



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 10, nº 1 (2024)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n1ID34833>



Modelagem computacional do fluxo de percolação em barragem de terra: um comparativo entre modelo 2D e 3D

Computational modeling of percolation flow in an earthen dam: a comparison of 2d and 3d flow models

Maísa de Calda Lopes¹; Luiz Gustavo Menezes Morgado²; Gustavo Hugo Pereira Vidal³; Luiz Alberto Ribeiro Mendonça⁴; Marco Aurélio Holanda de Casto⁵

¹ Universidade Federal do Ceará, Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza-CE, Brasil. E-mail: maisa.lobes@alu.ufc.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4950-828X>

² Universidade Federal do Ceará, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza-CE, Brasil. E-mail: luizmorgado@alu.ufc.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0393-1876>

³ Universidade Federal do Ceará, Curso de Engenharia Civil, Juazeiro do Norte-CE, Brasil. E-mail: Gustavo.hugo@aluno.ufca.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8055-1332>

⁴ Universidade Federal do Ceará, Curso de Engenharia Civil, Juazeiro do Norte-CE, Brasil. E-mail: luiz.alberto@ufca.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8166-3337>

⁵ Universidade Federal do Ceará, Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza-CE, Brasil. E-mail: marco@ufc.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5134-7213>

Resumo: Neste trabalho foram analisadas simulações de fluxos no maciço e na fundação da barragem Olho d'Água (construída no semiárido brasileiro e monitorada pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará - COGERH), utilizando o modelo de fluxo 2D estacionário, a partir do aplicativo SEEP/W (com soluções obtidas através do método dos elementos finitos) e o modelo de fluxo 3D transiente, a partir do aplicativo MODFLOW (com soluções obtidas através do método das diferenças finitas). Os resultados mostraram que a modelagem 3D transiente fornece resultados mais precisos, podendo ser uma ferramenta a ser utilizada no entendimento da dinâmica do fluxo percolado em barragens de terra. Soma-se ainda, a possibilidade de implementação do aplicativo MODFLOW como instrumento de monitoramento e análise de fluxo de percolação em barragens de terra, oferecendo *insights* críticos que podem prevenir falhas e otimizar a gestão de recursos hídricos. Estes avanços são essenciais para o dimensionamento, monitoramento e gestão de barragens, especialmente no contexto desafiador do Nordeste brasileiro, onde as barragens de terra são prevalentes.

Palavras-chave: Fluxo de percolação; Modelagem computacional; Barragem de terra.

Abstract: In this study, simulations of flows in the massif and foundation of the Olho d'Água dam (built in the Brazilian semi-arid region and monitored by the Water Resources Management Company of the State of Ceará - COGERH) were analyzed. The analysis utilized a 2D stationary flow model, employing the SEEP/W application (with solutions obtained through the finite element method), and a 3D transient flow model, using the MODFLOW application (with solutions obtained through the finite difference method). The results indicated that the 3D transient modeling provides more accurate outcomes and could be a valuable tool in understanding the dynamics of seepage flow in earth dams. Additionally, there is potential for implementing the MODFLOW application as a tool for monitoring and analyzing seepage flow in earth dams, offering critical insights that could prevent failures and optimize water resource management. These advancements are crucial for the design, monitoring, and management of dams, especially in the challenging context of Northeast Brazil, where earth dams are prevalent.

Keywords: Percolation flow; Earthen dam; Computational modeling.

Recebido: 12/12/2023; Aceito: 06/12/2024; Publicado: 04/03/2024.

1. Introdução

A preocupação com problemas relacionados à estabilidade hidráulica de barragens de terra, tem levado muitos pesquisadores a aplicar modelos de fluxos em meios porosos, bem como a formular modelos numéricos que solucionam equações diferenciais que descrevem o fluxo de percolação hídrica em meios porosos.

O fluxo hídrico transiente através do maciço e da fundação de barragens de terra, submetido a um gradiente hidráulico natural, é descrito pelas equações diferenciais parciais que regem a percolação da água em aquíferos livres ou confinados em um domínio tridimensional constituído de material heterogêneo e anisotrópico. Porém, o dimensionamento e as análises necessárias para elaboração de um projeto executivo de barragens é realizado utilizando o domínio 2D que, Segundo Freeze e Cherry (1979), é realizado através de redes de fluxo, considerando uma seção transversal 2D constituída de material homogêneo e isotrópico, selecionada dentro do domínio tridimensional (3D). Contudo, estudos recentes mostraram que essa metodologia pode resultar em problemas. Segundo Nazari (2018), as simplificações utilizadas na modelagem 2D de fluxo subterrâneo pode gerar soluções inadequadas. Bayat *et al.* (2019) defende que o comportamento hidráulico de percolação tanto na fundação, quanto no maciço não é possível ser previsto com os métodos convencional (análise 2D e estacionária).

Chen e Zhang (2006) e Pimenta *et al.* (2020) relataram que, comumente, as falhas no sistema de drenagem de barragens iniciam com surgências e erosões nas ombreiras. Essa situação não é observada nas simulações convencionais (Bayat *et al.* 2019), que por ser muito simplificadas geralmente subestimam o fluxo de percolação e o risco de falha nos limites das ombreiras. Contudo, pode ser analisada em uma modelagem 3D, pois segundo Lópes e Promotor (2016) nela pode-se incluir geometrias irregulares da estrutura, configuração topográfica do solo, condições de escoamento não saturado, além de condições de contorno mais realistas. Além disso, segundo Rocha *et al.* (2023), simulações 3D permitem uma compreensão mais precisa dos fenômenos hidráulicos, fornecendo informações valiosas para o projeto, análise e gestão de estruturas hidráulicas, trazendo menores riscos de realização de obras corretivas, ao longo da vida útil operacional da unidade.

Alguns pesquisadores, como Chen e Zhang (2006) e Kacimov *et al.* (2019), realizaram estudos comparativos entre a modelagem 2D e 3D referentes ao fluxo de percolação no maciço e na fundação de barragens. Mas, os estudos foram realizados com o regime estacionário considerando o equilíbrio hidrodinâmico sendo desprezados os efeitos do coeficiente de armazenamento específico e vazão específica.

Segundo Bayat *et al.*, 2019 fatores como disponibilidade de material, rapidez na construção e aspectos econômicos, a categoria de barragem de terra é preferida. A análise do fluxo de percolação deve ser ainda mais minuciosa em barragens de terra, pois o fluxo hídrico que atravessa o maciço e a fundação é utilizado para o dimensionamento dos sistemas de drenagem interna. Segundo Terzaghi e Peck (1962), é aconselhável em barragens de terra minimizar a percolação de água do reservatório através do maciço até seu eixo, evitando erosão regressiva através de dreno vertical de areia, em conjunto com um dreno horizontal ou tapete drenante composto de brita e areia, complementado por um dreno de pé, também de brita e areia.

A Política Nacional de Segurança de Barragens, estabelecida pela Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020, determina que a segurança de uma barragem deve ser considerada em todas as suas fases de existência: projeto, construção e operação (BRASIL, 2020). Na etapa do projeto, é destacado tanto o dimensionamento, quanto as simplificações adotadas. Na fase de construção, a ênfase recai sobre a conformidade com os critérios estabelecidos no projeto executivo; e na fase de operação, a atenção se concentra no monitoramento contínuo da estrutura.

No Nordeste brasileiro, conforme Moreira *et al.* (2019), a presença abundante de solos ideais para construção resultou na predominância de barragens de terra. Por apresentar um quadro de precipitação pluviométrica igual ou inferior a 800 mm anuais, é recorrente na região semiárida a existência de anos de seca, resultando em escassez de água para o consumo humano e animal e para as atividades produtivas em geral (ALVES, LIMA; 2020). Para contornar este problema houve um incentivo, por parte dos governantes, para a construção de inúmeras barragens (SANTOS *et al.*, 2014).

Este trabalho tem como objetivo a análise do fluxo de percolação uma barragem de terra, sendo utilizada como área de estudo a barragem Olho D'Água, situada no município de Várzea Alegre-CE. Para isso, foram usados modelo de fluxo 2D em regime estacionário, a partir do aplicativo SEEP/W, e modelo 3D transiente, através do aplicativo MODFLOW. O estudo visa investigar a hipótese de que a modelagem 3D transiente de fluxo de percolação em barragens de terra oferece resultados mais precisos e representativos em comparação com análises 2D estacionárias, considerando a natureza 3D e transitória da mecânica dos fluidos nestas estruturas. Ademais, busca estabelecer o aplicativo MODFLOW não apenas como uma ferramenta eficaz para a análise de fluxo de percolação em barragens, mas também como instrumento para o monitoramento contínuo de barragens de terra.

2. Área de estudo

A barragem Olho d'Água, localizada no semiárido nordestino (Figura 1) possui 24 m de altura, tem capacidade de armazenar 21 milhões de m³ e possui bacia hidráulica de 456 ha. Na Figura 2 tem-se uma visão geral do maciço da barragem.

