

5

Estudo de caso: Mina a céu aberto

5.1.

Introdução

Este estudo de caso tem por objetivo avaliar numericamente o comportamento hidrogeológico de uma mina a céu aberto que apresenta um problema de afluência de águas subterrâneas, que colocaria em questão a viabilidade da sua exploração. Localizada na costa norte da Espanha abrangendo uma área de aproximadamente 11 milhões m², a região em análise é caracterizada geologicamente por uma grande estrutura consistente em uma dobra sinclinal com fechamento periclinal, com estruturas menores associadas, principalmente, ao flanco sudeste. A pedreira, na qual se centra este trabalho, destina-se à exploração de rocha industrial (rocha calcária) ainda em atividade, mas ao mesmo tempo, à exploração de pequenas porcentagens de materiais pertencente às litologias de xistos e arenitos.

A exploração mineira ocupa uma extensão de 84104 m². A geometria dos diferentes frentes está em constante mudança devido ao avanço da lavra, com uma taxa de avanço de 15 % anual. Os trabalhos se realizam por meio de perfurações e detonação de bancos e bermas descendentes em profundidade e avanço na direção sudoeste.

De acordo com Álvarez *et al.*, 2012, devido às características hidrogeológicas e a própria configuração da mina, um processo de afloramento e acumulação de águas em volumes importantes ocorre na cava, que em alguns casos ultrapassam a possibilidade de drenagem e provocam inundações, já que o sistema projetado pela mineira para atenuar esse problema de inundação trata apenas de um sistema de valas perimetrais, internas, de distribuição e bombeamento. Este sistema atual de controle das águas evidencia-se insuficiente ou ineficiente com o avanço da lavra e, sobretudo, quando precipitações moderadas ocorrem e paralisam o avanço dos trabalhos mineiros.

Portanto, neste estudo o propósito é de realizar uma modelagem numérica hidrogeológica para a mina em referência, baseados na caracterização geológica e hidráulica da região em estudo, elaborada por Álvarez *et al.*, 2012. Este estudo tem como objetivos principais a (1) avaliação dos dados de monitoramento correspondentes ao ano de 2010 a partir de Álvarez *et al.* 2012 (2) conceitualização do modelo, onde se detalham as simplificações assumidas em conjunto com as condições de contorno empregadas, (3) criação do modelo numérico no FEFLOW, (4) calibração do modelo hidrogeológico numérico, (5) verificação da dinâmica de fluxo do sistema, (6) aplicação e análise dos resultados de técnicas para controle das águas.

5.2.

Caracterização hidrogeológica

Uma breve descrição das condicionantes geológicas e hidráulicas necessárias para a caracterização da área em estudo, realizada por Álvarez *et al.*, (2012) e Díaz (2012), foi feita com a finalidade de fundamentar e justificar hipóteses e simplificações realizadas durante a conceitualização e elaboração do modelo numérico deste estudo de caso.

5.2.1.

Condicionantes geológicos

O conhecimento geológico da zona em estudo se centra principalmente na sua estratigrafia e na geologia estrutural. O mapa geológico é mostrado na Figura Anexo 2 conjuntamente com todos os cortes longitudinais e transversais disponíveis, que foram aproveitados neste trabalho para a geração do modelo hidrogeológico numérico.

5.2.1.1.

Estratigrafia

A série estratigráfica presente na zona de estudo é descrita na Figura 5.1, indicando os materiais que compreendem cada formação, denominada aqui também pela sua nomenclatura local. Estimações das potências destas formações, como referência são também especificados. Como resultado dessa análise, uma coluna estratigráfica representativa se compõe de materiais Devoniano (ou Devónico) e Carboníferos, que, de baixo para cima, se identificam como Arenito

de Naranco, Calcário de Candás, Arenito de Candás, Calcário de Montaña e uma Sucessão turbidítica. Os arenitos aflorantes são materiais de muito baixa permeabilidade e os materiais carbonatados constituem sistemas cársticos desenvolvidos caracterizados pelas heterogeneidades locais (Llopis, 1970).



Figura 5.1 - Coluna estratigráfica resultante do estudo geológico (Adaptado de Álvarez et al., 2012)

A região em estudo se encontra situada no extremo norte (N70E) da região de dobras e mantos, indicando que se trata de uma estrutura de dobramentos na que se situa o sinclinal, objeto de estudo, formando parte do grande sinclinório, que determina a morfologia e orientação dos vales e cristas da zona, a não continuidade da capa de calcário superior e a presença de dolomito nesta região.

Como observado na Figura 5.2 (nas seções longitudinal e transversal) o desnível da falha se atenua ao norte e afunda os calcários explorados ao sul (leste do plano de falha) para profundidades importantes, aumentando a espessura dos materiais de cobertura (dolomita e sucessão turbidítica).

De acordo com Álvarez *et al.*, (2012) não foi observado nem determinado que exista fluxo de água através das fraturas tectônicas importantes, e a circulação de água através destas supõem apenas fraturas com fluxo nulo.

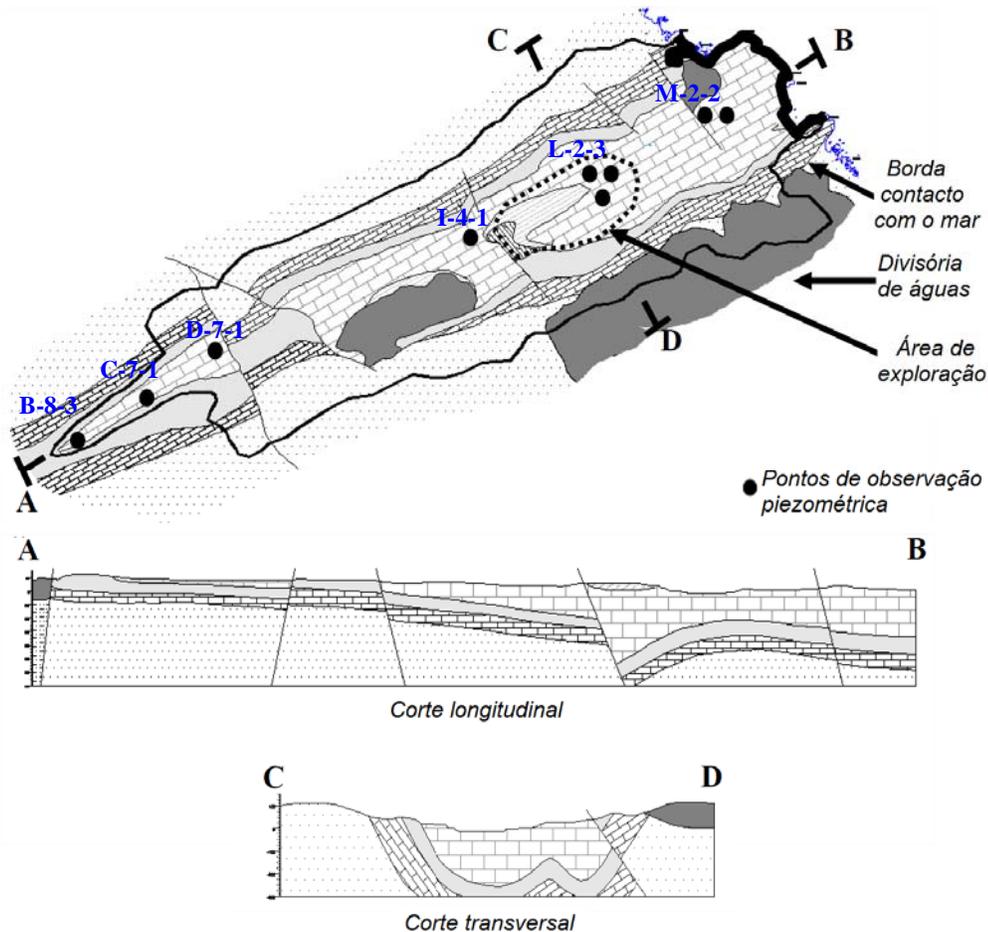


Figura 5.2 - Mapa geológico delimitado pela divisória de águas e borda contacto com o mar, na que se situa a exploração mineira e os poços de observação. Cortes longitudinal e transversal para identificação dos mantos e dobras (Álvarez *et al.*, 2012)

5.2.2. Condicionantes hidráulicos

A hidrogeologia da área em estudo, delimitada pela divisória topográfica de águas e borda em contato com o mar, caracteriza-se por um sistema de arroios, nos que se realizaram registros diferenciais, quantificando, dessa forma, o escoamento superficial e a infiltração dos mesmos.

Segundo Álvarez *et al.*, 2012, nesta área foram inventariados um total de 67 pontos de água, consistentes em mananciais, poço e sondagens, dos quais, pela sua situação e acessibilidade, 9 destes foram utilizados para o registro de dados piezométricos (Figura 5.2).

Baseada na análise e informação da estratigrafia e estrutural, bem como nos registros dos pontos de água, foi estabelecida uma classificação das diferentes

litologias presentes em função das capacidades hidráulicas de cada uma destas. Como resultado deste estudo serão definidas as Unidades hidrogeológicas conformadas por materiais geológicos com similar comportamento hídrico, o qual será apresentado na geração do modelo hidrogeológico conceitual (item 5.4).

5.3. Compilação e interpretação dos dados disponíveis

Todos os dados de monitoramento disponíveis para este trabalho foram obtidos de Díaz (2012), onde se encontram detalhados o processo de obtenção e o processamento destes. A seguir, um resumo das características mais importantes dos dados empregados está sendo apresentado.

5.3.1. Pluviometria

O clima da região onde se localiza a mina é de domínio oceânico, com precipitações durante o ano inteiro (superiores a 800 mm) e devido a que a mina se localiza a escassos 2 km da costa, está condicionado pela influência têmpera do mar e as condições topográficas (Marquinez *et al.*, 2003).

Na área em estudo apresenta uma rede de estações pluviométricas, porém são 3 as estações escolhidas serem as mais adequadas para caracterizar as precipitações da zona em estudo: Estações Gijón, Musel e Cabo das Peñas. Os critérios de valoração destas estações foram:

- Disponibilidade de séries temporais de dados,
- Distância do ponto de medição com relação à área de estudo e,
- Grau de correlação lineal entre estações.

Portanto, a pluviometria da região foi obtida a partir do estudo das séries temporais dessas 3 estações pluviométricas, realizando correlações cruzadas entre elas para conseguir uma série temporal completa desde os anos 30 até a atualidade. Também se calcularam os valores característicos das temperaturas que posteriormente serão utilizadas no cálculo da evapotranspiração. Uma vez analisados os dados dessas séries temporais das três estações se concluiu que:

1. Os dados da estação Gijón, por ser a mais próxima e a série temporal mais extensa, resultam ser os mais adequados para a estimativa dos valores

médios representativos da temperatura e precipitação. Também apresenta os valores extremos maiores que estão sendo tomados para estimar as cotas superiores e inferiores da precipitação e da temperatura da zona. Estes valores são:

Tabela 5.1 – Dados de precipitação e temperatura da estação de Gijón (Díaz, 2012)

Precipitação	(mm)	Temperatura	(°C)
Máxima anual	1303,1	Máxima média anual	17,7
Mínima anual	537,1	Mínima média anual	9,8
Média anual	941,5	Média anual	13,7

- Os dados da estação El Musel, é a mais próxima à pedreira e será utilizada para os estudos atuais (2010) e a avaliação do balanço hídrico, por proporcionar dados atuais de precipitações e permite estabelecer uma relação direta entre as precipitações e bombeamento na pedreira.

Tabela 5.2 – Dados de precipitação da estação de El Musel (Díaz, 2012)

Balanço hídrico, período (1/5/2010 - 30/4/2011)	
Precipitação acumulada	1160,1 mm

- Os dados da estação de Cabo de Peñas também serão usados com o apoio em caso de desarranjo ou colapso da medição na estação El Musel, por apresentar um alto grau de correlação com esta estação.

A partir destas variáveis de medição poderá se quantificar os componentes do balanço hídrico, necessários para a elaboração e análise do modelo hidrogeológico numérico.

5.3.2.

Vazões bombeadas da cava da mina

O sistema de bombeamento implementado na cava da mina consiste de uma rede de valas perimetrais e internas que captam e distribuem as vazões recolhidas a várias valas secundárias, desde onde se bombeia para uma estação de principal e a partir desta se envia para a estação de decantação, antes de vertê-lo no arroio 1. A drenagem d'água está estruturada para recolher as águas pluviais por zona bem como das filtrações, desta forma, o volume total da água acumulada na exploração é finalmente evacuado para fora da cava através de bombas instaladas na estação principal.

O histórico de volume de água bombeada é representado na Figura 5.3. Neste gráfico se aprecia como o volume de água bombeada na exploração tem sofrido um aumento progressivo nos últimos anos, onde se representa o volume de água bombeada anualmente (ano 2010). As porcentagens de bombeamento com respeito do anterior são mostradas na Tabela 5.3.

