

5 Estudo de casos

5.1. Fluxo através da barragem de enrocamento Gouhou (China) com face de concreto

A barragem Gouhou estava localizada em Gonghe, na província de Qinghai, China, como ilustrado na figura 5.1. Esta barragem de enrocamento com face de concreto colapsou em 1993 devido à erosão interna durante a etapa de enchimento inicial do reservatório.



Figura 5.1 – Localização da Barragem Gouhou na China.

Neste item é analisado o processo de infiltração de água através do corpo da barragem inicialmente em condições não-saturadas, sendo considerada a estratificação em uma zona do enrocamento.

Os resultados fornecidos pelas análises 3D na Barragem Gouhou empregando o GEOFLUX3D são comparados com aqueles obtidos por Chen e

Zhang (2006) que utilizaram o programa computacional SVFLUX, mostrando uma boa concordância entre ambos. Estes resultados também permitem apontar uma série de importantes aspectos que não podem ser modelados em análises tradicionais, mais simples, executadas no plano.

5.1.1. Descrição da barragem Gouhou

A barragem estava projetada para armazenar um volume de água de 3,1 milhões de metros cúbicos, contava com uma altura máxima de 71 metros e um comprimento de crista de 265 metros na altitude de 3.281,0 metros acima do nível do mar, como mostrado na figura 5.2. O corpo da barragem estava formado por quatro regiões: a região I era de material de transição e suportava a face de concreto, as regiões II e IV eram os enrocamentos principais, sendo a região III o núcleo da barragem.

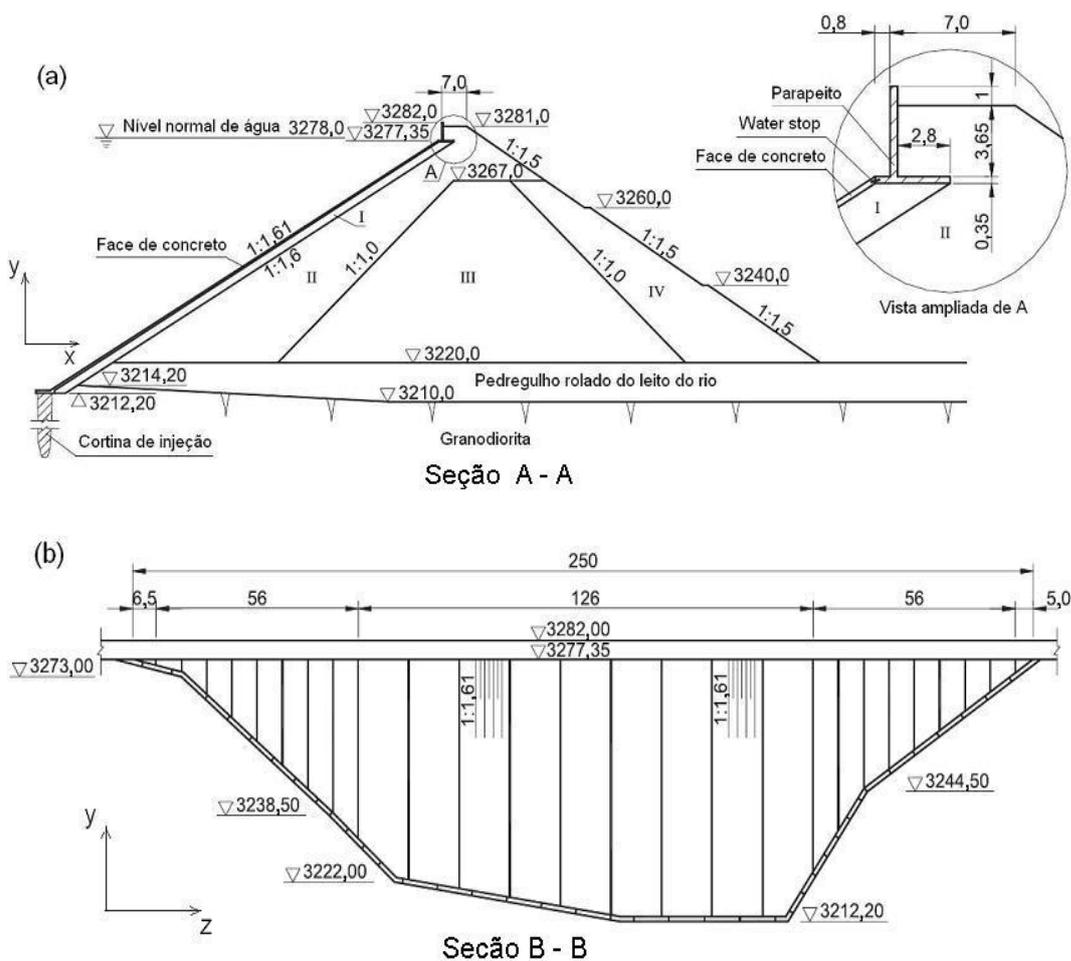


Figura 5.2 - Barragem Gouhou: (a) seção transversal A-A de altura máxima; (b) seção longitudinal B-B vista desde montante. Unidades em metros. (Chen e Zhang, 2006)

De acordo com a equipe da investigação da ruptura da barragem (1996), o nível de água do reservatório se elevou continuamente de 3261,0 m para 3277,3 m (16,3m) em 45 dias. A água então começou a fluir dentro do corpo da barragem através de uma junta entre o parapeito e a face de concreto (ver detalhe na figura 5.2a) e em apenas algumas horas mais tarde a água começou a emergir pela superfície de talude de jusante na elevação de 3260 m, ocasionando o colapso da estrutura.

5.1.2. Condições iniciais e de contorno

Uma das características da barragem de Gouhou (e possível causa do colapso) foi a estratificação existente em uma zona do enrocamento. Para representar esta influência na modelagem numérica, considerou-se a barragem subdividida em 3 zonas de enrocamento, sendo a zona 2 formada por material com condutividade hidráulica saturada muito superior às das zonas de enrocamento 1 e 3. A figura 5.3 mostra o modelo geométrico 3D com a posição das zonas de enrocamento e as condições de contorno utilizadas na simulação computacional do fluxo pelo método dos elementos finitos.

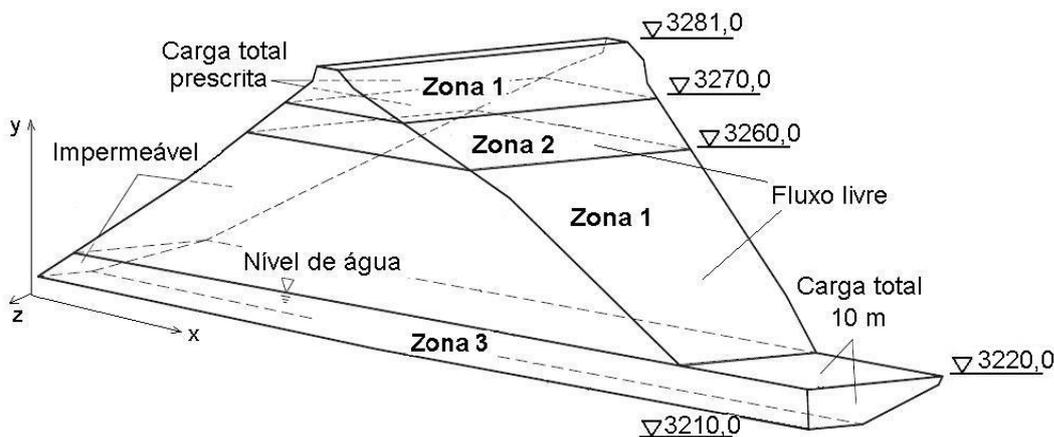


Figura 5.3 - Modelo geométrico 3D e condições de contorno para a simulação de fluxo transiente na barragem Gouhou, China. (Chen e Zhang, 2006)

O nível de água inicial foi assumido na base da barragem (3220,0m), permanecendo assim a zona 3 submersa. Como condições iniciais considera-se que a sucção aumenta linearmente com a elevação do nível de água, porém

limitada ao valor máximo de 14,2 kPa, à sucção média do enrocamento compactado com um teor de umidade de 3.5% durante a fase de construção.

Admite-se que a face de concreto é impermeável abaixo da elevação 3.260,0 m, mas é ineficiente acima dessa elevação, fato que justifica a condição de contorno na superfície do talude da montante definida em duas partes. A parte superior (elevação acima de 3.260,0 m) tem carga total prescrita como condição de contorno enquanto a parte inferior (elevação abaixo de 3260 m) tem a restrição de fluxo nulo (impermeabilidade) como condição de contorno imposta no modelo. A carga total é definida em relação ao nível de água na elevação 3277,3 m correspondente à base do parapeito. A condição de fluxo nulo é também aplicada ao longo da crista da barragem e na face de jusante da barragem, se a pressão na superfície da face de jusante for negativa. Caso positiva, é aplicada uma condição de fluxo livre por meio da subrotina SEEPAGE comentada no capítulo 3.

5.1.3. Propriedades dos materiais

Para esta simulação empregaram-se materiais de enrocamento diferenciados apenas pela distribuição granulométrica, como mostrado na figura 5.4. Desta forma, foram empregados na simulação materiais com tamanhos de distribuição correspondente à curva média (zona 1) e materiais com tamanhos de distribuição correspondente à curva limite inferior (zona 2). Para a fundação (zona 3) foram empregados materiais disponíveis no leito do rio.

