

## 4

### Fluxo na barragem de terra de Macusani - Peru

#### 4.1.

##### Introdução

Neste capítulo são feitas previsões de fluxo permanente e transiente na barragem de terra Macusani (Peru) utilizando como ferramentas de análise os programas de elementos finitos Seep/W (v.6.02) e Seep 3D (v.1.15) para modelagem 2D e 3D, respectivamente, da barragem. Comparações entre os resultados numéricos assim obtidos são feitas procurando-se destacar as principais diferenças em termos de vazão, gradientes hidráulicos e cargas.

#### 4.2.

##### Descrição da barragem Macusani

A barragem Macusani foi projetada para ser construída em um estreitamento do rio Macusani, na província de Carabaya, departamento de Puno, Peru, conforme ilustrado na figura 4.1. Barragem de terra do tipo zonada, terá uma altura máxima de 71 m, com comprimento de crista de 410 m na altitude de 4304 metros acima do nível do mar. O reservatório formado pela barragem terá um espelho d'água de 4,75 km<sup>2</sup>, devendo armazenar um volume máximo de 112 milhões de metros cúbicos, garantindo uma vazão constante para a usina hidroelétrica de San Gabán, situada no mesmo rio.

A área em estudo está localizada na bacia do rio Amazonas e na sub-bacia do rio Macusani. O subsolo regional é basicamente constituído por turfas vulcânicas, com terreno apresentando superfícies planas e ligeiramente onduladas interceptadas por numerosos afloramentos rochosos de paredes abruptas (INGEMMET, 1997) - figura 4.2.

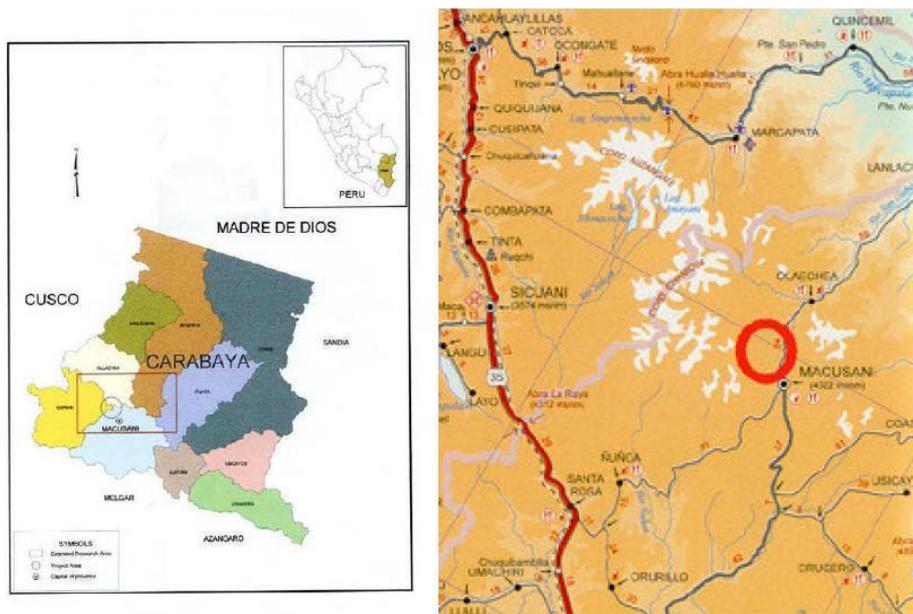


Figura 4.1 - Localização da barragem de Macusani – Peru



Figura 4.2 – (a) turfa de origem vulcânica (b) afloramentos rochosos na região da barragem Macusani, na altitude 4400m acima do nível do mar

As condições do solo de fundação no local da barragem estão apresentadas na figura 4.3. A margem esquerda consiste de uma camada superficial de depósitos morênicos (materiais transportados por galerias) e coluvionares de pequena espessura sobre camada de grande profundidade formada por turfás vulcânicas. A margem direita apresenta também a camada superficial de depósitos morênicos seguida por materiais flúvio-glaciais constituídos por blocos em uma matriz de areia limpa e/ou argilosa sobre turfás vulcânicas de cor branca a parda clara. A superfície freática se encontra na altitude aproximada de 4244 metros acima do nível do mar.

A seção transversal 3 da barragem Macusani (figuras 4.3 e 4.4) foi utilizada como seção transversal típica nas análises 2D de fluxo deste trabalho.

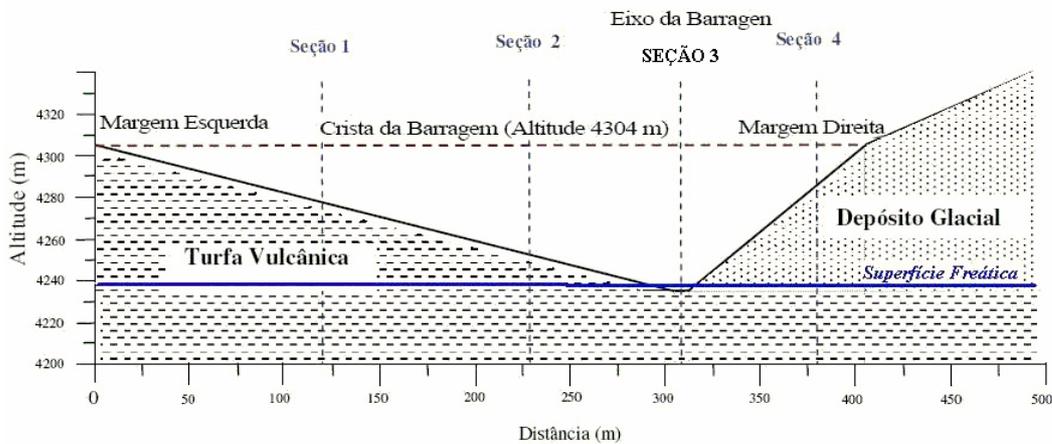


Figura 4.3 - Características do solo de fundação da barragem Macusani

#### Legenda

- 1 - Zona 1 : Material impermeável compactado
- 2 - Zona 2 : Filtro/Transição
- 3 - Zona 3 : Dreno
- 4 - Zona 4 : Areia e cascalho compactados
- 5 - Zona 5 : Transição do enrocamento
- 6 - Zona 6 : Enrocamento
- 7 - Zona 7 : Cascalho na superfície de rolamento
- 8 - Zona 8 : Material fluviu glacial
- 9 - Zona 9 : Turfa vulcânica alterada
- 10 - Zona 10 : Turfa Vulcânica

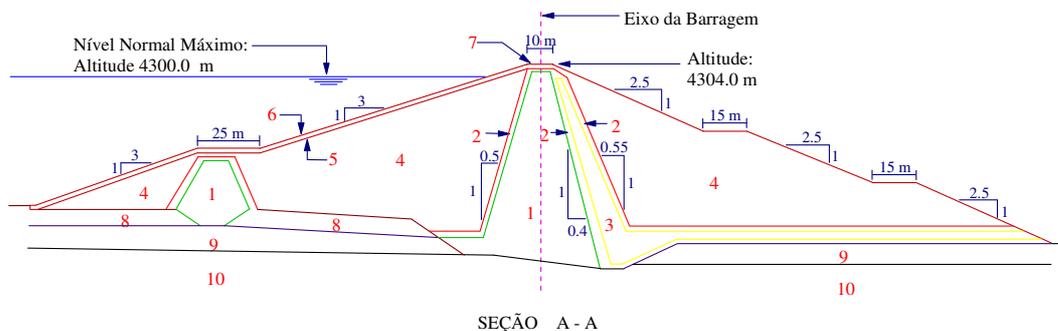


Figura 4.4 - Seção transversal 3 nas análises 2D de fluxo da barragem Macusani

Os parâmetros geotécnicos para previsão do comportamento hidráulico foram determinados através de ensaios de laboratório pelo CISMID – Centro de Pesquisas da Universidade Nacional de Engenharia de Lima, Peru, e estão listados na tabela seguinte.