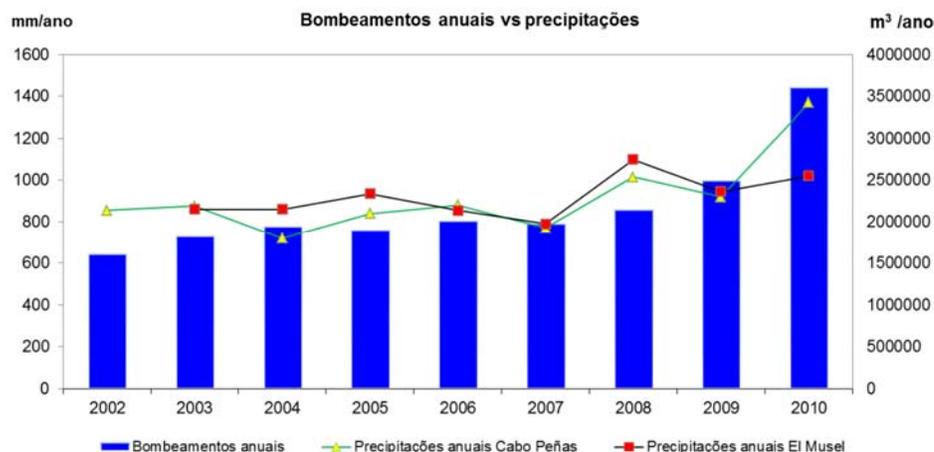


Figura 5.3 - Histórico anual de bombeamento cujos valores estão sendo comparados com as precipitações anuais acumuladas das estações El Musel e Cabo de Peñas, realizados entre 2002 e 2010 (Díaz, 2012)

Tabela 5.3 – Incremento do bombeamento com relação ao ano anterior (Díaz, 2012).

2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
+ 11%	+ 7%	-3%	+ 6%	-2%	+ 7,5%	+ 14%	+31%

O volume de água drenado na cava é um componente importante para o processo de calibração, já que este servirá como um ponto de controle no momento de encontrar um conjunto de condutividades hidráulicas único que represente o sistema.

O volume de bombeamento na cava da pedra registrada no ano de 2010 foi de 3500000 m³, resultando em um volume diário de 10085m³.

5.3.3. Evapotranspiração

O interesse do cálculo da evapotranspiração se centra na sua quantificação como elementos constituintes do balanço hídrico, julgando um papel muito importante ao estudar-se a recarga dos aquíferos. A quantidade de água que se infiltra no terreno em um período determinado é expressa como:

Infiltração = precipitação – evapotranspiração – escoamento

A evapotranspiração (daqui em diante ET) considera a forma conjunta dos processos diferentes e difíceis de quantificar por separado: a evaporação e a transpiração. Os métodos mais empregados para o cálculo da ET são variados e seu emprego depende dos dados disponíveis de precipitação e temperatura obtidos nas estações pluviométricas descritas anteriormente. A obtenção destes dados foi obtida a partir de dois métodos: de Thornthwaite e Le Turc.

O método de Thornthwaite define uma evapotranspiração potencial (ETP) para definir a quantidade de água que passaria à atmosfera supondo um solo completamente saturado e coberto de vegetação em crescimento ativo. Já que as condições ótimas de ET raramente se cumprem, a ETP é estabelecida como limite superior da quantidade de água que realmente pode volver à atmosfera por evaporação e transpiração. A evapotranspiração real (ETR), portanto, vai ser sempre menor ou igual que a ETP: $ETR < ETP$

A partir dos dados da estação pluviométrica de Gijón o valor obtido é:

$$ETP=721,7 \text{ mm/ano}$$

No método de Le Turc, o cálculo da ETR está em função dos valores de precipitação acumulada e a temperatura média anual. O cálculo da ETR anual da zona em estudo a partir dos dados da estação pluviométrica de Gijón resultou:

$$ETR=608,8 \text{ mm/ano}$$

A partir destes resultados da ETP e ETR e levando em consideração os valores de referência em precipitações (Tabela 5.1), a evapotranspiração pode ser expressa em porcentagens.

Tabela 5.4 - Evapotranspiração expresso em porcentagem (Díaz, 2012)

	% Pmax	% Pmed	% Pmín
ETP	55,4	76,6	100
ETR	46,7	65,0	100

A água da chuva representa a porcentagem da precipitação que não se evapotranspirará, assim, traduzindo-se ao nível de bacia em um volume de chuva útil anual, esta representa:

$$\text{Chuva útil total (volume)} = \text{Área da bacia} \cdot (\text{Precipitação} - \text{Evapotranspiração})$$

Sendo a área da bacia do arroio $1 = \text{Área} = 10592692 \text{ m}^2$.

O valor da chuva útil para cada uma das precipitações de referência (em porcentagem, Tabela 5.5) como elemento do balanço hídrico será:

Tabela 5.5 – Valores de chuva útil para cada uma das precipitações de referência (ETP e ETR) (Díaz, 2012)

	% Pmax	% Pmed	% Pmin
Chuva útil (mm/ano) para a ETP	581,51	219,81	-184,59
Chuva útil (mm/ano) para a ETR	694,32	332,62	-71,78

5.4.

Modelo hidrogeológico conceitual

Para a criação do modelo conceitual é necessária a identificação e quantificação adequada dos processos que representem o comportamento do sistema real. Devido a que resulta impossível o conhecimento em detalhe é necessário estudar e examinar aqueles fatores que são mais importantes ou condicionantes do sistema. Deve ser, portanto, estabelecido:

- Geometria em planta (extensão física da área a ser modelada).
- Geometria na seção transversal e longitudinal (extensão do modelo em profundidade, baseado nos estudos geológico).
- Condições de contorno (limites do modelo, responsáveis pelo equilíbrio do sistema, CC. Hidráulicas: Dirichlet, como nível constante $h=0$ para a linha da costa N-NW de Perecil; Neumann com vazão nula $Q=0$ disposto na divisória de águas na bacia).
- Distribuição de capas e parâmetros dos materiais (definida em função da agrupação dos materiais nas unidades hidrogeológicas)
- Identificação dos elementos do balance hídrico (referente à área e os processos de recarga e descarga).

5.4.1.

Conceitualização do problema

Como descrito no item 2.2 o modelo conceitual definitivo é elaborado como resultado de algumas hipóteses, descritas a seguir:

Hipótese 1: O regime de fluxo permanente, meio poroso contínuo saturado e aquífero não confinado.

Hipótese 2 a geometria em planta que demarcará o modelo abrange a bacia do arroio 1, como a zona física considerada no Balanço hídrico.

Hipótese 3: O limite do modelo na zona norte da pedreira se estende até a costa considerando o mar como uma condição de contorno de limite (piezometria conhecida).

Hipótese 4: a única fonte de recarga é a precipitação, devido a que medições no campo indicaram que as perdas do rio eram mínimas e desprezíveis. A divisória de águas superficiais coincide com a divisória de águas subterrâneas, e os fluxos subterrâneos entre bacias são, portanto, nulos.

Hipótese 5: baseado em dados geológico, *i.e.*, nos cortes transversais – longitudinais (Figura Anexo 2), a região abrange a forma dos dobramentos do sinclinal/periclinal que se estende até uma profundidade máxima de 800 m na costa e diminui conforme em direção ao interior.

Hipótese 6: Não se levarão em conta estruturas (fraturas) condutoras de fluxo preferenciais. Os materiais implicados na modelagem são considerados meios porosos isotrópicos e homogêneos.

Hipótese 7: A direção principal de drenagem superficial e subterrânea da bacia é para o mar, a exceção da zona da pedreira que constitui por si mesma a zona de drenagem interno facilitado pelos bombeamentos.

Hipótese 8: Apenas as litologias do Triássico do solo estão sendo consideradas no afloramento da zona sul (Unidade Trias, Figura 5.1). Isto significa que nem os xistos, nem os materiais do quaternário de cobertura, como os aluviais e eluviais, estão sendo considerados na superfície do terreno.

5.4.2.

Parâmetros dos materiais

O valor inicial da condutividade hidráulica para cada uma das unidades hidrogeológicas é um parâmetro que não se têm dados nem informação quantitativa. Portanto, partiu-se da recopilação bibliográfica por distintos autores em função das distintas litologias foram recopilados por Díaz como faixas de valores orientados para os diferentes materiais daquela região em estudo. Estas condutividades hidráulicas ainda serão objeto de calibração.

Tabela 5.6 – Valores de condutividade hidráulicas (cm/s) para materiais de acordo com diferentes autores. (Díaz, 2012, adaptado de San Roman, 2008)

		Domenico	Smith & W	Freeze	Fetter	Sanders
Sedimentos	Pedregulho	25 a 2500	100 a 10^5	100 a 10^6	10 a 1000	
	Pedregulho com areia					
	Areia grossa	0.1 a 500	0.01 a 1000	1 a 1000	1 a 100	1 a 100
	Areia média	0.1 a 50			0.01 a 1	
	Areia fina	0.02 a 20			0.01 a 1	
	Areia argilosa			0.01 a 100	0.001 a 0.1	0.01 a 1
	Slite, sedimentos depositados pelo vento	10^{-4} a 2	10^{-4} a 1	10^{-4} a 1	0.001 a 0.1	10^{-4} a 1
	Argila	10^{-6} a $4 \cdot 10^{-4}$	10^{-7} a 10^{-3}		10^{-6} a 10^{-3}	10^{-6} a 10^{-3}
	Argila marinha inalterada	10^{-7} a $2 \cdot 10^{-4}$		10^{-11} a 10^{-7}		
Rochas sedimentares	Calcário carstificado	0.1 a 2000	0.05 a 0.5	0.1 a 1000		0.1 a 10^{-7}
	Calcário, dolomitos	10^{-4} a 0.5	0.001 a 0.5	10^{-4} a 1		10^{-4} a 1
	Arenito	$3 \cdot 10^{-5}$ a 0.5	10^{-5} a 1	10^{-5} a 1		
	Siltito (siltstone)	10^{-6} a 0.001				
	Xisto de origem sedimentar intato	10^{-8} a $2 \cdot 10^{-4}$	10^{-8} a 10^{-4}	10^{-4} a 10^{-8}		10^{-4} a 10^{-8}
	Xisto de origem sedimentar fraturado/alterado		10^{-4} a 1			

5.5. Desenvolvimento do modelo numérico

O modelo conceitual a ser modelado numericamente é conformatado em função das referidas seções transversais e longitudinais (Figura Anexo 2) que indicam o dobramento sinclinal (Figura 5.2). Este processo requereu a ajuda de programas como o Autocad Civil 3D, Google Earth, ArcGis, Excel MO, entre outras ferramentas computacionais que permitiram a importação adequada dos dados para a geração da malha de elementos finitos e relevo da superfície no FEFLOW 6.2. A discretização da malha levou em conta um refinamento horizontal na zona da cava onde é necessário reproduzir resultados com mais precisão, em aqueles lugares onde o contraste de condutividades hidráulicas seja grande para evitar problemas de convergência numérica e em zonas adjacentes aos arroios.

Algumas características importantes do modelo numérico são descritas a seguir:

- Área total do modelo: 10422600 m², cobrindo 100% da bacia.
- Discretização: 1879125 elementos triangulares (células) com 1005488 nós (pontos de interseção das células).
- 17 camadas numéricas distribuídas verticalmente em 7 unidades hidrogeológicas.

O modelo numérico de fluxo no FEFLOW é mostrado na Figura 5.4, e a descrição das camadas hidrogeológicas na Figura 5.5.

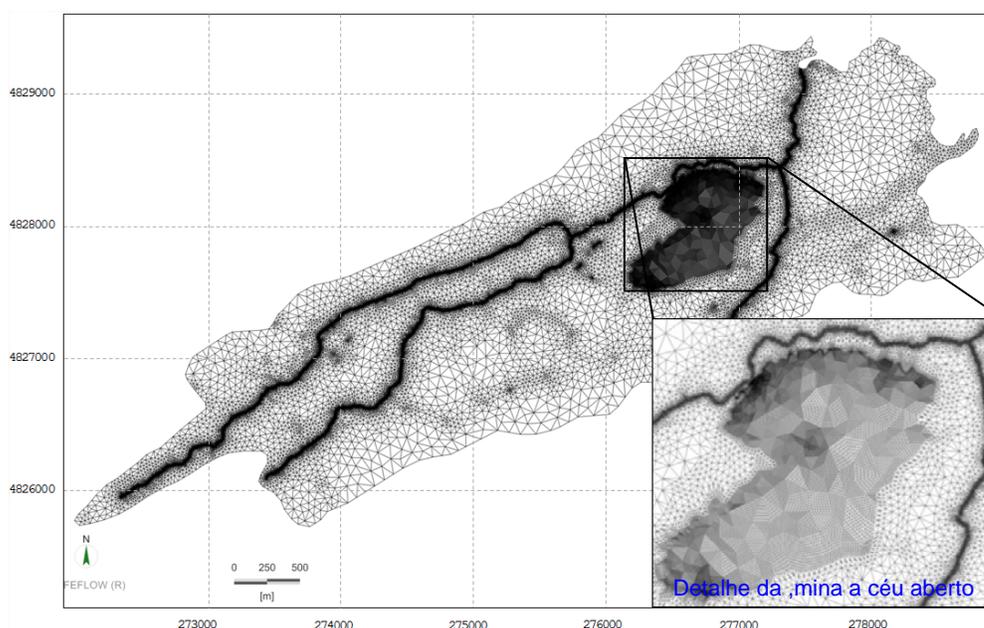


Figura 5.4 – Modelo numérico de fluxo em FEFLOW com a localização da mina a céu aberto (ao ano de 2010).

Cabe ressaltar que as camadas numéricas não foram deformadas em relação às camadas geológicas. Neste caso camadas não-deformáveis foram empregadas tentando-se reproduzir a forma da distribuição geológica.

