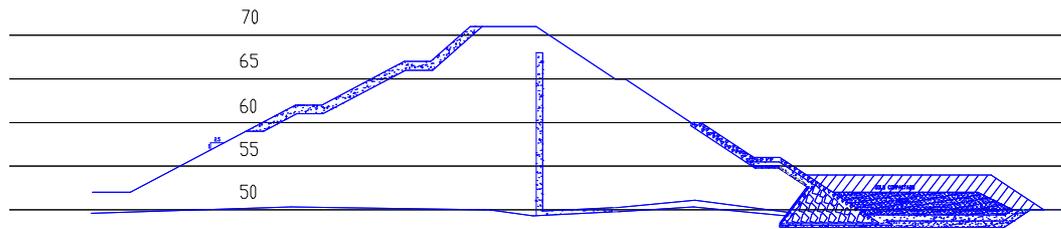


Figura 79 - Seção típica da barragem na estaca 38

A discretização espacial da barragem foi feita com elementos quadrilaterais. A Figura 80 apresenta a malha de elementos finitos, utilizada nos estudos, composta por 755 nós e 696 elementos,. A Figura 81 detalha as dimensões e materiais analisados.

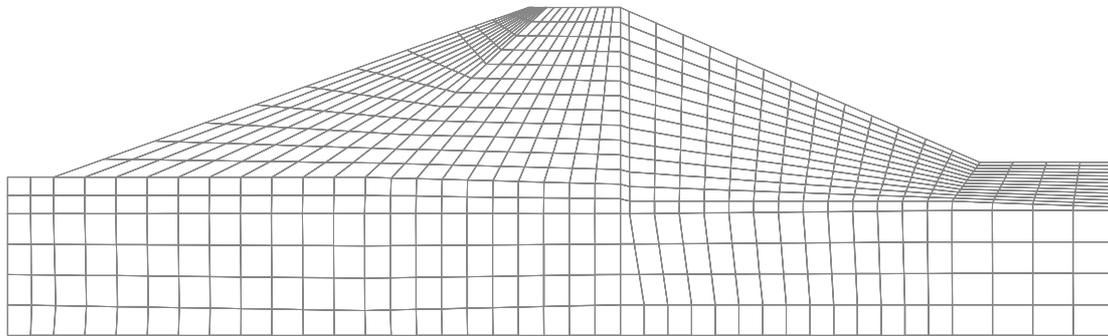


Figura 80 - Malha de elementos finitos utilizada

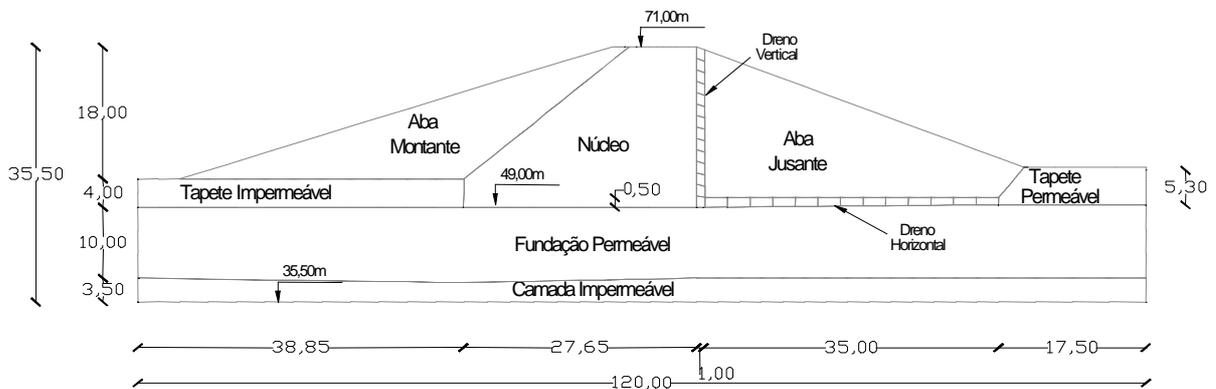


Figura 81 – Dimensões da malha e materiais analisados

Ressalta-se que o tapete impermeável a montante, com comprimento de 240m, não foi totalmente discretizado. Este fato deve-se a uma limitação do gerador de malhas utilizado. Para contornar este problema, foi fixada uma condição de contorno que impõe fluxo pela fundação. Este aspecto será discutido posteriormente.

### 5.3.2. Parâmetros Hidráulicos

Os parâmetros hidráulicos representaram a principal incógnita na simulação do padrão de fluxo correspondente às condições atuais de operação da barragem. O levantamento de informações disponíveis na literatura, associado aos resultados experimentais obtidos no presente trabalho, possibilitou uma definição da ordem de grandeza da permeabilidade saturada dos diversos materiais da barragem. A Tabela 39 resume a faixa de valores encontrada para o coeficiente  $k_{sat}$ . Estes resultados, entretanto, são insuficientes para se avaliar o grau de anisotropia em termos de permeabilidade. Assim sendo, devido aos estudos anteriores de Amorim (1976), considerou-se uma anisotropia inicial  $k_x = 5k_y$ .

Quanto às funções, que definem as relações entre a condutividade hidráulica relativa ( $k_r=k/k_{sat}$ ), carga de pressão ( $\psi$ ) e teor de umidade volumétrico ( $\theta$ ), foram adotadas as curvas mostradas na Figura 82.

Tabela 39 - Faixa de valores para os coeficientes de permeabilidade ( $k_{sat}$ )

Nº	Material	Região	$k_{max}$		$k_{min}$		Ensaio	Fonte
			m/dia	cm/s	m/dia	cm/s		
1	Areia Silto Argilosa	Aba Montante	$8 \times 10^{-3}$	$9 \times 10^{-6}$	$8 \times 10^{-4}$	$9 \times 10^{-7}$	Triaxial (fluxo vertical)	-
2	Argila Compactada	Núcleo	$8 \times 10^{-4}$	$9 \times 10^{-7}$	$8 \times 10^{-5}$	$9 \times 10^{-8}$	Carga Variável laboratório	Amorim (1976)
3	Areia Silto Argilosa	Aba Jusante	$8 \times 10^{-3}$	$9 \times 10^{-6}$	$8 \times 10^{-4}$	$9 \times 10^{-7}$	Triaxial (fluxo vertical)	-
4	Argila Compactada	Tapete Impermeável	$8 \times 10^{-4}$	$9 \times 10^{-7}$	$8 \times 10^{-5}$	$9 \times 10^{-8}$	Carga variável	Amorim (1976)
5	Areia	Drenos e Tapete Permeável	8.64	$10^{-2}$	8.64	$10^{-2}$	Carga variável "in situ"	Amorim (1976)
6	Areia	Fundação Permeável	3,2	$4 \times 10^{-3}$	$6 \times 10^{-1}$	$6 \times 10^{-4}$	Perda d'Água	Amorim (1976)
7	Material Impermeável	Camada Impermeável	$10^{-7}$	$10^{-10}$	$10^{-7}$	$10^{-10}$	Adotado	-