Tabela 4.1 - Valores dos coeficientes de permeabilidade saturados para análise de fluxo da barragem Macusani

	Material	Coefficiente de permeabilidade saturado (m/s)
Barragem	Espaldar : GP - GM	$2 \times 10^{-5}$
Barragem	Núcleo : GC	$10^{-7}$
Barragem	Drenos : GW	$4 \times 10^{-5}$
Fundação	Depósito flúvio-glacial : GW-GP-GM	$10^{-5}$
Fundação	Depósito morênico	$10^{-7}$
Fundação	Turfa vulcânica alterada	$10^{-7}$

Na ausência de outras informações sobre a condutividade hidráulica dos materiais sob condição não-saturada (incluindo-se as respectivas distribuições granulométricas) as curvas características de sucção e as correspondentes funções de condutividade hidráulica empregadas nas análises tri e bidimensionais foram retiradas dentre as disponíveis no programa Seep/W, de acordo com o tipo de solo. A figura 4.5 mostra as curvas características de sucção adotadas para os diversos materiais que compõem a barragem, enquanto que a figura 4.6 ilustra as correspondentes funções de condutividade hidráulicas determinadas pelo método de Fredlund et al. (1994).

### 4.3. Modelagem do fluxo na condição 3D

As simulações numéricas para a análise de fluxo tridimensional foram realizadas com o programa Seep 3D, no qual a estrutura é geometricamente modelada pelo usuário através de grandes blocos que, na execução do programa, são subdivididos automaticamente em elementos finitos hexaédricos de 20 nós (funções de interpolação 3D quadráticas). As análises podem ser feitas considerando fluxo transiente ou permanente, para meios porosos total ou parcialmente saturados, apresentando heterogeneidades e anisotropias. As condições de contorno podem ser impostas em termos de carga hidráulica prescrita ou fluxo superficial por unidade de área.

A figura 4.7 apresenta a configuração dos blocos 3D que descrevem a geometria e indicam os materiais da barragem Macusani. A fundação tem espessura média de 36m e comprimento de 525m. Na modelagem foram

utilizados 270 blocos prismáticos que se transformaram em uma malha de elementos finitos 3D (figura 4.8) composta por 2076 elementos quadráticos conectados por 2091 pontos nodais.

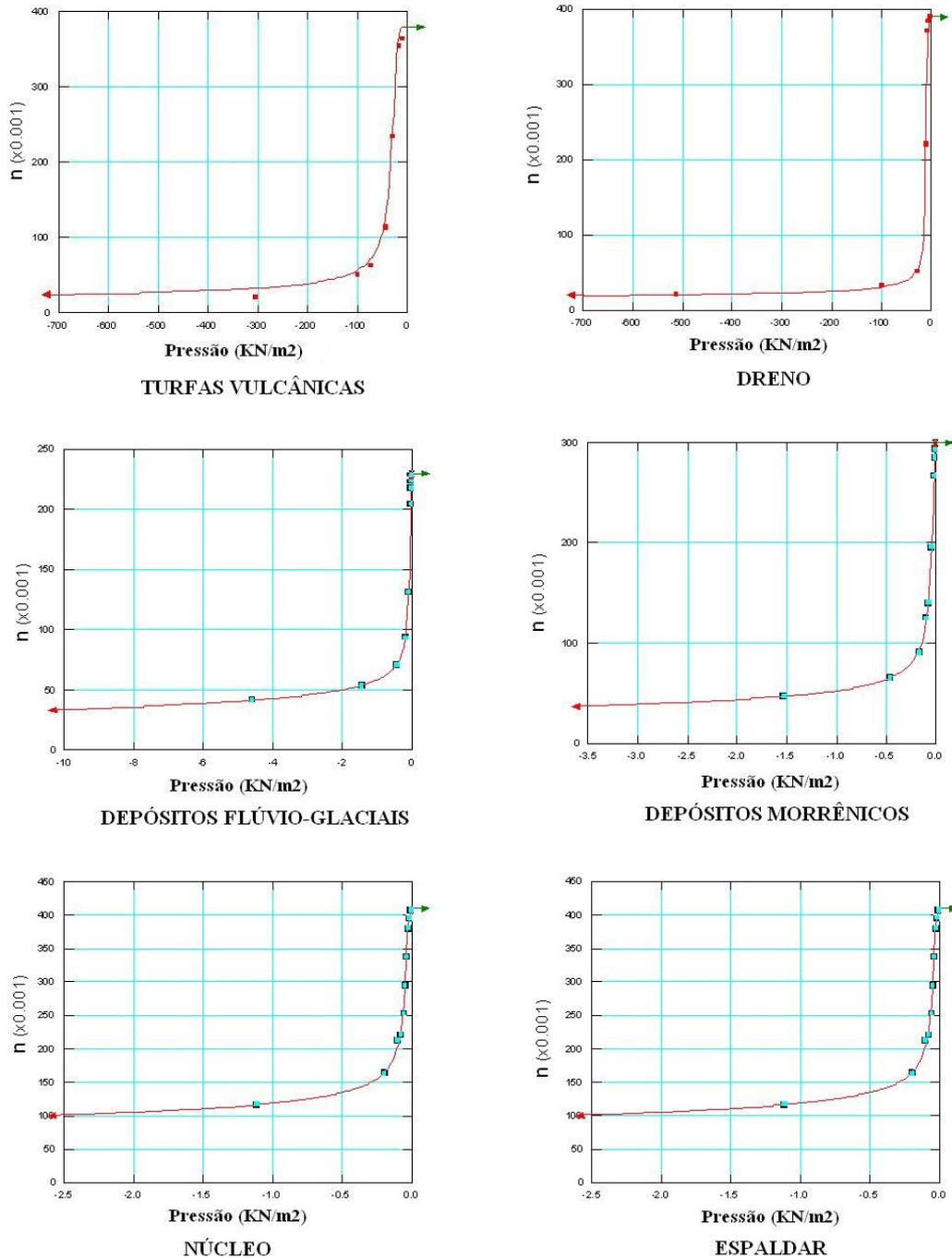


Figura 4.5 – Curvas características de sucção assumidas para os materiais da barragem Macusani com base no programa Seep/W