Na elaboração deste modelo numérico alguns processos deverão ser realizados, os quais serão mais bem descritos nas seguintes seções:

1. Pontos de calibração do modelo.
2. Condições de contorno utilizadas assim como as demais drenagens.
3. Calibração das propriedades hidráulicas das unidades hidrogeológicas

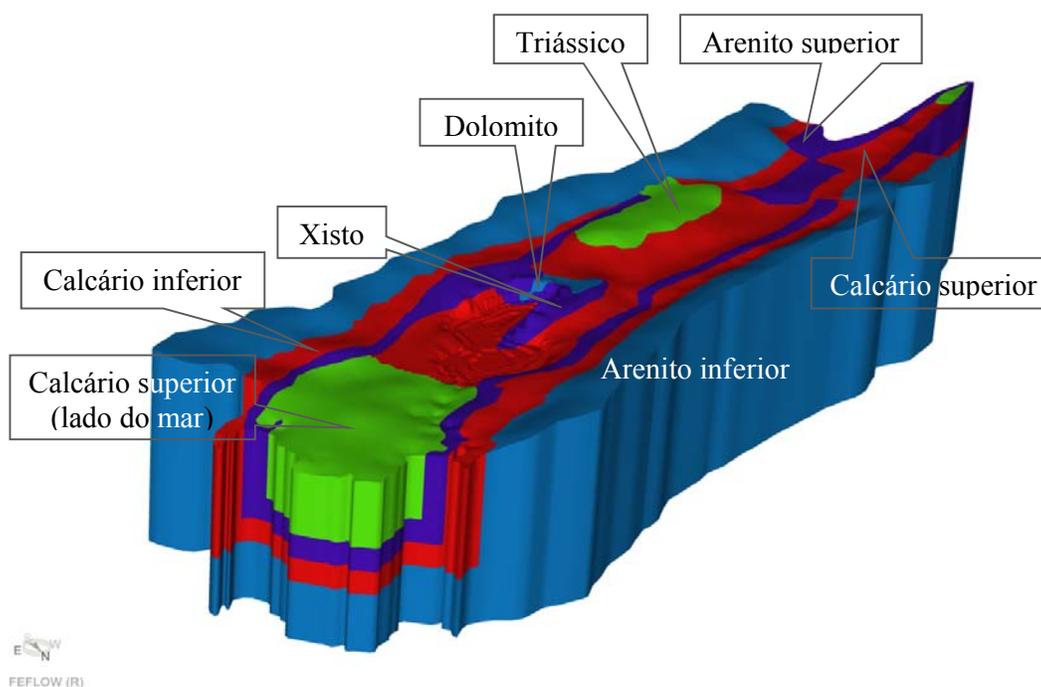


Figura 5.5 - Unidades hidrogeológicas que conformam o modelo numérico no FEFLOW para a mina a céu aberto.

5.5.1. Pontos de calibração do modelo

A diferença do caso da mina subterrânea (Capítulo 4), neste caso de mina a céu aberto não existem dados de monitoramento suficientes que abrangem espacialmente o modelo todo de uma maneira adequada limitando a calibração do modelo aos dados de medições disponíveis. Como parâmetros de controle ficam estabelecidos dois tipos de medições:

1. Leituras piezométricas, situados na unidade hidrogeológica Calcário Superior (Tabela 5.7, Figura 5.2).
2. Registros de vazão de drenagem da cava, calculados a partir de horímetros das bombas, considerado o principal parâmetro de controle (Tabela 5.8). Como referenciado anteriormente, a drenagem na cava é o principal problema da mina. Esta será, portanto, a zona de balanço onde a quantificação das vazões de entrada e saída em toda esta superfície será ainda feita de maneira independente do resto do modelo.

Tabela 5.7 - Poços de medição usados na calibração do modelo – Mina a céu aberto (Díaz, 2012).

Código	Poços de medição	Valor médio de piezometria (m.s.n.m)
1	B-8-3	95
2	C-7-1	83
3	D-7-1	75
4	I-4-1	30
5	L-2-3	3
6	M-2-2	5

Tabela 5.8 – Medições de vazão na cava (Díaz, 2012)

Fluxo	Vazão média (m3/dia)
Vazão de drenagem na cava (maio/2010-abril/2011)	10085

5.5.2. Condições de contorno

Condições de contorno hidráulicas estão sendo atribuídas ao modelo, descritas a seguir e ilustradas na Figura 5.6.

C. C. Tipo 1 ou de *Dirichlet*: com carga hidráulica constante $h=0$, usada na região que limita com o mar.

C.C. Tipo 2 ou de *Neumann*: implica em um fluxo imposto devido à precipitação, pela imposição de uma taxa de chuva apenas no topo do modelo (*layer 1*) onde o programa calculará o fluxo de entrada em cada nó.

Além das condições de contorno imputadas, o programa assume que onde não estão especificadas alguma condição, então este assumirá que esses contornos são impermeáveis, *i.e.*, fluxo igual zero, representando desta forma, as divisórias de águas que definem a bacia.

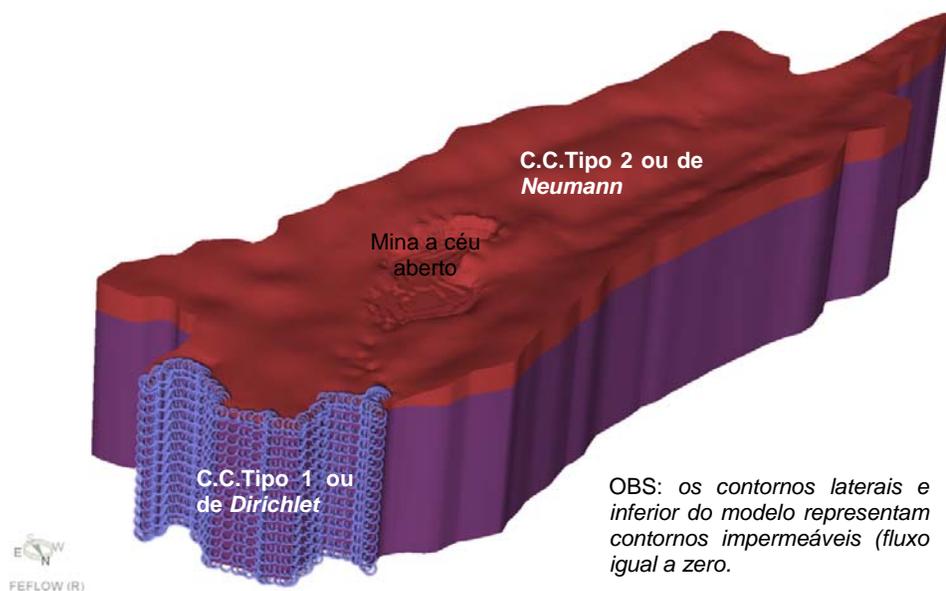


Figura 5.6 - Condições de contorno hidráulicas atribuídas ao modelo numérico.

5.5.3. Calibração do modelo numérico

O processo de calibração do modelo numérico foi efetivado pelo método de Tentativa-e-Erro (item 2.4.1.1) baseados nos dados descritos no item 5.5.1 O processo de calibração estabelece critérios necessários para a avaliação dos seus resultados, correspondentes aos parâmetros de condutividade hidráulica e de recarga. Estes critérios também definem a qualidade da calibração durante seu processo.

5.5.3.1. Avaliação e critérios da calibração

Esta calibração é feita em termos de carga hidráulica, comparando as cargas hidráulicas observadas no campo com as que resultam do modelo numérico conceitual, e ao mesmo tempo, comparando as vazões medidas no campo, durante o período Abril 2010 – Maio 2011, com a vazão de saída na cava calculada, correspondente ao mesmo período.

A avaliação dos resultados da calibração obtidos é feita pelo método estatístico (item 2.4.3.2) ou quantitativo, determinando a faixa de erros pelos métodos Erro Médio (ME), Erro Médio Absoluto (MAE), e Erro da Raiz média

Quadrática (RMS). Esta avaliação é mostrada na Tabela 5.9, que podem ser considerados como satisfatórios dentro da faixa trabalhada.

O erro associado à calibração para as piezometrias fica estabelecido em função dos dados disponíveis e da fiabilidade destas, situando em um valor de 3m entre os valores simulados e os valores médios. Este valor é estimado na base das flutuações observadas nas medições dos poços.

O erro associado ao valor da calibração da vazão que drena para a cava da pedreira em relação aos valores reais se estabelece em um 5% estimado a partir das margens do erro suposto nas medições das bombas.

De acordo com os resultados obtidos (Tabela 5.9), estes valores estão dentro da faixa recomendada, *i.e.*, os erros RMSE, MAE e ME calculados para este estudo devem estar na faixa de ± 3 m, e 5% de erro na vazão de saída na cava.

Tabela 5.9 - Resultado da avaliação estatística para carga hidráulica e vazão de saída na cava

	Resultados
RMSE - The Root Mean Squared Error (m)	2,76
MAE - The mean Absolute Error (m)	2,36
ME - The mean Error (m)	-0,05
Discrepância de vazões (m ³ /h)	2,75%

Na Figura 5.7 é apresentada a comparação gráfica das cargas hidráulicas calculadas com as medidas no campo, para os 6 pontos de controle **1**: (B-8-3), **2**:(C-7-1), **3**:(D-7-1), **4**: (I-4-1), **5**: (L-2-3) e **6**: (M-2-2), onde os números do **1** - **6** representam os códigos dos pontos de controle. A partir destes resultados pode-se observar uma tênue diferença entre ambos os valores de cargas (calculadas e monitoradas). Os residuais obtidos (diferença entre níveis observado e simulado) varina entre 0,4m e 3,84m.

O coeficiente de correlação R (item 2.4.3.2) e o coeficiente de determinação R² foram também verificados, baseados na média e no desvio padrão das cargas hidráulicas calculadas e medidas. Em modelos hidrogeológicos um modelo é considerado calibrado quando o coeficiente de correlação é no mínimo de 0,95, Na Figura 5.8 se apresenta os resultados da calibração em termos de R², resultando em um valor de R de 0,998.

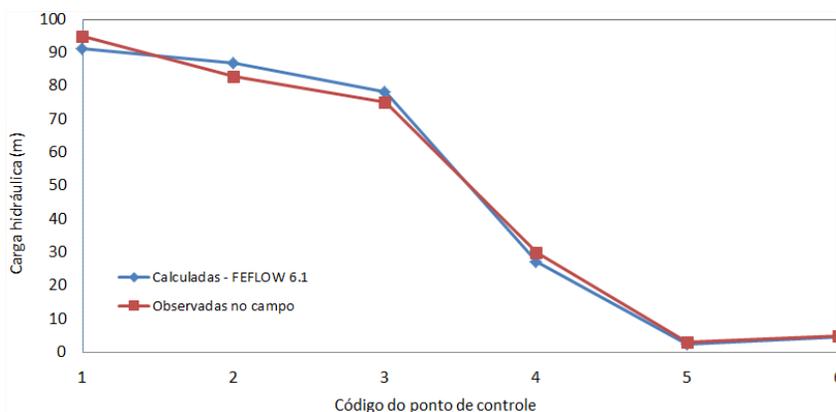


Figura 5.7 - Comparação das cargas hidráulicas calculadas e registradas no campo

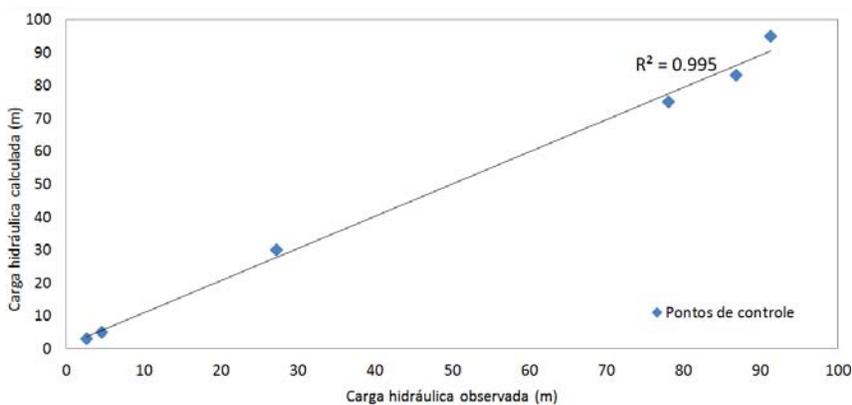


Figura 5.8 – Ajuste das cargas hidráulicas calculadas e registradas no campo

5.5.3.2. Resultados da calibração

Os valores da calibração da condutividade hidráulica, k , resultantes para unidades hidrogeológicas (Figura 5.5) estão sendo apresentados na Tabela 5.10. Estes dados foram baseados inicialmente nas referências bibliográficas (Tabela 5.6). Os valores de rendimento específico, S_y , necessários para as análises transientes foram retiradas da literatura, de acordo com Custódio & Llamas (1976).

Tabela 5.10 - Propriedades hidráulicas das diferentes unidades hidrogeológicas do modelo numérico

Unidade	k (m/s)	S_y
Calcário Superior (zona pedreira – mar)	1,16E-06	0,005
Calcário Superior	1,16E-05	0,005
Calcário Inferior	1,16E-05	0,005
Arenito Superior	1,16E-08	0,10
Arenito Inferior	1,16E-07	0,10
Triássico	1,16E-06	0,15
Dolomito	1,16E-07	0,01
Sucessão Turbidítica	1,16E-08	0,10

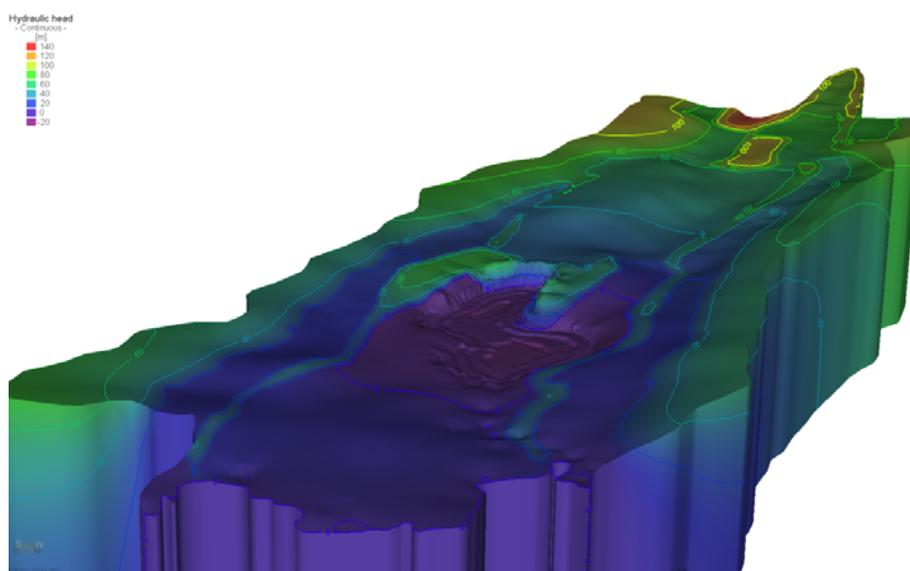


Figura 5.9 - Superfície potenciométrica simulada para a mina a céu aberto.