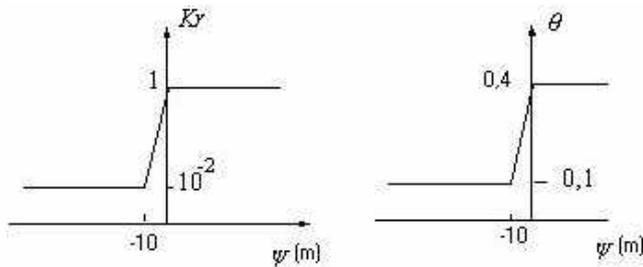


Figura 82 - Parâmetros Hidráulicos:  $\psi$  (carga de pressão)  $\theta$  (teor de umidade volumétrica) e  $k_r$  (condutividade hidráulica relativa)

### 5.3.3. Tempo de Execução do Programa

O tempo de execução necessário para o estabelecimento do regime permanente de cada simulação deve ser estabelecido criteriosamente. A adoção de tempos reduzidos de simulação pode acarretar valores incoerentes de carga de pressão. Por outro lado, tempos excessivos podem elevar de forma significativa o custo computacional.

Com o objetivo de estipular o tempo de execução adequado para as condições analisadas no presente trabalho foram realizados alguns testes. A Figura 83 mostra as cargas de pressão obtidas para alguns nós, localizados em diferentes regiões da barragem, considerando vários tempos de execução do programa. Os resultados mostram que partir de 1000 dias de percolação, as cargas de pressão começam a estabilizar e que, após 4000 dias, não ocorrem mais variações significativas. Dessa forma, 4000 dias representa o intervalo de tempo necessário para que o fluxo na barragem atinja a condição de regime permanente.

É importante ressaltar que o tempo calculado não corresponde ao tempo real de saturação da barragem. Para que o tempo real fosse previsto, seria necessário determinar experimentalmente todos os parâmetros hidráulicos, conhecer as condições de umidade na compactação, além realizar a simulação respeitando o cronograma de enchimento do reservatório.

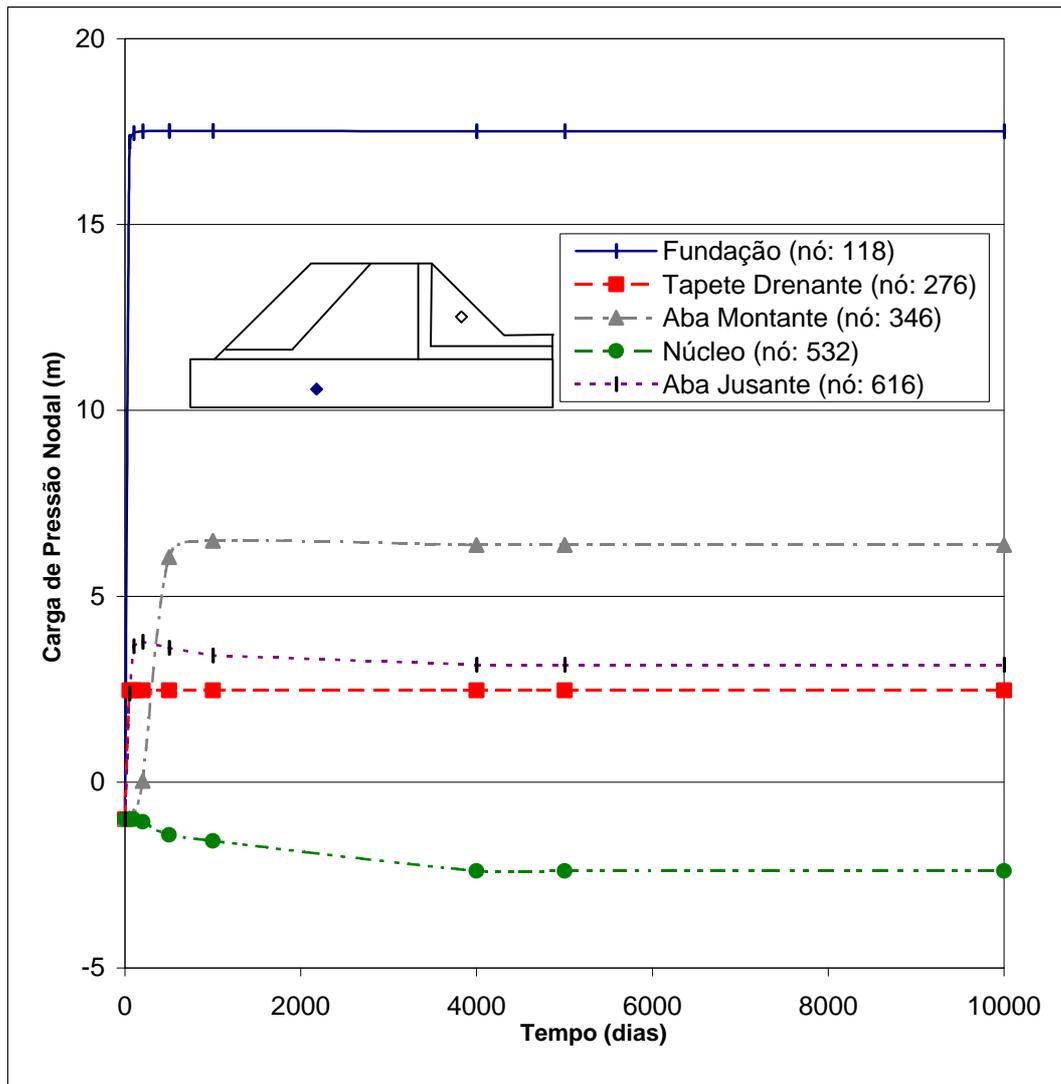


Figura 83 - Avaliação da sensibilidade ao tempo para diferentes materiais

#### 5.3.4. Condições Iniciais

Para iniciar as iterações, o programa necessita de um valor inicial de carga de pressão, constante para todos os nós da malha. No presente trabalho, adotou-se a opção de carga de pressão constante e igual a  $-1,00\text{m}$ . As condições iniciais interferem diretamente no tempo de execução da simulação. A atribuição de valores elevados de carga de pressão gera a necessidade de um maior número de iterações pelo programa.

### 5.3.5. Condições de Contorno

Na região de montante, cargas de pressão foram prescritas nos nós, reproduzindo a pressão de água do reservatório. A Figura 84 mostra a superfície com carga de pressão prescrita, para nível do reservatório na cota 66,84m. Para cada elevação do nível do reservatório, esta superfície era ampliada de tal forma que o primeiro nó coincidisse com este nível.