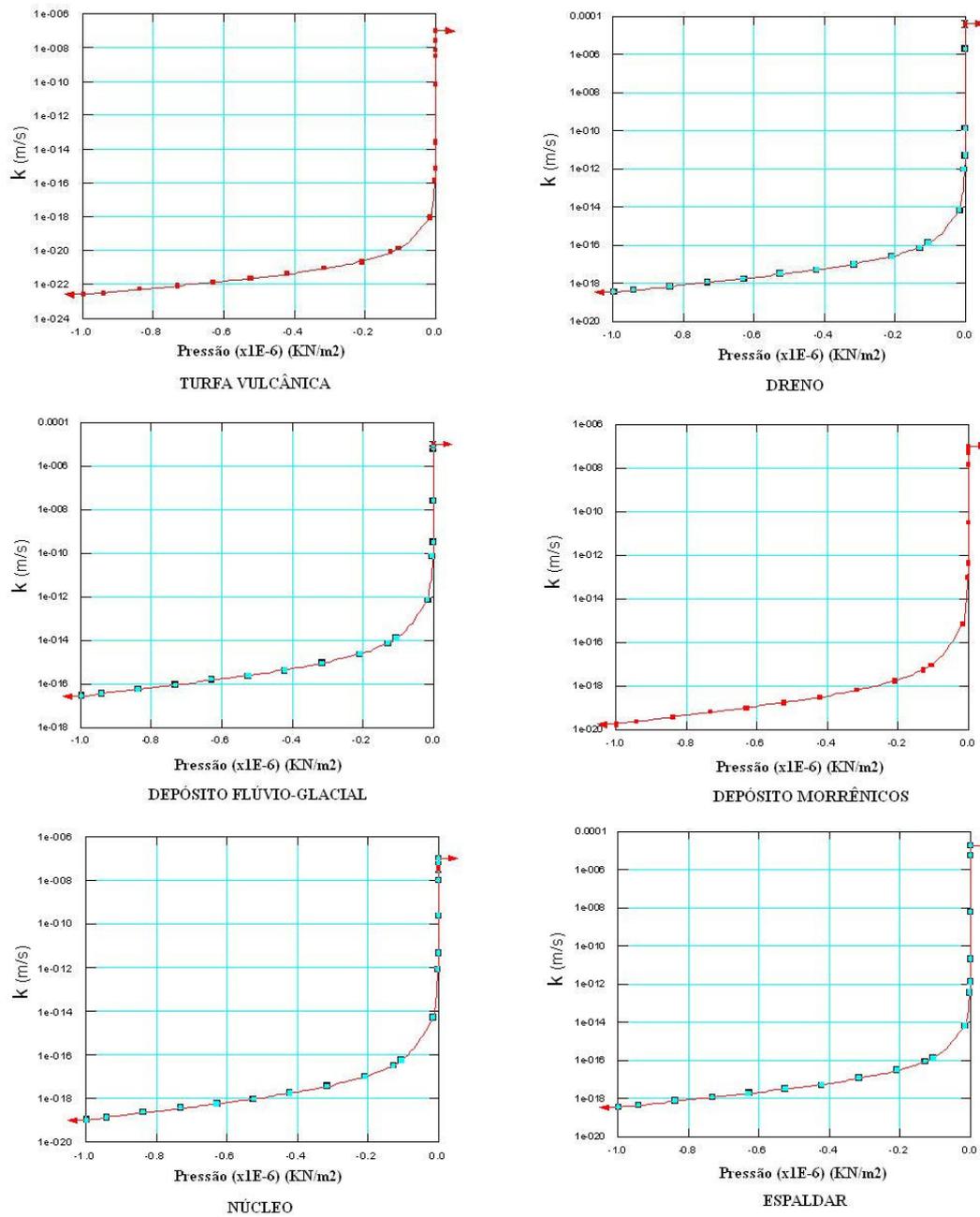


Figura 4.6 – Funções de condutividade hidráulica calculadas pelo método de Fredlund e al. (1994) para os materiais da barragem Macusani

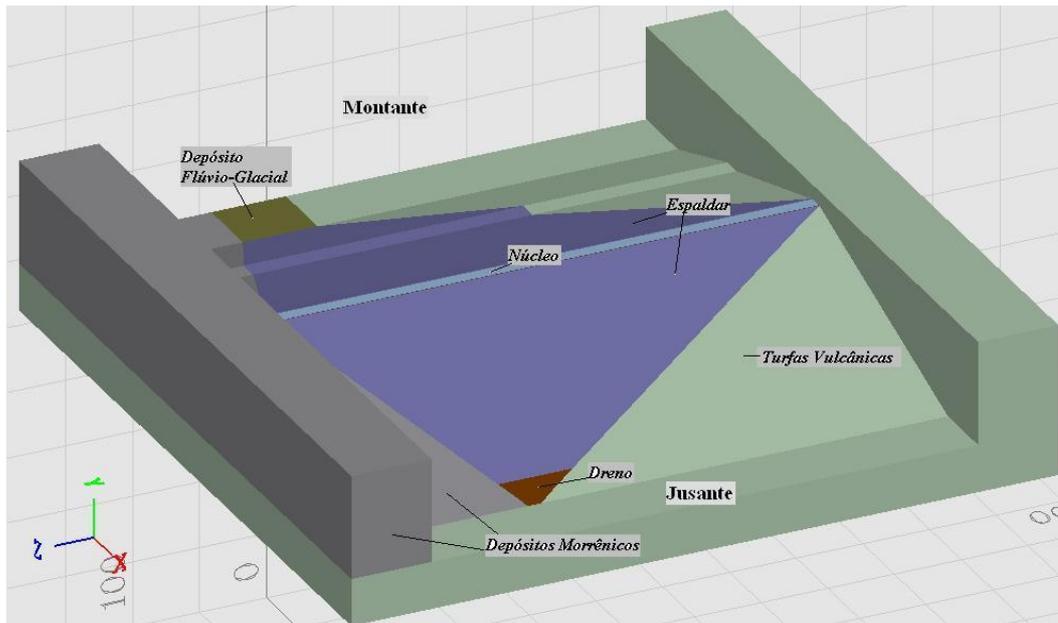


Figura 4.7 – Malha de blocos na análise 3D da barragem Macusani

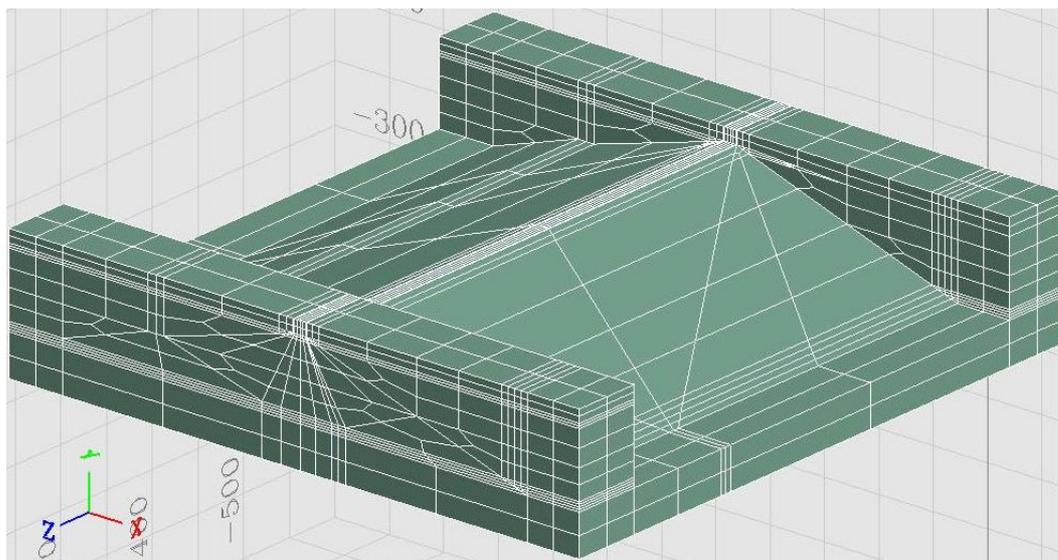


Figura 4.8 - Malha de elementos finitos na análise 3D da barragem Macusani

### 4.3.1. Primeiro enchimento do reservatório

O nível do lençol freático antes do primeiro enchimento do reservatório localizava-se entre as altitudes 4244m (à montante) e 4236m (à jusante), conforme indicado na figura 4.9. As condições de contorno foram introduzidas em termos de cargas hidráulicas totais nos contatos solo-água e como fluxo prescrito nulo

nos contatos considerados impermeáveis. As cargas hidráulicas foram medidas com relação ao nível 4240m, tomado como referência.

O processo de enchimento foi feito por etapas, considerando 1 mês o tempo total para o reservatório atingir a altitude máxima de 4300m acima do nível do mar. A tabela 4.2 indica a função linear de enchimento, mostrando as 6 etapas de enchimento com as respectivas cargas totais H (m) no pé do talude de montante em relação a um nível de referência situado na altitude de 4200m. A análise no tempo foi executada considerando-se um número máximo de iterações por intervalo de tempo igual a 500, com tolerância de 0,001 na solução do problema de fluxo, de natureza não linear em virtude da introdução de funções de condutividade hidráulica não-lineares para os diferentes materiais. O intervalo de tempo é ajustado automaticamente pelo programa dependendo das características das funções de condutividade hidráulica e da tolerância nos resultados finais (0,001 no caso, valor padrão recomendado pelo Seep/3D).

Tabela 4.2 – Função para variação da carga hidráulica com o tempo no talude de montante (primeiro enchimento do reservatório) da barragem Macusani

Etapa	Tempo (dias)	Carga total H (m)	Altitude (m)
-	0	44	4244
1	5	49	4249
2	10	61	4261
3	15	70	4270
4	20	83	4283
5	25	92	4292
6	30	100	4300

Para a seção transversal 3 (figura 4.3) a distribuição das cargas totais na altitude 4236m (correspondente ao pé do talude de jusante) nos tempos correspondentes às etapas 1 a 6 do enchimento do reservatório, bem como na condição de fluxo permanente, estão indicadas na figura 4.10.