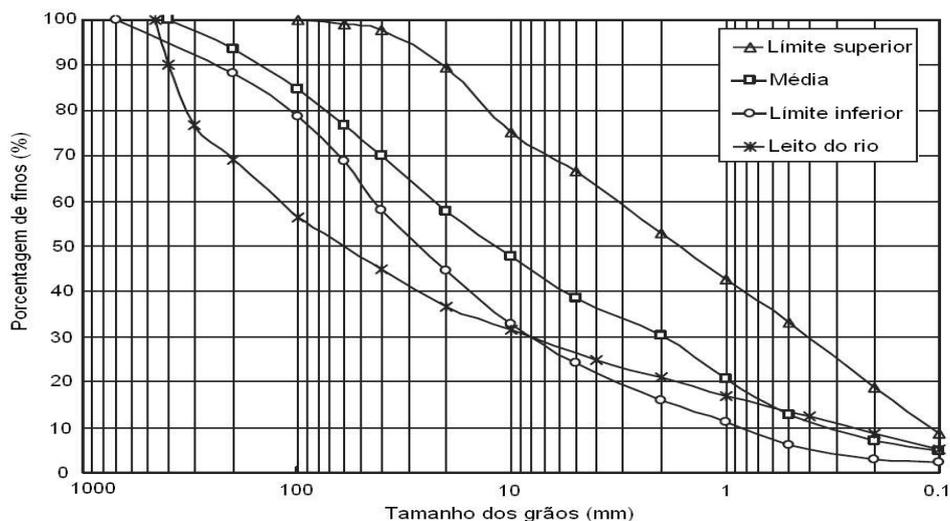


Figura 5.4 – Curvas de granulometria dos materiais empregados nas zonas de enrocamento da barragem Gouhou. (Chen e Zhang, 2006)

As curvas de retenção para as zonas 1 e 2 (necessárias para as análises transientes) são apresentadas na figura 5.5. A curva de retenção correspondente ao material da zona 3 (leito do rio) não foi considerada porque esta zona permanece saturada durante toda o processo de simulação.

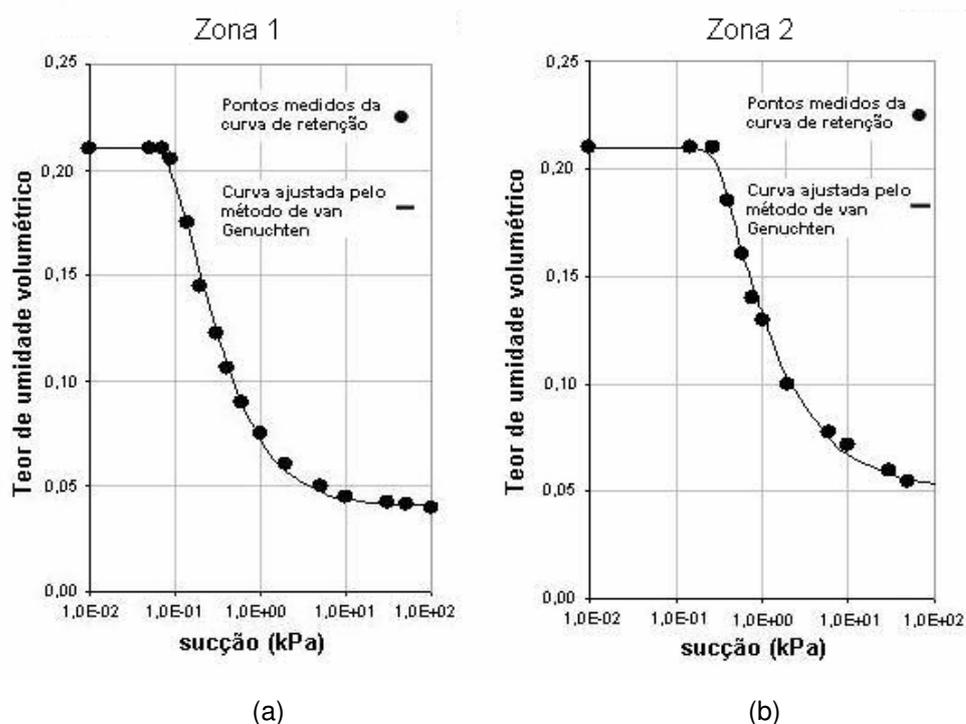


Figura 5.5 - Curvas características de retenção para os materiais correspondentes nas zonas de enrocamento 1 (a) e 2 (b). (Chen e Zhang, 2006)

O modelo empregado para o ajuste das curvas foi o de van Genuchten (1980) com auxílio do programa RETC v.6 (Simunek et al., 1985), desenvolvido para determinação dos parâmetros das curvas características de sucção e de condutividade hidráulica de solos não-saturados. A tabela 5.1 lista os valores obtidos para os parâmetros requeridos pelo modelo de van Genuchten.

Tabela 5.1 - Parâmetros do modelo de van Genuchten (1980) nos materiais da barragem Gouhou, China.

Material	Zona	θ_s	θ_r	α_{vg}	q	K_s ($\times 10^{-5}$ m/s)
Distribuição média dos grãos de enrocamento	1	0,21	0,05	75,16	1,88	11,6
Distribuição limite inferior dos grãos do enrocamento	2	0,21	0,04	32,77	1,70	231,0
Leito do rio	3	0,27	0,02	62,14	1,13	7,4

5.1.4. Modelagem no espaço e no tempo

As figuras 5.6 e 5.7 mostram os modelos geométricos empregados nas análises 2D e 3D junto com suas respectivas malhas de elementos finitos. Na análise bidimensional empregou-se uma malha com 526 nós e 885 elementos triangulares do tipo TRIA3. Na análise tridimensional foram utilizados 2.979 nós conectados a 12.771 elementos do tipo tetraedro TETR4.

Em ambas as simulações os intervalos de tempo foram iguais a 0,0001 dias de duração. Para o tratamento da não-linearidade adotou-se uma tolerância de 1% e um número máximo de 40 iterações. Os tempos de simulação computacional foram muito rápidos, mostrando uma capacidade de resolução bastante efetiva do programa GEOFLUX3D.

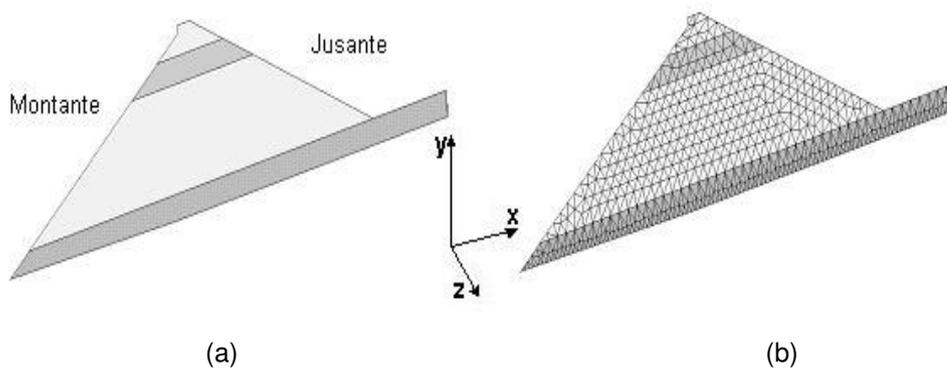


Figura 5.6 - (a) Modelo geométrico 2D da barragem Gouhou, (b) malha de elementos finitos tipo TRIA3.

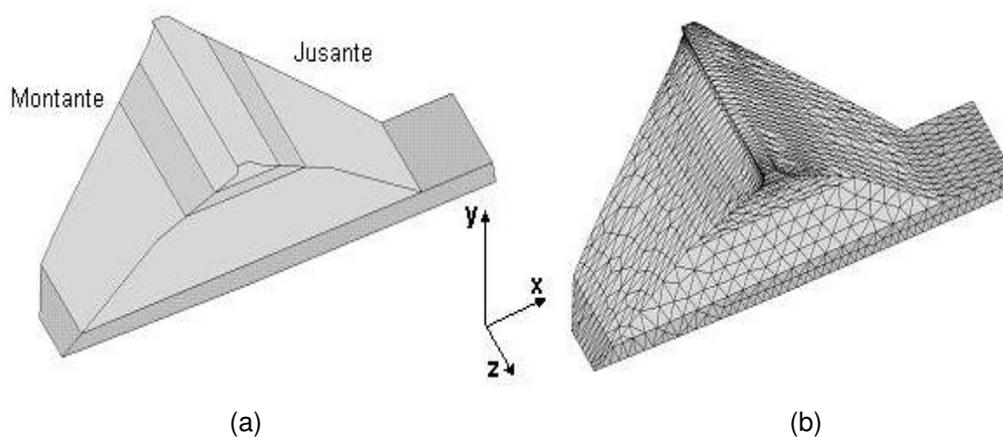


Figura 5.7 - (a) Modelo geométrico 3D da barragem Gouhou, (b) malha de elementos finitos tipo TETR4.

5.1.5. Análise e discussão dos resultados

Pela consideração dos efeitos de estratificação, obteve-se, como esperado, maiores velocidades de fluxo no enrocamento da zona 2 do que na zona 1.

A figura 5.8 mostra a evolução no tempo da superfície freática na barragem. A infiltração de água se dá gradualmente a partir da parte superior do talude de montante onde a face de concreto é defeituosa.