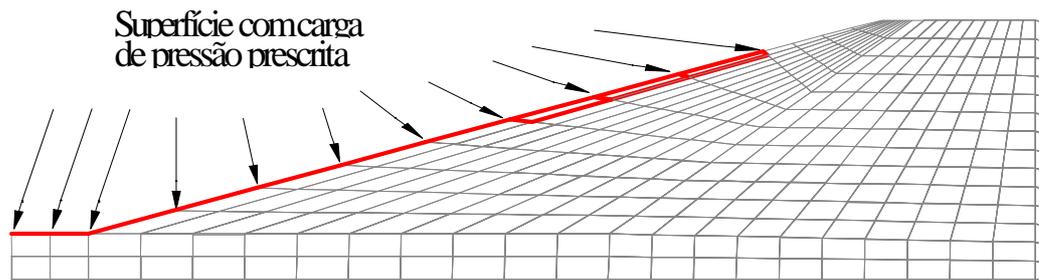


Figura 84 - Superfície com carga prescrita

Devido a limitações do gerador de malhas utilizado, o tapete impermeável a montante da barragem não pôde ser simulado em toda sua extensão. Para solucionar este problema, optou-se por impor uma condição de fluxo no contorno esquerdo da fundação, visando reproduzir a vazão nesta região (Figura 85). Para estimar a velocidade de fluxo a ser imposta, foi construída uma rede de fluxo, considerando-se a geometria real e fluxo somente pela fundação da barragem. A rede foi traçada com 14 canais de fluxo e 147 linhas equipotenciais, indicando um gradiente hidráulico de 0,07, na região do pé de montante. Adotando-se um valor médio de permeabilidade ( $k$ ) igual a 2,5m/dia (Amorim,1976), obteve-se uma velocidade 0.18m/dia para o fluxo nesta região.

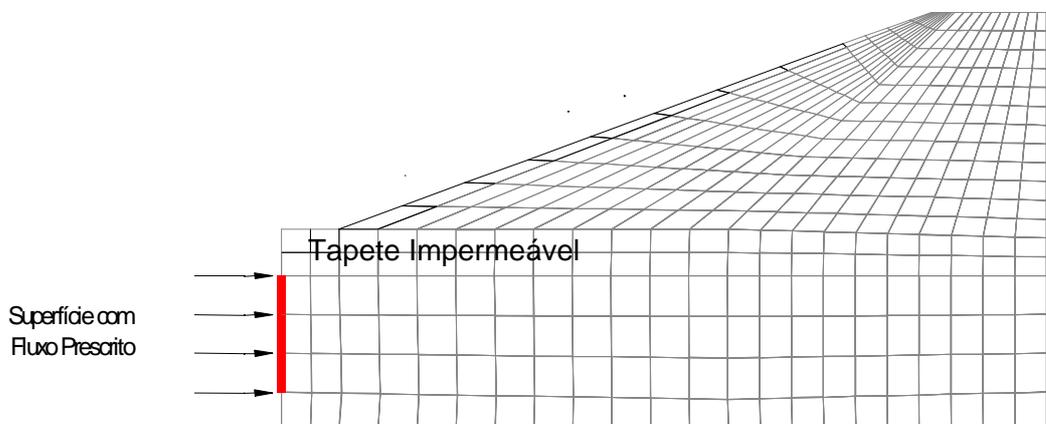


Figura 85 - Localização da superfície com fluxo prescrito em 4 nós

Na região de jusante da barragem, optou-se por delimitar uma faixa com condição de contorno de superfície livre. Como já foi mencionado no capítulo 03, existem relatos da ocorrência de surgências próximas ao pé de jusante da barragem. Desta forma, a superfície livre estipulada (Figura 86) encontra-se na região onde já existiram registros de problemas de surgências. Nos demais contornos, considerou-se uma condição de fronteira impermeável.

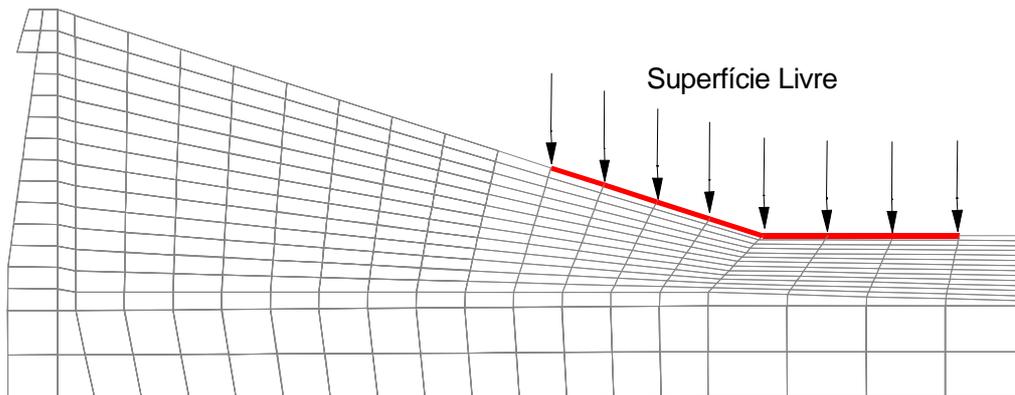


Figura 86 - Superfície livre considerada nas análises

#### 5.4. Simulação do Regime de Fluxo para Reservatório no Nível Atual

O regime de fluxo para a configuração atual da barragem foi simulado de forma iterativa, variando-se os coeficientes de permeabilidade dentro da faixa estipulada na Tabela 39, e comparando-se os valores de cargas de pressão medidos no campo ( $h_p$ ) com os previstos ( $\psi$ ) pelo programa. Ao final do processo, a linha piezométrica indicada pelos piezômetros instalados na barragem (Figura 87) e na fundação, deveria coincidir com a determinada numericamente.

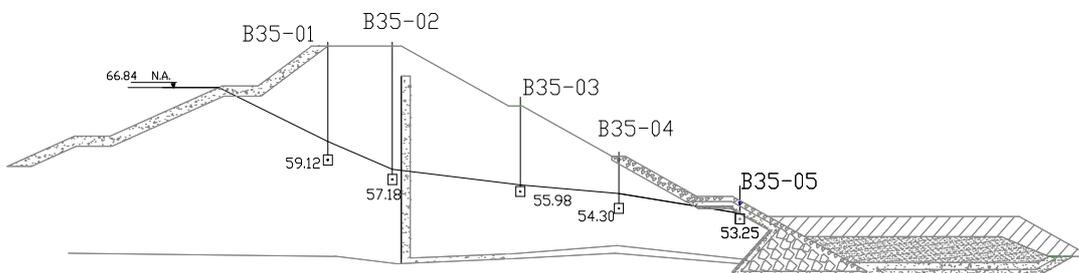


Figura 87 - Cotas piezométricas para nível do reservatório de 66,84m

Neste estudo foram considerados apenas os novos piezômetros, com posicionamento mais confiável e leituras mais consistentes.