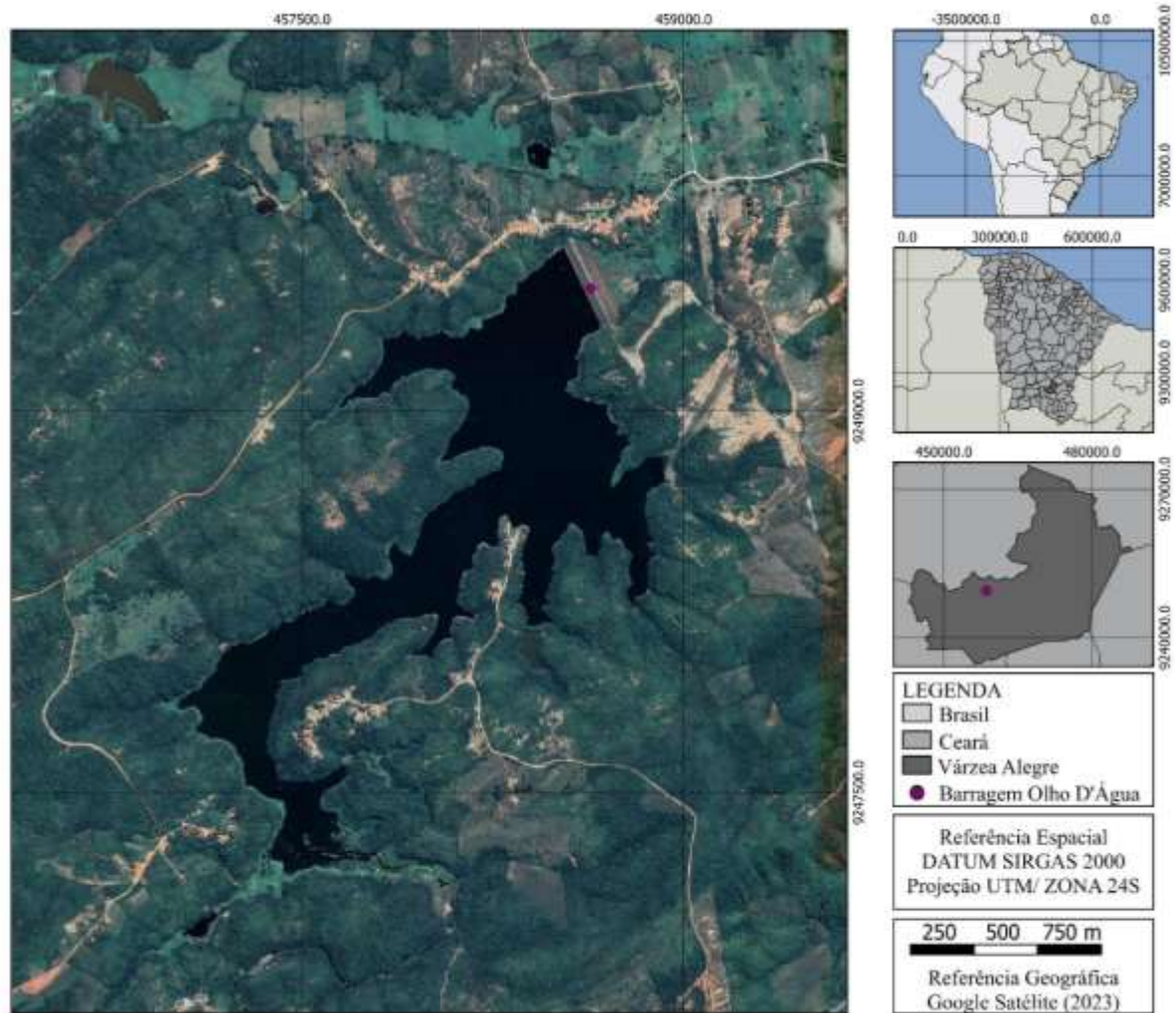


Figura 1 – Mapa de localização

Fonte: Autores (2023)



Figura 2 – Vista geral da barragem.

Fonte: <http://portal.cogerh.com.br>

O projeto executivo da barragem Olho d'Água foi elaborado pela empresa Aguasolos - Consultora de Engenharia Ltda (SRH, 1988a) e executado pelo 3º Batalhão de Engenharia de Construção do Exército, sendo inaugurada em 1998. Mas, durante a execução da obra ocorreram alterações não previstas no projeto executivo e não registradas em um projeto as built, mas descritas no Relatório Diagnóstico de Instrumentação (COGERH, 2021).

Conforme SRH (1988a), a barragem seria do tipo zonada com núcleo constituído por solos do tipo areia-silto-argilosa SC-SM (segundo classificação do SUCS) e abas por solos do tipo argila de baixa plasticidade CL, possuindo coroamento de 6 m, inclinações dos taludes de montante e jusante de respectivamente 1:3,0 (V:H) e 1:2,6, tapete impermeável de montante de 120 m, trincheira de vedação de largura de 46 m, banquetas de aterro compactado de 70 m e sistema de drenagem interno constituído de filtros horizontal e vertical (Figura 3a).

Contudo, com as alterações realizadas durante a fase de execução, a barragem passou a ser do tipo homogênea constituída de solos SC-SM, possuindo tapete impermeável de montante com 18 m, sem banquetas de aterro compactado a jusante e com sistema de drenagem interno reduzido (Figura 3b). Após à construção surgiram problemas associados à sobrepressão por artesianismo na fundação, levando à instalação de poços de alívio à jusante (Figura 3b).

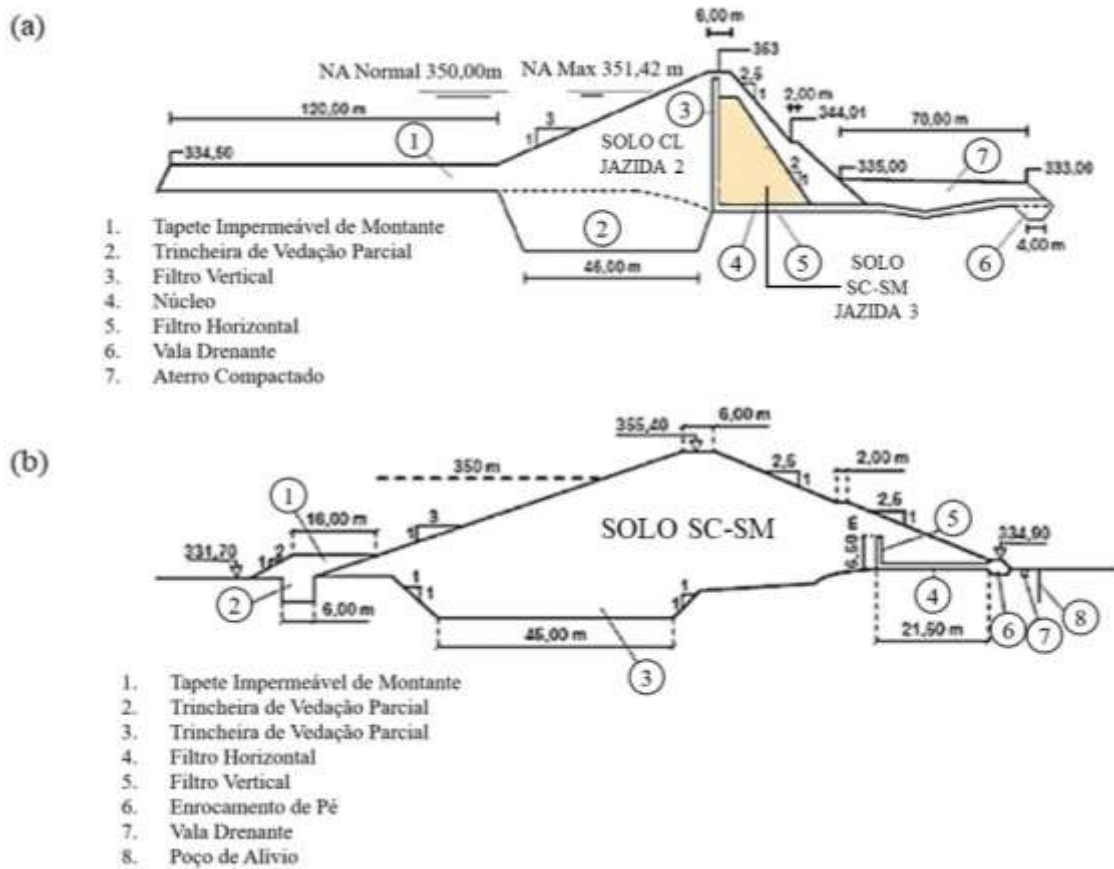


Figura 3 – Seção máxima do projeto executivo (a) e seção máxima executada (b)
 Fonte: Modificado de Dantas Neto e Carneiro (2013, apud Araújo, 2013)

3. Percolação de água no solo

O fluxo que percola o maciço e a fundação de barragens de terra é descrito pelas equações que regem a percolação da água em meio poroso, sendo que o aplicativo MODFLOW considera as células do domínio discretizado abaixo das células que contém a superfície freática (Figura 4a e Equação 1) como confinada (Figura 4b e Equação 2).

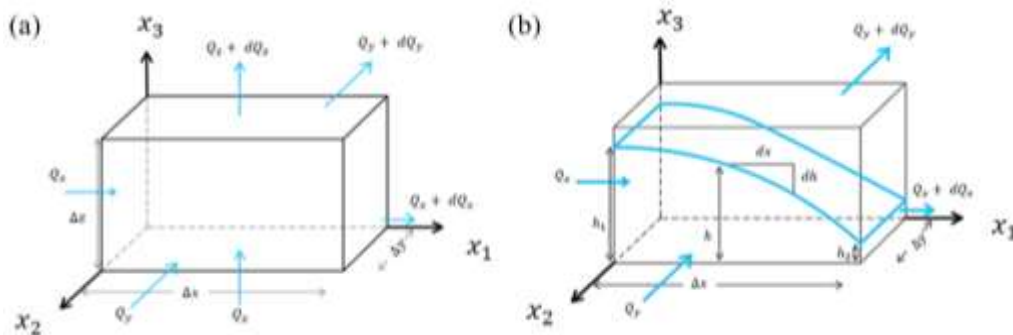


Figura 4 – Volume de controle prismático para aquífero confinado (a) e livre (b)
 Fonte: Autores (2023)

$$[1] \quad \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ii} \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) \pm q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

$$[2] \quad \sum_{i=1}^2 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(h k_{ii} \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) \pm q = S_y \frac{\partial h}{\partial t}$$

Em que:

k_{ii} : componente principal do tensor condutividade hidráulica [LT-1];

h : carga hidráulica [L];

q_s : fluxo externo por unidade de volume representando fonte ou sumidouro [T-1];

SS: coeficiente de armazenamento específico do material poroso [L-1];

q : fluxo externo por unidade de área da seção transversal representando fonte ou sumidouro [LT-1];

Sy: produção específica [-].

Considerando a situação de confinamento, o domínio 3D está confinado no topo e na base por materiais relativamente impermeáveis e a variação do volume hídrico é dada pelo coeficiente de armazenamento específico (SS), que é definido a partir das compressibilidades do meio poroso e da água. Já a superfície freática contida no domínio 3D está submetida a pressão atmosférica e o fluxo ocorre sob ação da gravidade, com variação do volume hídrico dada pela produção específica (Sy) (Freeze e Cherry, 1979). Na dedução da Equação 2, aplicou-se a simplificação de Dupuit-Forchheimer, que admite o fluxo predominantemente horizontal, com descarga específica Q apenas nas direções x1 e x2.

