

Universidade Federal de Minas Geras

FELIPE ABBAS DA GAMA

Estudo da Zona de Influência Direta do Bombeamento de uma Mina do Quadrilátero Ferrífero

Trabalho de conclusão de curso do
10º período de Engenharia de Minas
sob a orientação do Geólogo Aurélio
Fernando Silva

Belo Horizonte

2019

Dedicatória

Essa conquista tem seu início em minha mãe Andrea e meu pai Evandro. Exemplos de força e profissionalismo, respectivamente.

Dedico aos meus irmãos Lorraine e Pedro, pois tudo que me for vitória será por consequência vitória dos mesmos.

Dedico aos meus fieis amigos, Rafael, Lucas, Marcela, Alice, Alessandra, Lívia e Renata que estiveram perto mesmo enquanto estive longe e me mantiveram centrado em me tornar o melhor profissional possível.

Dedico ao meu amado Placieux, à ENSG e – claro – à UFMG e aos amigos que fiz para a vida.

Dedico à minha parceira e companheira Gabriela que sempre foi motivo maior de alegria e de meu constante desejo por me tornar uma pessoa melhor.

Dedico ao menino atrevido que foi pra Nancy.

Agradecimentos

Ao Sr. Luiz Carlos Vannucci por acreditar na proposta e ver finalidade no trabalho realizado.

Ao Sr. Felipe Gonçalves pela oportunidade de continuar meu trabalho.

Ao Sr. Aurélio Fernando Silva por aceitar tamanha tarefa que foi me orientar durante o trabalho.

Aos professores e profissionais do departamento de Engenharia de Minas sempre solícitos e dispostos a nos ajudar especialmente no final da nossa trajetória.

À Prof.^a Sonia Denise Rocha pelo carinho e pela disponibilidade para me ajudar com detalhes finais.

Aos senhores Jean Marc-Montel, Adel Abdallah e Constantin Oltean, profissionais da Escola Superior de Geologia de Nancy que acreditaram no potencial dos estudantes brasileiros.

À mim, que me redescobri em inúmeros níveis e hoje me sinto mais preparado para qualquer desafio.

Sumário

1. Objetivo	6
2. Introdução	6
3. Contexto	7
3.1. A mineração em Minas Gerais.....	7
3.2. Geologia Regional.....	7
3.3. Hidrogeologia da zona.....	11
3.3.1. Conceitos de Hidrogeologia.....	11
3.3.2. Hidrogeologia Regional	11
3.3.3. Hidrogeologia Local	12
4. Metodologia	13
4.1. Rebaixamento de Nivel Freatico	13
4.1.1. Método de Theis.....	14
4.1.2. Método de Neumann	15
4.2. As propriedades das unidades geológicas.....	16
4.2.1. Condutividade Hidráulica	16
4.2.2. Porosidade Total.....	17
4.3. O rebaixamento de nível freático da Mina do Pau Branco	18
4.4. Modelamento Numérico	19
4.4.1. ModFLOW.....	19
4.4.2. Método das Diferenças Finitas: Condições de Contorno	19
4.5. Modelo Conceitual	19
4.5.1. Topo e Base do aquífero:.....	20
4.5.2. Limites do modelo	21
4.5.3. Parâmetros Hidrodinâmicos.....	22
4.5.4. Recarga	23
4.5.5. Estrutura do modelo:	23
4.5.6. Calibração	24
4.6. Análise segundo métodos descritivos	26
4.6.1. Análise de Vazão Bombeada	26
4.6.2. Análise de Parâmetros Hidrodinâmicos	27
4.6.3. Pontos de observação	27
4.6.4. Aplicação do modelo de Theis.....	28
4.6.5. Aplicação do modelo de Neuman	29
4.6.6. Discussão dos resultados.....	30
4.6.7. Crítica e sugestões para avanço	31