Como já mencionado no capítulo 04, vários piezômetros instalados na fundação apresentavam problemas quanto ao funcionamento. Nesta análise,

verificou-se que apenas um (01) piezômetro da fundação fornecia dados confiáveis.

A Tabela 40 resume as cargas de pressão ( $h_p$ ) e as cotas piezométricas dos instrumentos para o mês agosto de 2002.

Tabela 40 – Cargas de pressão e cotas piezométricas em agosto de 2002

Piezômetro	Localização	Cota de Instalação (m)	Carga de Pressão (m)	Cota Piezométrica (m)
B35-01	Barragem	59,12	2,35	61,47
B35-02	Barragem	57,18	1,53	58,71
B35-03	Barragem	55,98	1,17	57,15
B35-04	Barragem	54,30	1,99	56,29
B35-05	Barragem	53,25	1,06	54,31
B38-01	Fundação	48,38	11,32	59,70

Pelo fato do posicionamento dos piezômetros não coincidirem com os nós da malha, o cálculo da carga de pressão ( $\psi$ ) nestes pontos foi feito por meio de interpolação linear dos quatro nós mais próximos à cota de instalação do piezômetro.

#### 5.4.1. Eficiência do Sistema Interno de Drenagem

Como já foi mencionado no capítulo 03 o material do dreno vertical não atende a todos os critérios propostos por Terzaghi. Desta forma, foi avaliada a eficiência do sistema interno de drenagem levando-se em consideração o comportamento das linhas piezométricas no interior do maciço.

Observando-se a linha piezométrica apresentada na Figura 87, verifica-se que os valores elevados de carga de pressão, na região de jusante, podem ser interpretados como indicativos de baixa eficiência do dreno horizontal, na função de captação das águas do corpo da barragem.

Além disso, existe a possibilidade de ter ocorrido uma colmatação do dreno vertical. Este aspecto gera dúvida quanto ao adequado funcionamento do dreno. Pierre (2002) relatou a ocorrência de alguns problemas de corrosão em equipamentos hidráulicos devido aos níveis de concentração de ferro na água do reservatório de Curuá-Una. Um outro aspecto que não deve ser desconsiderado é que o material de proteção do talude de montante (“rip-rap”) é constituído por um arenito ferruginoso.

Na presente pesquisa, tentou-se avaliar a possibilidade da ocorrência de colmatção no dreno da barragem. No entanto, as análises da água do reservatório, a montante e a jusante, forneceram resultados não conclusivos. Adicionalmente, a análise do material extraído do dreno apresentou reduzida concentração de ferro e elevada porcentagem de areia fina.

As simulações do regime de fluxo sugerem o funcionamento provavelmente inadequado do dreno vertical. Após sucessivas variações dos coeficientes de permeabilidade, o melhor ajuste foi obtido com os valores mostrados na Tabela 41. Neste caso, foi possível reproduzir as cargas de pressão na região de montante e no pé de jusante, conforme mostra a Figura 88. A comparação entre as cotas piezométricas previstas e observadas a jusante do dreno (B35-03 e B35-04) apresentou discordância superior a 1,0m. O modelo numérico indica portanto que, caso o dreno estivesse operando satisfatoriamente, menores cotas piezométricas seriam observadas nesta região.

Tabela 41 - Coeficientes de permeabilidades utilizados considerando o dreno vertical

Nº	Material	Região	K <sub>x</sub> (horizontal)		K <sub>y</sub> (vertical)	
			m/dia	cm/s	m/dia	cm/s
1	Areia Silto Argilosa	Aba Montante	$4 \times 10^{-3}$	$4,6 \times 10^{-6}$	$8 \times 10^{-4}$	$9 \times 10^{-7}$
2	Argila Compactada	Núcleo	$1,4 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-7}$	$7 \times 10^{-4}$	$8 \times 10^{-7}$
3	Areia Silto Argilosa	Aba Jusante	$1,2 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-6}$
4	Argila Compactada	Tapete Impermeável	$4 \times 10^{-3}$	$4,6 \times 10^{-6}$	$8 \times 10^{-4}$	$9 \times 10^{-7}$
5	Areia	Drenos e Tapete Permeável	8.64	$10^{-2}$	8.64	$10^{-2}$
6	Areia	Fundação Permeável	3,2	$4 \times 10^{-3}$	$6 \times 10^{-1}$	$7 \times 10^{-4}$
7	Material Impermeável	Camada Impermeável	$10^{-7}$	$10^{-10}$	$10^{-7}$	$10^{-10}$

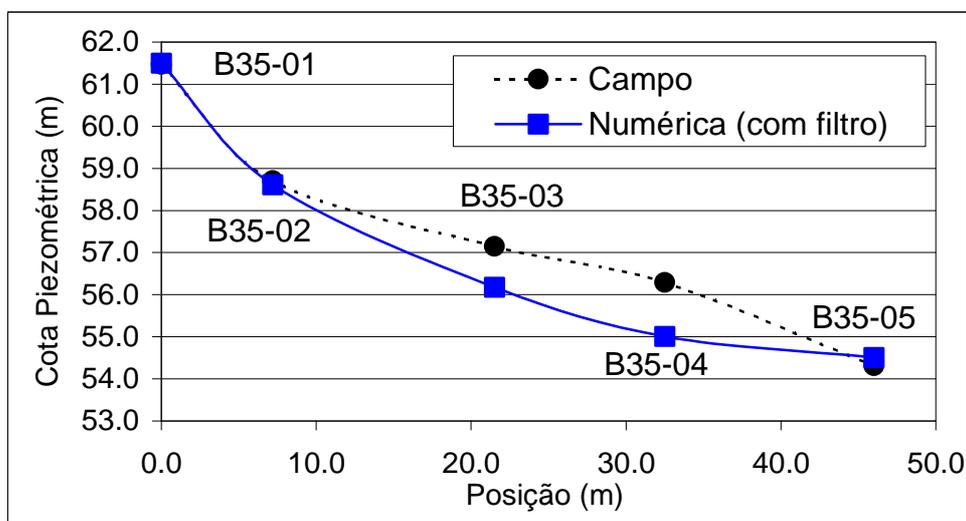


Figura 88 - Cotas piezométricas de campo e numéricas no corpo da barragem, considerando o dreno vertical

### 5.4.2. Condição atual sem sistema de drenagem vertical

Uma nova campanha de simulações foi então realizada, desconsiderando-se o funcionamento do dreno. Novamente os coeficientes de permeabilidade foram variados dentro da faixa proposta, até que fosse restituído o regime de fluxo observado nos piezômetros. A Figura 89 mostra as faixas de carga de pressão calculadas pelo programa.