No fluxo 2D estacionário as Equações 1 e 2 são simplificadas, os termos que não estão alinhados com a coordenada que contém a seção transversal que define o domínio, bem como o segundo membro que representa a variação temporal da carga hidráulica, são desconsiderados.

As soluções das Equações 1 e 2, bem como de suas simplificações, são obtidas através de métodos numéricos. Comumente são utilizados o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método das Diferenças Finitas (MDF).

O MEF fornece uma solução numérica para um problema de valor de contorno inicial (PASHAH, 2023). A ideia básica é discretizar a região de solução contínua em um grupo de elementos finitos conectados entre si de uma determinada maneira (XU *et al.* 2022), onde segundo Xu e Huo (2020), sua solução é baseada no princípio variacional e no método dos resíduos ponderados. O MDF é uma técnica de discretização de domínio que converte o problema governante em uma equação de diferenças. Os valores funcionais são aproximados nos nós da rede. A vantagem da abordagem numérica deste estudo é que são necessárias iterações mínimas para obter a precisão ideal em cada nível de tempo (HUSSAIN, ALI; 2023).

A decisão sobre qual método aplicar depende do usuário, considerando sua facilidade de uso e o programa em que será implementado. O SEEP/W (GEO-SLOPE, 2001), por exemplo, é um programa gráfico, pertencente ao GEO-SLOPE International Ltd., que opera no Microsoft Windows. A modelagem é realizada utilizando o MEF para fluxo em meios porosos, em estado estacionário e transiente, de solos saturados e insaturados. Já o MODFLOW (MCDONALD, HARBAUGH; 1988) (modular three dimensional finite difference groundwater flow model) é um dos programas mais conhecidos utilizados na simulação 3D de fluxos subterrâneos e transporte de contaminantes, utilizando o MDF.

4. Metodologia

As simulações de fluxo 2D estacionário foram feitas no aplicativo SEEP/W, versão 2018, enquanto as simulações de fluxo 3D transiente foram conduzidas no Visual MODFLOW, versão 2011.1. Em ambos os programas, as Equações 1 e 2 são devidamente aplicadas a cada célula da malha do domínio discretizado. O fluxo interno é determinado pela Lei de Darcy, e o externo, por condições de contorno que determinam funções que formulam termos que representam fonte e/ou sumidouro.

4.1 Informações utilizadas na construção do modelo hidrogeológico conceitual 3D e transiente

No aplicativo *MODFLOW*, o domínio do modelo foi definido como um prisma quadrangular de 210 m x 228 m x 52 m discretizado numa malha de diferenças finitas de 228 linhas, 214 colunas e 59 camadas, no qual foram inseridos os diferentes tipos de materiais, as propriedades hidrogeológicas do meio poroso (k , S_s e S_y), a instrumentação (piezômetros, PZ, e medidores de nível, NA) e as condições iniciais e de contorno, como descreve a seguir.

- **Perfil estratificado**

Os perfis estratigráficos do maciço e da fundação, bem como o detalhamento das sondagens, foram obtidos do projeto executivo (SRH, 1988c). A caracterização da fundação, feita a partir de estudos geotécnicos realizados por sondagens à pá e picareta, à percussão e mista, identificou uma aluvião espessa depositada sobre o embasamento cristalino decomposto, constituída por oito camadas de materiais distintos (Figura 4).

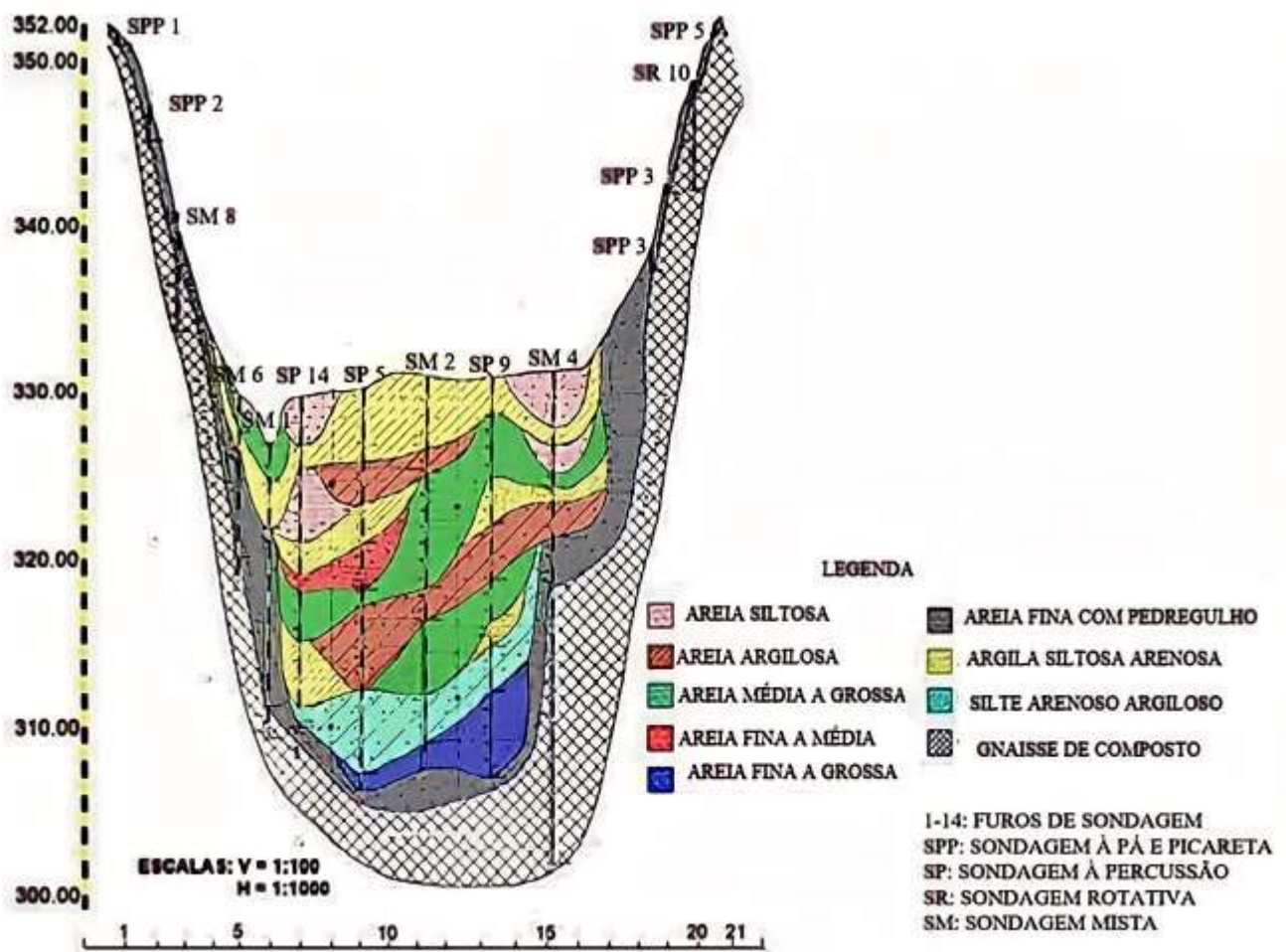


Figura 4 – Perfil estratificado da fundação obtido com base nos resultados das sondagens
 Fonte: Adaptado de SRH (1988b)

- **Superfície topográfica e de base**

Para obtenção da superfície topográfica foi realizado o ajuste das seções disponibilizadas no projeto executivo (SRH, 1988c) e a partir de georreferenciamento foram obtidas as coordenadas dos pontos que descrevem o maciço e o leito do rio à montante e à jusante. Posteriormente, a topografia foi obtida por *krigagem* de pontos topográficos com auxílio do aplicativo SURFER versão 23. Para a construção da superfície de base foi considerado o limite rochoso apresentado no perfil estratificado (Figura 4) e os pontos foram obtidos a partir de georreferenciamento e da *krigagem*.

- **Propriedades hidrogeológicas**

Com as informações de cada tipo de solo presentes na fundação (Figura 4) e do material utilizado para construção do maciço (Araújo, 2013), foram obtidos, na literatura, faixas de valores para as propriedades hidrogeológicas k (Chapuis e Aubertin (2003)), S_s (Germain *et al.* (2020)) e S_y (Johnson (1967)). A partir destas faixas foram obtidos valores de k para serem utilizados no início da análise de sensibilidade do modelo no regime estacionário e de S_s e S_y , no regime transiente (Tabela 1). As camadas que constituem o maciço homogêneo foram consideradas anisotrópicas ($k_{x_{33}} = 10^{-1} k$, com $k = k_{x_{11}} = k_{x_{22}}$) (Fell *et al.* 1992) e as demais isotrópicas ($k_{x_{11}} = k_{x_{22}} = k_{x_{33}}$).

Tabela 1 – Propriedades hidrogeológicas utilizadas no início da análise

Material	Localização	$k(m/s)$	$S_s (1/m)$	$S_y (-)$
areia-silto-argilosa	Maciço	10^{-4}	5×10^{-3}	$3,0 \times 10^{-2}$
areia siltosa	Fundação	10^{-3}	5×10^{-3}	$2,5 \times 10^{-1}$
areia argilosa	Fundação	10^{-4}	5×10^{-3}	$2,5 \times 10^{-1}$
areia média a grossa	Fundação	10^{-3}	5×10^{-3}	$2,5 \times 10^{-1}$
areia fina a média	Fundação	10^{-3}	5×10^{-3}	$2,5 \times 10^{-1}$
areia de fina a grossa	Fundação	10^{-3}	5×10^{-3}	$2,5 \times 10^{-1}$
areia fina com pedregulho	Fundação	10^{-3}	5×10^{-3}	$1,6 \times 10^{-1}$
argila silto arenosa	Fundação	10^{-6}	5×10^{-3}	$2,5 \times 10^{-1}$
silte areno argiloso	Fundação	10^{-7}	5×10^{-3}	$3,0 \times 10^{-2}$
brita	Rip-rap	10^{-3}	5×10^{-3}	$2,2 \times 10^{-1}$
brita	Enrocamento de pé	10^{-2}	5×10^{-3}	$2,2 \times 10^{-1}$

Fonte: Autores (2023)

- **Discretização do maciço e da fundação**

A Figura 5 mostra a discretização da seção transversal máxima (correspondente ao furo de sondagem SP-9 apresentado na Figura 3), além de três seções longitudinais, uma à montante (seção AA), outra no eixo do maciço (seção BB) e outra à jusante (seção CC).

