

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/85

O Papel do Modelo Hidrogeológico Numérico no Descomissionamento de Barragem de Rejeitos Contaminados com Falhas no Sistema de Impermeabilização

Lucas Henrique Vieira
Engenheiro Geotécnico, DF+ Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, lvieira@dfmais.eng.br

Thaís Guedes Ayres Silva
Hidrogeóloga, DF+ Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, tgsilva@dfmais.eng.br

Luciano Rodrigo Gomes Santos
Geoquímico Ambiental, GeoEnviron, Belo Horizonte, Brasil, luciano.santos@geoenviron.com.br

Camila Mendes Correa Pinto
Engenheira Geotécnica, DF+ Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, cmendes@dfmais.eng.br

Alexandre Chagas Pelegrineli
Engenheiro Geotécnico, DF+ Engenharia, Limeira, Brasil, apelegrineli@dfmais.eng.br

RESUMO: Reservatórios de barragens de rejeitos não-inertes usualmente são concebidas com sistema de impermeabilização a fim de evitar a contaminação do solo de fundação e lençol freático. Nos casos em que se detecta a falha deste sistema de impermeabilização, o modelo hidrogeológico numérico desempenha um papel importante para o descomissionamento destas estruturas. Para o estudo hidrogeológico da área do barramento, estabeleceu-se os limites e condições de contorno para o modelo conceitual, assim como, a compilação dos dados de monitoramento existentes. Com base no modelo conceitual foi construído o modelo numérico em cinco etapas, desde o refinamento da malha até a simulação dos cenários. A partir do modelo numérico calibrado e da montagem dos cenários de tratamento propostos foi possível executar as simulações e comparar os impactos de cada alternativa na impermeabilização da estrutura. Em relação as vazões obtidas nas zonas de balanço nos cenários de simulação, observou-se que o Cenário 1, no qual é aplicada a impermeabilização de superfície pela geomembrana observa-se que a vazão se reduz drasticamente para 5 m³/dia em relação ao calibrado em permanente (42 m³/dia) demonstrando a eficiência do tratamento de superfície com a geomembrana impermeabilizante. E no Cenário 2 onde o tratamento é realizado com solo de baixa permeabilidade a vazão de Dreno de Fundo corresponde a 12 m³/dia, mostrando que essa solução é menos eficiente que a geomembrana, mas também eficiente para redução da vazão dentro do reservatório.

PALAVRAS-CHAVE: Descomissionamento de Barragens, Sistema de Impermeabilização, Modelo Hidrogeológico Numérico.

ABSTRACT: Non-inert tailings dam reservoirs are usually designed with a waterproofing system in order to avoid contamination of the foundation soil and groundwater. In cases where failure of this waterproofing system is detected, the numerical hydrogeological model plays an important role in the decommissioning of these structures. For the hydrogeological study of the dam area, the limits and boundary conditions for the conceptual model were established, as well as the compilation of existing monitoring data. Based on the conceptual model, the numerical model was built in five steps, from mesh refinement to scenario simulation. From the calibrated numerical model and the assembly of the proposed treatment scenarios, it was possible to run the simulations and compare the impacts of each alternative on the waterproofing of the structure. In relation to the flow rates obtained in the balance zones in the simulation scenarios, it was observed that in Scenario 1, in which surface waterproofing is applied by the geomembrane, it is observed that the flow rate is drastically reduced to 5 m³/day in relation to the calibrated permanently (42 m³/day) demonstrating the efficiency of surface treatment with the waterproofing geomembrane. And in Scenario 2, where the treatment

is carried out with low permeability soil, the Bottom Drain flow corresponds to 12 m³/day, showing that this solution is less efficient than the geomembrane, but also efficient in reducing the flow within the reservoir.

KEYWORDS: Dam Decommissioning, Waterproofing System, Numerical Hydrogeological Model

1 INTRODUÇÃO

Reservatórios de barragens de rejeitos não-inertes usualmente são concebidas com sistema de impermeabilização a fim de evitar a contaminação do solo de fundação e lençol freático. Nos casos em que se detecta a falha deste sistema de impermeabilização, com característica difusa, o modelo hidrogeológico numérico pode desempenhar um papel importante no processo de escolha da melhor solução para o descomissionamento destas estruturas. O modelo hidrogeológico é crucial para entender as direções de fluxo da água subterrânea e suas interações com as águas superficiais, assim como com o material contaminante contido no reservatório, ajudando nas tomadas de decisão e minimizando os riscos ambientais e de segurança associados à barragens de rejeito contaminados.