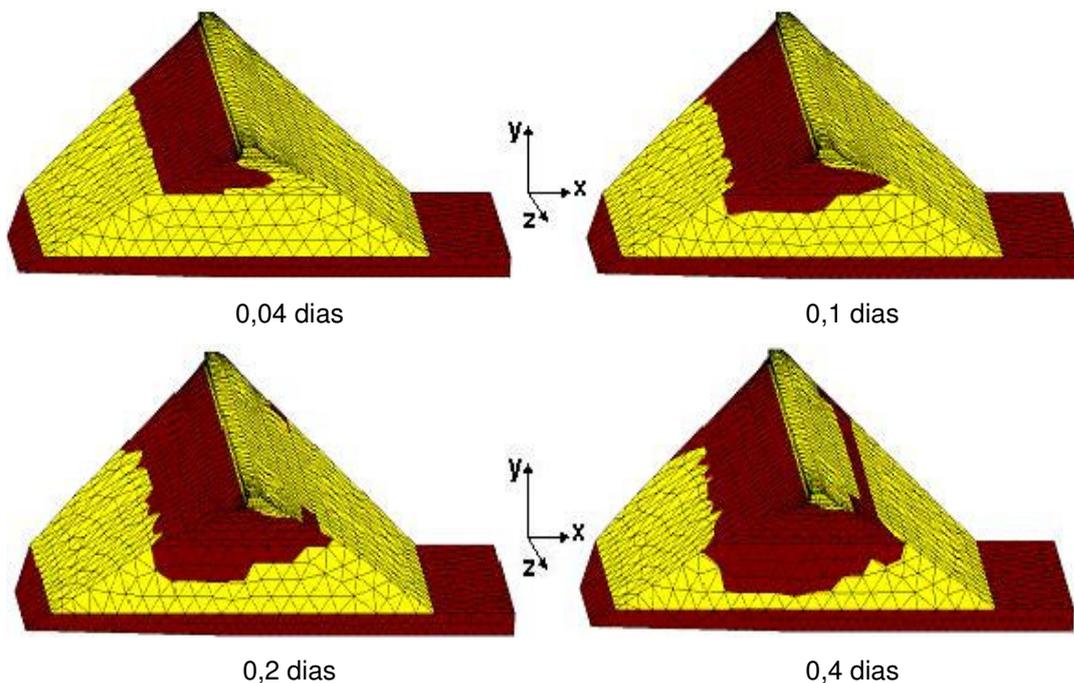


Figura 5.8 - Evolução no tempo da superfície freática na barragem Gouhou

Distinguem-se duas zonas: uma escura, onde os vazios estão completamente preenchidos por água e a poro-pressão é positiva (região saturada) e a outra, mais clara, onde a poro-pressão é negativa (região não saturada). Observa-se que a região saturada alcança a superfície do talude de jusante em 0,1 dias e que o fluxo é mais rápido próximo das ombreiras laterais. Contudo, a frente de saturação não alcança o nível de água inicial na base da barragem após 0,4 dias.

A figura 5.9 mostra os contornos de poropressão na seção transversal localizada em $z = 150$ m em diferentes instantes de tempo, comparando os resultados obtidos pelo GEOFLUX3D com aqueles estimados por Chen e Zhang (2006) usando o programa computacional SVFLUX3D.

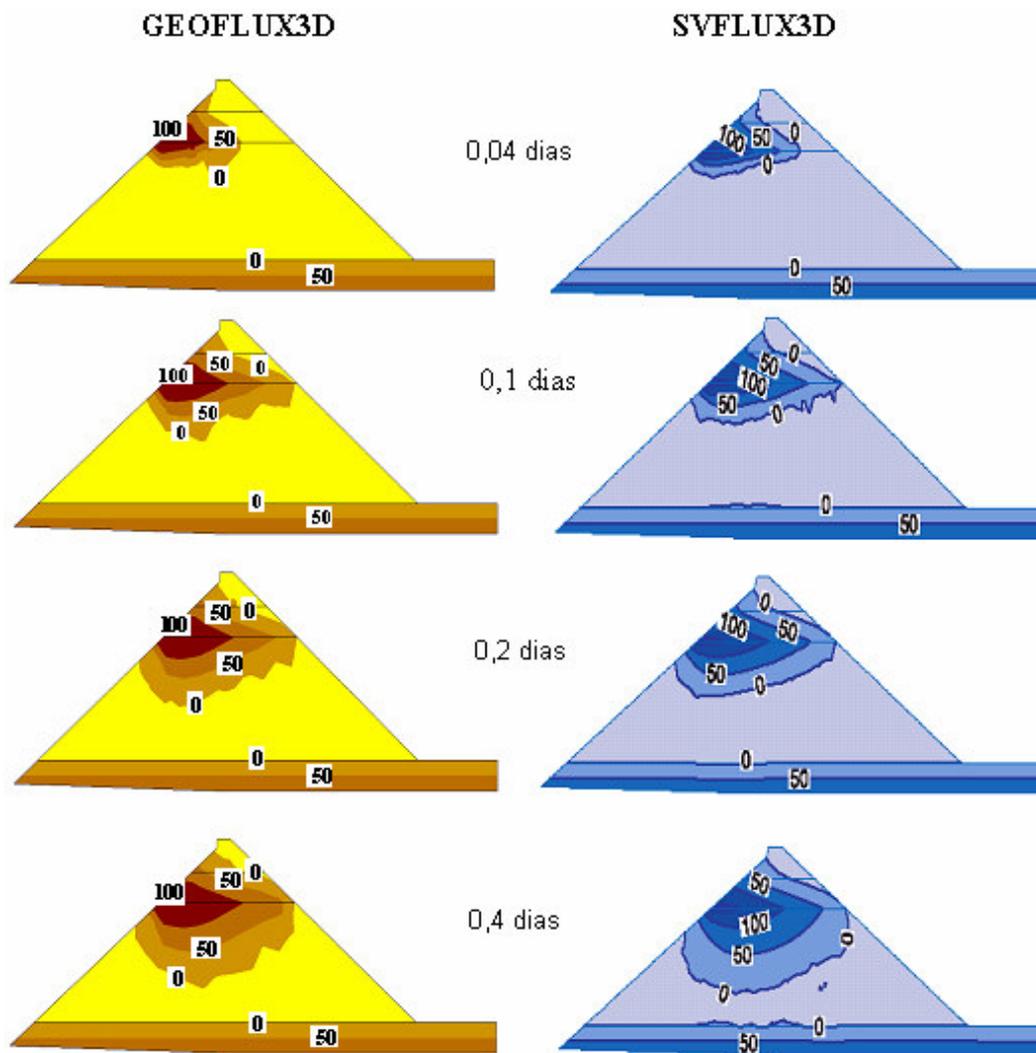


Figura 5.9 - Evolução no tempo dos contornos das isóbaras (kPa) na seção transversal máxima da barragem Gouhou.

Observa-se que a frente de saturação chega em 0,1 dias na superfície do talude de jusante na análise executada com o programa SvFlux3D, enquanto que na modelagem através do GEOFLUX esta condição é atingida em 0,11 dias. A velocidade horizontal de fluxo é ligeiramente mais rápida nos resultados obtidos com o programa SVFLUX3D, enquanto que a componente vertical parece ser ligeiramente maior nos resultados computados com o programa GEOFLUX3D. Estas pequenas diferenças podem estar relacionadas diretamente com a discretização da malha de elementos finitos e com o fato de que no SVFLUX3D o modelo de Fredlung e Xing (1994) é empregado para representação das curvas características dos solos não-saturados enquanto que no GEOFLUX3D optou-se pelo modelo de van Genuchten (1980).

Em ambas simulações, a frente de umedecimento avança principalmente ao longo da interface entre as camadas de enrocamento, comportamento consistente com o observado antes do colapso da barragem e do afloramento de água no talude jusante acima dos 3.260,0m. Em comparação com os resultados obtidos pela análise 2D, a frente de umedecimento atinge o talude de jusante em 0,15 dias, tempo maior de aquele determinado na simulação 3D (0,11 dias).

A figura 5.10 mostra os contornos de poropressão, em diferentes instantes de tempo, na seção longitudinal localizada em $x = 111,56$ m. As áreas escuras correspondem às regiões saturadas. A frente de umedecimento avança lentamente para baixo e quase atinge o lençol freático na base da barragem perto das ombreiras após 0,4 dias. A parte central da barragem, no entanto, até este instante de tempo permanece ainda não-saturada.

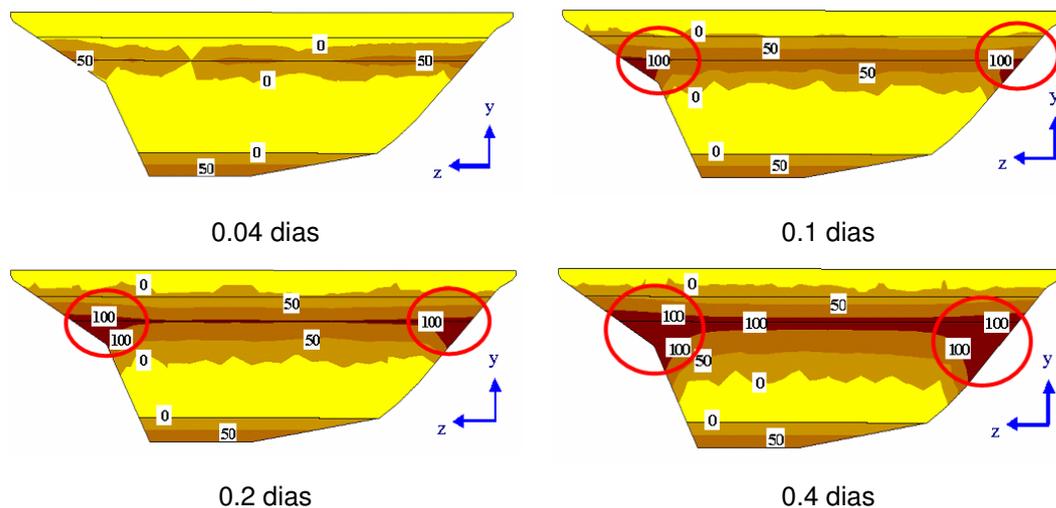


Figura 5.10 – Evolução no tempo dos contornos de poropressão (kPa) na seção longitudinal da barragem em $x = 111,56$ m.