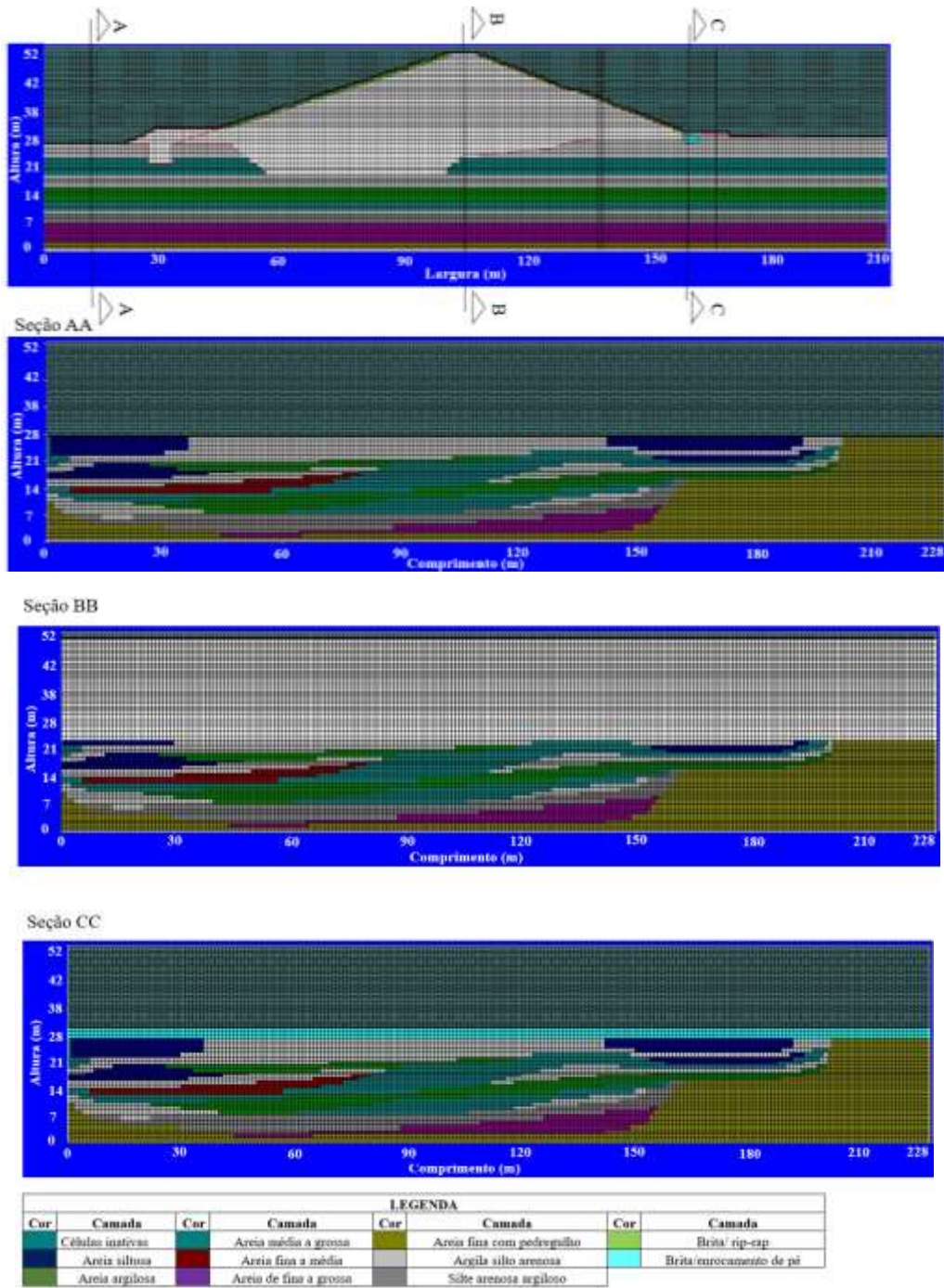


Figura 5 – Discretização da seção transversal máxima e de seções longitudinais
 Fonte: Autores (2023)

- **Carga hidráulica**

As cargas hidráulicas observadas utilizadas na calibração do modelo foram obtidas a partir das leituras dos instrumentos instalados no maciço (NA) e na fundação (PZ). Os instrumentos foram inseridos em três seções transversais: a seção instrumentada 01, que passa no furo de sondagem 09; a 02, no 02; e a 03, no 05 (Figura 6). Ao todo foram 21 instrumentos, sendo 8 NA e 13 PZ.

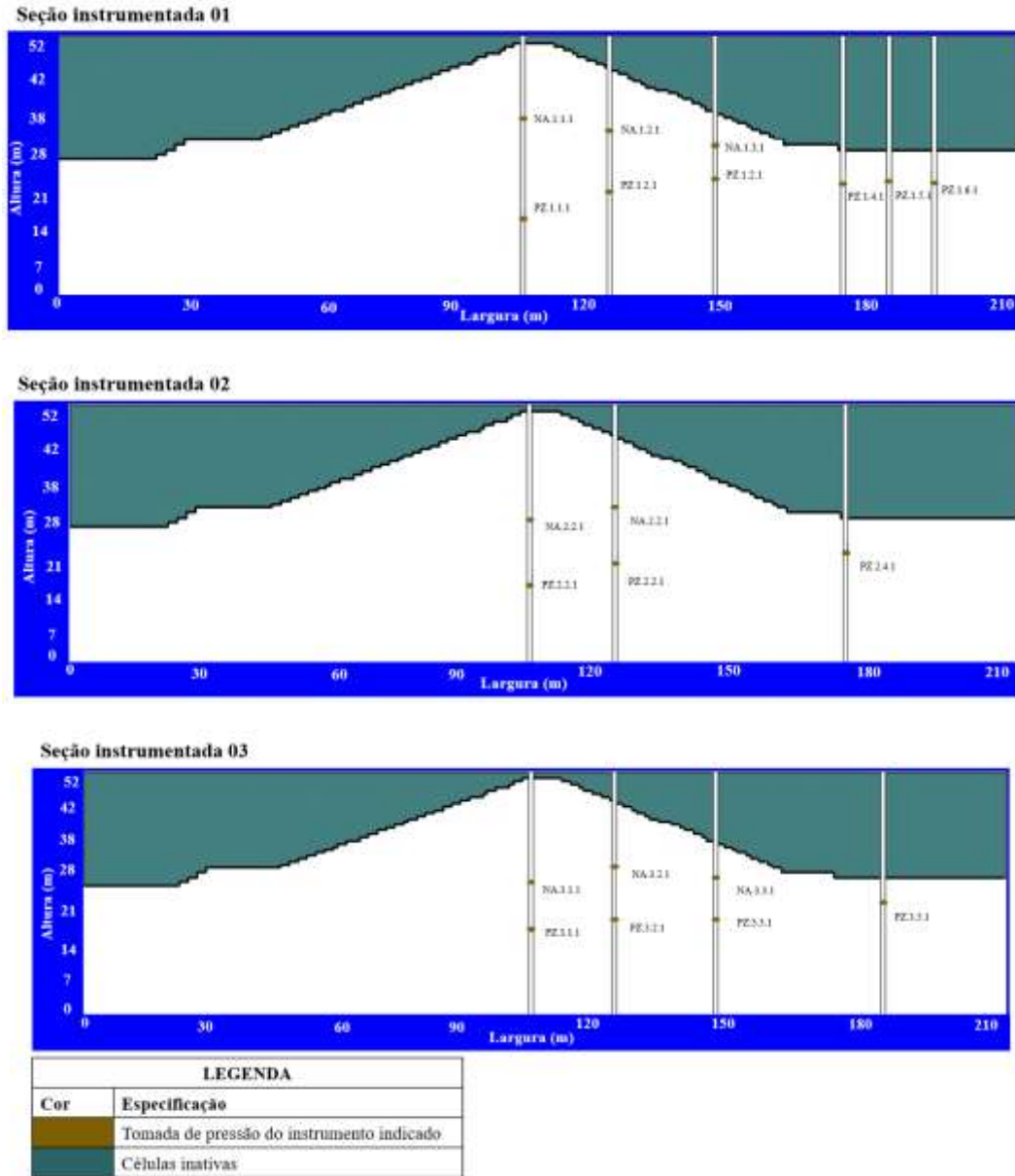


Figura 6 – Seções instrumentadas
 Fonte: Autores (2023)

- **Condições de contorno**

As condições de contorno atribuídas ao modelo hidrogeológico conceitual foram dos tipos:

- Dirichlet, definida por cargas hidráulicas constantes especificadas no contorno, à montante e a jusante do maciço, representando, respectivamente, as águas armazenadas no reservatório em diferentes níveis e as surgências de pé;
- Neumann, definida por regiões de não-fluxo (células inativas) que representam os contornos impermeáveis que delimitam o domínio do modelo;
- Cauchy, definida por drenos que representam o sistema de drenagem interno e os poços de alívio instalados à jusante do maciço.

A Figura 7 mostra a representatividade das condições de contorno na seção transversal máxima, com destaque para o sistema de drenagem interno e poço de alívio.