O modelo hidrogeológico numérico permite a análise em três dimensões das condições de contorno e parâmetros associados aos materiais naturais e antrópicos, mostrando como ocorre a interação do fluxo na barragem e arredores. Isso ajuda a prever o comportamento da água e planejar estratégias de drenagem adequadas.

Sabe-se que o descomissionamento das barragens de rejeito ocorre principalmente por duas maneiras: remoção do maciço ou revegetação do reservatório. Neste último, em barragens com resíduos perigosos, faz-se necessária a impermeabilização da superfície do reservatório em fase anterior à revegetação.

No caso em estudo, o monitoramento ambiental detectou vazamento pela membrana de fundo, e assim, o modelo hidrogeológico numérico foi desenvolvido com o intuito de simular as alternativas de tratamento, auxiliando na tomada de decisão sobre qual a solução mais viável.

2 MÉTODO

Para o estudo hidrogeológico da área do barramento, inicialmente estabeleceu-se os limites e condições de contorno para o modelo hidrogeológico conceitual, assim como, a compilação dos dados de monitoramento existentes.

Com base no modelo conceitual foi construído o modelo numérico. Para isso foi utilizado o *software* “Visual *MODFLOW*” e o algoritmo para a resolução das equações foi o MODFLOW-NWT, desenvolvido pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos – USGS, através do método de diferenças finitas.

A metodologia para desenvolver o modelo hidrogeológico foi dividida em cinco etapas:

- 1ª Etapa: Construção do modelo com refinamento de malha, vertical e horizontal, na região do barramento e nas unidades de menor espessura;
- 2ª Etapa: Discretização das unidades hidrogeológicas identificadas no mapeamento geológico-geotécnico de superfície;
- 3ª Etapa: Discretização dos instrumentos de monitoramento e impermeabilização do barramento;
- 4ª Etapa: Calibração em regime permanente com dados de monitoramento;
- 5ª Etapa: Simulação de cenários a fim de tentar prover direções preferenciais de fluxo e vazões com a impermeabilização de superfície com geomembrana e por camada de solo.

2.1 Montagem e Calibração do Modelo

As condições de contorno em hidrogeologia representam as situações de fluxo d’água no modelo, sendo que esse pode ser de carga especificada, fluxo especificado, ou carga e fluxo não especificado, sendo o fluxo dependendo da carga, conforme o elemento a ser introduzido, como rios, lagos, zonas de aporte hídrico.

A extensão horizontal do modelo foi definida com base em condições de contorno naturais visando uma condição de fluxo nula em suas extremidades (Figura 1). Assim, a região foi delimitada pela área da bacia hidrográfica do vale em que a barragem se encontra. Verticalmente o modelo teve sua superfície superior

definida pela importação da topografia e o limite inferior definido pela cota da drenagem mais baixa vizinha ao vale, buscando uma condição de fluxo de base local (Figura 2).