Conforme também pode ser notado, as cargas de pressão são maiores perto das ombreiras, ocasionando maiores gradientes hidráulicos e, conseqüentemente, o fluxo avança com maior velocidade perto dos contornos laterais, formando assim regiões de mais alto risco quando a água flui no interior do corpo da barragem. Não é de se surpreender, portanto, que rupturas por erosão em várias barragens do mundo, como na barragem Teton (EUA), tenham acontecido junto às ombreiras (USCOLD, 1988).

Apresentam-se finalmente, as figuras 5.11 e 5.12 contendo as distribuições de carga de pressão e de carga total, respectivamente, para o tempo $t = 0,4$ dias.

Como pode ser observado na figura 5.11, na superfície do talude da jusante correspondente à zona 2, as cargas de pressão tornam-se nulas devido à condição de contorno SEEPAGE que simula a saída livre de água através dessa superfície. Já na figura 5.12, os contornos de carga total tornam-se quase verticais e a direção de fluxo quase horizontal dentro da zona 2. Portanto, a ruptura devido ao fluxo horizontal deve ter sido iniciada ao longo dessa camada, como suposto inicialmente.

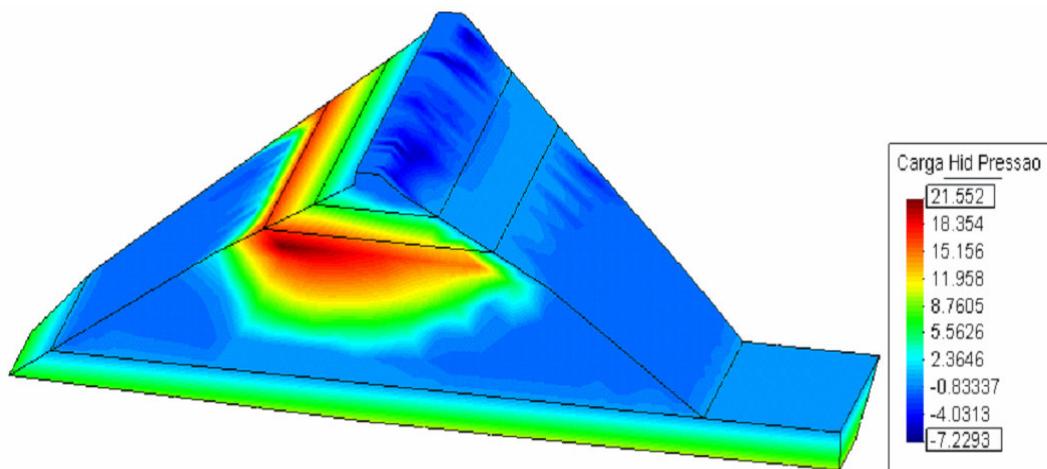


Figura 5.11 - Distribuição de cargas de pressão (m) na barragem Gouhou depois de 0,4 dias.

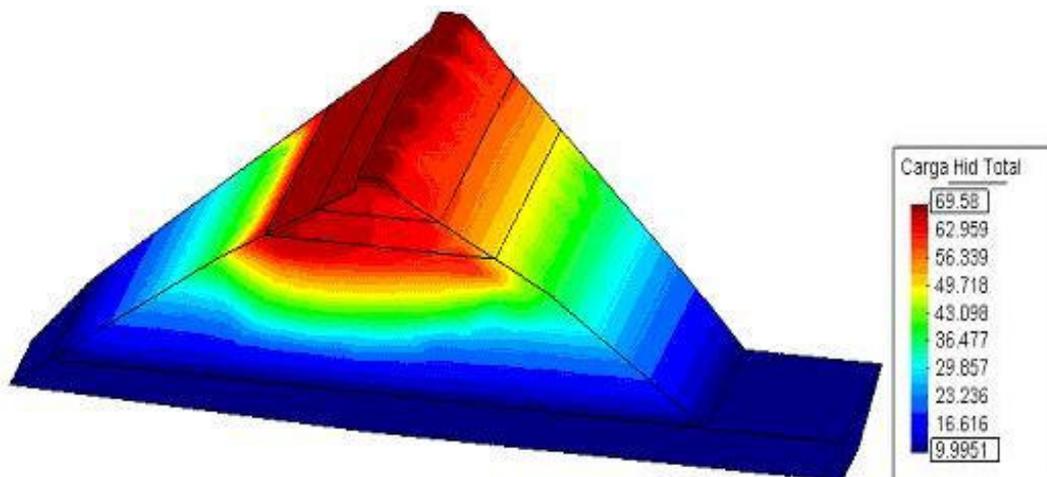


Figura 5.12 - Distribuição de cargas totais (m) na barragem Gouhou depois de 0,4 dias.

5.2. Fluxo através da barragem de terra Macusani

A barragem de terra Macusani está projetada para ser construída em um vale estreito do rio Macusani, na província de Carabaya, departamento de Puno, Peru, como ilustrado na figura 5.13.

São investigados os processos de fluxo transiente e permanente durante o enchimento e rebaixamento rápido do nível do reservatório, comparando-se os resultados numéricos obtidos por análises 2D e 3D do fluxo, os quais evidenciam a necessidade de se executar análises 3D nas barragens projetadas em vales estreitos onde os efeitos da variação da geometria nas condições de fluxo podem ser significativos.



Figura 5.13 - Localização da barragem Macusani no Peru.

No final, os resultados obtidos pelo GEOFLUX3D na condição de regime permanente em análises 3D são comparados com aqueles obtidos por Huertas (2006) através do programa computacional SEEP3D v.1.15; mostrando-se algumas diferenças na posição final da linha freática entre ambos resultados

devido à condição de contorno SEEPAGE implementada no GEOFLUX3D e imposta na superfície do talude de jusante da barragem.

5.2.1. Descrição da barragem Macusani

Do tipo zonada, a barragem terá uma altura máxima de 71 metros e um comprimento de crista de 410 metros, situando-se a uma altitude de 4.304,0 metros acima do nível do mar. O reservatório formado pela barragem terá um espelho de água de 4,75 km², devendo armazenar um volume máximo de 112 milhões de metros cúbicos, garantindo uma vazão constante para a usina hidroelétrica de San Gabán.

Na figura 5.14 são apresentados uma seção transversal simplificada da barragem correspondente à seção de altura máxima (A-A) e um perfil da seção longitudinal vista desde a montante.

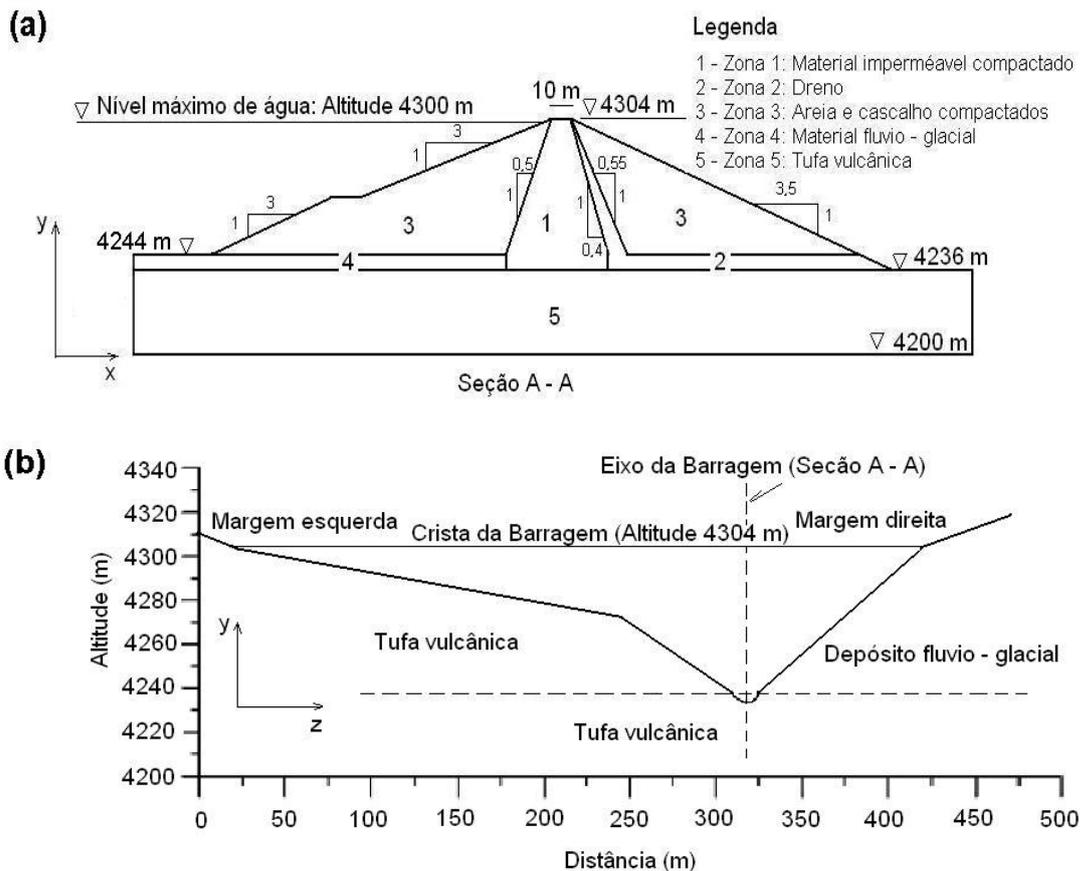


Figura 5.14 - Barragem Macusani: (a) Seção transversal A-A de altura máxima; (b) Seção longitudinal. Unidades em metros. (Fonte: Huertas, 2006).

5.2.2. Casos de simulação

Considerando a geometria e as condições de contorno ilustradas na figura 5.15, três casos de simulação de fluxo através da barragem de terra foram simulados.