A Tabela 5.11 mostra o balanço de massa obtido para a mina. A Figura 5.9 mostra a superfície potenciométrica simulada.

Tabela 5.11 – Balanço de massa para a mina a céu aberto.

Entrada	m3/h	Saída	m3/h
Recarga	512,83	Mar	108,82
Mar	1,31	Mina	405,31
Total	514,14	Total	514,13

5.5.4. Análise de sensibilidade

Como resultado da análise de sensibilidade foram obtidas faixas de valores possíveis para a condutividade hidráulica de cada unidade hidrogeológicas

levando em conta os erros permissíveis tanto para os resultados das cargas hidráulicas quanto para as vazões de saída na pedreira.

Nos resultados mostrados na Tabela 5.12 estão sendo mostradas as faixas de condutividades, onde o calcário superior mostra-se ser um parâmetro muito sensível revelando-se na curta faixa de variação em comparação com as outras unidades hidrogeológicas, que diferem em até uma ordem de grandeza.

Tabela 5.12 – Balanço de massa para a mina a céu aberto.

Unidade	Faixa condutividades hidráulicas (m/s)
Calcário Superior (zona canteira – mar)	4,6E-07 - 1,4E-06
Calcário Superior	8,1E-06 - 1,4E-05
Calcário Inferior	4,6E-06 - 1,9E-05
Arenito Superior	4,62E-09 - 1,5E-08
Arenito Inferior	4,6E-08 - 1,9E-07

5.6. Condição hidráulica da mina

Uma vez que o modelo foi calibrado este será usado para avaliar a condição hidráulica da mina, isto é, sua dinâmica de fluxo, principalmente na região da cava onde foi observado no campo a ocorrência de infiltração e inundação de um volume de água a ser bombeado (405,31 m³/h).

Das Figura 5.10 e Figura 5.11 verifica-se a condição de inundação na cava e a posição do lençol freático na bacia (linha branca), resultado das condições de contorno do domínio que indicam fluxos convergentes e divergentes no modelo (Figura 5.12). Na Figura 5.11 aprecia-se com maior detalhe a superfície de afloramento¹⁴ na cava, onde as bolinhas de diferentes cores indicam as diferentes intensidades do fluxo de percolação.

¹⁴ Onde a carga hidráulica superou a de elevação do terreno.

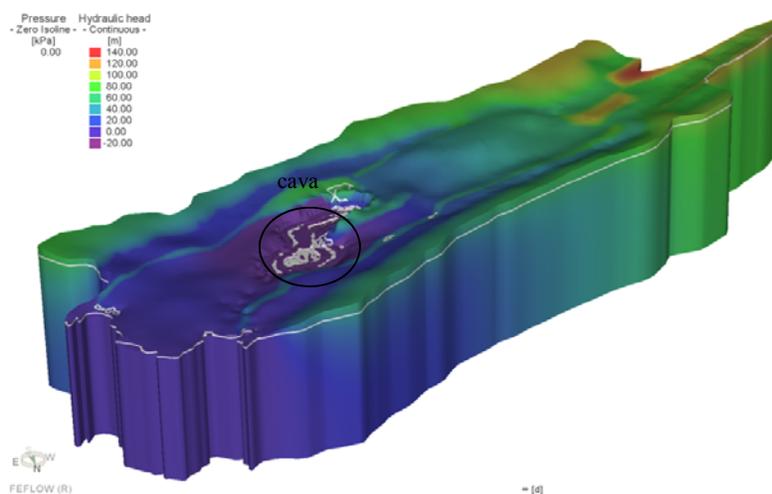


Figura 5.10 - Superfície do lençol freático na mina e no domínio e a condição de inundação na cava da mina.

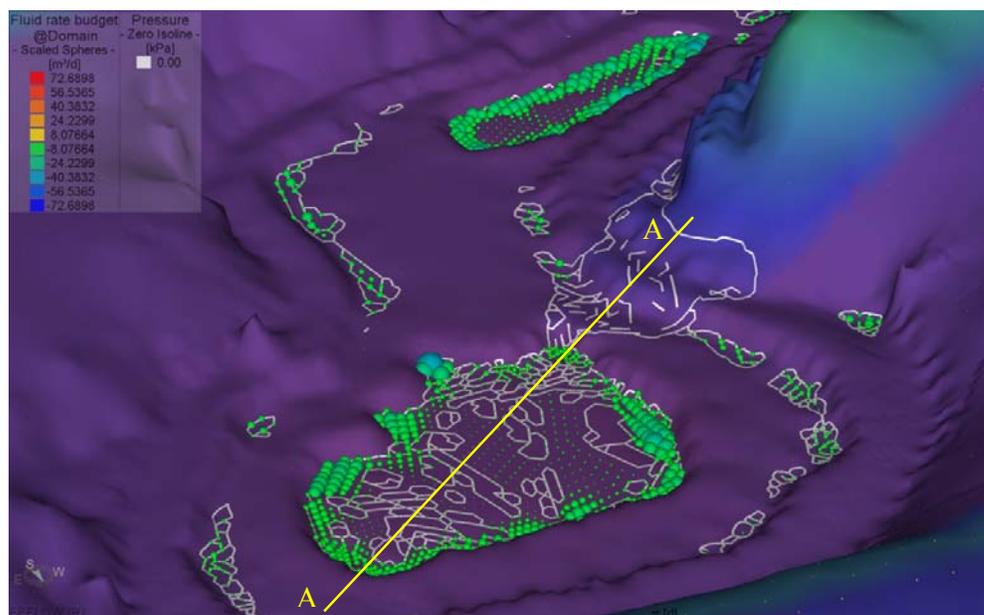


Figura 5.11 – Superfície de afloramento do lençol freático e distribuição de volumes de água na cava da mina.

Na Figura 5.11 observa-se as zonas onde a superfície freática intersecta a superfície do terreno, produzindo, desta forma, o afloramento da água na cava. O FEFLOW para este caso apresenta uma opção essencial para lidar com este tipo de problemas de drenagem nas minas a céu aberto. Trata-se da configuração de restrições ao comportamento da superfície freática. Quando o FEFLOW detecta os

nós onde os níveis piezométricos ascendem alcançando a cota da superfície do terreno, neste caso, o FEFLOW configura nestes nós uma condição do tipo Dirichlet que tira a água correspondente ao modelo e impede que os níveis ascendam por cima de dita cota. Quando o FEFLOW detecta que os níveis nestes nós voltam a descer por baixo da cota da superfície, aparece uma restrição de contorno tipo Neumann com vazão de entrada nula, que impede que a condição de Dirichlet se comporte como uma fonte de água introduzindo água demais no modelo.

A Figura 5.12 mostra a direção que o fluxo segue em direção à cava, representado aqui por meio das linhas de fluxo, indicando como a cava ocasiona fluxos radiais convergentes. Outra característica é a presença de fluxo ascendente observado tanto na intensidade e direção das linhas de fluxo quanto no perfil piezométrico da seção A-A (Figura 5.13).

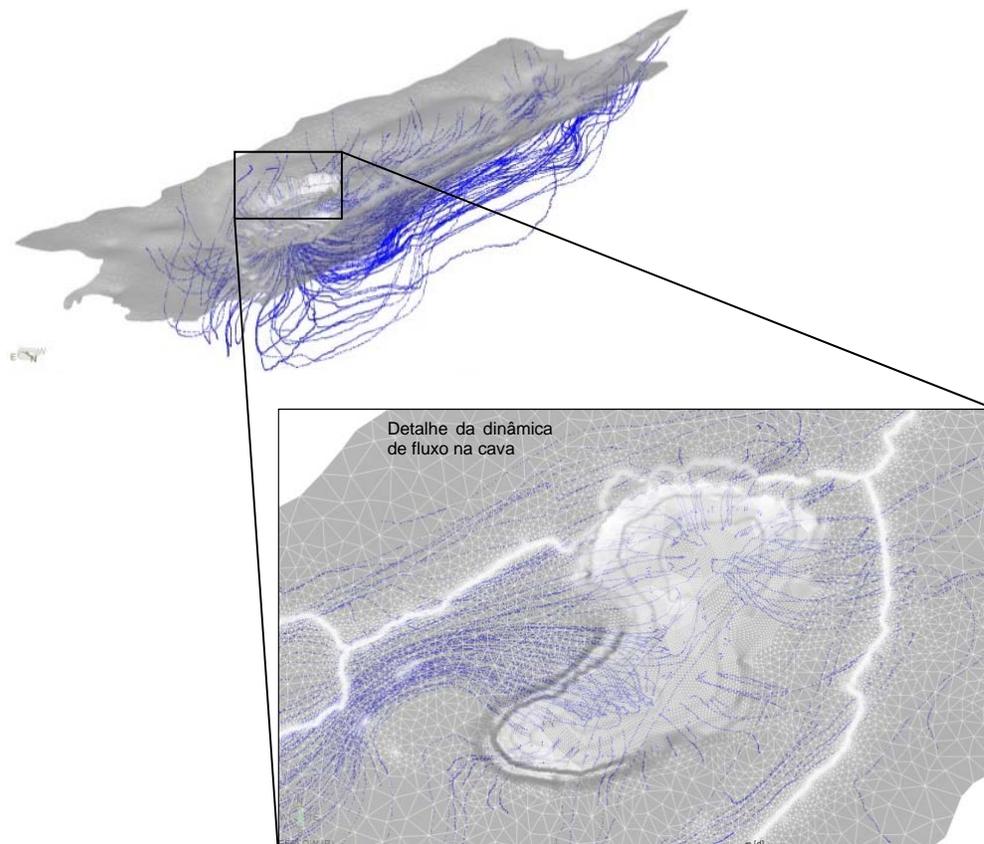


Figura 5.12 – Linhas de fluxo que indicam o caminho que a água segue em direção à cava da mina

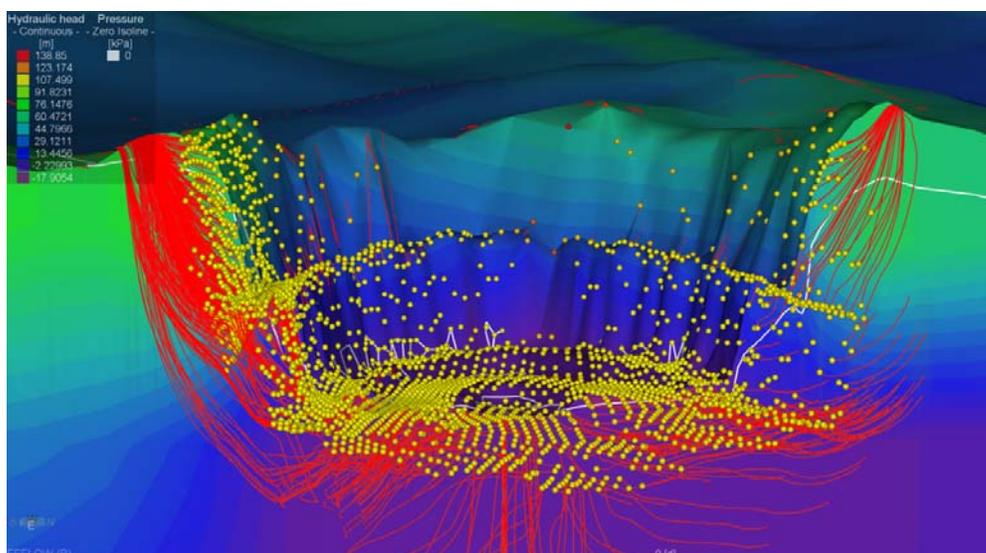


Figura 5.13 – Seção A-A : Perfil piezométrico e linhas de fluxo em direção à cava

5.7.

Avaliação das técnicas de controle das águas – cenários de simulação

Atualmente esta mina é mantida em condições de trabalho pela implementação de valas perimetrais, valas internas e bombeamento dessas águas para fora da cava, que tem mostrado não serem muito eficiente já que por temporadas a mina tem paralisado por causa de inundações superficiais, em especial, quando chove com certo grau de intensidade. Devido à condição de fluxo da pedreira, em particular, na cava, algumas técnicas de controle das águas são necessárias e recomendadas de serem executadas no campo.

Neste trabalho se simularão alguns arranjos de fluxo pela aplicação de técnicas de controle de águas com a possibilidade de implementação no campo. Estes arranjos envolvem o uso de diferentes técnicas (item 3.5) agrupadas para um melhor desempenho dependendo do requerimento da região em análise. Devido a que todo o processo de teste não poderá ser mostrado, apenas os resultados mais importantes estão sendo, a continuação, discutidos.

5.7.1.