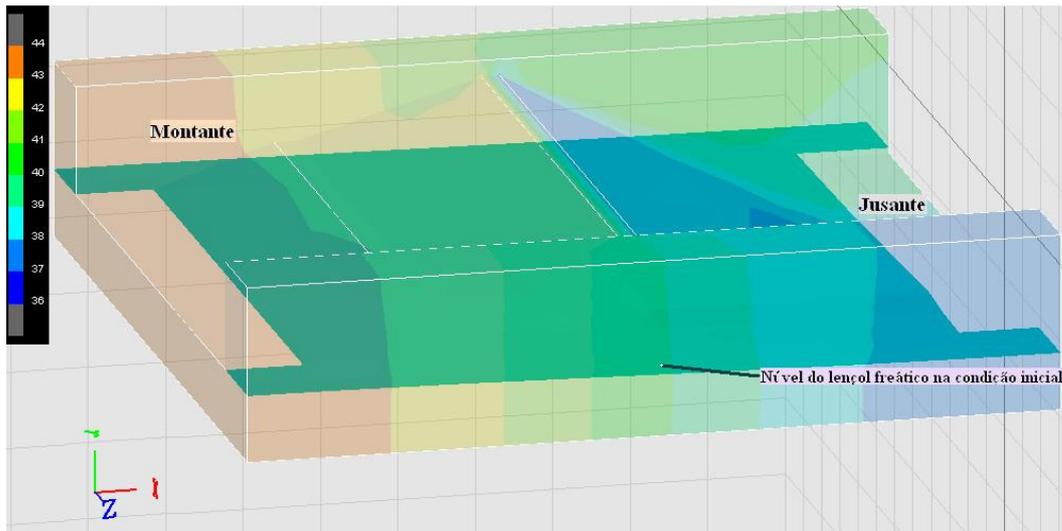


Figura 4.9 – Posição inicial do lençol freático antes do primeiro enchimento do reservatório da barragem Macusani

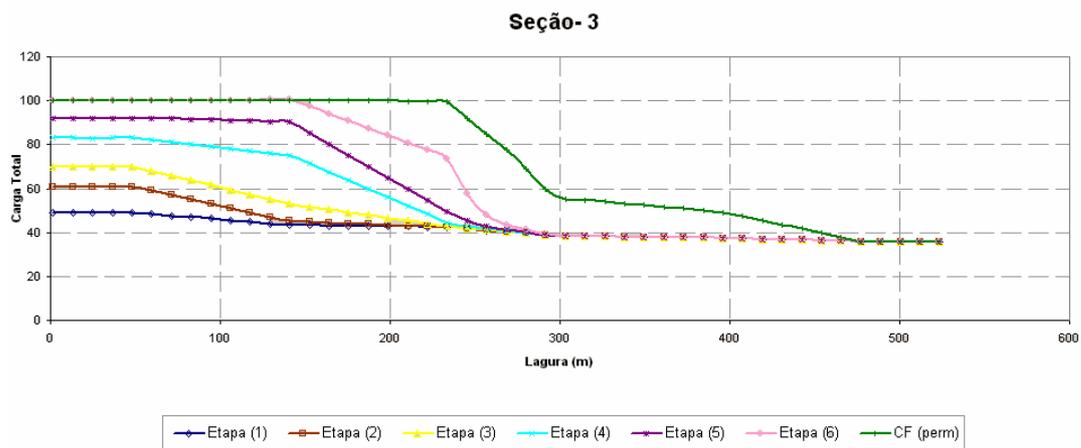


Figura 4.10 – Variação da carga hidráulica total na altitude 4236m, correspondente ao pé do talude de jusante, nas seis etapas de enchimento e na condição de fluxo permanente

Na condição de fluxo permanente 3D, a posição da superfície freática, a distribuição das cargas de pressão, das cargas totais, velocidades e gradientes hidráulicos encontram-se ilustradas nas figuras 4.11 a 4.15, respectivamente.

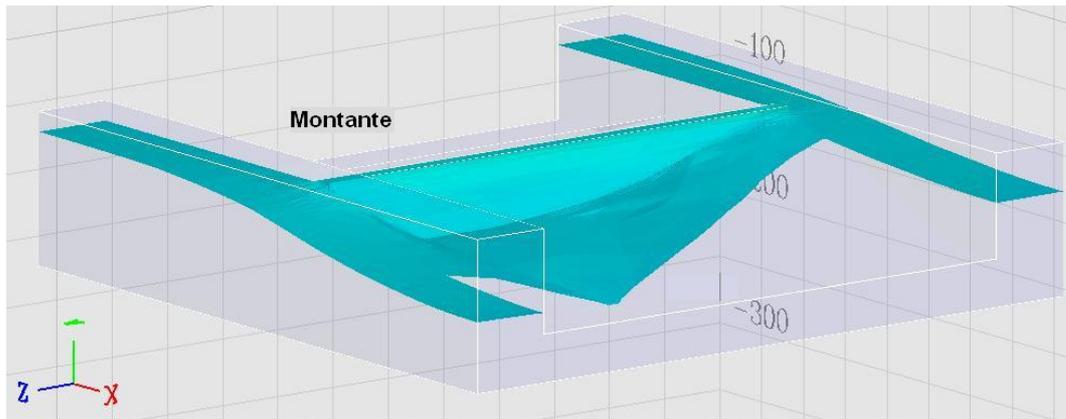


Figura 4.11 – Posição da superfície freática no final do enchimento do reservatório na condição de fluxo permanente

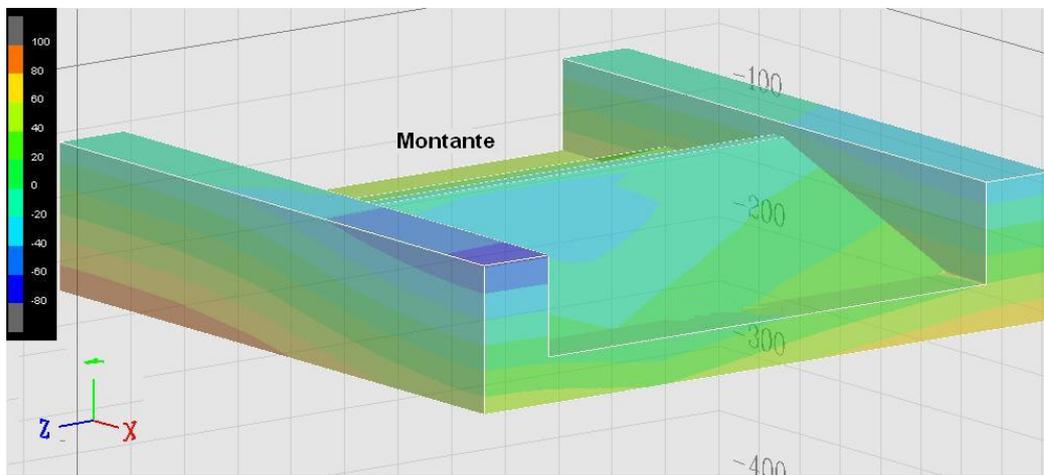


Figura 4.12 – Distribuição das cargas de pressão no final do enchimento do reservatório na condição de fluxo permanente

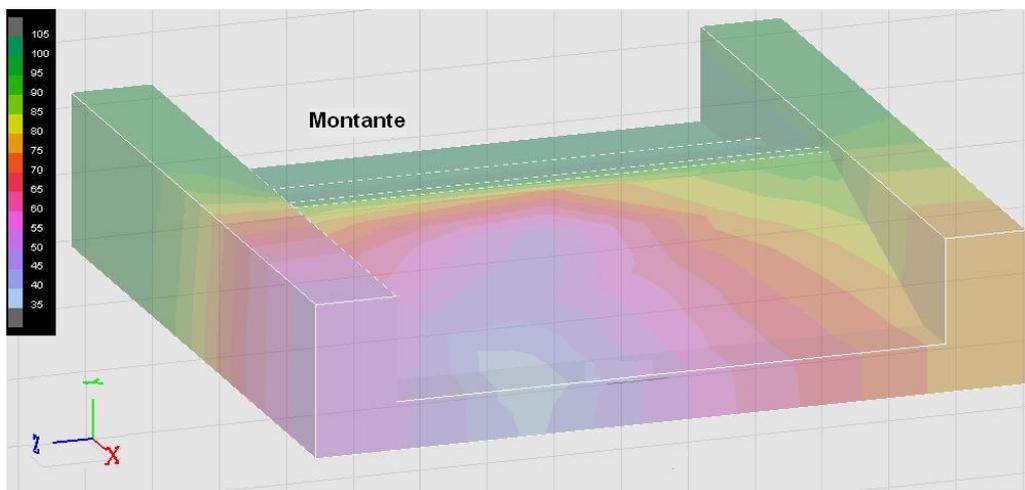


Figura 4.13 – Distribuição das cargas hidráulicas totais no final do enchimento do reservatório na condição de fluxo permanente