Em ambos os casos I e II investiga-se as condições de fluxo devido ao enchimento inicial do reservatório. No caso I, a análise é feita considerando-se um valor do coeficiente de permeabilidade saturada $k_{\text{dreno}} = 4 \times 10^{-5}$ m/s, estabelecido para o dreno de acordo com o projeto original da barragem, baseado em modelagem do problema 2D, enquanto que no caso II o material do dreno foi admitido com coeficiente de permeabilidade saturada $k_{\text{dreno}} = 4 \times 10^{-4}$ m/s. Finalmente no caso III simula-se o rebaixamento rápido do reservatório de água e as condições de fluxo assim geradas.

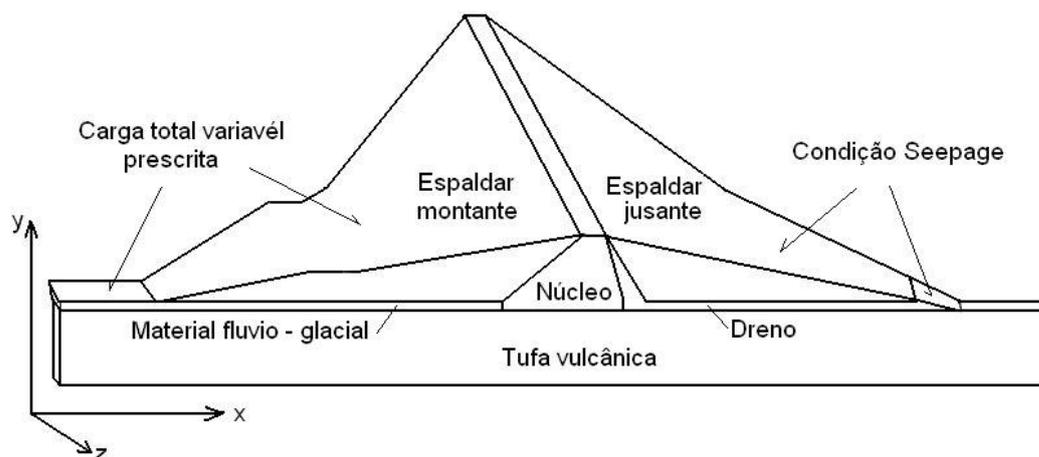


Figura 5.15 - Modelo geométrico simplificado e condições de contorno para análise de fluxo 3D na barragem de terra Macusani, Peru.

Nos casos I e II, a posição da superfície freática inicial é obtida a partir da condição de fluxo permanente na base da barragem, devido à diferença de cargas nas superfícies livres de montante (4.244,0m) e de jusante (4.236,0 metros). Assume-se que a sucção é incrementada linearmente com a carga de elevação, acima da superfície freática, alcançando valores muito elevados da ordem de 1.000 kPa na crista da barragem (solos muito secos). Para o caso III, as condições iniciais são aquelas obtidas quando o regime permanente é estabelecido na análise do caso II.

Para os três casos, assume-se uma condição de contorno sob forma de carga hidráulica variável prescrita na superfície do talude da montante, representando dessa forma as etapas de primeiro enchimento ou de rebaixamento rápido do reservatório.

A função de variação da carga hidráulica prescrita na simulação do enchimento, aplicável nas análises dos casos I e II empregando a subrotina DATBOUI, está apresentada na tabela 5.2. A variação da carga para representar o rebaixamento rápido do reservatório da barragem no caso III é apresentada na tabela 5.3. Uma condição de contorno de fluxo nulo (impermeável) é aplicada na crista da barragem e no talude de jusante, quando as cargas de pressão são negativas neste talude; na hipótese de positivas, é imposta então a condição de fluxo livre utilizando a subrotina SEEPAGE, conforme descrito anteriormente no capítulo 3.

Na região de saída, sobre a superfície da fundação de jusante, a carga hidráulica é considerada constante, no valor de 36m. Também é assumido que as superfícies das ombreiras da barragem são impermeáveis, i.e., admite-se que não haja fluxo através das fundações laterais da barragem.

Tabela 5.2 - Função de variação de carga hidráulica na superfície do talude de montante (primeiro enchimento do reservatório).

Etapa	Tempo (dias)	Carga total H (m)	Altitude (m)
--	0	44,0	4244,0
1	5	49,0	4299,0
2	10	61,0	4261,0
3	15	70,0	4270,0
4	20	83,0	4283,0
5	25	92,0	4292,0
6	30	100,0	4300,0

Tabela 5.3 - Função de variação de carga hidráulica na superfície do talude da montante (rebaixamento rápido do reservatório).

Etapa	Tempo (dias)	Carga total H (m)	Altitude (m)
--	0	100,0	4300,0
1	0,2	92,0	4292,0
2	0,4	83,0	4283,0
3	0,6	70,0	4270,0
4	0,8	61,0	4261,0
5	1,0	44,0	4244,0

5.2.3. Propriedades dos materiais

Nas análises foram considerados quatro materiais para o corpo da barragem e um material para a fundação, os quais estão apresentados junto aos seus respectivos coeficientes de condutividade hidráulica na tabela 5.4. Os valores foram obtidos a partir de ensaios de laboratório executados no CISMID - Centro de Pesquisas da Universidade Nacional de Engenharia de Lima, Peru.

Tabela 5.4 - Materiais empregados na barragem Macusani e seus respectivos coeficientes de condutividade hidráulica na condição saturada. (CISMID)

Zona da Barragem	Material	k_s (m/s)
Corpo da Barragem	Espaldar	2×10^{-5}
Corpo da Barragem	Núcleo	1×10^{-7}
Corpo da Barragem	Dreno	4×10^{-5}
Corpo da Barragem	Depósito fluvio glacial	1×10^{-5}
Fundação	Tufa vulcânica	1×10^{-7}

As curvas de retenção de água foram as mesmas empregadas por Huertas (2006) e para sua representação empregou-se também o modelo de van Genuchten (1980), com utilização do programa computacional RETC v.6 (Simunek et al., 1985). Tais parâmetros, são listados na tabela 5.5, abaixo.

Tabela 5.5 - Materiais empregados na barragem Macusani e respectivos parâmetros do modelo de van Genuchten (1980) utilizado para análise sob regime transiente. (CISMID)

Material	Zona	θ_s	θ_r	α_{vg}	q
Núcleo	1	0,41	0,105	0,147	1,78
Dreno	2	0,39	0,020	2,670	2,29
Espaldar	3	0,38	0,105	1,077	3,01
Depósito fluvio glacial	4	0,30	0,035	0,315	1,93
Turfa vulcânica	5	0,38	0,024	0,400	3,74

5.2.4. Modelagem no espaço e no tempo

As figuras 5.16 e 5.17 mostram os modelos geométricos empregados nas simulações 2D e 3D assim como suas respectivas malhas de elementos finitos. Nas análises bidimensionais empregou-se uma malha com 2.140 nós conectados a

4.025 elementos triangulares do tipo TRIA3. Nas análises 3D foram empregados 26.691 nós, conectando 133.826 elementos tetraédricos do tipo TETR4.

Em todos os casos empregaram-se passos de tempo de 0,1 dias de duração, no início das simulações, incrementados para 0,5 dias após 100 dias. Para o tratamento da não-linearidade adotou-se uma tolerância de 1% e um máximo número de iterações para convergência da solução numérica igual a 40. Os tempos de simulação computacional foram muito rápidos nos três casos para a análise 2D, enquanto que nos casos 3D, pela maior quantidade de equações, os tempos de processamento chegaram a durar até 1,5 dias.

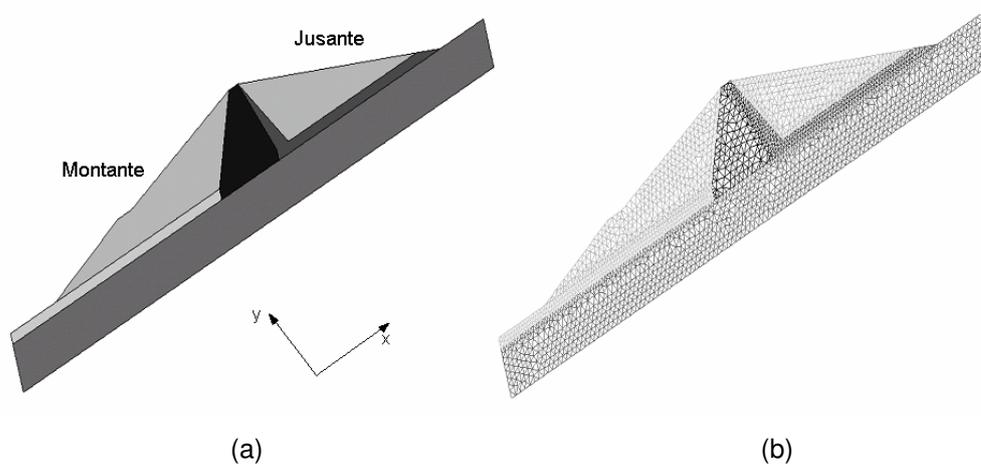


Figura 5.16 - (a) Modelo geométrico 2D da barragem Macusani, (b) malha de elementos finitos com o tipo TRIA3.