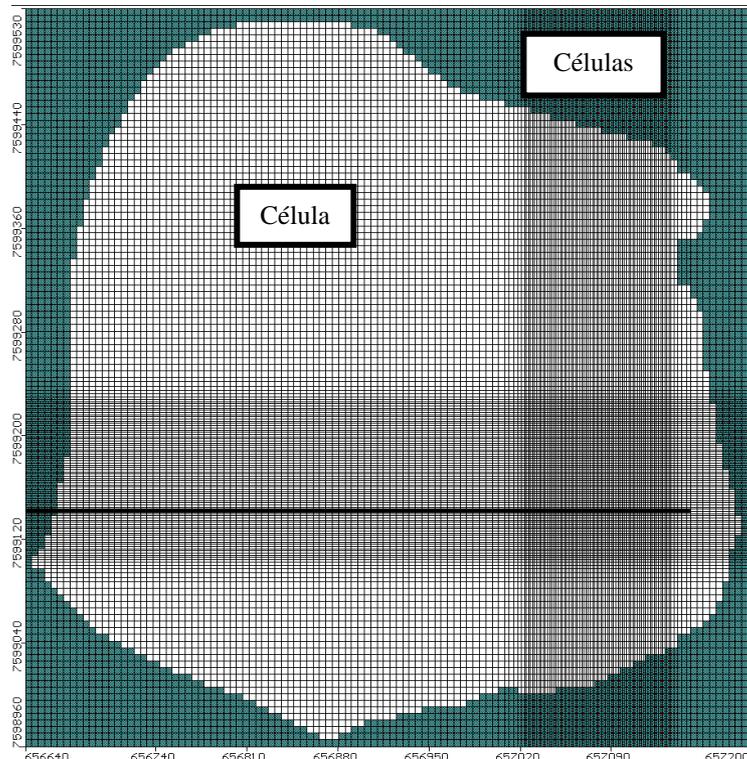


Figura 1 – Malha Horizontal do modelo (Camada 1 - Traço preto indica seção da Figura 2).

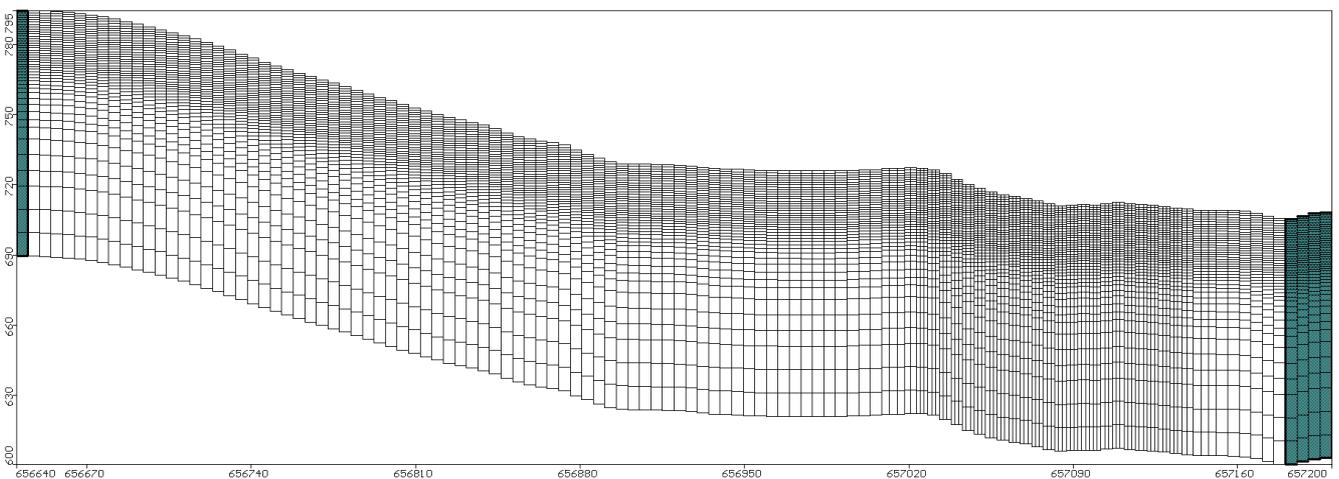


Figura 2 – Malha vertical do modelo numérico.

Dessa forma o modelo foi desenvolvido com os dados disponibilizados existentes da região de estudo. Assim, neste foram discretizadas as condições de contorno como limite de fluxo nulo, limite com fluxo de entrada e saída, drenos, lago do reservatório e recarga superficial. Esses podem ser observados na Figura 3.