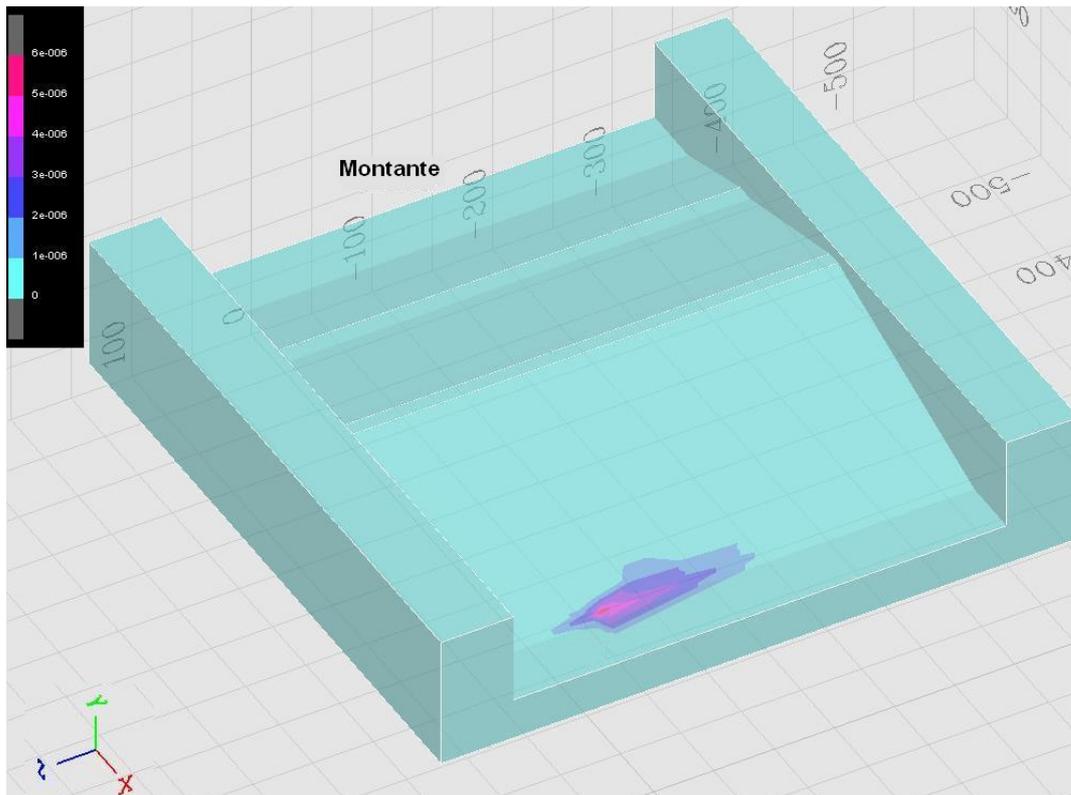


Figura 4.14 – Distribuição das velocidades no pé da barragem Macusani no final do enchimento do reservatório na condição de fluxo permanente

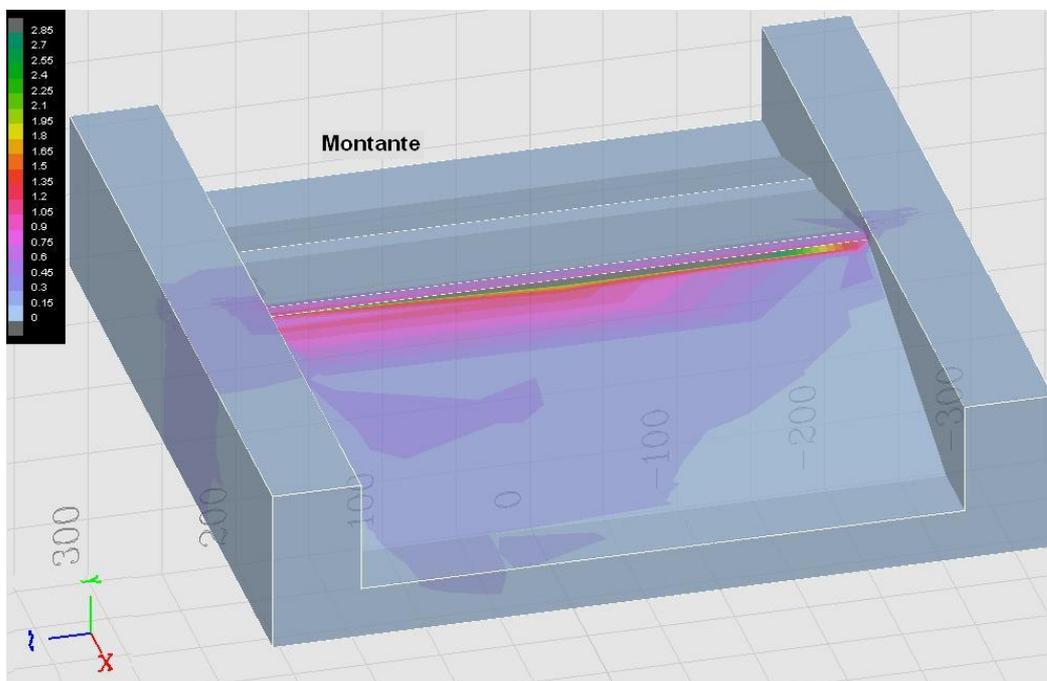


Figura 4.15 – Distribuição dos gradientes hidráulicos no final do enchimento do reservatório na condição de fluxo permanente

### 4.3.2. Rebaixamento rápido do reservatório

Com a barragem operando em condições de fluxo permanente 3D, simulou-se em seguida a situação de rebaixamento rápido do nível do reservatório. Para tanto, foi considerada a função linear da tabela 4.3 para descrição da variação da condição de contorno à montante, relacionada com o decréscimo do nível do reservatório no tempo. A análise no tempo foi executada considerando-se um número máximo de iterações por intervalo de tempo igual a 500, com tolerância de 0,001 na solução do problema de fluxo não-linear. O intervalo de tempo é ajustado automaticamente pelo programa.

A figura 4.16 mostra a posição da linha freática quando foi executado o rebaixamento do nível freático à montante, como indica a tabela 4.3. Note que dentro do corpo da barragem ainda não se atingiu o fluxo no estado permanente.

Para a seção transversal 3 (figura 4.3) a distribuição das cargas totais na altitude 4236m (correspondente ao pé do talude de jusante) no instante do rebaixamento do nível do lençol freático à montante, bem como na condição de fluxo permanente da barragem, estão indicadas na figura 4.17.

Tabela 4.3 – Função empregada para o rebaixamento rápido do reservatório da barragem Macusani

Tempo (dias)	Carga total H (m)	Altitude (m)
0	100	4300
1	44	4244

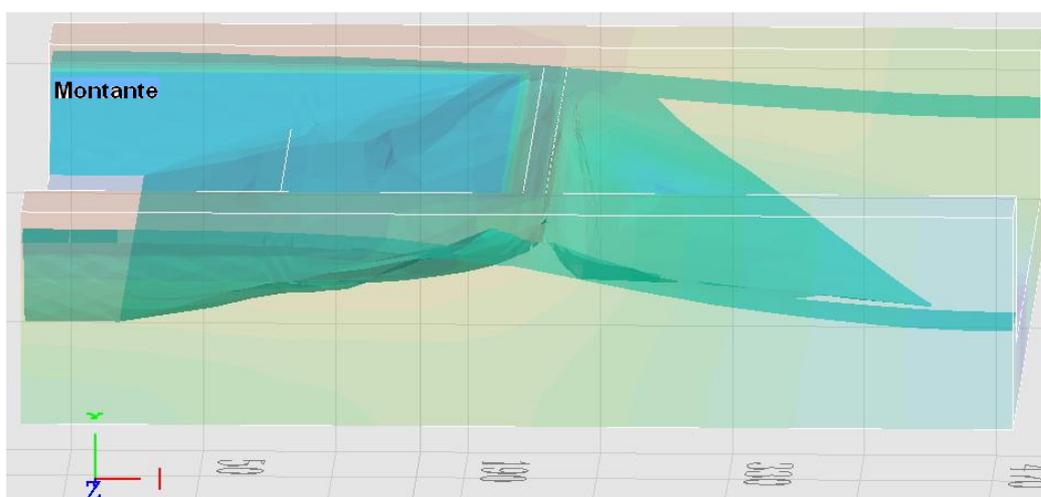


Figura 4.16 – Esquematização da linha freática para o rebaixamento rápido do lençol freático (t=dia)