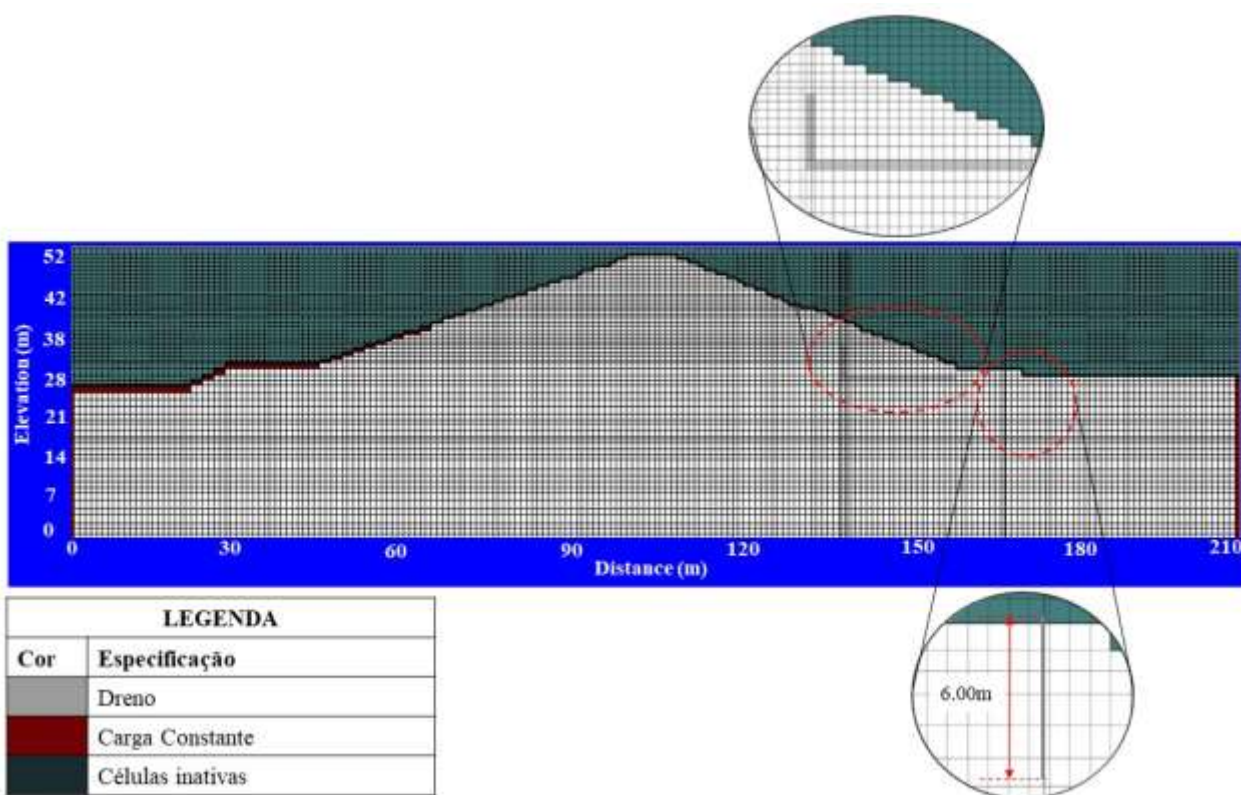


Figura 7 – Representatividade das condições de contorno

Fonte: Autores (2023)

A equação que determina o fluxo extraído pelos drenos em cada célula que os contém é definida como função da condutância e da diferença entre as cotas especificadas no dreno e as cargas hidráulicas calculadas pelo modelo. Como não há uma formulação para obtenção da condutância, ela foi ajustada na calibração do modelo, com valor inicial fornecido de respectivamente 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 m²/dia, para os filtros horizontal, vertical e os poços de alívio.

4.2 Informações utilizadas na construção do modelo hidrogeológico conceitual 2D e estacionário

No aplicativo SEEP/W, o domínio do modelo foi definido considerando a seção máxima do maciço (Figura 3b) e as quatro camadas superficiais da fundação identificadas na sondagem SP-9 (Figura 4). O domínio foi discretizado numa malha de elementos finitos constituída por quadriláteros e triângulos de tamanho global de 2,0 m na região do maciço e da fundação, refinada para 0,5 m nas regiões dos filtros, do enrocamento de pé e do poço de alívio.

A Figura 8a mostra o domínio discretizado, os materiais constituintes, as condições de contorno carga constante localizadas a montante e a jusante e a localização dos instrumentos utilizados na obtenção das cargas hidráulicas calculadas. Já a Figura 8b mostra a malha de elementos finitos utilizada nas análises.

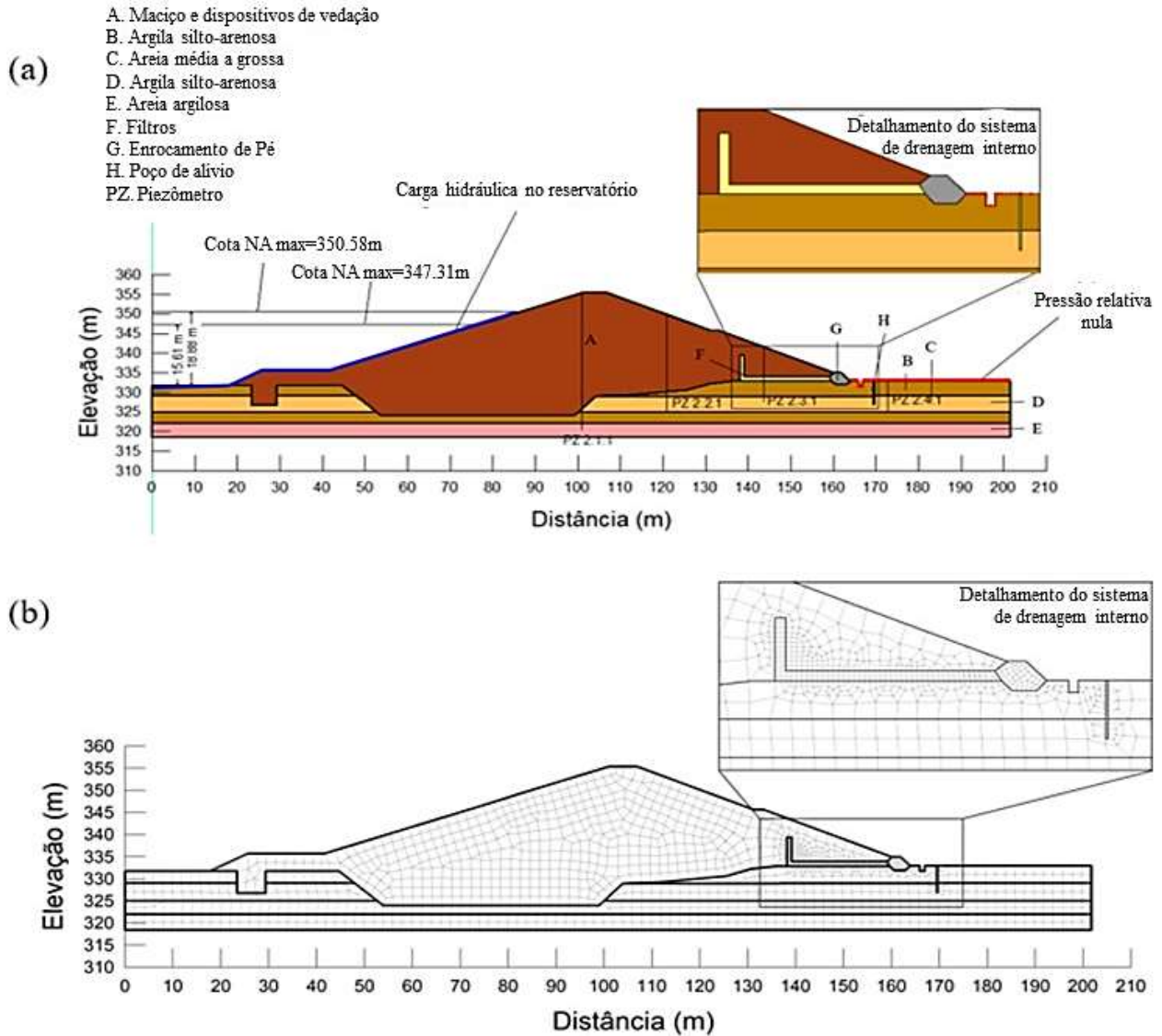


Figura 8 – Domínio do modelo 2D (a) e malha de elementos finitos (b)
Fonte: Autores (2023)

Para cada material presente no maciço e na fundação foi atribuída a propriedade hidrogeológica k . Os valores iniciais utilizados no início da análise de sensibilidade e calibração do modelo foram os mesmos apresentados na Tabela 1. Como neste modelo não foi utilizada a condição de contorno dreno, admitiu-se o sistema de drenagem interno e o poço de alívio constituídos de areia com k de 10-2 m/s. Neste modelo o material constituinte do maciço também foi considerado homogêneo e anisotrópico e os demais homogêneos e isotrópicos, assim como no 3D.

4.3 Análise de sensibilidade, calibração e validação dos modelos

A análise de sensibilidade e a calibração do modelo de fluxo 3D transiente foram feitas em duas etapas, a primeira considerando o modelo de fluxo estacionário e a segunda, transiente.

Na primeira etapa foi avaliada a propriedade hidrogeológica k dos materiais constituintes do maciço e da fundação, variando os valores individualmente, considerando a carga hidráulica no reservatório de 14,31 m (registrada no dia 9 de janeiro de 2013). Paralelamente, foi feita a calibração do modelo de fluxo estacionário, minimizando o R e o RMS das cargas hidráulicas no maciço e na fundação, ajustando os valores de k dentro das faixas especificadas por Chapuis e Aubertin (2003) e/ou próximos dos obtidos em ensaios apresentados no projeto executivo. Por fim, foi obtida a superfície freática que foi considerada como condição inicial para a segunda etapa da análise de sensibilidade e calibração na condição transiente.

Na análise de sensibilidade e calibração do modelo 3D transiente os erros R e RMS das cargas hidráulicas no maciço e na fundação foram calculados tomando como referência as leituras dos instrumentos no início e no final do período de 9 de janeiro a 13 de fevereiro de 2013, considerando as respectivas cargas hidráulicas no reservatório de 14,31 m e 13,94 m. A minimização dos erros resultou na calibração do modelo, com ajuste das propriedades hidrogeológicas SS e Sy , além da condutância dos drenos. As variações dos valores de SS e Sy foram feitas dentro das faixas especificadas por Germain *et al.* (2020) e Johnson (1967), respectivamente.

A validação do modelo de fluxo 3D transiente foi feita para o período de 9 de janeiro a 20 de dezembro de 2013, dividida em sete sequência de simulações ininterruptas, considerando as cargas hidráulicas variáveis no reservatório para cada sequência (14,31 m para 9 de janeiro, 13,88 m para 20 de fevereiro, 13,37 para 25 de abril, 12,63 m para 12 de julho, 12,10 m para 28 de agosto, 11,39 m para 16 de dezembro e 10,79 m para 4 de dezembro). A superfície freática utilizada como condição inicial, referente ao dia 9 de janeiro, foi a calculada previamente em uma simulação estacionária. No final de cada sequência de simulação foram calculados os erros R e RMS das cargas hidráulicas no maciço e na fundação.