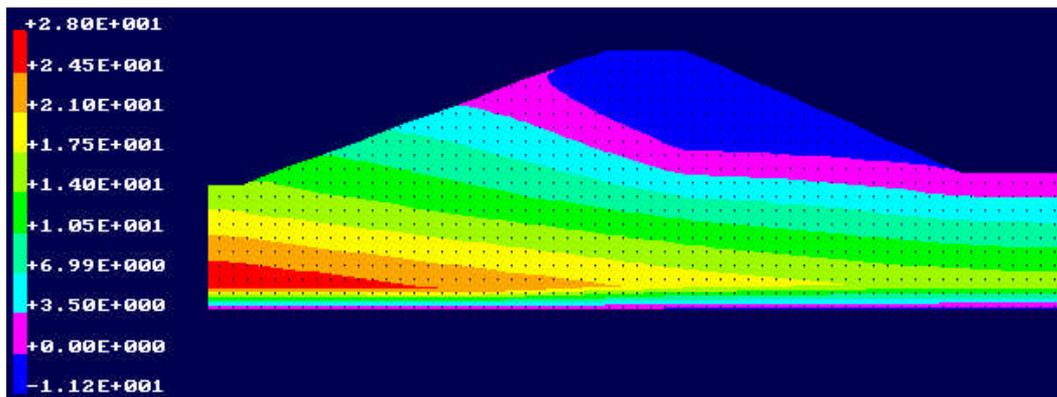


Figura 89 - Distribuição das poropressões na barragem sem dreno vertical (escala em metros)

A comparação entre as cargas de pressão  $h_p$  (campo) e  $\psi$  (numérica) estão apresentadas na Tabela 42 e na Figura 90. Os resultados mostram um ajuste aceitável, havendo somente uma pequena diferença no piezômetro B35-05. Esta diferença pode atribuída à proximidade do piezômetro em relação à região de drenagem da barragem. Neste caso, a interpolação linear, adotada para estimar a carga de pressão na posição do piezômetro, pode não ser aplicável.

As condições de fluxo na barragem foram retroanalisadas para estabelecer os valores dos coeficientes  $k_x$  e  $k_y$  adequados para os diversos materiais. Estes coeficientes estão mostrados na Tabela 43 e foram adotados nas análises de previsão de comportamento para uma condição futura de alteamento do reservatório.

Tabela 42 - Comparação entre a simulação numérica e a instrumentação de campo

Piezômetros	Localização	Carga de Pressão (m)		Cota Piezométrica (m)		
		$h_p$ (campo)	$\psi$ (numérica)	Campo	Numérica	Erro (%)
B35-01	Barragem	2,35	2,38	61,47	61,50	<0,1
B35-02	Barragem	1,53	1,69	58,71	58,87	0,3
B35-03	Barragem	1,17	1,09	57,15	57,07	0,1
B35-04	Barragem	1,99	2,10	56,29	56,40	0,2
B35-05	Barragem	1,06	1,89	54,31	55,14	1,5
B38-01	Fundação	11,32	11,30	59,70	59,68	<0,1

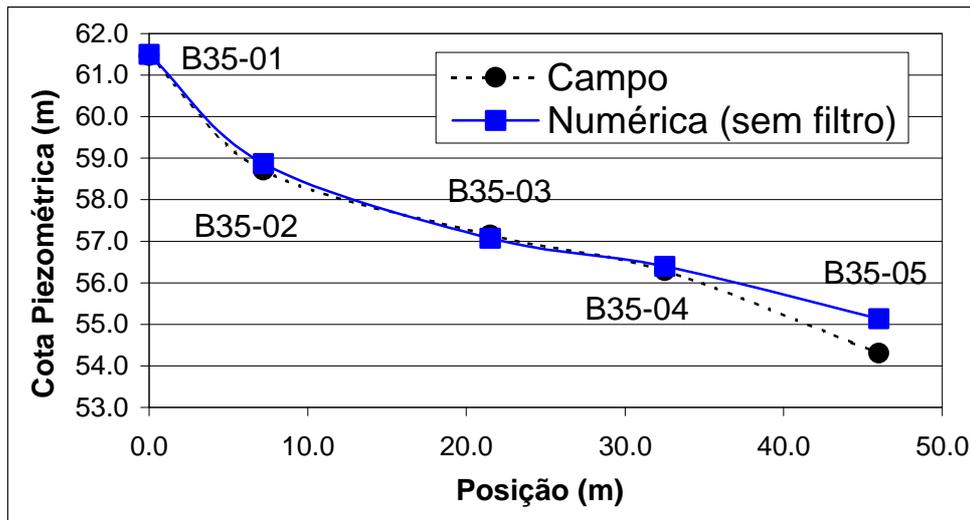


Figura 90 – Comparação entre as linhas piezométricas de campo e numérica (sem drenagem vertical)

Tabela 43 - Coeficientes de permeabilidade para condição atual

Nº	Material	Região	$k_x$ (horizontal)		$k_y$ (vertical)	
			m/dia	cm/s	m/dia	cm/s
1	Areia Silto-argilosa	Aba Montante	$4,5 \times 10^{-3}$	$5,5 \times 10^{-6}$	$9,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-6}$
2	Argila Compactada	Núcleo	$2,0 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-6}$	$4,3 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-7}$
3	Areia Silto-argilosa	Aba Jusante	$3,2 \times 10^{-2}$	$3,7 \times 10^{-5}$	$6,5 \times 10^{-3}$	$7,5 \times 10^{-6}$
4	Argila Compactada	Tapete Impermeável	$3,0 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-6}$	$6,0 \times 10^{-4}$	$7,0 \times 10^{-7}$
5	Areia	Drenos e Tapete Permeável	$8,6 \times 10^0$	$1,0 \times 10^{-2}$	$8,6 \times 10^0$	$1,0 \times 10^{-2}$
6	Areia	Fundação Permeável	$2,5 \times 10^0$	$1,1 \times 10^{-4}$	$5,0 \times 10^{-1}$	$5,8 \times 10^{-4}$
7	Solo Impermeável	Camada Inferior	$1,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-10}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-10}$

Com o objetivo de confirmar a validade dos coeficientes de permeabilidade estabelecidos para os diversos materiais, foi realizada uma nova simulação para cota do reservatório de 67,87m, observada no ano de 2001. Neste caso, a superfície com carga de pressão prescrita foi ligeiramente ampliada e a velocidade de fluxo prescrita foi recalculada para a nova diferença de carga total, sendo obtido o valor de 0,187m/dia. O novo regime de fluxo foi, então, obtido a partir das leituras do piezômetro P18. As leituras médias de campo, no ano de 2001, forneceram uma cota piezométrica igual a 56,45m, enquanto que o programa indicou uma cota piezométrica de 56,48m. Este resultado mostra que os coeficientes de permeabilidade apresentados na Tabela 43 são coerentes e podem ser utilizados para simular um possível alteamento do nível do reservatório da U.H.E. de Curuá-Una.