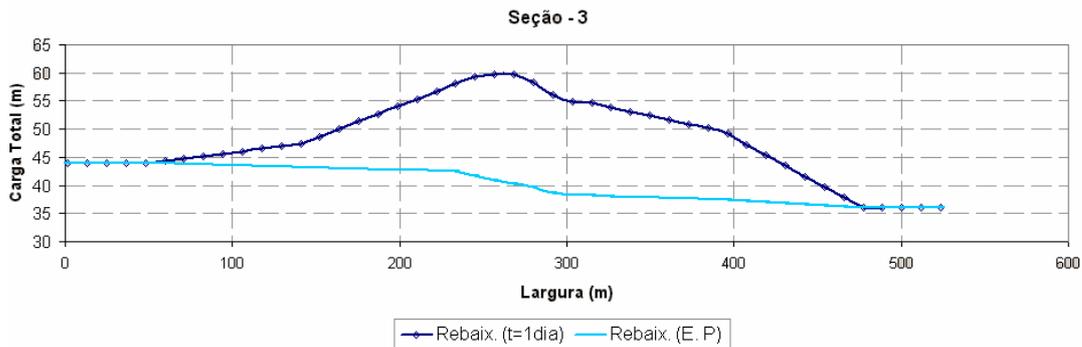


Figura 4.17 – Distribuição das cargas totais na altitude 4236m (correspondente ao pé do talude de jusante) para o rebaixamento à montante da barragem e na condição de fluxo permanente dentro do corpo da barragem

#### 4.4. Análise do fluxo na condição 2D

Nesta seção são apresentados os resultados numéricos das análises de fluxo bidimensionais obtidas com o módulo Seep/W do pacote de programa de elementos finitos GeoStudio v6.02.

As análises se referem à seção 3, aqui considerada como seção transversal típica para o problema de fluxo plano 2D. A figura 4.18 mostra a geometria da barragem e fundação (espessura de 36m e comprimento de 525m) bem como a malha de elementos finitos, composta por 2277 elementos, dos quais 2202 são elementos quadrilaterais bilineares (4 nós) e 75 triangulares de velocidade constante (3 nós). A posição inicial do lençol freático se localiza na altitude 4240m, à montante, e 4236m, à jusante, conforme figura 4.19.

##### 4.4.1. Primeiro enchimento do reservatório

Na análise 2D, o mesmo procedimento de enchimento do reservatório por etapas empregado na análise 3D foi utilizado, considerando-se o reservatório atinge sua cota máxima em um mês, de acordo com as etapas da tabela 4.2

O tempo total de análise do problema de fluxo foi discretizado em 46 intervalos de tempo de 5 dias cada, com número máximo de 500 iterações por intervalo e tolerância de 0.1 para convergência da solução numérica não-linear. Condição de fluxo permanente foi atingida ao final do último intervalo de tempo (230 dias).

A figura 4.20 mostra a evolução no tempo da posição da linha freática no final de cada uma das 6 etapas de enchimento do reservatório e sua posição final em regime de fluxo permanente.

A figura 4.21 ilustra a variação no tempo da carga hidráulica total dos pontos localizados na altitude 4236m (correspondente ao pé do talude de jusante).

Sob regime de fluxo permanente, as distribuições das cargas hidráulicas totais, das cargas de pressão, das velocidades e dos gradientes hidráulicos estão sumarizadas nas figuras 4.22 a 4.25, respectivamente.

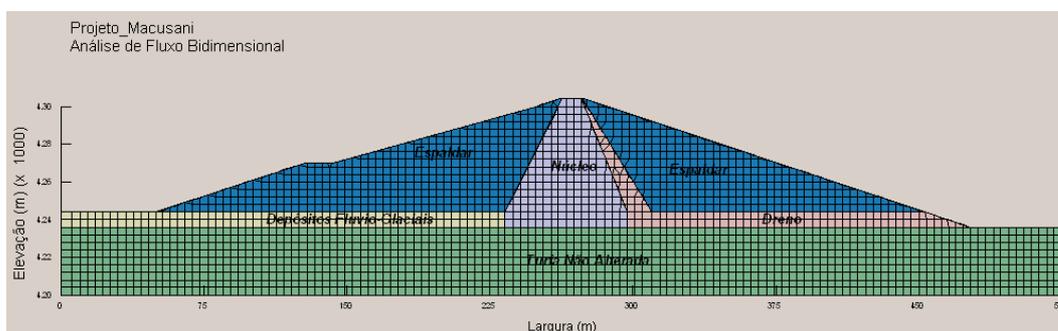


Figura 4.18. – Geometria, materiais e malha de elementos finitos da seção 3 da barragem Macusani

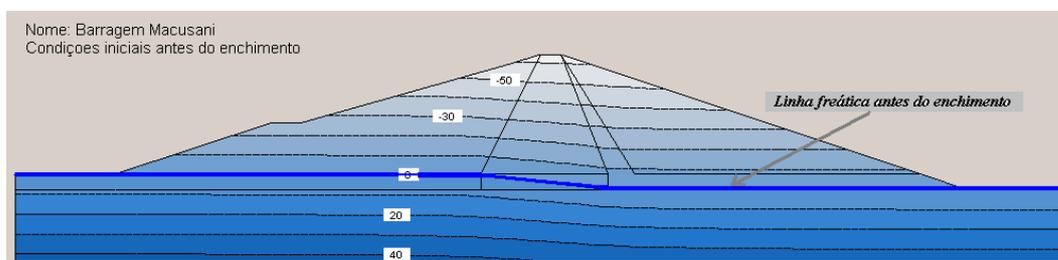


Figura 4.19 – Posição inicial da linha freática e linhas de iguais cargas de pressão

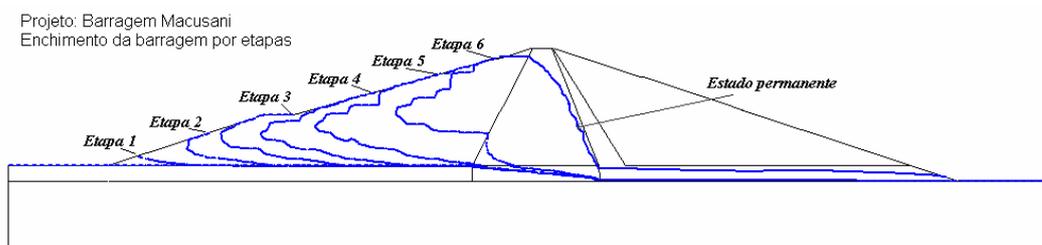


Figura 4.20 – Posição da linha freática na seção 3 durante as etapas de primeiro enchimento do reservatório e em condição de fluxo permanente

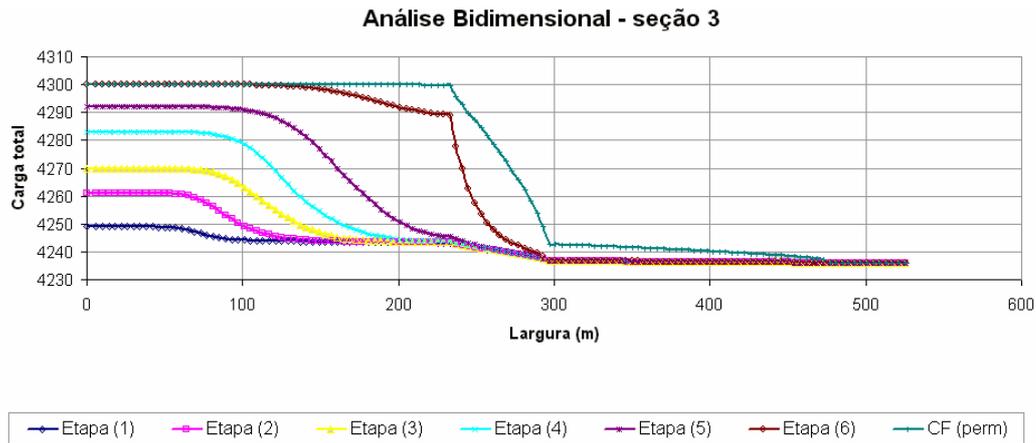


Figura 4.21 – Variação da carga hidráulica total na altitude 4236m, correspondente ao pé do talude de jusante, nas seis etapas de enchimento e na condição de fluxo permanente