Relativo ao modelo de fluxo 2D estacionária só foi realizada a primeira etapa. Assim como no modelo 3D, na calibração do modelo 2D estacionária, buscou-se minimizar os erros médio (R) e quadrático médio normalizado (RMS) ajustando a condutividade hidráulica dentro das faixas especificadas, onde foi utilizado o nível do reservatório máximo do ano de 2009 (registrado no dia 5 de maio de 2009) e para validação foi considerado o nível mínimo (registrado no dia 18 de fevereiro de 2009).

4.4 Simulação de cenários

Foram realizadas duas simulações de cenários utilizando o modelo de fluxo 3D transiente. A primeira, para o período de 2 de janeiro a 31 de dezembro de 2009 (com cargas hidráulicas no reservatório variando de respectivamente 15,61 m a 18,88 m), foi utilizada para a avaliação do funcionamento do sistema de drenagem interno e dos poços de alívio. A simulação de cenário no modelo de fluxo 2D foi utilizada para a avaliação do funcionamento do sistema de drenagem interno e dos poços de alívio, referente ao dia 2 de janeiro de 2009, com carga hidráulica no reservatório de 15,61 m.

Já a segunda, de 14 a 28 de junho de 2022 (com variação nas cargas hidráulicas no reservatório de 18,30 m a 18,20 m), foi utilizada para verificar a resposta do modelo a registros atuais.

5. Resultados e discussão

5.1 Análise de sensibilidade e calibração e validação do modelo 3D

Na primeira etapa da análise de sensibilidade e calibração do modelo 3D, os resultados foram sensíveis às variações dos valores de k da areia-silto-argilosa no maciço, da argila silto arenosa e da silto areno argiloso na fundação e na camada de brita no rip-rap, com erros R e RMS das cargas hidráulicas variando de respectivamente -0,27 a -0,58 e 0,223 a 0,233. No entanto, não apresentou sensibilidade às variações da condutância dos drenos.

Já na segunda etapa, têm-se os resultados expostos na Tabela 2, onde há a sequência evolutiva das simulações utilizadas na calibração do modelo, os valores de k ajustados para cada material e os menores erros R e RMS . Na primeira sequência, após a minimização dos erros, o valor de k ajustado foi fixado, repetindo o procedimento na sequência seguinte e assim sucessivamente. Desta forma observa-se uma redução nos valores absolutos dos erros com a evolução das sequências. O modelo foi calibrado na última sequência, com os valores de k ajustados, com $R = -0,27$ m e $RMS = 0,223$. Após a calibração apenas os valores correspondentes a areia-silto-argilosa do maciço, a areia silto arenosa da fundação, a britas do rip-rap e a brita do enrocamento de pé, convergiram para os adotados no início do processo (Tabela 1).

Tabela 2 – Sequência evolutiva das simulações utilizadas na calibração do modelo 3D estacionário, valores de k ajustados para cada material e menores erros R e RMS em cada sequência.

Sequência	Material	Localização	k_{ajust} (m/s)*	R (m)	RMS (-)
1	areia-silto-argilosa	Maciço	10^{-4}	-0,58	0,233
2	areia siltosa	Fundação	10^{-5}	-0,51	0,231
3	areia argilosa	Fundação	10^{-6}	-0,51	0,230
4	areia média a grossa	Fundação	10^{-4}	-0,51	0,230
5	areia fina a média	Fundação	10^{-4}	-0,51	0,230
6	areia de fina a grossa	Fundação	10^{-4}	-0,51	0,230
7	areia fina com pedregulho	Fundação	10^{-4}	-0,51	0,230
8	argila silto arenosa	Fundação	10^{-6}	-0,31	0,223
9	silte areno argiloso	Fundação	10^{-5}	-0,28	0,223
10	brita	Rip-rap	10^{-3}	-0,27	0,223
11	brita	Enrocamento de pé	10^{-2}	-0,27	0,223

* Para o maciço $k_{ajust} = k_{x11} = k_{x22}$ e $k_{x33} = 10^{-1} k_{ajust}$;

* Para as demais camadas $k_{ajust} = k_{x11} = k_{x22} = k_{x33}$.

Fonte: Autores (2023)

O modelo de fluxo 3D transiente não foi sensível às variações dos valores de S_s , S_y e condutância dos drenos, permanecendo os mesmos adotados no início do processo, sendo validado em sete sequências de simulações ininterruptas, com erros R e RMS das cargas hidráulicas nas faixas de respectivamente -0,52 m a -0,33 m e 0,222 a 0,236 (Tabela 3).

Tabela 3 – Sequência de simulação e erros R e RMS utilizados na validação do modelo de fluxo 3D transiente

Sequência	R (m)	RMS (-)
1	-0,41	0,228
2	-0,33	0,222
3	-0,46	0,228
4	-0,37	0,236
5	-0,41	0,232
6	-0,49	0,235
7	-0,52	0,231

Fonte: Autores (2023)

5.2 Análise de sensibilidade e calibração e validação do modelo 2D

O modelo de fluxo 2D estacionário foi sensível às variações dos valores de k das camadas de areia-silto-argilosa no maciço, das camadas de areia-argilosa, de areia média a grossa, de argilo a silto arenosa e de silte areno argiloso na fundação, e das camadas de brita no poço de alívio, no enrocamento de pé e nos filtros, com erros R e RMS das cargas hidráulicas variando de respectivamente -0,10 a 0,18 e 0,73 a 0,95.

A sequência evolutiva das simulações utilizadas na calibração do modelo, os valores de k ajustados para cada material e os menores erros R e RMS de cada sequência, estão na Tabela 4. O modelo foi calibrado com os valores de k ajustados, com $R = -0,13$ m e $RMS = 0,95$. Após a calibração nenhum valor convergiu para o adotado no início do processo (Tabela 1) e apenas o valor correspondente a areia argilosa da fundação foi semelhante ao obtido na calibração do modelo 3D (os demais foram menores).

Tabela 8 – Sequência evolutiva das simulações utilizadas na calibração do modelo 2D estacionário, valores de k ajustados para cada material e menores R e RMS em cada sequência

Sequência	Material	Localização	k_{ajust} (m/s)*	R (m)	RMS (-)
1	areia-silto-argilosa	Maciço	10^{-5}	-0,10	0,73
2	areia argilosa	Fundação	10^{-6}	-0,13	0,95
3	areia média a grossa	Fundação	10^{-6}	-0,10	0,73
4	argila silto arenosa	Fundação	10^{-8}	0,18	0,82
5	silte areno argiloso	Fundação	10^{-7}	0,17	0,83
6	brita	Poço de alívio	10^{-2}	0,18	0,82
7	brita	Enrocamento de pé	10^{-3}	0,11	0,95
8	brita	Filtros	10^{-3}	-0,13	0,95

* Para o maciço $k_{ajust} = k_{x11} = k_{x22}$ e $k_{x33} = 10^{-1} k_{ajust}$;

* Para as demais camadas $k_{ajust} = k_{x11} = k_{x22} = k_{x33}$.

Fonte: Autores (2023)

5.3 Simulações

A simulação do primeiro cenário utilizando o modelo de fluxo 3D transiente mostrou que o sistema de drenagem interno permaneceu afogado durante todo período com surgências até talude jusante. A Figura 9 mostra o fluxo correspondente a carga máxima (dia 5 de maio de 2009) na seção máxima.

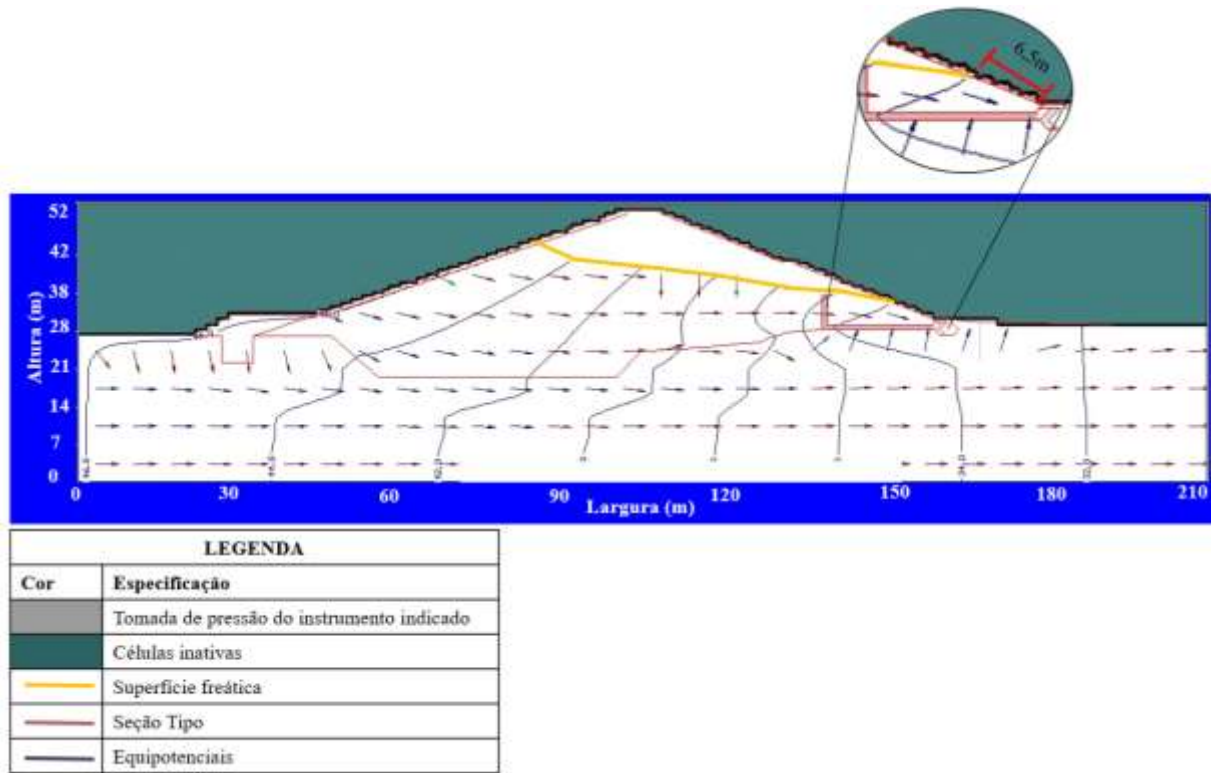


Figura 9 – Direções dos vetores velocidade de fluxo obtidos no primeiro cenário do modelo tridimensional
Fonte: Autores (2023)

As direções dos vetores velocidade de fluxo na seção máxima (Figura 9) indicam que o sistema de drenagem interno não foi capaz de captar todo fluxo proveniente do maciço e da fundação. Esta falha deve-se, provavelmente, as reduções nas medidas dos filtros horizontal e vertical realizadas durante a execução da obra. Resultados semelhantes também foram observados em todas as seções, porém com maior evidência nas áreas próximas das ombreiras, onde parte da fundação é constituída por camadas arenosas (areia fina a média, areia média a grossa, e areia fina com pedregulho). Esta situação similar a encontrada por Chen e Zhand (2006), indica que os limites das ombreiras correm risco maior de ruptura por erosão regressiva.