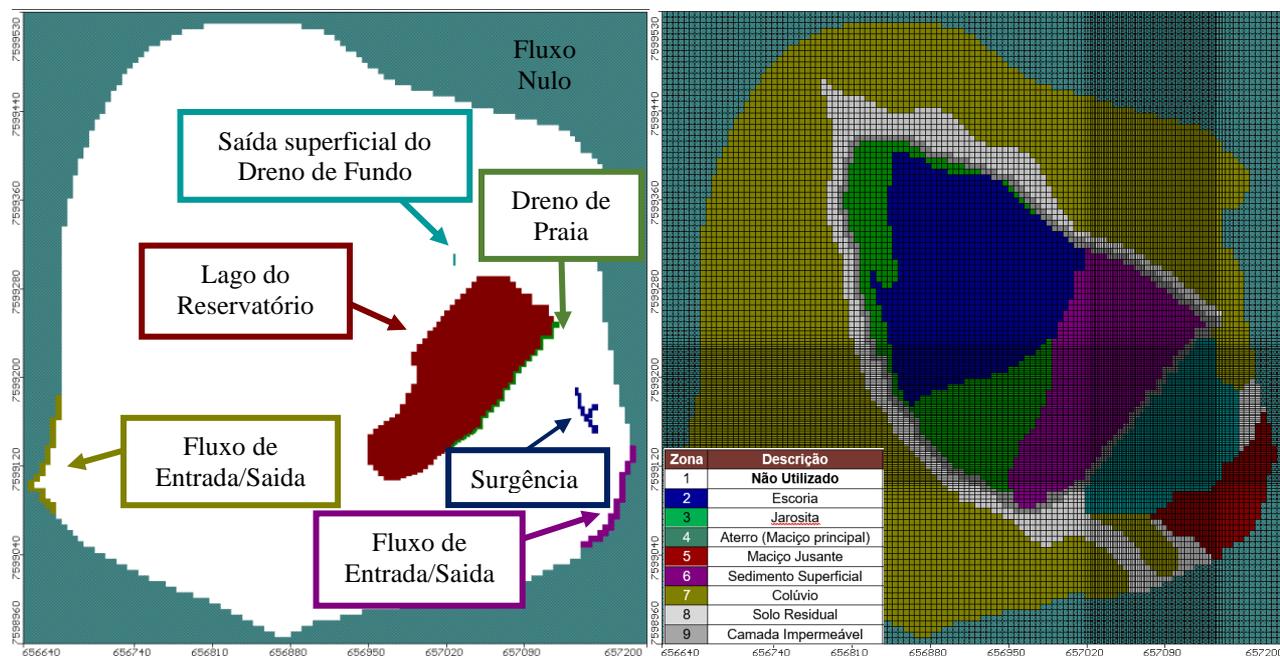


Figura 3. Condições de contorno imputadas ao modelo, com detalhe para as zonas de recarga superficiais (a direita), onde também é possível observar a malha utilizada com refino na área do maciço do barramento.

A discretização das unidades hidrogeológicas foi realizada por interpolação com base no mapa de superfície e seções geológicas geradas para a área. Foram obtidas 15 zonas que são apresentadas na Figura 4, ressalta-se que as zonas 1 e 13 não foram utilizadas. Destaca-se a zona 14 que foi discretizada com baixíssima condutividade hidráulica para representar a camada impermeabilizante do fundo do reservatório, que segundo o monitoramento tem mostrado falhas e fluxo para o lençol freático, contaminando este.