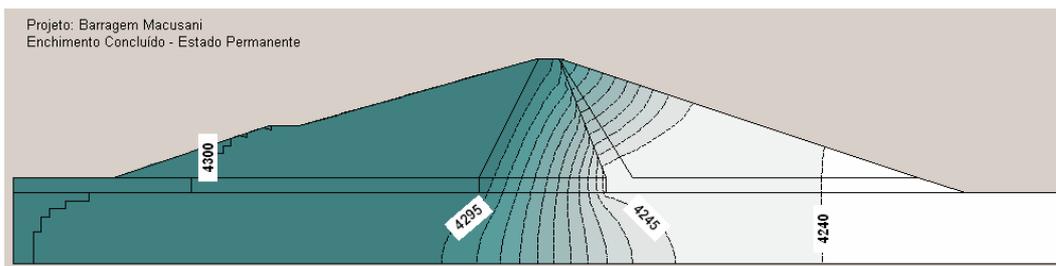


Figura 4.22 – Distribuição das cargas hidráulicas totais obtidas na análise 2D da seção 3 sob regime de fluxo permanente

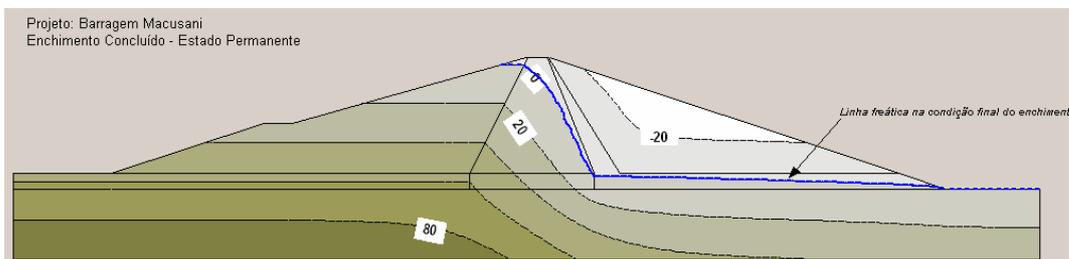


Figura 4.23 – Distribuição das cargas de pressão obtidas na análise 2D da seção 3 sob regime de fluxo permanente

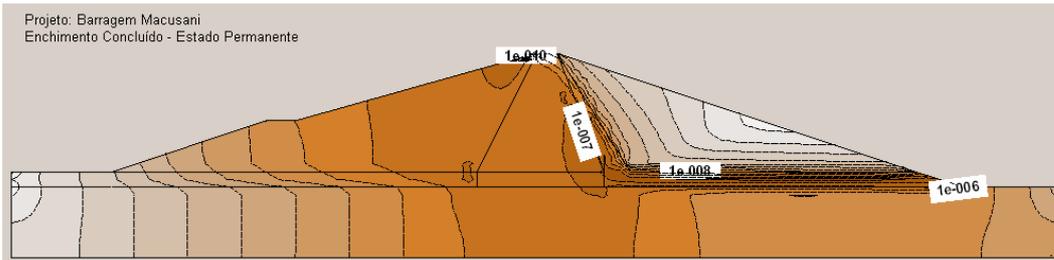


Figura 4.24 – Distribuição das velocidades de fluxo obtidas na análise 2D da seção 3 sob regime de fluxo permanente

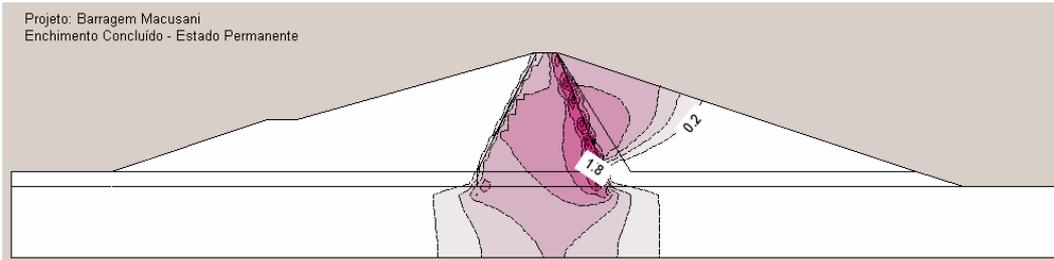


Figura 4.25 – Distribuição dos gradientes hidráulicos obtidos na análise 2D da seção 3 sob regime de fluxo permanente

#### 4.4.2. Rebaixamento rápido

Com a barragem operando em condições de fluxo permanente 2D, novamente simulou-se uma situação de rebaixamento rápido do nível do reservatório, considerando a mesma função de rebaixamento da tabela 4.3. A figura 4.26 mostra a posição da linha freática, para o rebaixamento rápido,  $t=1$  dia, bem como a linha freática antes do rebaixamento, enquanto que a figura 4.27 ilustra a distribuição das cargas hidráulicas para o rebaixamento rápido do lençol freático à montante para o tempo,  $t=1$  dia e quando a linha freática atingiu o estado permanente, na altitude 4236m (pé do talude de jusante).

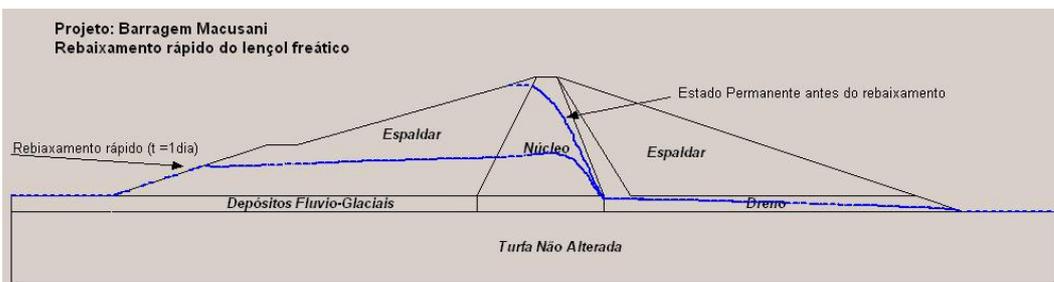


Figura 4.26 – Posição da linha freática antes do rebaixamento do lençol freático e depois de aplicado o rebaixamento ( $t=1$  dia)

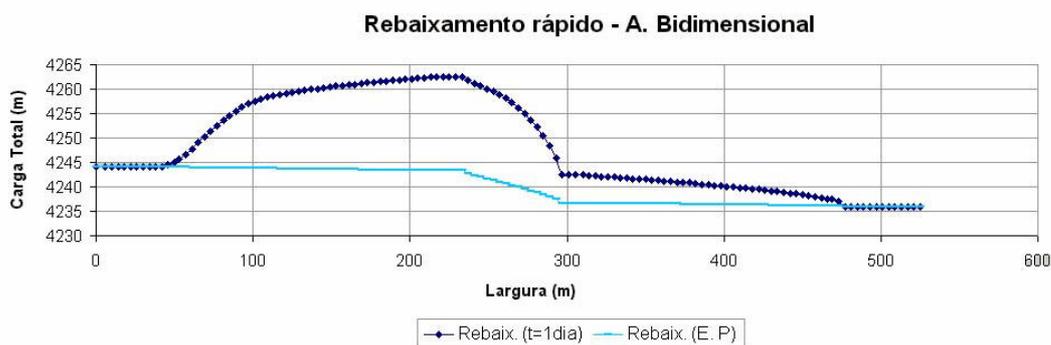


Figura 4.27 – Variação da carga hidráulica total na altitude 4236m, correspondente ao pé do talude de jusante, no caso de rebaixamento rápido do reservatório, para o tempo  $t=1$  dia e no estado permanente

#### 4.5. Comparação de resultados

A figura 4.28 mostra as posições das linhas freáticas nas seções 1, 2, 3 e 4 da barragem Macusani (figura 4.3), na condição de fluxo permanente após o primeiro enchimento do reservatório, determinadas com as análises de fluxo 3D. Para efeitos comparativos, também é mostrada nesta figura e na figura 4.29 a posição da linha freática da seção 3 obtida pela análise 2D.

Conforme pode ser notado, na seção 3 há uma significativa diferença entre as linhas freáticas determinadas nas análises bi e tridimensionais, com ocorrência de fluxo, na simulação 3D, acima do dreno horizontal da barragem. O fluxo 3D proveniente das ombreiras laterais eleva a posição da superfície freática na região de jusante, fenômeno que não pode ser capturada na modelagem do problema considerando apenas fluxo 2D.