Já o modelo de fluxo 2D estacionário apresentou resultados diferentes, mostrando que o sistema de drenagem interno foi capaz de captar e direcionar os fluxos no maciço, protegendo o espaldar de jusante contra a saturação, e que o poço de alívio captou o fluxo da camada confinada da fundação, reduzindo o artesianismo (Figura 10).

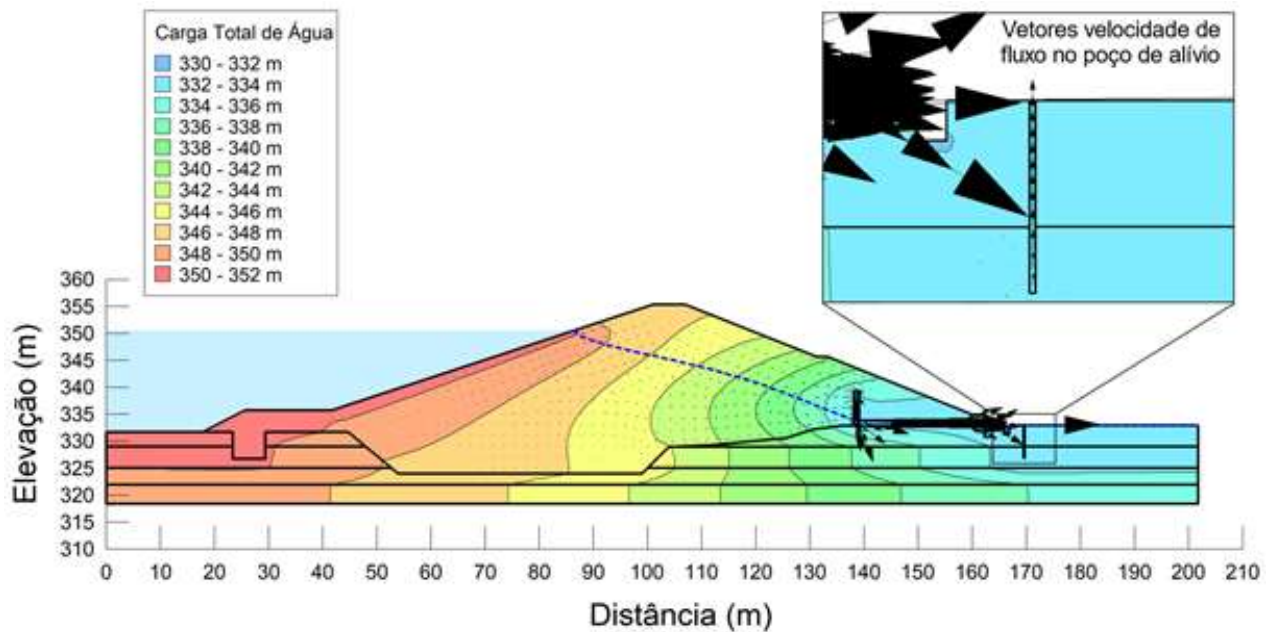


Figura 10 – Vetores velocidade de fluxo obtidos através do modelo de fluxo 2D estacionário
Fonte: Autores (2023)

O fluxo de percolação no maciço e na fundação obtidos no modelo 3D transiente foram de, respectivamente, $1,49 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e $1,52 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$; enquanto no modelo 2D estacionário foram de, respectivamente, $4,13 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e $1,28 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, da ordem de dez vezes menor do que os calculados no modelo de fluxo 3D transiente. Estes resultados corroboram com os obtidos por Chen e Zhand (2006), que verificaram que os fluxos de percolação no maciço e na fundação são maiores na análise 3D, indicando que a análise 2D estacionária pode subestimar os resultados, podendo levar a tomada de decisões equivocadas (Nazari, 2018).

Ainda no modelo 2D estacionário, o gradiente hidráulico máximo calculado pelo SEEP/W na região de fluxo ascendente à jusante foi de $0,75 \text{ m}/\text{m}$ (localizado na camada confinante superior da fundação abaixo da vala drenante). Este valor foi menor que o gradiente hidráulico crítico de $0,84 \text{ m}/\text{m}$, indicando que a camada confinante superior pode ser considerada hidráulicamente estável em condição de fluxo ascendente. Em uma simulação teste, desativando o poço de alívio, verificou-se uma elevação dos gradientes hidráulicos na região de fluxos ascendentes à jusante, com valores bem superiores ao crítico ($2,31 \text{ m}/\text{m}$, abaixo da vala drenante). Estes resultados indicam que o bom funcionamento do poço de alívio contribui com a estabilidade hidráulica da camada confinante na região de fluxo ascendente à jusante do maciço.

Como defendido por Serafin (1985), a análise dos poços de alívio a partir do modelo 3D é mais completa, pois é possível observar no perfil longitudinal estratificado (Figura 11) que alguns poços estão instalados acima da camada permeável confinada apresentando condições para ocorrência de artesianismo, possibilitando o desenvolvimento de elevadas porpressões, com possível comprometimento da estabilidade hidráulica da fundação. Esta instabilidade foi observada por Oliveira (2020) quando identificou surgências no talude de jusante da barragem, sendo necessário instalar um medidor de vazão para monitoramento do fluxo (Ceará, 2018).

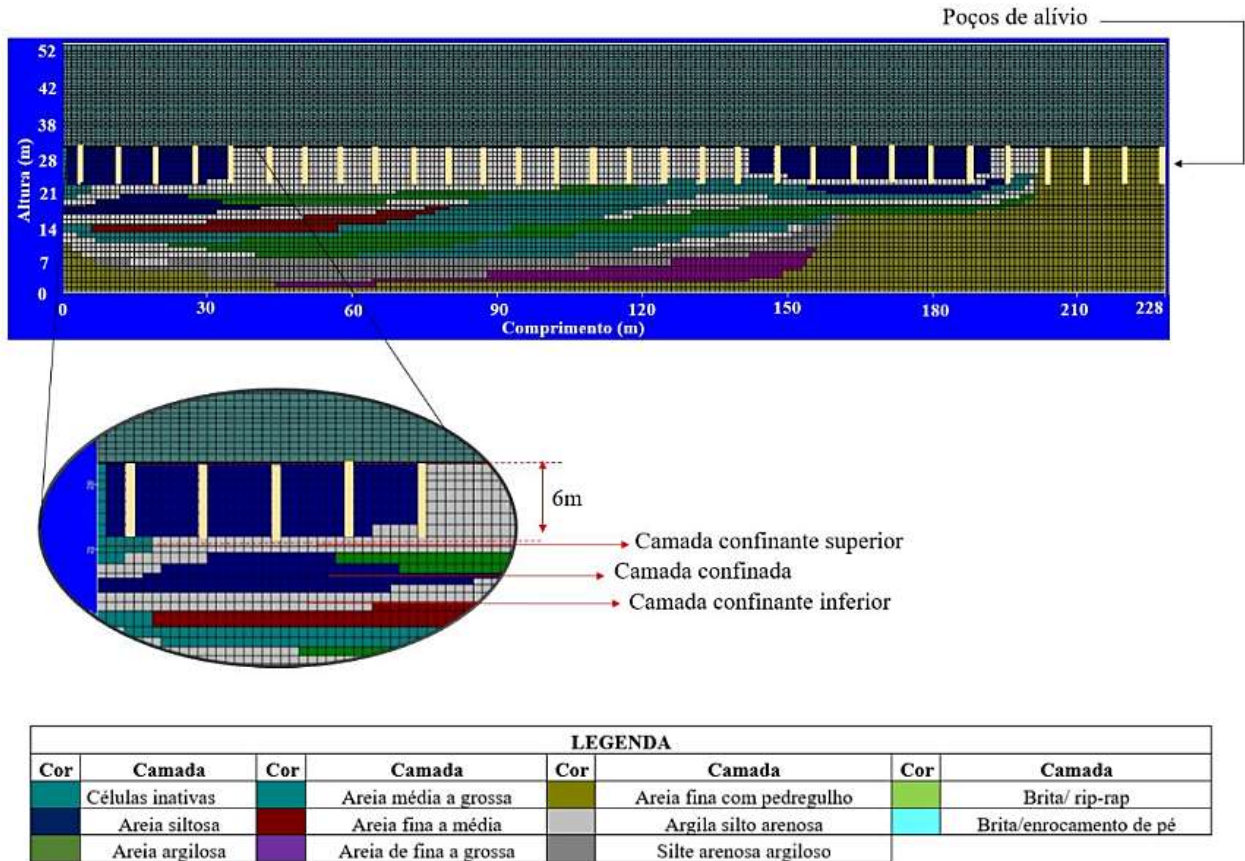


Figura 11 – Perfil longitudinal estratificado discretizado com localização dos poços de alívio
Fonte: Autores (2023)

Ao desativar os poços de alívio no modelo 3D transiente, não foi possível verificar modificações na surgência no talude de jusante, indicando que ela ocorre, possivelmente, devido as alterações realizadas no sistema de drenagem interno durante a execução da obra. Simulações com variações da condutância do sistema de drenagem interno (representando uma possível colmatagem) apresentaram aumento nos valores de R e RMS, indicando uma situação que não representa a situação atual.