## 5.5. Simulação do Regime de Fluxo após Aumento da Cota do Reservatório

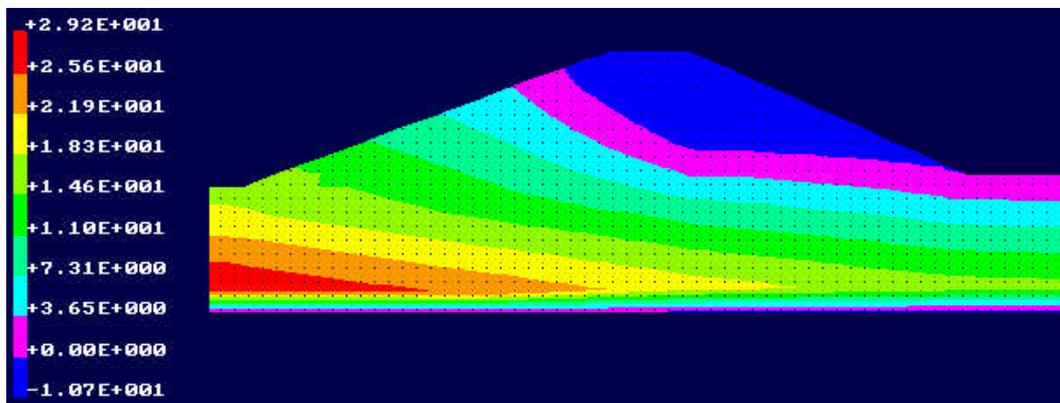
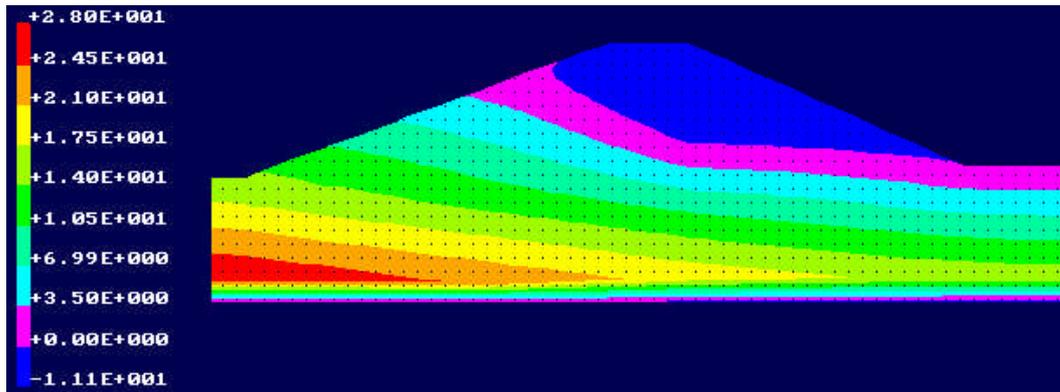
Com o objetivo de melhor analisar as possíveis condições de futuras de alteamento do reservatório, foram realizadas seis (06) simulações.

O aumento do nível do reservatório acarreta mudanças nas condições de contorno (cargas de pressão nos nós do talude de montante e fluxo prescrito na fundação). A Tabela 44 mostra as cotas analisadas e as respectivas velocidades de fluxo prescrito, recalculadas em função das mudanças na carga total.

Tabela 44 – Velocidades prescritas adotadas nas simulações

Simulação	01	02	03	04	05	06
Cota do reservatório (m)	67,0	67,5	68,0	68,5	69,0	69,5
Velocidade prescrita (m/dia)	0,180	0,185	0,187	0,191	0,194	0,198

A Figura 91 e a Figura 92 trazem a distribuição de carga de pressão obtidas para as cotas do reservatório de 67,0m e 69,5m, respectivamente.



A Tabela 45 apresenta as cotas piezométricas previstas para cada um dos piezômetros e a Figura 93 mostra a evolução da linha piezométrica no corpo da barragem para os diferentes níveis simulados para o reservatório. Os resultados indicam que as variações previstas de carga de pressão ( $\Delta\psi$ ) entre as cotas máxima e mínima do reservatório são relativamente pequenas. Estas variações crescem com a proximidade do talude de montante.

Tabela 45 - Cotas piezométricas previstas para os diversos níveis do reservatório

Cotas Piezométricas (m)								
NA (m)	66,84	67,00	67,50	68,00	68,50	69,0	69,5	$\Delta\psi$
B35-01	61,50	61,55	61,74	61,89	62,08	62,28	62,52	1,02
B35-02	58,87	58,89	59,02	59,09	59,20	59,30	59,46	0,59
B35-03	57,07	57,08	57,16	57,19	57,25	57,29	57,37	0,30
B35-04	56,40	56,41	56,47	56,50	56,54	56,57	56,63	0,23
B35-05	55,14	55,15	55,17	55,18	55,20	55,20	55,23	0,09
B38-01	59,68	59,69	59,85	59,90	60,02	60,08	60,25	0,57

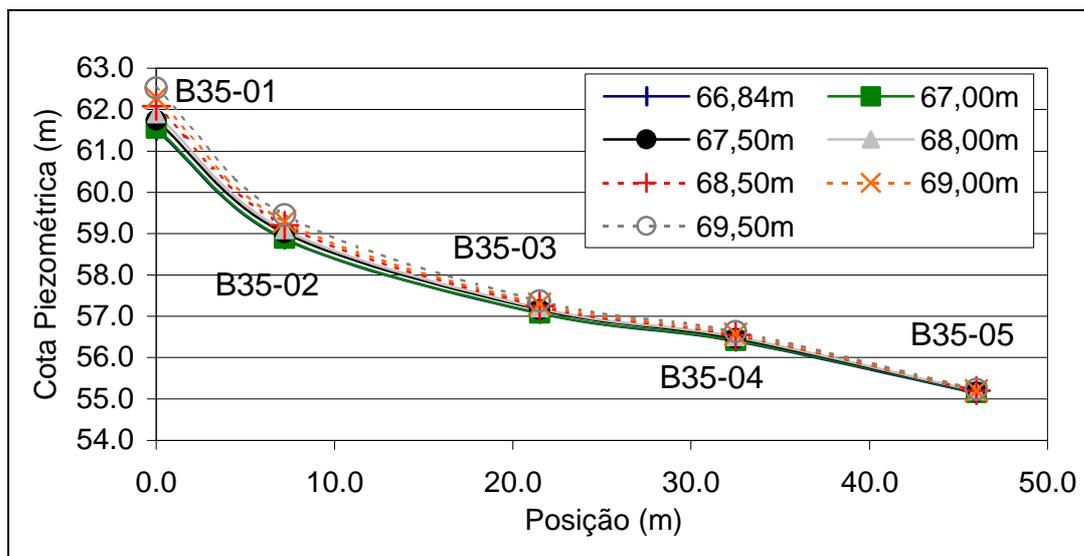


Figura 93 - Comparação das linhas piezométricas para diferentes níveis do reservatório

## 5.6. Avaliação das condições de segurança

Após a análise do regime de fluxo no corpo e na fundação da Barragem de Curuá-Una, a condição de segurança foi também avaliada para dois aspectos: níveis críticos de operação e subpressões na fundação.