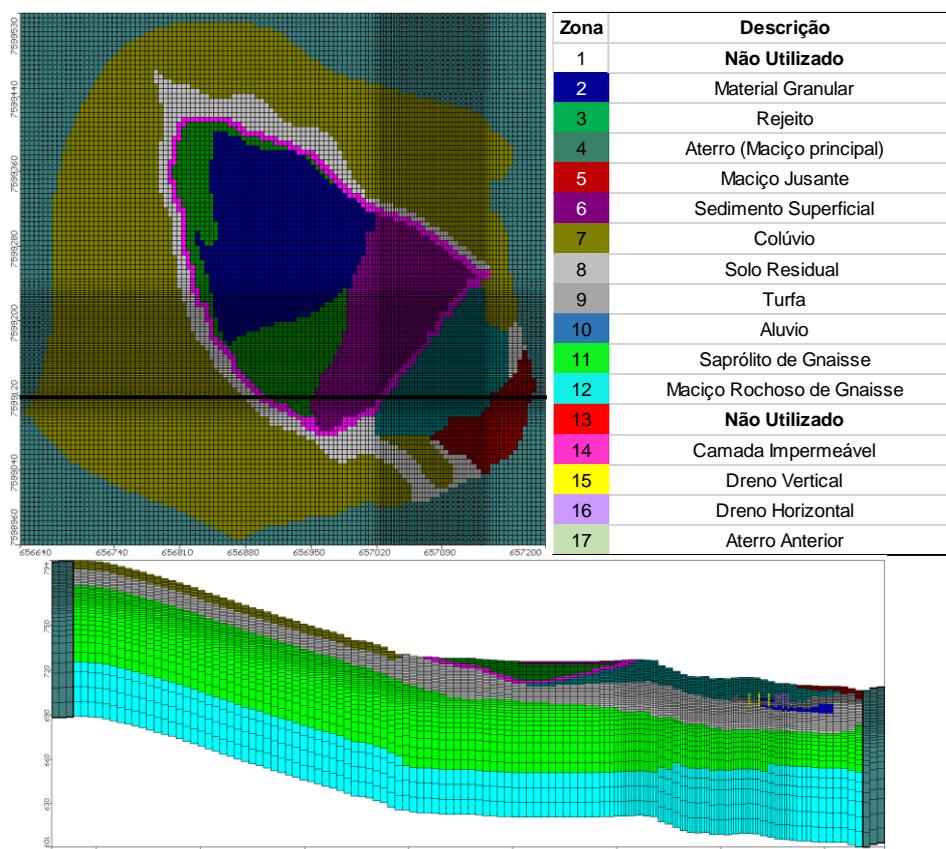


Figura 4. Unidades hidrogeológicas discretizadas no modelo em planta e seção.

Com base nos dados de condutividade conceituais e nos dados de monitoramento de nível de água nos piezômetros e indicadores de nível de água instalados no sítio, realiza-se o processo de calibração do modelo, a fim de obter valores de condutividade coerentes e compatíveis com variações em função da anisotropia. Nesse processo os valores de condutividade hidráulica, obtidos inicialmente pelos ensaios de permeabilidade, são alterados inúmeras vezes buscando uma melhor correspondência aos dados de nível observados e calculados pelo modelo.

2.2 Montagem das Simulações

Após a calibração do modelo em regime permanente foram montados os cenários a serem simulados. Ressalta-se que o processo de calibração de um modelo hidrogeológico numérico de fluxo, só se torna realmente completo com a calibração em regime transiente, onde valores de armazenamento são incorporados ao modelo. Assim, o modelo obtido é uma aproximação da realidade, um retrato temporal.

Os cenários de simulações foram definidos a fim de fornecer informações para o comportamento defeituoso da camada impermeabilizante do fundo do barramento, assim como simular a situação de tratamento implementando uma impermeabilização de superfície com uma geomembrana e com o solo de baixa permeabilidade.

Assim, em comparação ao resultado em regime permanente foram simuladas duas situações: com a impermeabilização de superfície pela geomembrana (Cenário 1), onde uma camada com recarga nula foi atribuída ao topo do reservatório; e outra situação com a impermeabilização por uma camada de solo (Cenário 2), neste cenário foi atribuída uma zona de permeabilidade baixa (10-8 cm/s) as duas primeiras camadas sob o reservatório e uma camada de baixa recarga (Taxa = 2%).

Na Figura 5 mostra a localização da zona cinza escura que demonstra a região onde foi atribuída a zona de recarga e permeabilidade reduzida sob o reservatório, para representar as soluções de tratamento. O traço na figura mostra a localização das seções que serão apresentadas como resultado com as direções de fluxo.

Destaca-se que nos cenários de impermeabilização foi necessária a retirada do recurso “river” e dos drenos presentes nas duas primeiras camadas do modelo para a convergência do modelo, assim o Dreno de Praia foi totalmente retirado. A Tabela 1 resume os cenários simulados.