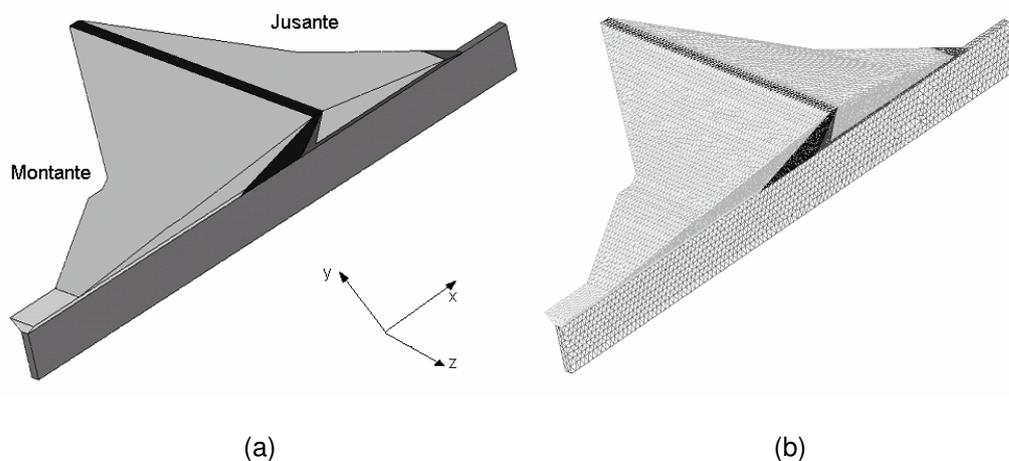


Figura 5.17 - (a) Modelo geométrico 3D da barragem Macusani, (b) malha de elementos finitos com o tipo TETR4.

5.2.5. Análise e discussão dos resultados

5.2.5.1. Caso I: Primeiro enchimento do reservatório ($k_{\text{dreno}} = 4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$)

A figura 5.18 mostra a evolução no tempo da superfície freática da barragem para o caso de fluxo 3D durante o primeiro enchimento do reservatório, utilizando um coeficiente de permeabilidade do dreno na condição saturada igual a $4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$. Assim como no caso dos estudos feitos na barragem Gouhou, podem ser distinguidas duas regiões: uma escura, na qual a poropressão é positiva (zona saturada), e uma região mais clara onde a poropressão é negativa (zona não-saturada). Observa-se que a frente de umedecimento alcança o núcleo da barragem em 25 dias, a partir dos quais o fluxo torna-se mais lento tendo em vista a baixa condutividade hidráulica do material do núcleo, demorando 300 dias para atingir o dreno e estabelecer condições de fluxo permanente em 1.000 dias. Nesta condição, nota-se que a superfície freática encontra-se acima do dreno, evidenciando um aspecto de comportamento hidráulico da barragem não previsto com base na utilização de modelos bidimensionais pelo método dos elementos finitos.

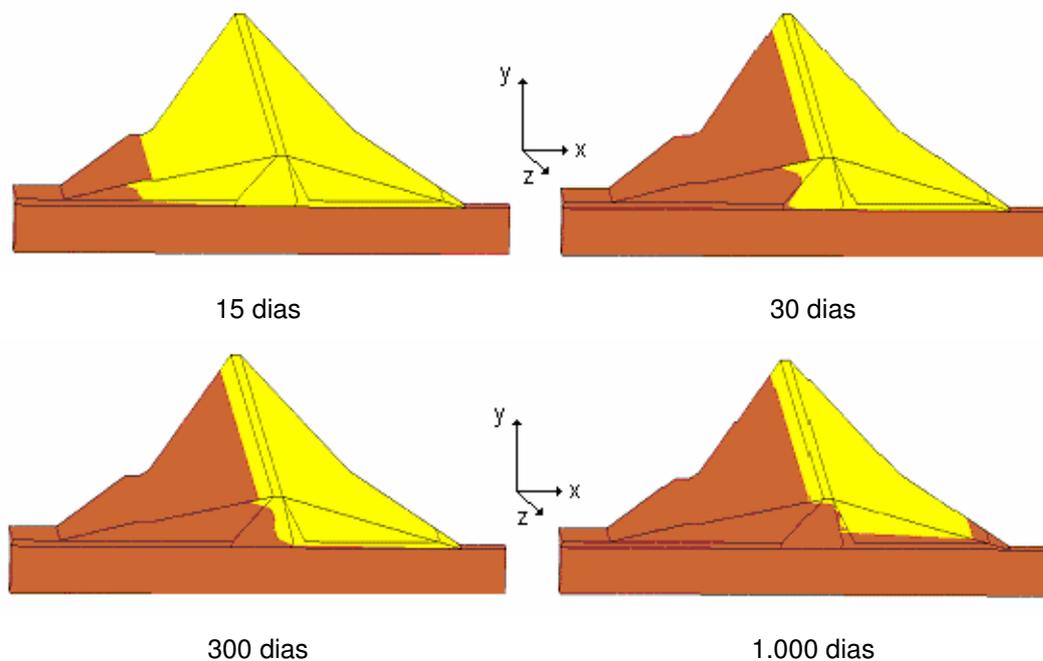


Figura 5.18 - Evolução da superfície freática na barragem Macusani para o caso I sob diferentes tempos

A figura 5.19 mostra os contornos de poropressão na seção transversal A-A em $z = 290\text{m}$, para diferentes instantes de tempo, com o propósito de comparar as condições de fluxo obtidas através de modelagens 2D e 3D.

Observa-se que a frente de umedecimento avança ligeiramente mais rápida na simulação 3D, o que pode ser atribuído (em comparação com os resultados computados da análise 2D) à contribuição das componentes de velocidade fora do plano que, obviamente, não podem ser representadas em modelos bidimensionais do problema. Nota-se também que a frente de umedecimento avança rapidamente através da zona do espaldar da montante até chegar ao núcleo, onde o fluxo torna-se então muito lento.

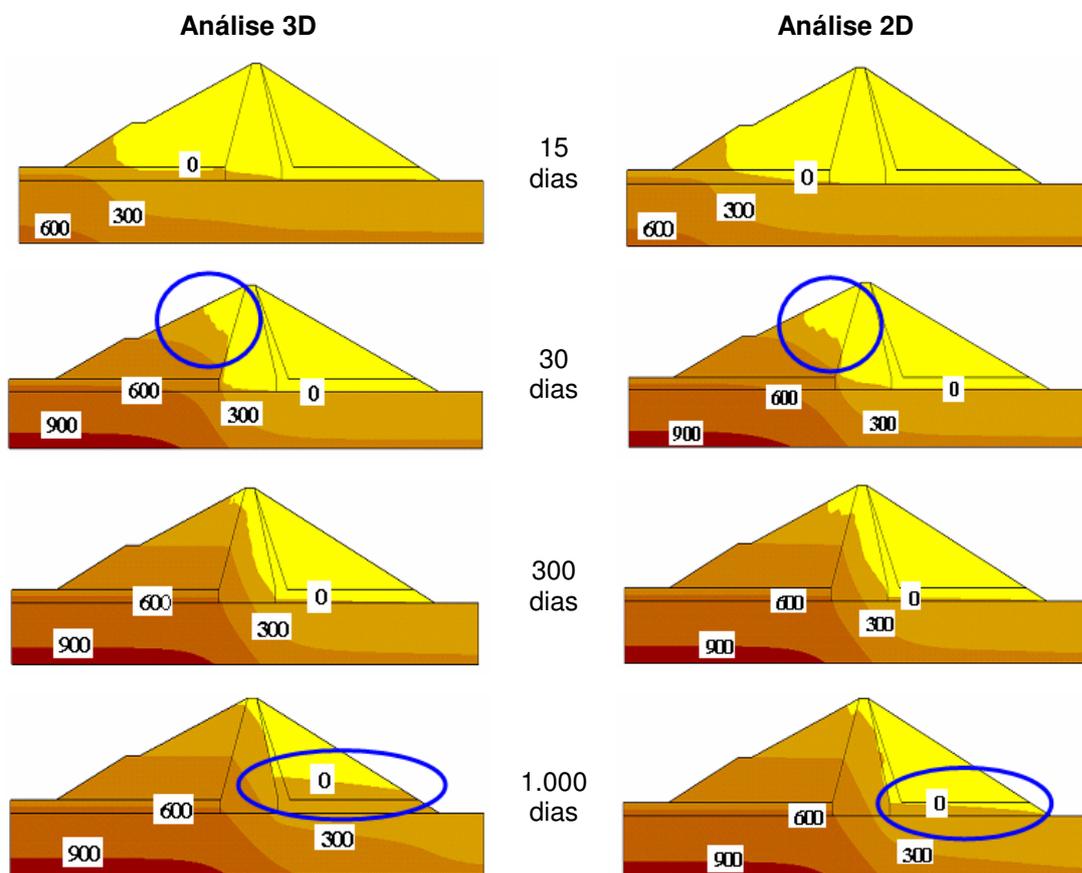


Figura 5.19 – Evolução no tempo dos contornos de poropressão (kPa) na seção transversal em $z = 290\text{ m}$ para o caso I.

Quando a frente se estabelece no regime permanente, no tempo $t=1.000$ dias, observa-se que na análise 3D a condutividade hidráulica do dreno não é suficiente para transportar toda a quantidade de água que percola pela barragem e, conseqüentemente, a superfície freática termina estabelecendo-se acima da face

superior do dreno. Dos resultados da análise 2D, o dreno parece no entanto funcionar perfeitamente.

Finalmente, constatou-se certas oscilações na definição da superfície freática na interface entre o núcleo e o dreno, tais oscilações podem ser explicadas devido a que não se considerou uma zona de transição apropriada nos modelos, ocasionando mudanças bruscas de propriedades entre um material e outro, porém sem significativa influência nos resultados gerais do problema.

5.2.5.2.

Caso II: enchimento do reservatório ($k_{\text{dreno}} = 4 \times 10^{-4}$ m/s)

No caso II simula-se o primeiro enchimento do reservatório considerando-se um coeficiente de permeabilidade do material do dreno ($k_{\text{dreno}} = 4 \times 10^{-4}$ m/s), na condição saturada, dez vezes maior do que no caso I.