### 5.6.1. Níveis Críticos de Operação

Como já mencionado, este trabalho faz parte de um estudo de viabilidade do alteamento do reservatório de Curuá-Una. Para possibilitar o controle do nível de segurança da barragem quanto à estabilidade do talude de jusante, foram definidos limites, denominados de “níveis de alerta” (Tabela 46):

Tabela 46 - Classificação dos níveis de alerta (Sayão et al., 2002)

Nível	Fator de Segurança Máximo
Normal	$F.S._{Max} \geq 1,50$
Atenção	$1,50 > F.S._{Max} \geq 1,20$
Emergência	$F.S._{Max} < 1,20$

Os estudos de estabilidade do talude de jusante foram realizados por Ligocki (2003). Nestes estudos, foram estipuladas as cotas piezométricas máximas para cada um dos níveis de alerta dos instrumentos instalados na barragem. Os valores limites calculados por Ligocki (2003) foram comparados com os valores de carga de pressão previstos numericamente. Os resultados, apresentados na Figura 94, mostram que os três primeiros piezômetros (B35-01, 02 e 03) operam no nível normal, enquanto que os piezômetros B35-04 e B35-05 podem operar no nível considerado como de atenção.

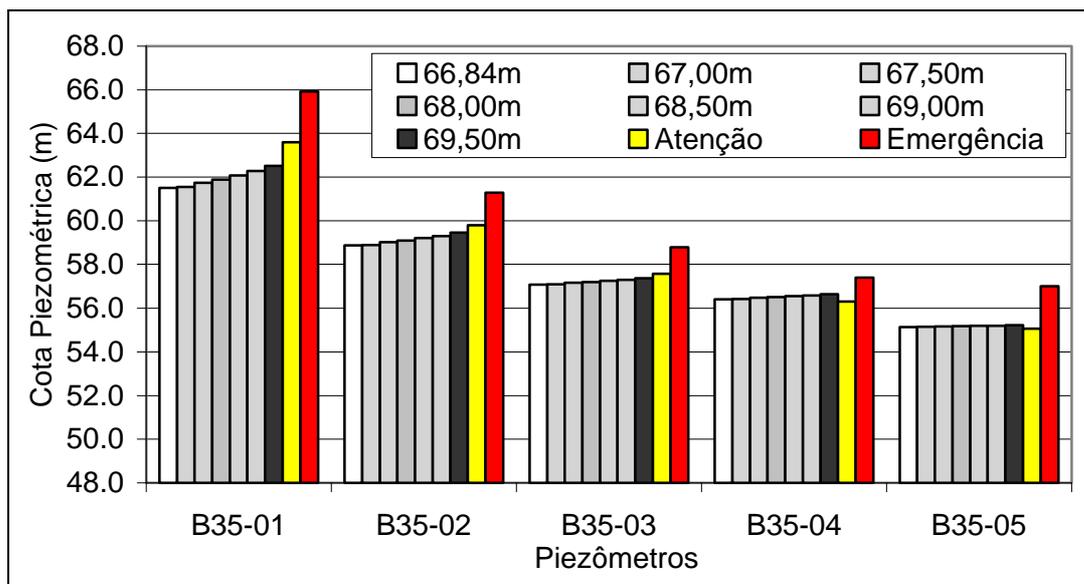


Figura 94 - Comparação gráfica entre níveis piezométricos previstos e níveis de alerta para os piezômetros instalados no corpo da barragem.

Na realidade, na condição atual de operação, todos os piezômetros estão operando no nível considerado normal, conforme mostra a Tabela 47. As cotas piezométricas previstas na região de jusante da barragem tenderam a fornecer valores ligeiramente superiores aos efetivamente medidos. Esta diferença foi atribuída à metodologia de cálculo da carga piezométrica no interior do elemento (correspondendo à profundidade de instalação do piezômetro).

Tabela 47 – Comparação entre cotas piezométricas medidas, previstas e associadas aos níveis de alerta

Piezômetro	Cota Piezométrica (m)		Níveis de Alerta (m)	
	Medido	Previsto	Atenção	Emergência
B35-01	61.47	61.50	63.59	65.92
B35-02	58.71	58.87	59.79	61.28
B35-03	57.15	57.07	57.57	58.78
B35-04	56.29	56.40	56.30	57.40
B35-05	54.31	55.14	55.06	57.00

A Figura 95 mostra a previsão da variação da carga piezométrica do piezômetro B35-02 em função da elevação do nível do reservatório. Observa-se uma tendência linear de crescimento, da ordem de 0,6m, para uma elevação do nível do reservatório de 1,5m. Esta tendência foi observada em todos os piezômetros, sendo que a magnitude das variações reduzia com o afastamento do talude de montante.

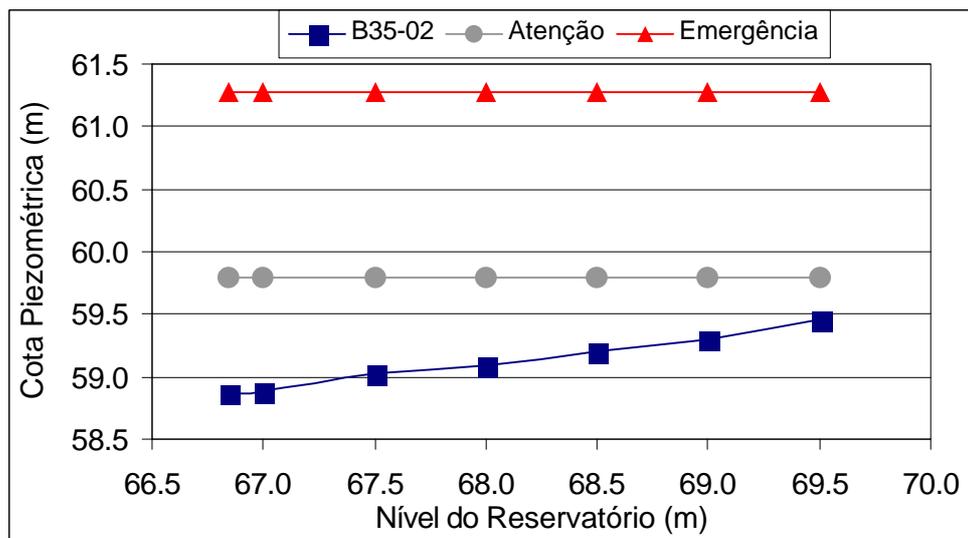


Figura 95 - Previsão da variação da carga piezométrica do piezômetro B35-02

No caso do piezômetro B35-05 (Figura 96), a previsão mostra que esta variação é praticamente nula