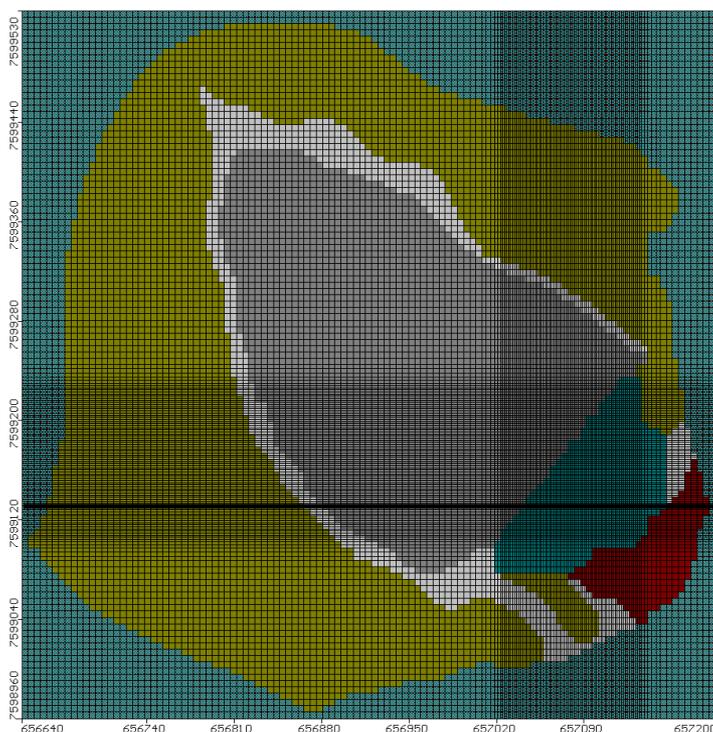


Figura 5. Zonas de recarga discretizadas nos Cenários 1 e 2 (Camada 1) e traço de seções apresentadas nas figuras posteriores.

Tabela 1. Resumo da configuração dos Cenários Simulados

Cenário	Permeabilidade da Membrana Impermeabilizante de Fundo (cm/s)	Taxa de Recarga da Membrana Impermeabilizante de Superfície (2%)	Permeabilidade da Camada de Solo Impermeabilizante de Superfície (cm/s)
Permanente	10^{-9}	Não aplicada	Não aplicada
Cenário 1	10^{-9}	0	Não aplicada
Cenário 2	10^{-9}	2	10^{-8}

3 RESULTADOS

A partir do modelo numérico calibrado e da montagem dos cenários de tratamento propostos foi possível executar as simulações e comparar os impactos de cada alternativa na impermeabilização da estrutura. Para essa análise tres parametros foram mensurados: variação dos níveis d'água, vazões calculadas para os drenos de praia e fundo do barramento, balanço das vazões de trocas entre os materiais do reservatório e unidades vizinhas.

3.1 Variações de Níveis D'água

Quanto a variação dos níveis d'água durante as simulações, a Tabela 2 mostra as variações de nível entre o modelo calibrado em permanente e os Cenários 1 e 2 com a impermeabilização de superfície pela geomembrana e por solo, respectivamente.

Tabela 2. Comparação entre os dados de nível d'água obtidos em cada instrumentos nos cenários 1 e 2 simulados e o calibrando em regime permanente pelo modelo.

Ponto	Cenário 1		Cenário 2	
	Calc. Cen. 1-	Calc. Perm.	Calc. Cen. 2-	Calc. Perm.
INA-01		0.04		0.15
INA-02		0.04		0.13
INA-03		0.04		0.15
INA-04		0.03		0.11
INA-05		0.03		0.12
INA-06		0.03		0.12
INA-07		0.04		0.14
INA-08		0.03		0.10
PM-1		0.02		0.07
PM-2		0.04		0.15
PM-3		0.00		0.02
PM-4		0.00		0.03
PM-5		0.05		0.18
PZ-1		0.03		0.10
PZ-2		0.02		0.08
PZ-3		0.02		0.07
PZ-4		0.03		0.11
PZ-5		0.02		0.09
PZ-6		0.02		0.06
PZ-7		0.02		0.10
PZ-8		0.03		0.10

Nesta análise vê-se que no Cenário 1, com impermeabilização por geomembrana, em comparação ao permanente, a variação máxima foi 5 cm, com a impermeabilização de superfície por solo (Cenário 2) passa para a máxima de 18 cm.

3.1 Variações nas Vazões dos drenos

Em relação as vazões obtidas nas zonas de balanço nos cenários onde a camada impermeabilizante de fundo tem efetividade, observa-se na Tabela 3 os dados de vazão dos drenos.