A figura 5.20 mostra os contornos de poropressão na seção transversal A-A para o caso II. Observa-se uma semelhança de comportamento com o caso I, até o tempo $t = 300$ dias, necessário para que a frente de umedecimento atinja o dreno. No entanto, devido à mudança no valor do coeficiente de condutividade hidráulica do dreno, desta vez a superfície freática se estabelece no interior da região do dreno, indicando que a mudança na permeabilidade do dreno assegurou que o mesmo funcione perfeitamente dentro de limites de segurança adequados inclusive incorporando a quantidade de água adicional gerado pelos efeitos 3D das condições de fluxo.

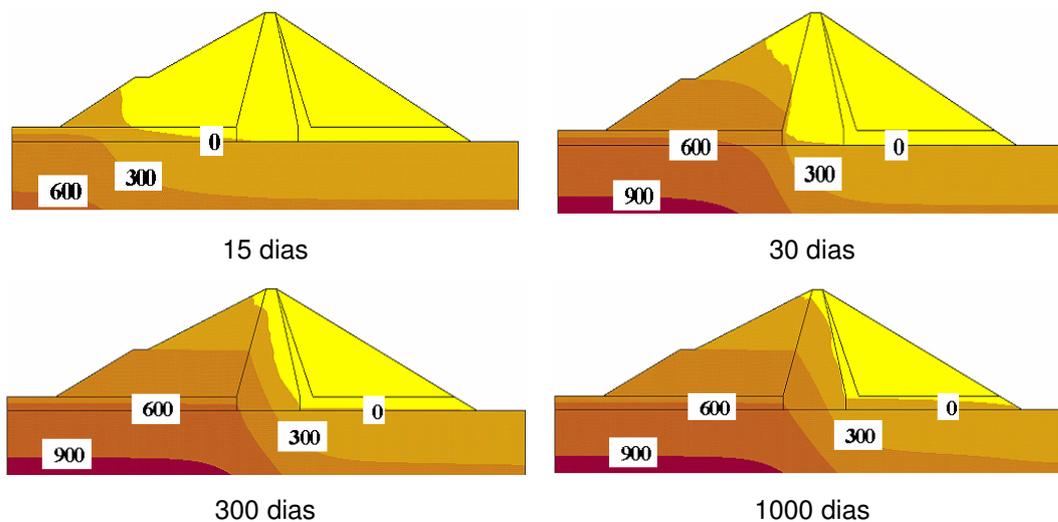


Figura 5.20 – Evolução dos contornos de poro pressão (kPa) na seção de corte em $z = 290$ m para o caso II.

Apresentam-se nas figuras 5.21 e 5.22 as distribuições finais de carga de pressão e de carga total, respectivamente, na condição de regime permanente no caso II. Nota-se que na superfície do talude da jusante tem-se uma re-distribuição das cargas hidráulicas em consequência do afloramento de água pelo pé do dreno.

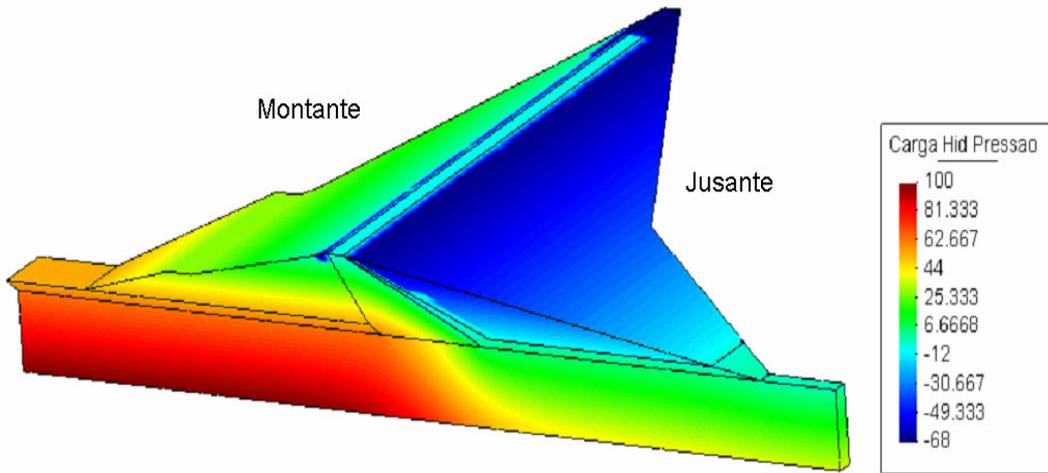


Figura 5.21 - Distribuição final das cargas de pressão (m) na barragem Macusani depois de 1000 dias (condição de regime permanente) para o caso II.

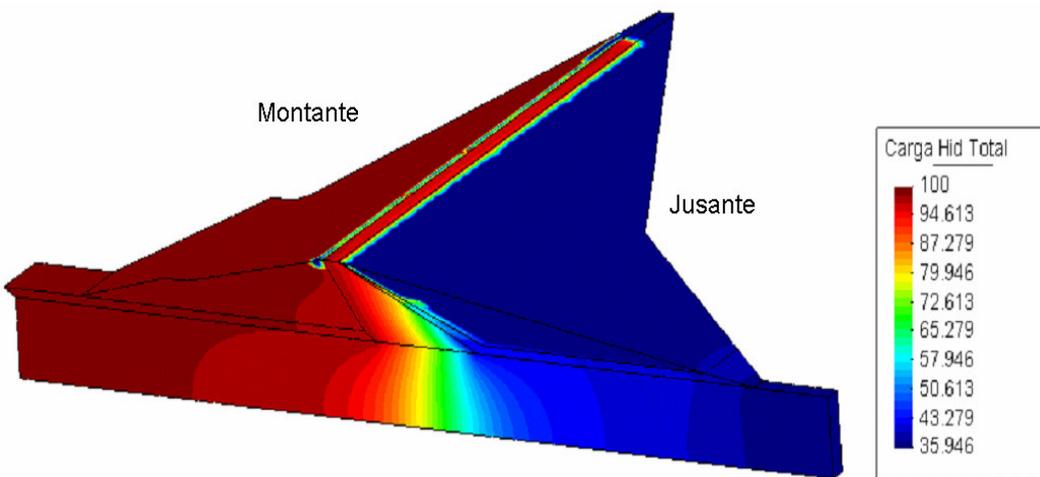


Figura 5.22 - Distribuição final das cargas totais (m) na barragem Macusani depois de 1000 dias (condição de regime permanente) para o caso II.

5.2.5.3.

Caso III: Rebaixamento rápido do reservatório

No caso III simula-se o rebaixamento rápido do reservatório considerando a função de rebaixamento mostrada anteriormente na tabela 5.5. A figura 5.23 mostra a evolução da superfície freática na barragem Macusani. Nota-se que logo após a ocorrência do rebaixamento rápido, o nível da superfície freática na região de montante desceu muito pouco, não tendo havido tempo suficiente para a dissipação dos excessos de poropressão no espaldar de montante que, em quase a sua totalidade, apresenta-se saturado. Este aspecto do problema hidráulico aliás evidencia os cuidados com que devem ser feitas as análises de estabilidade de taludes de montante de barragens, considerando-se a possibilidade de ocorrência de rebaixamentos rápidos do nível de água do reservatório.

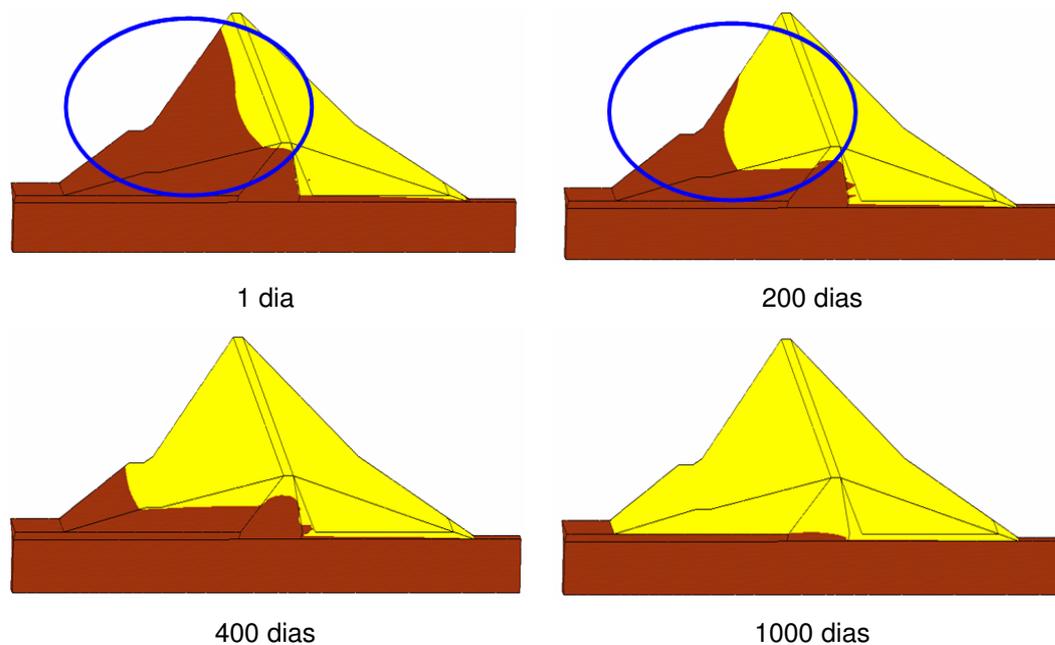


Figura 5.23 - Evolução da posição da superfície freática com o tempo, após rebaixamento rápido do reservatório.

A figura 5.24 mostra a evolução da superfície freática, assim como os contornos de poropressão negativos, na superfície do talude de montante, após o rebaixamento do reservatório. Observa-se aqui que após o rebaixamento total do reservatório em um dia, a superfície freática desce ligeiramente mais próximo da zona da seção transversal máxima A-A, enquanto que se retarda na direção das

ombreiras laterais, principalmente da ombreira esquerda, região mais afastada da seção máxima A-A.