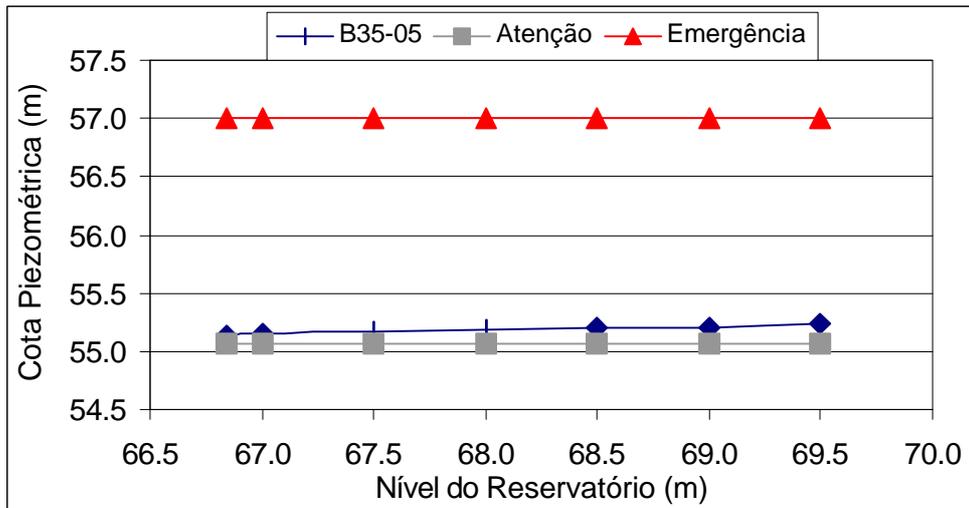


Figura 96 - Previsão da variação da carga piezométrica do piezômetro B35-02

### 5.6.2. Subpressões na Fundação

O objetivo desta análise é estimar o aumento percentual das subpressões existentes na fundação, em razão de um possível alteamento do nível do reservatório. O cálculo das subpressões foi realizado considerando o peso específico da água ( $\gamma_w$ ) igual a  $9,81\text{kN/m}^3$ . A Figura 97 mostra as subpressões atuantes na condição do reservatório na cota 66,84m.

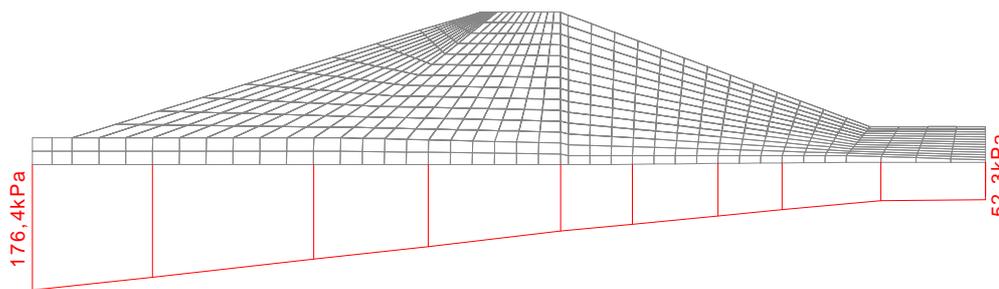


Figura 97 - Subpressões atuantes na fundação para o reservatório na cota 66,84m

Após a simulação do alteamento do reservatório, foi possível estimar as subpressões atuantes na fundação para o reservatório na cota de 69,50m (Figura 98).

O aumento percentual da resultante das subpressões pode ser comparado com o nível simulado para o reservatório (Figura 99). Os resultados indicam que o aumento percentual das subpressões não é superior a 5%, mesmo para o reservatório no nível máximo de 69,50m.

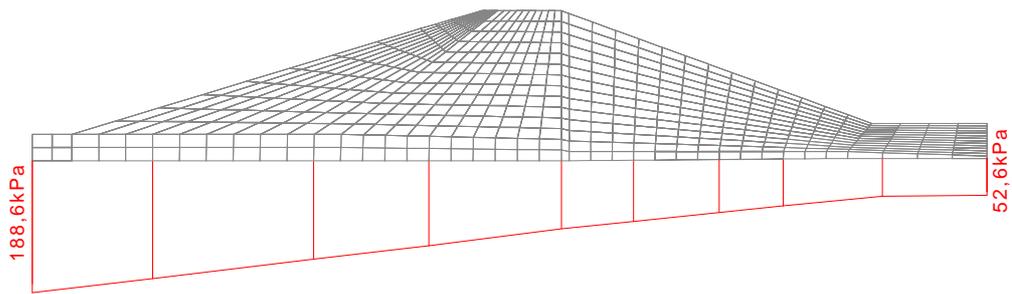


Figura 98 - Subpressões atuantes na fundação para o reservatório na cota 69,50m

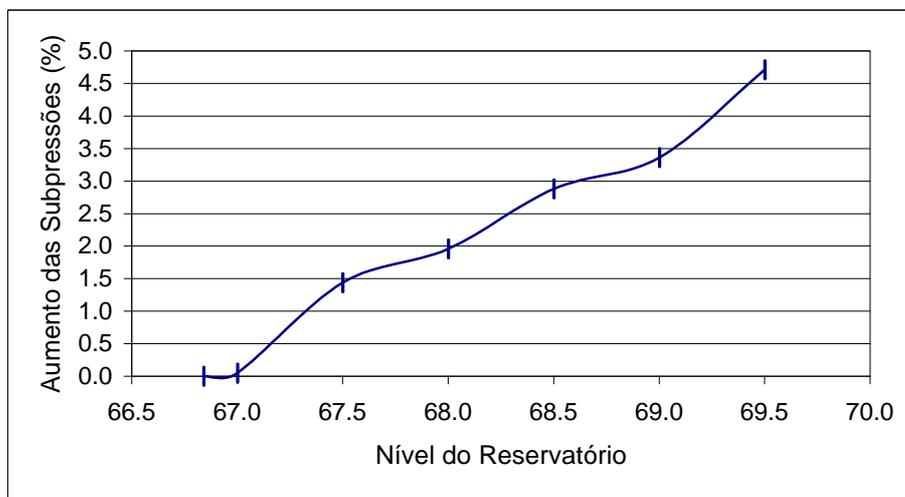


Figura 99 Aumento percentual das subpressões x nível do reservatório