Arranjo 1: Poços de bombeamento

Neste primeiro arranjo, diferentes distribuições de poços de bombeamento no interior da cava estão sendo estudados para avaliar o comportamento e

dinâmica do fluxo principalmente nesta região da mina. Para isto, um fator importante e conhecido é a quantidade de água que está sendo exfiltrada à cava, de aproximadamente, 405,31 m³/h (9727,44 m³/dia). Esta vazão será o valor objetivo para o qual diferentes distribuições e potências de poços serão projetadas, levando em conta que as suas capacidades atingiam ou ultrapassem o valor de exfiltração. Duas verificações estão sendo realizadas:

- A. Quando a soma das capacidades dos poços distribuídos no interior da cava apenas atingem a vazão de exfiltração; deixando a superfície da cava praticamente sem água, e,
- B. Quando a soma das capacidades dos poços distribuídos na cava é maior do que a vazão de exfiltração; que além de deixar a cava sem água, a deixa em condições de trabalhabilidade em segurança, devido ao cone de rebaixamento gerado pelos poços implementados na região.

O diâmetro dos poços para os diferentes projetos é mantido em 0,35 m, como recomendado por Powers *et al.*, 2007. De acordo com o autor o único efeito do incremento do diâmetro do poço seria gerar maiores perdas de cargas no interior deste, mas, estas diferenças de perdas de cargas são quase desprezíveis na faixa de diâmetros que se trabalha no campo, portanto, não justifica trabalhar com diâmetros maiores. De acordo com o verificado na bibliografia, o diâmetro escolhido de 0,35 m é de prática corrente neste tipo de trabalhos.

Opção (A): Capacidade de poços \leq exfiltração

Quando a capacidade dos poços é menor do que a exfiltração na cava, indica que estes foram projetados para (ou só conseguirão) desaguar as águas superficiais de afloramento geradas na cava, logo a distribuição de poços usados na região trabalharia como um sistema de bombeamento superficial.

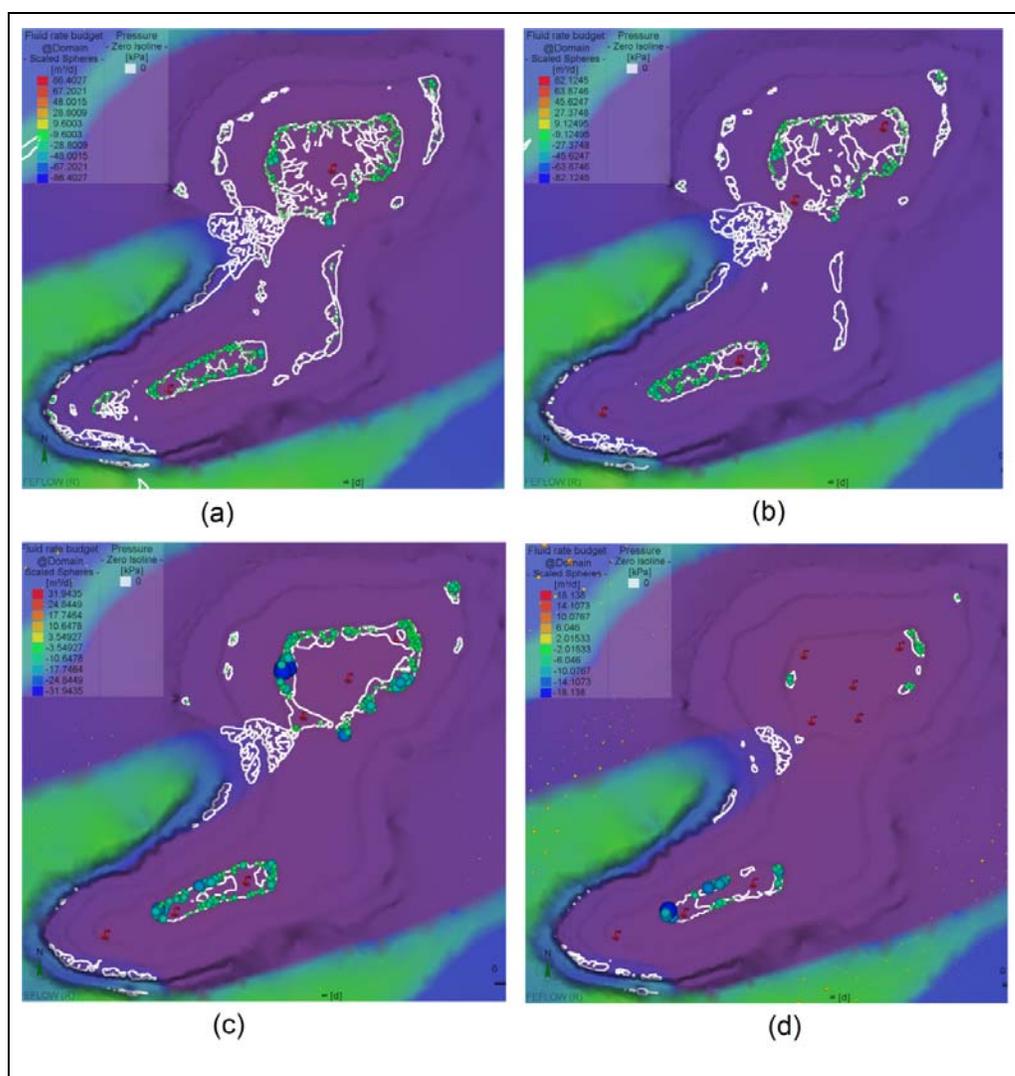


Figura 5.14 – Arranjo 1 - Opção (A): Vistas em planta da cava da pedraira para diferentes números de poços de idênticas profundidades e capacidades: a) 2 poços; b) 4 poços; c) 6 poços e d) 8 poços.

Esta primeira verificação pretende mostrar a diferença do fluxo superficial modificado na cava da pedraira como resposta aos sistemas de poços incorporados na cava, os quais consistem de diferentes números de poços (com profundidade dos poços de 85 m) de idênticas capacidades. Quatro arranjos [(2 poços de 50 m³/h); (4 poços de 50 m³/h); (6 poços de 50 m³/h); (8 poços de 50 m³/h)] estão sendo verificados. Esta análise foi feita em condições de fluxo permanente já que o intuito é de verificar a condição final da cava sob a influência destes arranjos.

A partir da Figura 5.14 verifica-se as diferenças na água acumulada na superfície da cava. Note que as legendas dos arranjos indicam as taxas de fluxo contidas na cava, as quais variam de acordo com o número de poços projetados.

Estes arranjos indicam que quanto maior número de poços distribuídos na cava, maior é a área desaguada. Este processo mesmo que pareça lógico pretende também validar a funcionalidade do sistema de fluxo numérico.

Opção (B): Capacidade de poços > exfiltração

Quando a capacidade dos poços é maior do que a exfiltração na cava, os poços projetados desaguam tanto as águas superficiais de afloramento quanto as águas subterrâneas (aquífero), isto é, a água percolada na superfície mais o rebaixamento do lençol freático. Logo, a distribuição de poços usada na região trabalharia como um sistema de bombeamento profundo, ideal para trabalhos de mineração por conseguir diminuir o lençol freático alguns metros abaixo a partir da base da cava (-17 NMM – profundidade máxima), ideal para garantir condições de segurança dentro da cava.

A incorporação de poços de bombeamento está distribuída no interior e exterior da cava da mina. Um único arranjo de distribuição está sendo aqui discutido, a pesar das várias tentativas de arranjos feitas dentro das recomendações aplicáveis na mineração, que sugere uma profundidade de rebaixamento do lençol freático média de 4m por ano. Este arranjo é mostrado em planta na Figura 5.15.

Nesta opção, a distribuição de poços interiores corresponde ao arranjo de 8 poços da opção (A), e foram adicionados poços de bombeamento exteriores à cava (no perímetro) [2 poços de 85 m de profundidade e 62,5 m³/h de capacidade] para poder captar as águas e rebaixar o lençol freático vindo dos taludes da cava. Mesmo que a capacidade total do sistema de rebaixamento seja maior do que a exfiltração na cava, os resultados aos 730 dias indicaram que existiram ainda pequenas exfiltrações nos taludes (condutividades hidráulicas na faixa de 10E-8 a 10E-08 m/s) sul oeste e oeste da cava, devido a que estes não conseguiram drenar nesse tempo, como indicado na Figura 5.15.

Três seções (A-A, B-B e C-C) foram escolhidas para verificação dos resultados da incorporação do sistema de poços, das quais a seção A-A é a mais crítica por apresentar maiores gradientes e, portanto, maiores exfiltrações na cava, previamente verificados nas análises de fluxo (item 5.6). A evolução no tempo do

rebaixamento do lençol freático (análise de fluxo transiente) para esta seção é apresentada na Figura 5.16. O rebaixamento do lençol freático nas seções A-A, B-B e C-C é apenas representado na condição $t \rightarrow \infty$ (Figura 5.17).

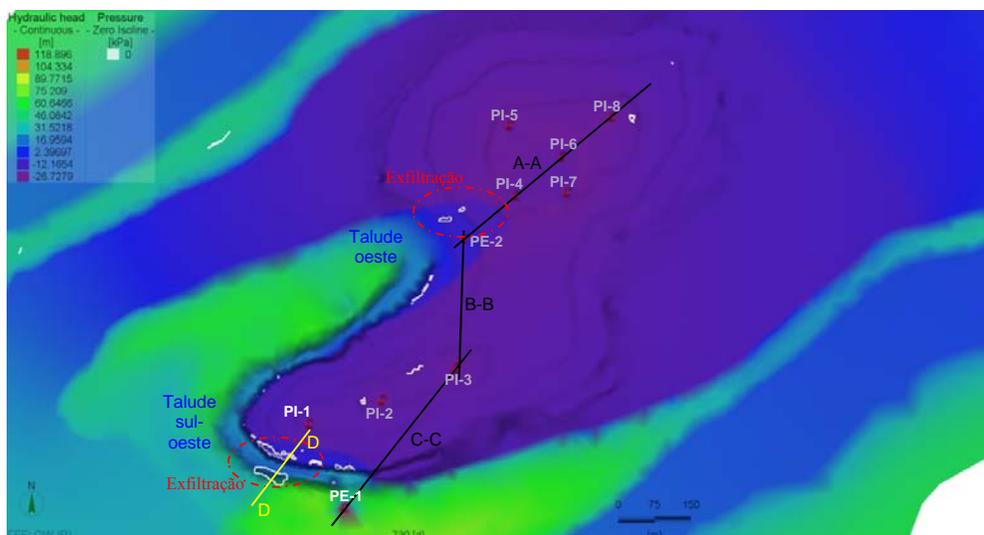


Figura 5.15 – Arranjo 1 - Opção (B): Vista em planta da localização de um sistema com poços internos e externos à cava indicando a potenciométrica resultante no tempo $t \rightarrow \infty$ na região da cava. Localização das seções A-A, B-B e C-C

Da Figura 5.16 é possível observar a evolução do lençol freático com o tempo e da sua potenciométrica. Cabe a pena lembrar que o FEFLOW trabalha com uma pseudo-não saturação para calcular a superfície freática (item 2.3.4.1), mostrando resultados irrealis de zona não saturada (valores de sucção). Nesse sentido as cargas hidráulicas mostradas acima do lençol freático deverão ser desconsideradas para todos os casos. Do resultado da análise transiente verifica-se que apenas 50 dias seriam necessários para conseguir eliminar a superfície de afloramento na base da cava e aproximadamente 360 dias seriam necessários para atingir no mínimo 4 metros de profundidade de rebaixamento do lençol freático desde a base da cava, a partir da projeção de um sistema como este. Concluindo-se que este sistema funcionaria de forma ideal de acordo com a distribuição, profundidades e capacidades dos poços de bombeamento projetadas.

A Figura 5.17 mostra um corte vertical 3D (abrangendo as seções A-A, B-B e C-C) que atravessa a maior quantidade de poços possíveis, na qual se observa a

superfície do lençol freático embaixo do nível do terreno para o tempo infinito, indicando a eficiência deste arranjo projetado.