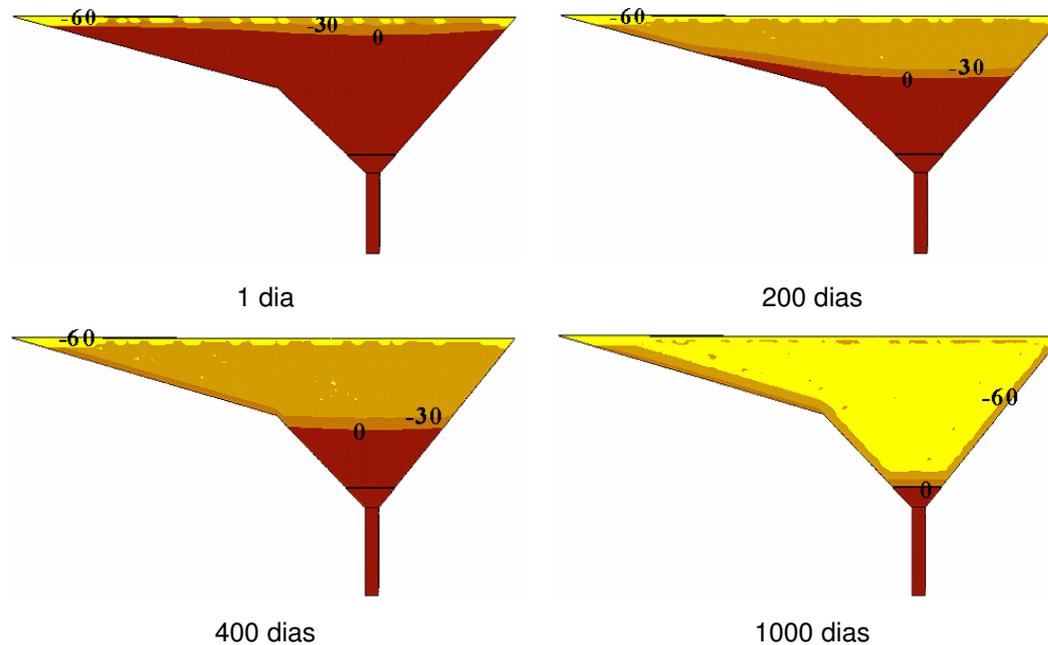


Figura 5.24 – Evolução no tempo dos contornos de poropressão (kPa) na superfície de talude de montante após o rebaixamento rápido.

5.2.6.

Comparação de resultados com o programa computacional Seep3D

Os resultados obtidos nas análises 3D pelo programa GEOFLUX3D na condição de regime permanente são aqui comparados com aqueles obtidos por Huertas (2006) através da utilização do programa comercial SEEP3D, v.1.15.

Compararam-se em primeiro lugar as posições finais das superfícies freáticas obtidas para o caso I, como mostrado na figura 5.25. Como apreciado nesta figura as linhas freáticas são estabelecidas acima do nível superior do dreno, porém, aprecia-se diferenças à saída no talude da jusante. A linha freática estabelecida no SEEP3D é fixada à saída do pé do dreno (elevação de 36m) devido à condição de contorno imposta nessa posição enquanto que para o GEOFLUX3D a linha freática à saída termina estabelecendo-se acima do nível superior do dreno (elevação de 49m) devido à condição de contorno SEEPAGE imposta na superfície do talude de jusante.

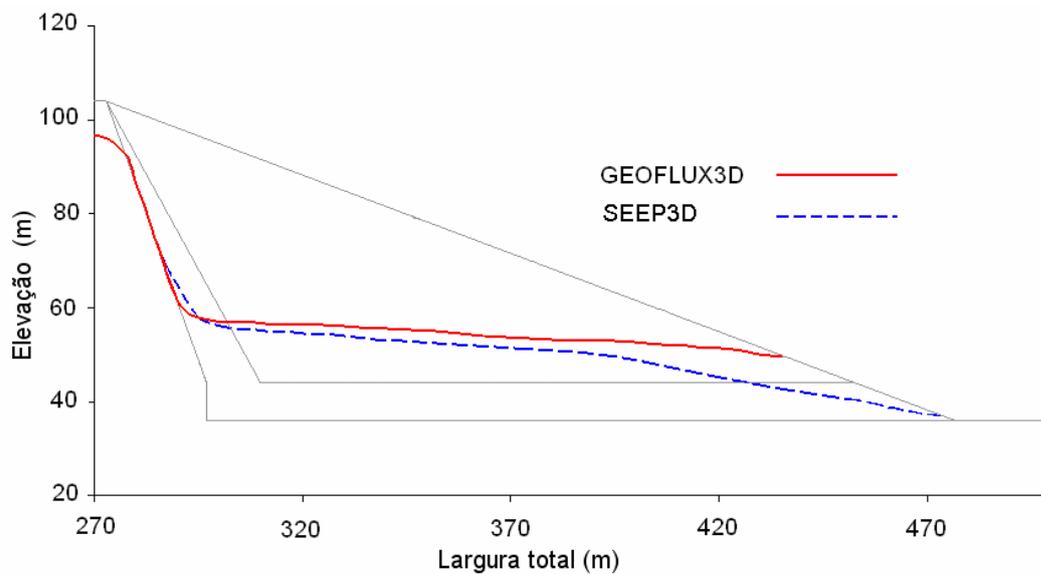


Figura 5.25 - Comparação das linhas freáticas na seção máxima A – A , determinadas pelo GEOFLUX3D e pelo programa comercial SEEP3D v.1.15, em análises 3D na condição de fluxo em regime permanente para o caso I.

Em segundo lugar foram comparadas as posições finais das superfícies freáticas obtidas para o caso II, como mostrado na figura 5.26. Desta vez as linhas freáticas são muito parecidas sendo ambas estabelecidas praticamente no pé do dreno não influenciando a condição de contorno SEEPAGE como aconteceu no caso I.

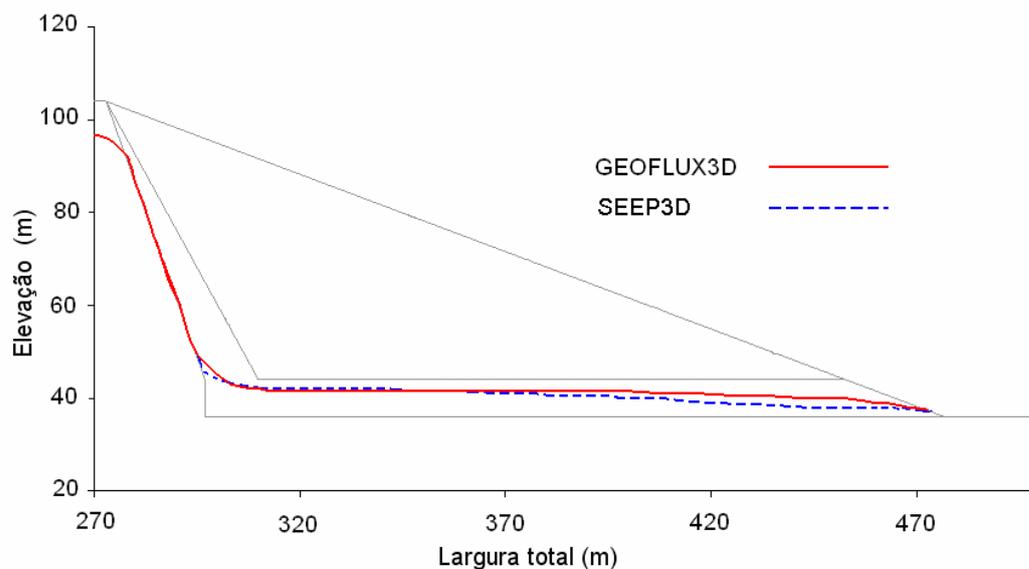


Figura 5.26 - Comparação das linhas freáticas na seção máxima A – A , determinadas pelo GEOFLUX3D e pelo programa comercial SEEP3D v.1.15, em análises 3D na condição de fluxo em regime permanente para o caso II.

A tabela 5.6 mostra as comparações das vazões obtidas na superfície do talude de jusante pelo GEOFLUX3D e pelo SEEP3D. Constata-se que as vazões obtidas pelo GEOFLUX3D são maiores do que aquelas computadas utilizando o programa SEEP3D, e ainda que na aplicação do programa GEOFLUX3D a vazão determinada no caso I é quase o dobro de aquela calculada na análise do caso II.

Tabela 5.6 - Comparação de vazões totais calculadas pelos programas GEOFLUX3D e Seep3D em análises 3D da barragem de terra Macusani.

Caso de análise	Vazão total Q (m ³ /s) GEOFLUX3D	Vazão total Q (m ³ /s) Seep3D
I) 3D ($k_{\text{dreno}}=4 \times 10^{-5}$ m/s)	$7,92 \times 10^{-3}$	$1,89 \times 10^{-3}$
II) 3D ($k_{\text{dreno}}=4 \times 10^{-4}$ m/s)	$3,86 \times 10^{-3}$	$2,00 \times 10^{-3}$

As diferenças de vazões podem ser explicadas justamente com base na posição final da superfície freática determinadas em ambas as análises. Na simulação executada com o SEEP3D foi prescrita uma condição de contorno que permitia a saída de água apenas pelo pé do dreno, o que produziu maiores velocidades através de pequenas áreas de saída. No caso do GEOFLUX3D, devido à atualização constante da posição da superfície freática na região de saída do talude de jusante, obtiveram-se menores velocidades de fluxo, porém através de maiores áreas de saída, produzindo finalmente maiores valores de vazão em relação àquelas determinadas por Huertas (2006) com o programa computacional SEEP3D.