Tabela 3. Vazão observada e calculada pelo modelo para os Drenos de Praia e Fundo nos Cenários 1 e 2.

Zona	Ponto de Medição Estrutura	Vazão (m ³ /dia)			
		Observado	Permanente	Cenário 1	Cenário 2
3	Dreno de Praia	960	976.75	Retirado	Retirado
4	Dreno de Fundo	192	42.49	5,02	12,48

Os dados acima mostram que o Cenário 1, no qual é aplicada a impermeabilização de superfície pela geomembrana observa-se que a vazão se reduz para 5 m³/dia em relação ao calibrado em permanente (42 m³/dia). E no Cenário 2 onde o tratamento é realizado com solo de baixa permeabilidade a vazão de Dreno de Fundo corresponde a 12 m³/dia.

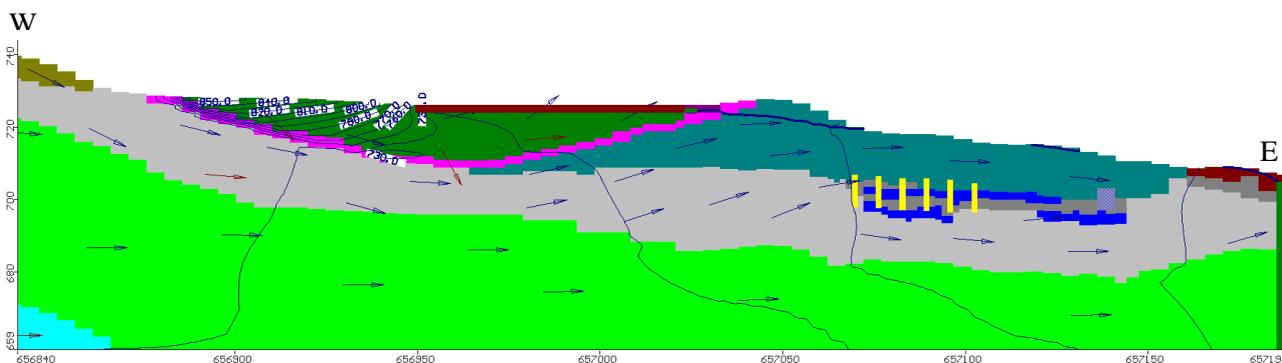
3.4 Direções de Fluxo

Para observação das relações das direções de fluxo durante as alterações simuladas foram extraídas imagens de seções oeste-leste de cada um dos cenários, que serão mostradas e descritas abaixo da Figura 6 a Figura 8.

É possível notar que na calibração em permanente (Figura 6) as setas de direção de fluxo subterrâneo bordeiam o reservatório e a carga hidráulica dentro do reservatório grada de 850 m no topo a 720 na base. As setas dentro do reservatório fluem de montante para jusante e de margens para talvegue.

No Cenário 1 (Figura 7), a carga hidráulica dentro do reservatório é 790m, reduzindo o gradiente hidráulico dentro do reservatório que é possível observar pela menor densidade de linhas equipotenciais. Neste as setas de fluxo se direcionam da superfície para a base.

No Cenário 2 (Figura 8), também observamos o mesmo comportamento em relação as setas de direção de fluxo, porém em relação as equipotenciais, estas agora apresentam um gradiente hidráulico ainda maior, gradando de 920m no topo para 720m na base do reservatório.



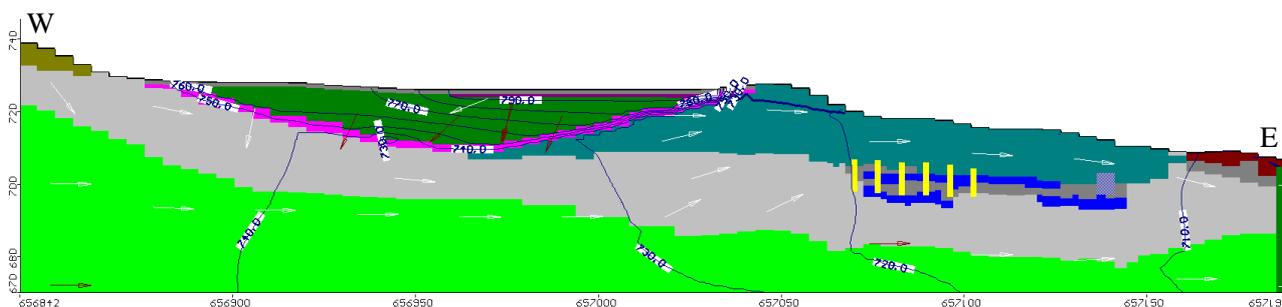


Figura 7. Equipotenciais e direções de Fluxo no Cenário 1 – Demais cores correspondem as zonas de condutividade hidráulica.