Com o objetivo de verificar a influência do coeficiente de permeabilidade do dreno na posição da superfície freática, este foi majorado para o valor  $k_{\text{dreno}} = 4 \times 10^{-4}$  m/s, sendo as análises de fluxo tridimensionais então repetidas.

A figura 4.30 mostra as respectivas posições das linhas freáticas nas seções 1, 2, 3 e 4, e as diferenças observadas na seção 3 em relação à análise 2D estão comparadas na figura 4.31. Como pode ser observado, a linha freática nesta nova análise 3D com coeficiente de permeabilidade do dreno  $k_{\text{dreno}} = 4 \times 10^{-4}$  m/s está contida no interior do dreno horizontal na região de jusante da barragem.

As vazões totais  $Q$  calculadas nas diferentes análises estão mostradas na tabela 4.4, considerando-se um comprimento médio da barragem de 245m para cálculo da vazão  $q$  por unidade de comprimento. Conforme pode ser observado, a vazão média por unidade de comprimento estimada na análise 3D é 5,8% superior àquela calculada na simulação numérica 2D admitindo-se o mesmo valor para o coeficiente de permeabilidade do dreno horizontal ( $k_{\text{dreno}} = 4 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ). Com a mudança deste para  $k_{\text{dreno}} = 4 \times 10^{-4} \text{m/s}$  na análise 3D, esta diferença cresce então para 14,93%.

**Linhas freáticas nas diferentes seções em 3D**

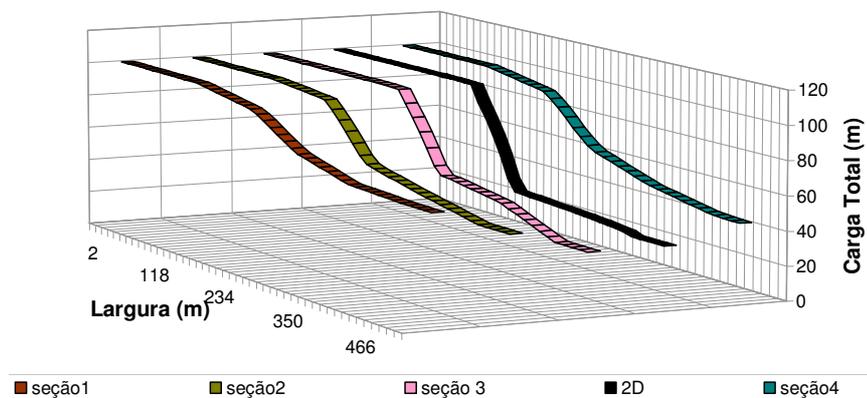


Figura 4.28 – Posições das linhas freáticas nas seções 1, 2, 3 e 4 (análise 3D) e na seção 3 (análise 2D) considerando coeficiente de permeabilidade do dreno horizontal  $k_{\text{dreno}} = 4 \times 10^{-5} \text{m/s}$

**Seção 3 (2D e 3D)**

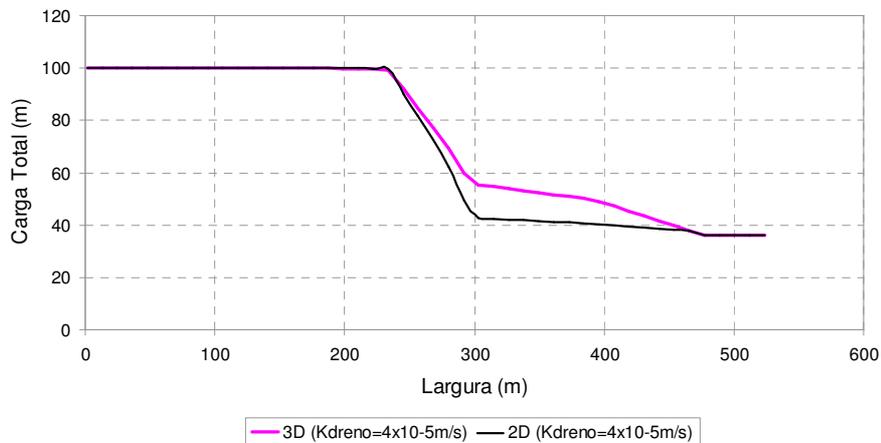


Figura 4.29 – Posição das linhas freáticas na seção 3 determinadas pelas análises 2D e 3D, considerando coeficiente de permeabilidade do dreno horizontal  $k_{\text{dreno}} = 4 \times 10^{-5} \text{m/s}$

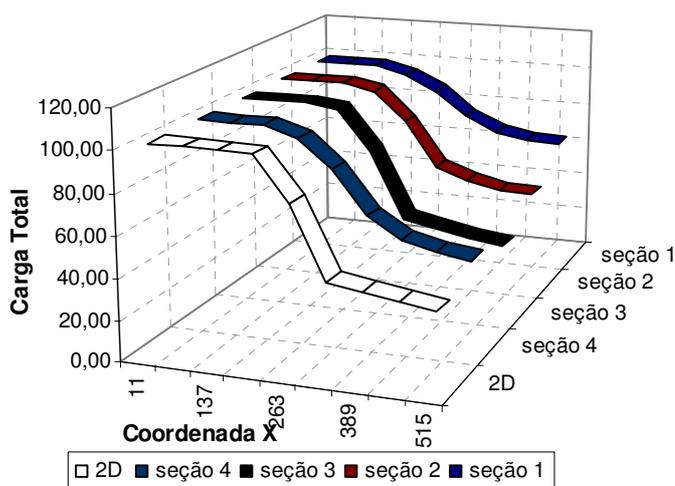


Figura 4.30 – Posições das linhas freáticas nas seções 1, 2, 3, 4 obtidas nas análises 3D ( $k_{\text{dreno}} = 4 \times 10^{-4}$  m/s) e na análise 2D ( $k_{\text{dreno}} = 4 \times 10^{-5}$  m/s)

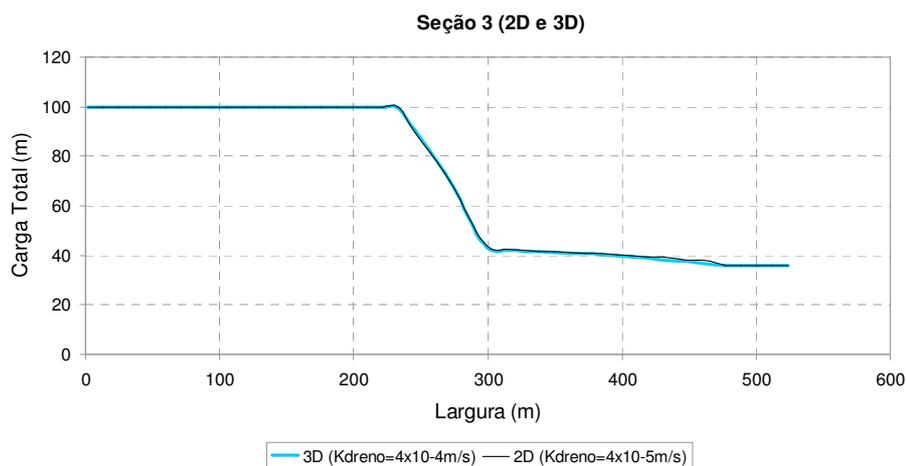


Figura 4.31 – Comparação das posições das linhas freáticas na seção 3, obtidas em análises 2D ( $k_{\text{dreno}} = 4 \times 10^{-5}$  m/s) e 3D ( $k_{\text{dreno}} = 4 \times 10^{-4}$  m/s)

Tabela 4.4 – Vazão total e por metro de comprimento de barragem calculadas nas análises 2D e 3D

Tipo de análise	Vazão total $Q$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Vazão por metro $q$ ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ )
3D ( $k_{\text{dreno}} = 4 \times 10^{-5}$ m/s)	$1,89 \times 10^{-3}$	$7,71 \times 10^{-6}$
2D ( $k_{\text{dreno}} = 4 \times 10^{-5}$ m/s)	—	$7,10 \times 10^{-6}$
3D ( $k_{\text{dreno}} = 4 \times 10^{-4}$ m/s)	$2,0 \times 10^{-3}$	$8,16 \times 10^{-6}$