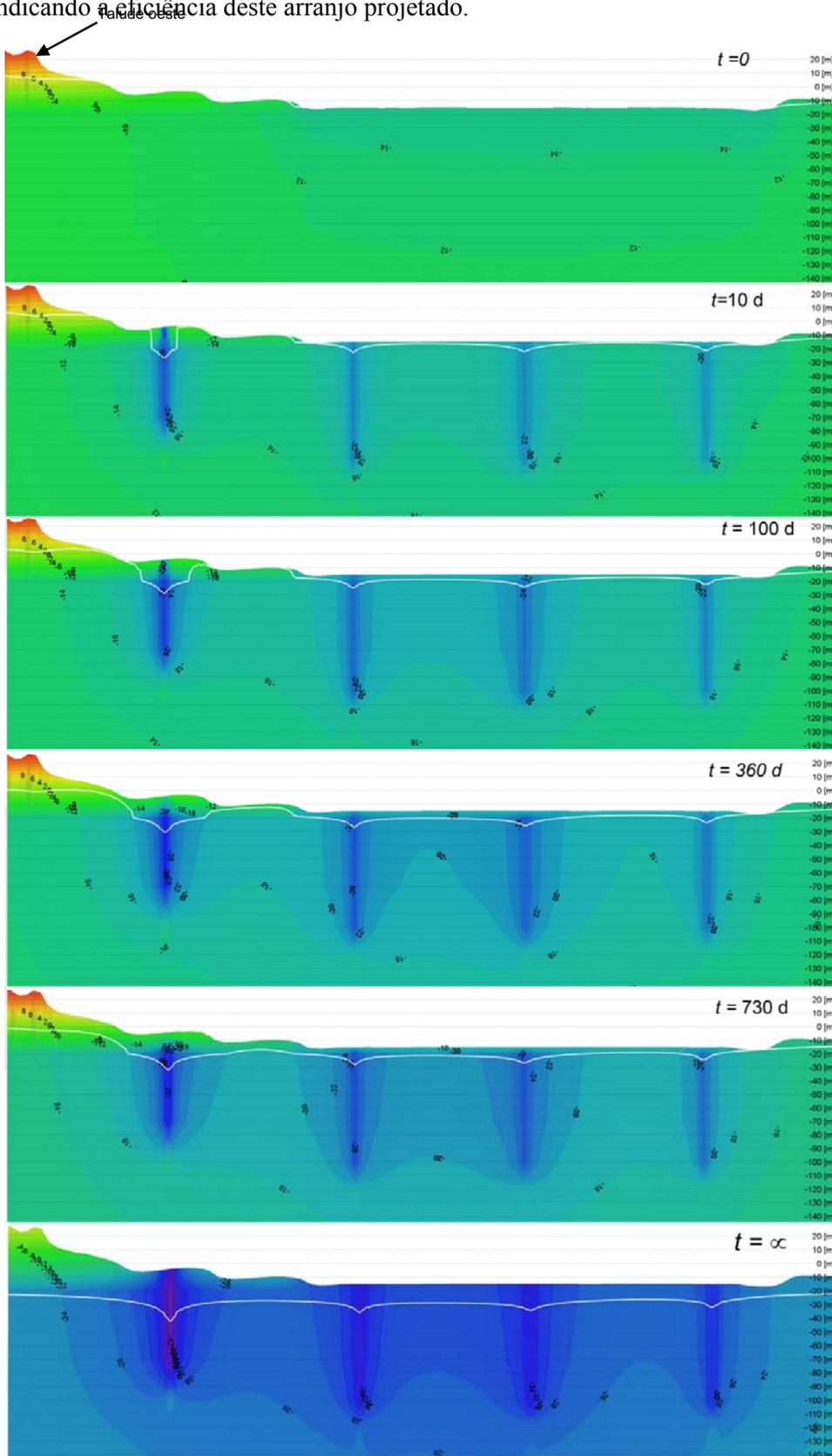


Figura 5.16 – Arranjo 1: Vista em corte vertical da Seção A-A indicando a superfície potenciométrica e o rebaixamento do lençol freático atingido devido ao funcionamento dos poços para diferentes tempos da análise transiente.

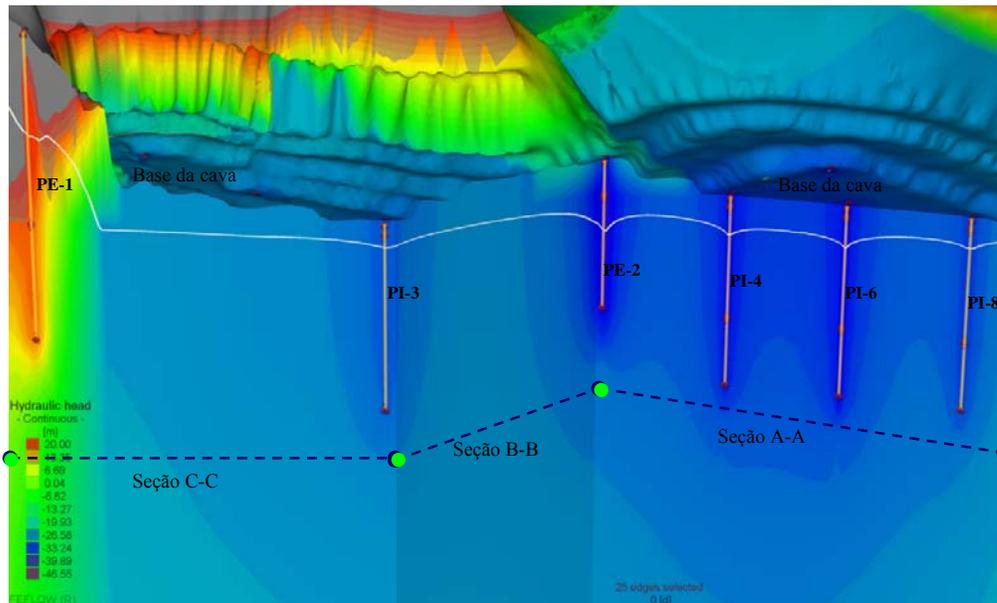


Figura 5.17 – Arranjo 1: Vista em corte vertical das seções A-A, B-B e C-C indicando a superfície potenciométrica no tempo $t = \infty$ no interior da cava devido à implementação dos poços de bombeamento.

5.7.2.

Arranjo 2: Paredes *cut-off*

Uma alternativa de projeto de controle das águas é usar paredes *cut-off* em lugares específicos onde exfiltrações localizadas devem ser reduzidas. A Figura 5.18 mostra a condição de exfiltração nos taludes sul-oeste e oeste da cava para o tempo $t=0$ (modelo calibrado sem nenhum sistema de controle das águas). Neste arranjo, paredes *cut-off* foram dispostas nesse talude (Seção D-D) para verificar o comportamento do fluxo e o possível controle da exfiltração nesta região, sem a influência de qualquer outra técnica. Nesse contexto, duas paredes de 0,4m de espessura e profundidades de 55 m (PCO-1) e 30m (PCO-2) foram incorporadas. O dimensionamento destas paredes está dentro do recomendado na literatura, que sugere profundidades de até 70m (item 3.5.2.1).

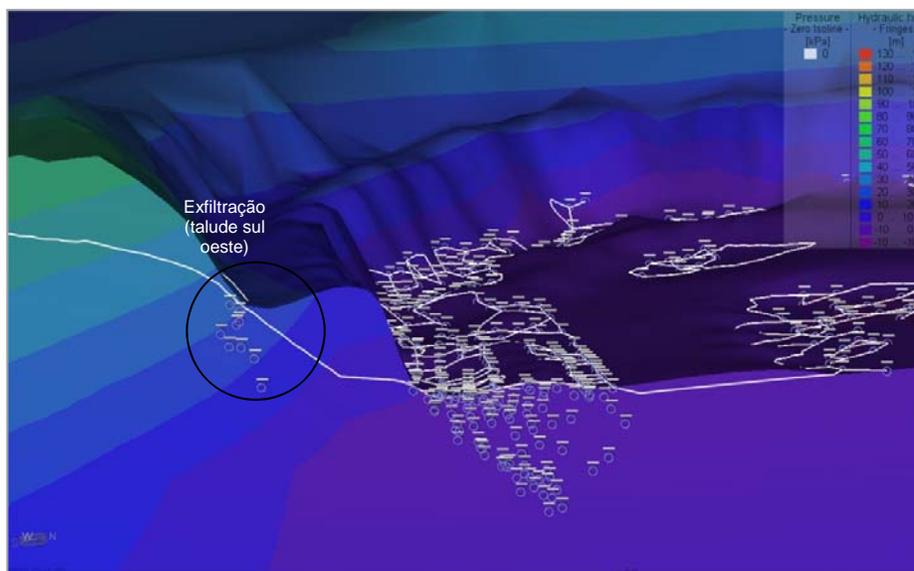


Figura 5.18 – Condição de exfiltração no talude sul oeste representado pela condição de contorno tipo 1 sem a incorporação de técnicas de controle das águas.

A Figura 5.20 apresenta a seção D-D na que se pode apreciar a evolução no tempo do rebaixamento do lençol freático provocado pela implementação das paredes no talude sul oeste circunjacente à cava. Esta análise de fluxo foi elaborada para um modelo bidimensional gerada com base no método de Sub-escala já que uma completa simulação do modelo 3D resultaria excessivo e demorado demais para o que seria um problema localizado e tratando-se de uma análise de fluxo transiente, além do problema da discretização da malha, que não favorece a implementação destes elementos, e que o FEFLOW não permite incorporar elementos discretos cuja condutividade for menor do que o meio poroso.

De acordo com Mandeci & Guven (2006), métodos de sub-escala¹⁵ são normalmente utilizados para obter resultados mais exatos em uma região específica de certos domínios, onde o modelo global proporciona as condições de contorno necessárias para realiza a transferência de informação de interesse no submodelo. O modelo global utiliza uma malha grosseira para minimizar custos computacionais, enquanto que o submodelo possui uma malha mais refinada

¹⁵ Na literatura têm sido reportadas aplicações desta técnica para diferentes propósitos, sobretudo para problemas de tensão-deformação baseados no método dos elementos finitos (Martinez A, 2000).

visando melhorar a exatidão e capturar efeitos de escala local. Este método de sub-escala consegue resultados precisos e sobre tudo mais rápidos.

No presente arranjo os procedimento e critérios do método de sub-escala foram usados, baseados na analogia da variável primária, neste caso, para poder transmitir a informação do modelo global (potenciometria) de fluxo tridimensional para o bidimensional (modelo local). Esta seção bidimensional permite analisar com maior detalhe as regiões de exfiltração e realizar análises transientes partindo de uma condição potenciométrica inicial, a qual cópia valores de carga hidráulicas determinados nos nós do modelo 3D, inserindo-os no modelo 2D como condições de contorno, com a finalidade de reproduzir o mesmo comportamento na dinâmica de fluxo.

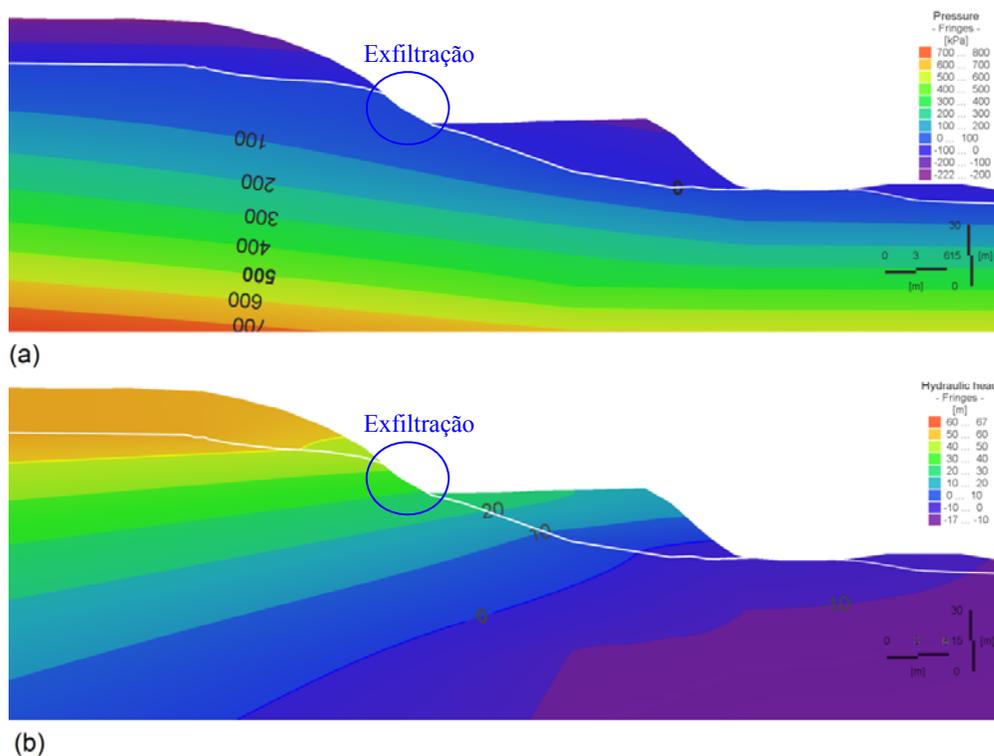


Figura 5.19 – Arranjo 2: Condição inicial para a análise de fluxo bidimensional na seção D-D (a) referente às cargas de pressão e (b) referente às cargas hidráulicas.

A partir dos resultados da análise verificam-se distribuições de cargas de pressão negativas (acima do lençol freático) (Figura 5.19) indicam a região de pseudo-não saturação (configuração do FEFLOW para o cálculo da linha freática).

Devido a que esta região de pseudo-não saturação pode causar confusão no momento de avaliar os resultados do arranjo, aqui estas cargas estão sendo limitadas ao valor de zero nas análises de fluxo transiente (Figura 5.20) para poder apreciar os diferentes níveis do lençol freático ao longo do tempo nos taludes, geradas por estas paredes *cut-off*.

De acordo como o observado na Figura 5.20, o rebaixamento conseguido neste arranjo é maior do que no caso do arranjo 1 (poços de bombeamento) devido a que as paredes *cut-off* estão sendo instaladas em uma zona de exfiltração específica (região delimitada em vermelho na Figura 5.19b) onde foi verificado que os poços de bombeamento não conseguiram rebaixar completamente. Contudo, devido às características do material geológico, o rebaixamento ainda é baixo do esperado neste tipo de projetos.