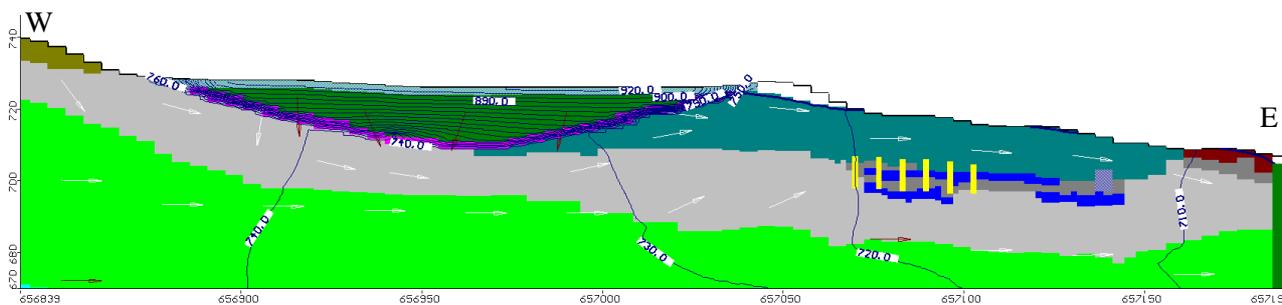


Figura 8. Equipotenciais e direções de Fluxo no Cenário 2 – Demais cores correspondem as zonas de condutividade hidráulica

4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos é possível constatar que durante as simulações os níveis d'água variaram alguns centímetros nos cenários simulados. No Cenário 1, com impermeabilização por geomembrana, em comparação ao permanente a variação máxima foi 5 cm. Essa variação é atribuída às mudanças no modelo, como a retirada do dreno de praia. Porém com a impermeabilização de superfície por solo (Cenário 2) essa diferença passa para a máxima de 18 cm. Assim, mostrando maior aporte e elevação do nível freático no modelo pela utilização desta solução ao invés da geomembrana.

Em relação às vazões obtidas nas zonas de balanço nos cenários de simulação, vê-se que o Cenário 1, no qual é aplicada a impermeabilização de superfície pela geomembrana observa-se que a vazão se reduz drasticamente para 5 m³/dia em relação ao calibrado em permanente (42 m³/dia) demonstrando a eficiência do tratamento de superfície com a geomembrana impermeabilizante. E no Cenário 2 onde o tratamento é realizado com solo de baixa permeabilidade a vazão de Dreno de Fundo corresponde a 12 m³/dia, mostrando que essa solução é menos eficiente que a geomembrana, mas também eficiente para redução da vazão dentro do reservatório. Com relação às direções de fluxo notar-se que no Cenário 1, a diferença que a carga hidráulica dentro do reservatório é reduzida para 790m, reduzindo também o gradiente hidráulico dentro do reservatório. Neste as setas de fluxo se direcionam da superfície para a base. No cenário 2, também observamos o mesmo comportamento em relação às setas de direção de fluxo, porém em relação às equipotenciais, estas agora apresentam um gradiente hidráulico ainda maior.

O Modelo Hidrogeológico Numérico foi calibrado em regime permanente e os resultados obtidos, expõem as condições de fluxo de água subterrânea da área e demonstra os resultados gerados pelos cenários de simulações propostos para as estruturas impermeabilizantes.

Dito isto, conclui-se que somente a impermeabilização de topo da estrutura não será suficiente para a estabilização química do lençol freático. Conforme análises do modelo hidrogeológico, ainda existirá recarga pelo fundo do reservatório, onde a impermeabilização é deficiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). NBR 13028. *Mineração Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos*. Rio de Janeiro.