A simulação do segundo cenário utilizando o modelo de fluxo 3D transiente mostrou o sistema de drenagem interno afogado e um aumento na extensão da surgência, que passou para 17,0 m acima do pé do talude de jusante, próximo a ombreira direita, (Figura 12). Essa situação mostra que através da modelagem 3D é possível analisar toda a estrutura do maciço e da fundação, avaliando possíveis problemas que normalmente iniciam nestas regiões (Chen e Zhand, 2006), sendo mais precisa do que a modelagem 2D (Zang *et al.* 2016).

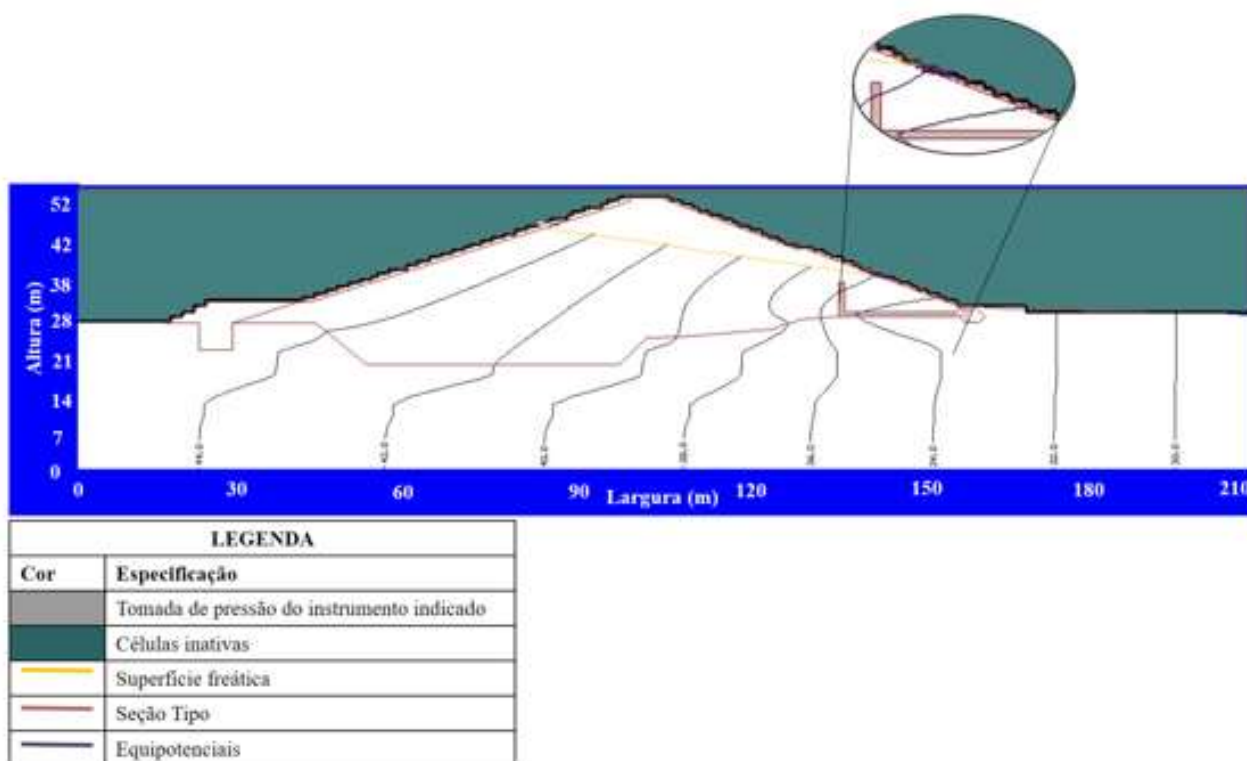


Figura 12 – Surgência no talude de jusante observada próxima a ombreira direita durante a simulação do segundo cenário

Fonte: Autores (2023)

Vale ressaltar que devido a intensificação das surgências no talude de jusante, durante o segundo semestre do ano de 2022 foi iniciada a execução de um dreno invertido. Essa situação, como descreve Rocha *et al.* (2023), poderia ter sido evitada, pois a partir de simulações considerando casos extremos, como acumulação durante um período extenso, os resultados poderiam sugerir um controle no nível das águas do reservatório e um aumento na frequência do monitoramento dos instrumentos, diminuindo a necessidade de realização de obras corretivas.

6. Considerações finais

A modelagem de fluxo hídrico 3D mostrou-se relevante na simulação de eventos mais realistas e na obtenção de resultados mais consistentes, quando comparada a modelagem 2D. Essa situação é decorrente do fato de que na análise 3D toda a estrutura é modelada e não apenas a seção máxima, como convencionalmente é feito, sendo capaz de prever problemas nas ombreiras.

Somente na modelagem 3D foi possível avaliar problemas observados em campo, como a existência de falhas no sistema de drenagem interno, resultando em surgências significativas no talude de jusante e a ocorrência de erros na instalação de alguns poços de alívio, contribuindo com a instabilidade hidráulica da fundação à jusante.

A modelagem de fluxo hídrico 3D e transiente no maciço e na fundação da barragem mostrou-se uma importante ferramenta na análise da dinâmica de percolação, podendo contribuir com tomadas de decisões decorrentes de imprevistos que podem ocorrer durante as fases de elaboração do projeto executivo, de construção e de manutenção do reservatório.

Referências

- ALVES, Marina Calisto; LIMA, Filipe Augusto Xavier. A construção de barragens e seus efeitos sobre comunidades rurais: uma análise a partir do Reassentamento Novo Alagamar. *Interações*, Campo Grande, MS, v. 23, n. 2, p. 457-471, abr./jun. 2022.
- ARAÚJO, F. R. *Risco geotécnico: uma abordagem estocástica para análise da estabilidade de Taludes da Barragem Olho D'água no Estado do Ceará*. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- Bayat M, Eslamian S, Shams G, Hajiannial A (2019) The 3D analysis and estimation of transient seepage in earth dams through PLAXIS 3D software: neural network. *Environ Earth Sci* 78: 571.
- BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Subsecretaria de Assuntos Jurídicos. Lei nº 14.066 de 30 de setembro de 2000. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Diário Oficial da União, 30 set. 2020.
- COGERH, Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. Companhia de Gestão de Recursos Hídricos. Diagnóstico das Barragens Instrumentadas do Estado do Ceará Monitoradas pela COGERH. 2011.
- Freeze, R.A., and Cherry, J.A. 1979. Groundwater. Prentice-Hall, Englewoods Cliffs, N.J.
- GEO-SLOPE, SEEP/W for seep analysis – User's Guide. GEO-SLOPE International Ltd. Canadá, 2001.
- HUSSAIN, Arafat; ALI, Rashid. Numerical Approximation of One-Dimensional Transport Model Using an Hybrid Approach in Finite Volume Method", *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2023, 2023.
- López-Acosta, N. P. , & Mendoza-Promotor, J. A. (2016). Study of Unsaturated Soils by Coupled Numerical Analyses of Water Flow-Slope Stability. In (Ed.), *Groundwater - Contaminant and Resource Management*. IntechOpen.
- MCDONALD, M.G. E HARBAUGH, A.W. A Modular three-dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model. In: **USGS Techniques of Water Resources Investigations**. Washington - Estados Unidos: USGS, 1988, v.6. cap.4.
- MOREIRA, Aniele Lacerda; AZEVEDO, Ilana Borges de; SANTOS, Isabella Christine de Paula. Análises de Percolação e Estabilidade de Taludes em Uma Barragem de Terra Homogênea Sob a Perspectiva de Segurança de Barragens, *In IX Encontro Científico das Engenharias*, Universidade de Rio Verde – UniRV, 2019.
- PASHAH,S. On the Use of Commercial Finite Element Packages for a Dimensionless Solution to a Class of Problems, *Computational and Mathematical Methods*, vol. 2023, 2023.
- Qun Chen and L M Zhang. Three-dimensional analysis of water infiltration into the Gouhou rockfill dam using saturatedunsaturated seepage theory. *Canadian Geotechnical Journal*. 43(5): 449-461.
- Nazari S, Zamani M, Moshizi SA. Comparison between two-dimensional and three-dimensional computational fluid dynamics techniques for two straight-bladed vertical-axis wind turbines in inline arrangement. *Wind Engineering*. 2018;42(6):647-664.
- PIMENTA, Rafael Colombo; BACELLAR, Luís de Almeida Prado; RJEILLE, Milena Jorge; MOREIRA, Rubens Martins. Estado da arte sobre traçadores aplicados na avaliação de fugas de água em barragens. *Periódico tchê químico*, v16.n31, 2020.

-
- ROCHA, Othon José; MARTINI FILHO, Luiz Renato; BENEVENTE, Caio Gripp; IMBUZEIRO, Letícia. Modelagem cfd-3d aplicada ao setor de mineração. *XXXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens*, Foz do Iguaçu – PR, 2023.
- SANTOS, L. L., CABRAL, J. J. S. P., CIRILO, J. A., FREITAS, D. A., SENS, M. L., ARAGÃO, R., BARROS, T. H. S.. Aplicação da tecnologia de filtração em margem para população difusa no Semiárido Pernambucano. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, V. 19 n. 4, p 49-85, 2014.
- SRH – Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará. Açude Olho D’água Várzea-Alegre-Ce: projeto executivo – relatório geral. *Tomo I*, 1988a.
- SRH – Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará. Açude Olho D’água Várzea-Alegre-Ce: projeto executivo – relatório geológico e geotécnico. *Tomo II*, 1988b.
- SRH – Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará. Açude Olho D’água Várzea-Alegre-Ce: projeto executivo - especificações técnicas. *Tomo IV*, 1988c.
- TERZAGHI, K.; PECK, R. B. Mecânica dos solos na prática da engenharia. Tradução Antônio José da costa nunes e Maria de Lourdes campos campelo. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S.A.,1962.
- XU, Chenyang, HUO, Zhijun. Numerical Simulation of Gravity Anomaly Based on the Unstructured Element Grid and Finite Element Method", *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2020, 2020.
- XU, Guanchao; GUO, Bowen; MENG, Zhuolun; ZHAO, Jiwei. Revisão de segurança sísmica de barragens gravitacionais com base no método dos elementos finitos. *Geofluids* , vol. 2022, artigo ID 5463613, 8 páginas, 2022.