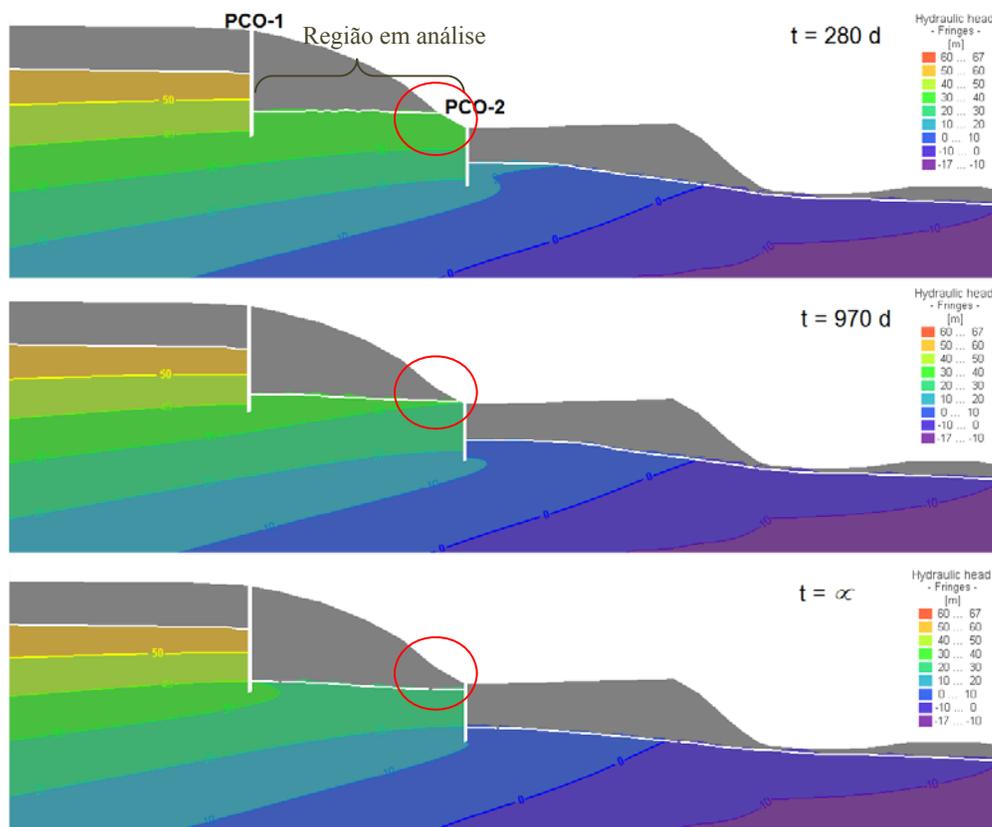


Figura 5.20 – Arranjo 2: Análise de fluxo transiente (seção D-D) indicando a evolução do lençol freático devido à incorporação das paredes *cut-off*

Este rebaixamento do lençol freático atingido foi de aproximadamente 4m nos primeiros 280 dias, atingindo praticamente os 12 m ainda nos 970 dias. Estes resultados indicam que as paredes *cut-off* (PCO-1 e PCO-2) mostraram resultados favoráveis a partir do 3 ano (970 dias) de terem sido instaladas. Esse comportamento de fluxo é devido à baixa condutividade hidráulicas, causado pelas características hidrogeológicas dos materiais, neste caso, o Dolomito, cuja condutividade hidráulica está na faixa de $1,16 \text{ E-}07 \text{ m/s}$ (Tabela 5.10).

Portanto, nesta avaliação conclui-se que as paredes *cut-off* além de ser uma das técnicas de controle de água mais caras de serem implementadas, estas não se mostram muito eficiente quando construídas em materiais de baixa permeabilidade, sendo recomendado em materiais mais permeáveis por conseguir respostas mais favoráveis em menor tempo. Porém, seu uso não é descartado quando se requer que efeitos do rebaixamento não atingiam fontes naturais de águas superficiais localizadas próximas à região em análise sendo que estas fontes poderiam se secar diante de um potencial rebaixamento do lençol freático.

5.7.3.

Arranjo 3: Ponteiras filtrantes, drenos horizontais e poços de bombeamento

Neste arranjo a instalação e eficiência de um conjunto de técnicas de controle de água, específico para tratar a exfiltração em um dos taludes é aqui verificada.

A partir dos resultados do arranjo 1 (item 5.7.1), relativo à instalação de poços de bombeamento, verificou-se que o nível piezométrico na cava foi diminuído, porém mantendo uma exfiltração localizada nos taludes sul-oeste e oeste (Figura 5.15). Neste arranjo este problema de exfiltração é abordado mais especificamente para o talude sul-oeste, como indicado na Figura 5.21, pela implementação de um sistema de drenos horizontais e de ponteiras filtrantes instalados nesta região (Figura 5.22), com o objetivo de complementar o sistema de bombeamento.

Este sistema de drenos horizontais e ponteiras filtrantes foram dispostos em torno da área de exfiltração (Figura 5.22) para mostrar como o sistema responderia, a partir da implementação deste arranjo, na condição do talude. Estes drenos e ponteiras foram representados por elementos discretos 1D (Lei de

Darcy), do tipo *Arbitrary node*. Quatro drenos horizontais foram colocados separados cada 20m, de 60m comprimento e 0,12m de diâmetro. No caso das ponteiros filtrantes, em um total de 40, foram dispostos circundando o talude sul-oeste da cava, um nível abaixo dos drenos horizontais, como indicado na Figura 5.22, distanciadas cada 4-5m, com comprimentos verticais de 10-12m e diâmetro de 0,10m.

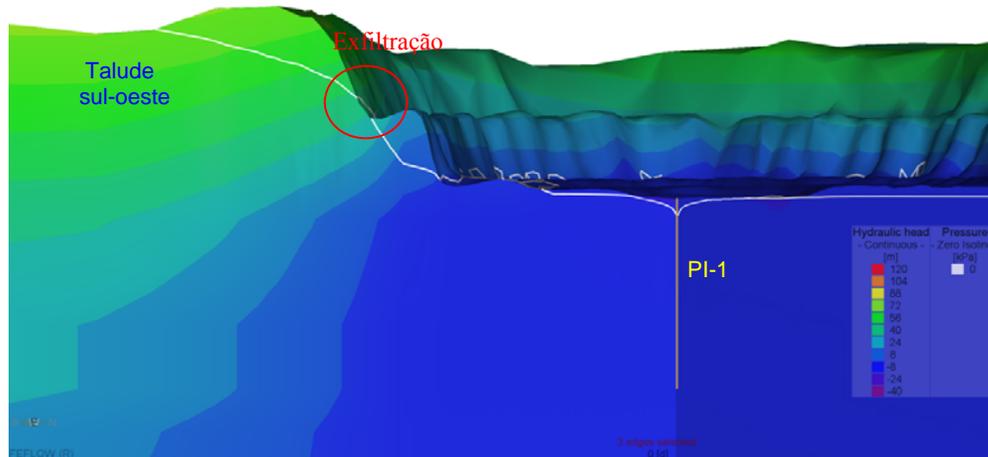


Figura 5.21 – Seção D-D: Exfiltração no talude sul-oeste, resultado do Arranjo 1.

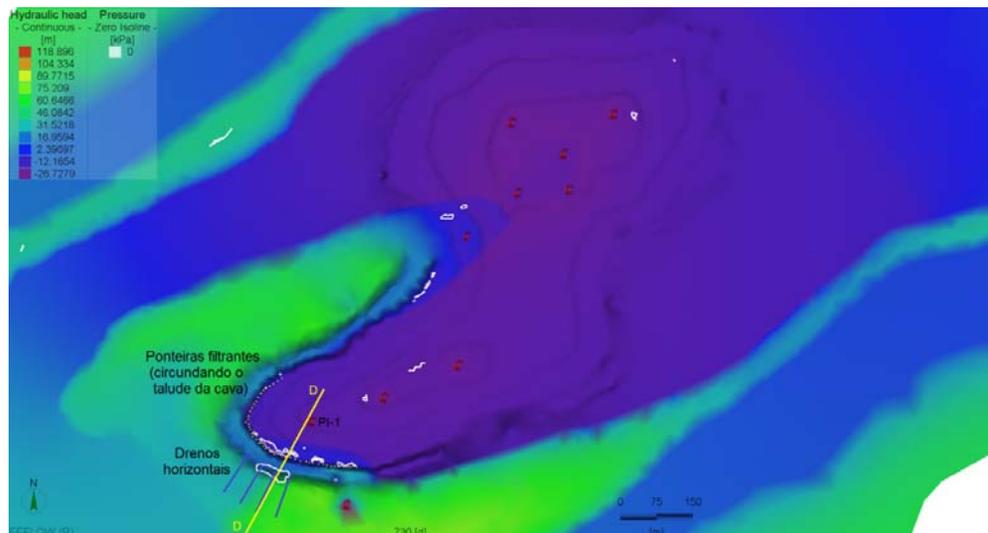


Figura 5.22 - Disposição dos drenos horizontais e ponteiros filtrantes a ser implementado no talude sul-oeste de exfiltração (seção D-D) a ser analisado no Arranjo 3.

O sistema drenos-ponteiras filtrantes e poços, cujos resultados estão sendo mostrados para a seção D-D, apresentaram-se favoráveis, apontando a uma melhora significativa (ou total eliminação) da exfiltração neste talude. Os resultados podem ser verificados aqui para diferentes tempos na análise transiente, $t=10d$ (Figura 5.23), $t=50d$ (Figura 5.24), $t=100d$ (Figura 5.25) e $t=360d$ (Figura 5.26), onde as figuras (a) representam a evolução do fluxo apenas com os poços de bombeamento e as figuras (b) e (c) os sistema de poços de bombeamento em conjunto com o sistema de drenos horizontais e ponteiras filtrantes. Estes casos (b) e (c) estão sendo avaliados a seguir para encontrar a melhor forma de representação dos drenos horizontais em um modelo numérico.

Após a avaliação dos resultados foi observado o funcionamento dos elementos discretos que representam os drenos horizontais, onde o comportamento do fluxo não estaria correspondendo para o caso (b) como os esperados nos campo, devido a que os drenos horizontais simulados nas figuras (b) são representados por elementos *Arbitrary node* que apenas atuam nos nós iniciais e finais, além de trabalhar como tubos fechados que só permitem fluxos de entrada e saída nesses dois pontos do elemento (Figura 4.13). Portanto, este tipo de elemento foi modificado para o tipo *Edge Slice*, simulados nas figuras (c), que atuam nas bordas dos elementos, atuando como um elemento de alta condutividade ao longo do seu comprimento (Figura 4.13), além do que este consegue conectar uma maior quantidade de nós desde o início até o final, mostrando uma melhor adaptação numérica do sistema de fluxo, a qual simula um comportamento mais próximo com os esperados no campo, refletido nos resultados obtidos.

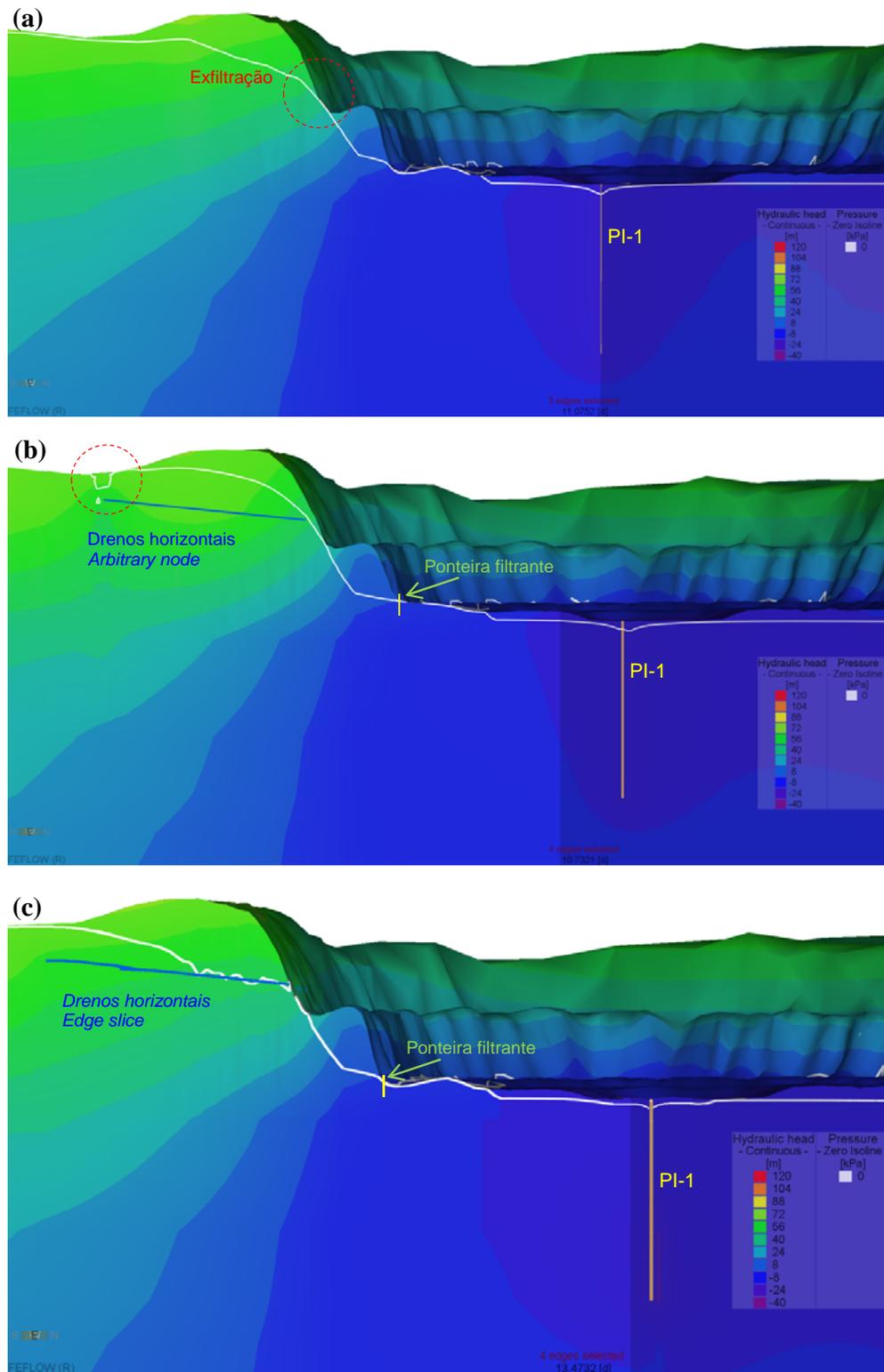


Figura 5.23 - Arranjo 3: Seção D-D - (a) Poços de bombeamento (Arranjo 1); (b) Poços de bombeamento mais drenos horizontais (*Arbitrary node*) e ponteiras filtrantes; (c) Poços de bombeamento mais drenos horizontais (*Edge slice*) e ponteiras filtrantes. Tempo de análise $t=10d$. As figuras (b) representam um rebaixamento localizado nos extremos dos elementos, (c) representam um rebaixamento mais uniforme e, portanto, maior ao longo de seu comprimento.

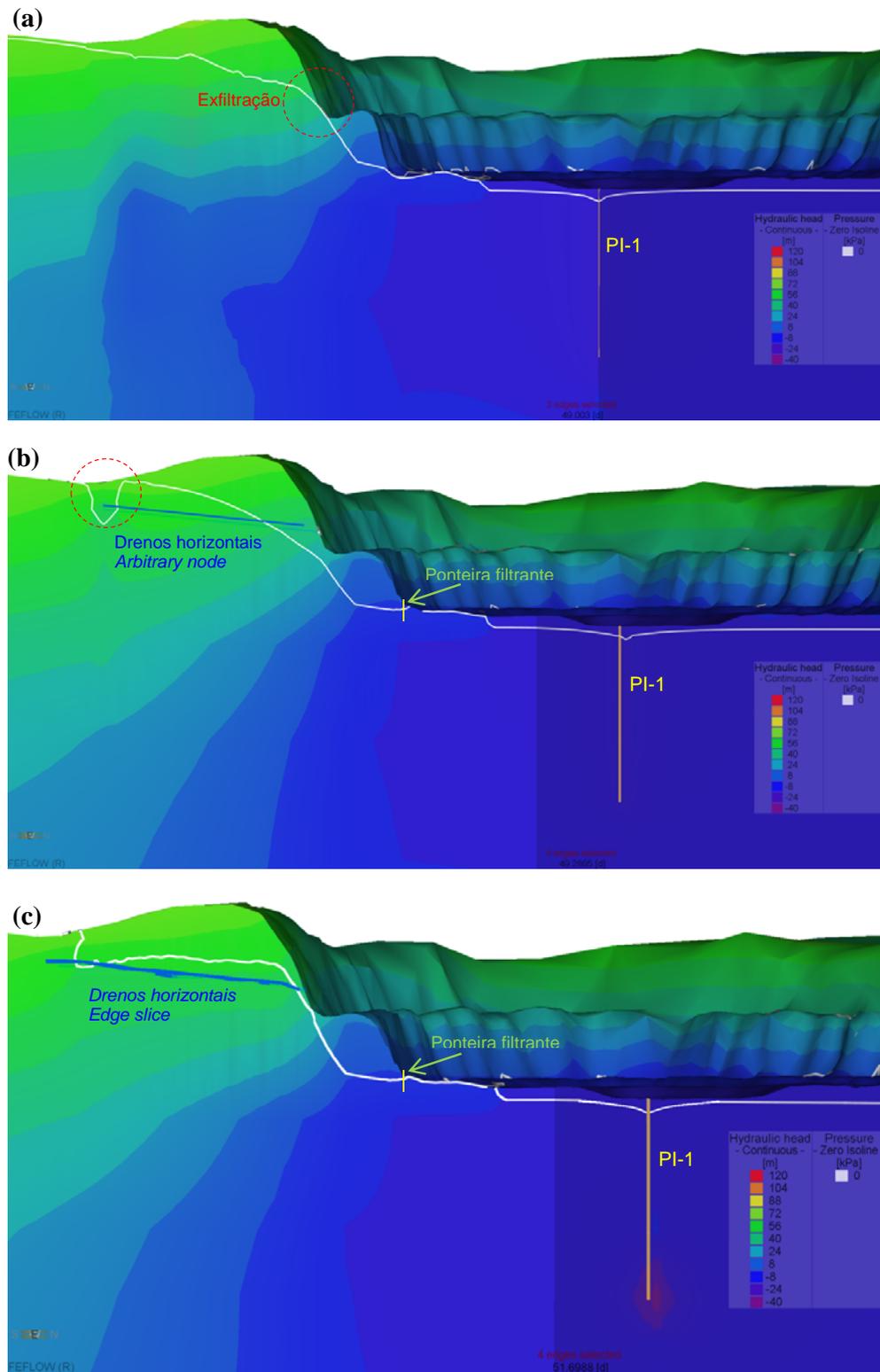


Figura 5.24 - Arranjo 3: Seção D-D - (a) Poços de bombeamento (Arranjo 1); (b) Poços de bombeamento mais drenos horizontais (*Arbitrary node*) e ponteiras filtrantes; (c) Poços de bombeamento mais drenos horizontais (*Edge slice*) e ponteiras filtrantes. Tempo de análise $t=50d$. As figuras (b) representam um rebaixamento localizado nos extremos dos elementos, (c) representam um rebaixamento mais uniforme e, portanto, maior ao longo de seu comprimento.

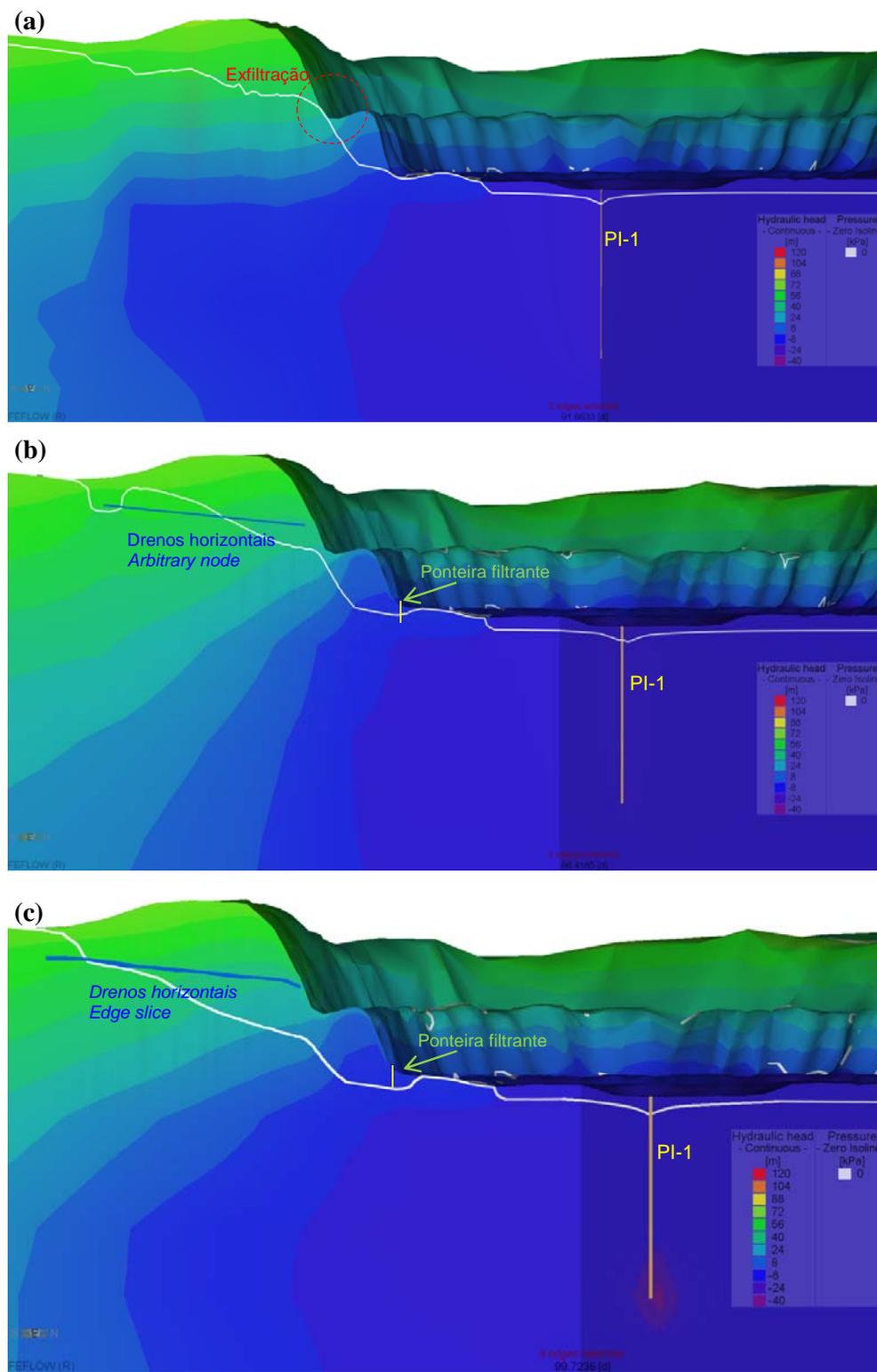


Figura 5.25 - Arranjo 3: Seção D-D - (a) Poços de bombeamento (Arranjo 1); (b) Poços de bombeamento mais drenos horizontais (*Arbitrary node*) e ponteiros filtrantes; (c) Poços de bombeamento mais drenos horizontais (*Edge slice*) e ponteiros filtrantes. Tempo de análise $t=100d$. As figuras (b) representam um rebaixamento localizado nos extremos dos elementos, (c) representam um rebaixamento mais uniforme e, portanto, maior ao longo do seu comprimento.

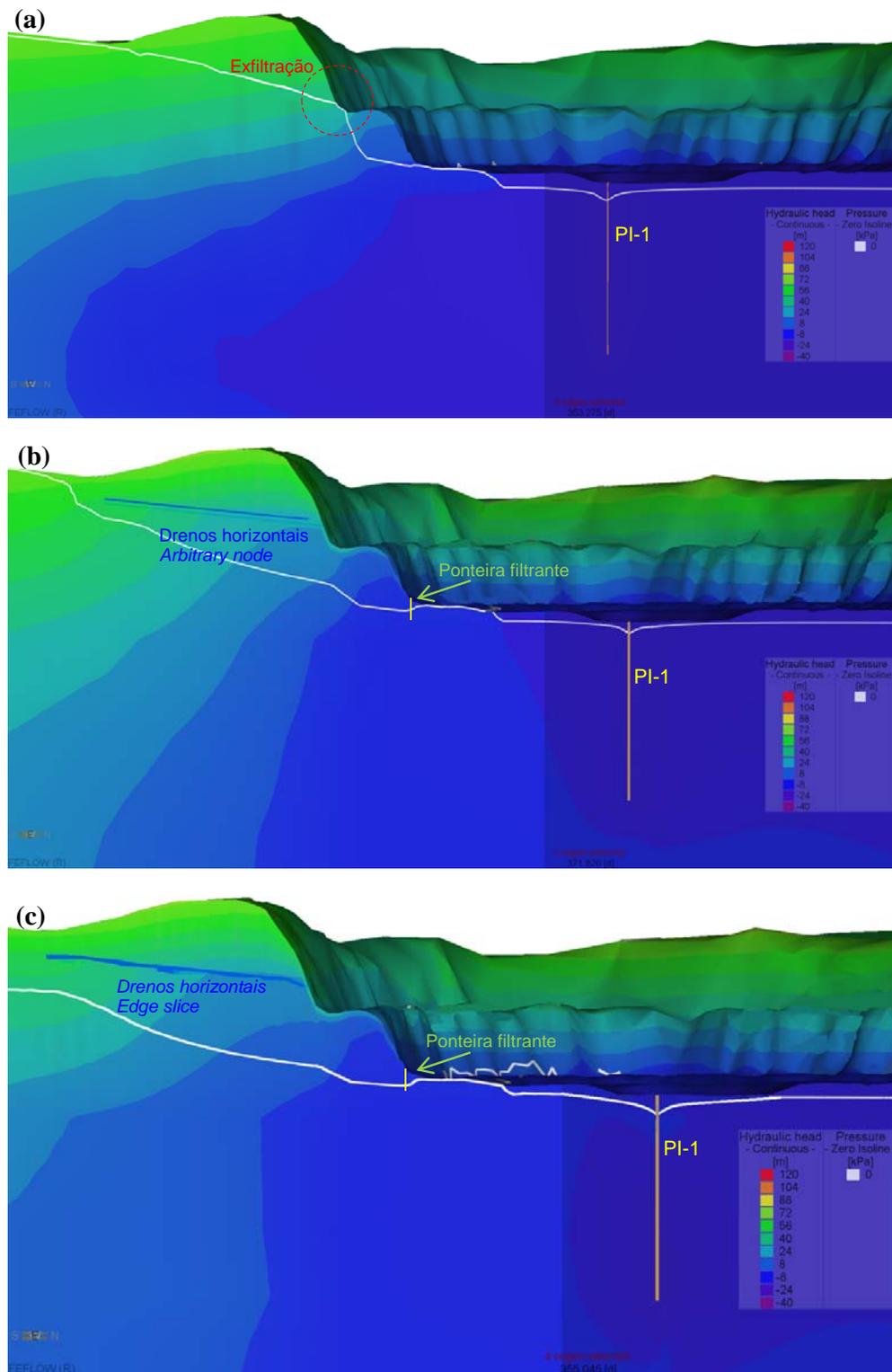


Figura 5.26 – Arranjo 3: Seção D-D – (a) Poços de bombeamento (Arranjo 1); (b) Poços de bombeamento mais drenos horizontais (*Arbitrary node*) e ponteiras filtrantes; (c) Poços de bombeamento mais drenos horizontais (*Edge slice*) e ponteiras filtrantes. Tempo de análise $t=360d$. As figuras (b) representam um rebaixamento localizado nos extremos dos elementos, (c) representam um rebaixamento mais uniforme e, portanto, maior ao longo do seu comprimento.