5. Conclusão	32
Referências:.....	33

Abstract

The Cauê formation is an iron ore formation that is widely explored in the Quadrilátero Ferrífero zone in Minas Gerais. It is also an aquifer formation that holds water supply for the city of Belo Horizonte and its surroundings. This work is divided in three parts: a preliminary research about the geography, the geology and the hydrogeology aspect of the zone. Afterwards, it presents concepts of waterbed lowering techniques and hydrogeology concepts that are present along with data about the pumping rate through the years. This work has as its objective the study of the radial extension of the pumping activity developed by the mining company in activity. In the end, a conceptual model is presented, which has been used to construct a numerical model for the zone. This numerical model has given basis to an analytical approach that determines the length of the pumping system radial influence using the models of Theis (1935) and Neuman (1975). This work has as its objective the study of the radial extension of the pumping system developed by the mining company in activity.

1. Objetivo

Esse trabalho tem como objetivo explorar a multidisciplinaridade do engenheiro de Minas em contextos mais abrangentes que planejamento de lavra e beneficiamento mineral. O estudo aqui realizado tem como finalidade a compreensão da zona de influência do rebaixamento da cava, buscando delimitar um raio de influência para o bombeamento da zona, discutindo metodologias para determinação de parâmetros e a utilização de dois métodos analíticos.

2. Introdução

A formação aquífera Cauê é a unidade geológica que abriga os minerais de ferro do Quadrilátero Ferrífero (QF) na região de Minas Gerais, Brasil. Sua riqueza mineral e a atividade mineraria existente na região desde a época colonial fizeram com que a região se tornasse objeto de estudo nacional e internacional. (MACHADO M., 2009)

A atividade mineraria no estado de Minas Gerais foi responsável em 2018 por 47.2 % de toda a produção dos minerais de ferro no Brasil. Além disso, a região do quadrilátero ferrífero é abundante em recursos hídricos. Tal disponibilidade permitiu a implantação de captações de água subterrânea para abastecimento da cidade de Belo Horizonte e região metropolitana (MOURÃO, 2007).

Nesse contexto, extrai-se da mina os minérios de ferro na formação Cauê fazendo uso do bombeamento via poços para o rebaixamento do nível freático. Esse rebaixamento pode ser representado pelo formato de um conjunto de cones imaginários que se sobrepõe gerando um patamar de maior profundidade, permitindo o avanço dos trabalhos de mineração.

O presente trabalho consiste em 3 partes: de início um estudo do contexto geográfico, geológico e hidrogeológico da região. Em seguida, uma fase de revisão bibliográfica sobre conceitos de rebaixamento de nível d'água via bombeamento, apresentado em conjunto aos dados levantados pela empresa ao longo dos anos de existência da Mina. Por fim, com o desenvolvimento de um modelo conceitual do escoamento de água subterrânea região e usando as teorias abordadas ao longo do trabalho, estimar o raio de influência do bombeamento na região, utilizando o apoio de softwares como ModFLOW¹ e modelos numéricos como Theis² e Neuman³. Essa estimativa será seguida das análises dos resultados obtidos.

¹ Algoritmo criado pela USGS em 1949 que soluciona equações tridimensionais de escoamento de água subterrânea.

² Método de Theis (1935), a primeira solução analítica para o funcionamento de um aquífero confinado sob regime de bombeamento constante.

³ Método de Neuman (1975), desenvolvido à partir da solução de Theis (1935), oferece uma solução para aquíferos não confinados com possibilidade de recarga e anisotropia nas formações geológicas.

3. Contexto

3.1. A mineração em Minas Gerais

Minas Gerais é o principal estado minerador do País, destacando-se na produção de ferro, ouro, zinco, nióbio, fosfato, calcário, gemas, alumínio, níquel, manganês, granito e água mineral, sendo o único produtor nacional de grafita e chumbo. Além disso, o Estado produz outros minerais amplamente utilizados em setores industriais e com utilização direta na construção civil, como areia, argila, cascalho e brita. A política pública relacionada à produção mineral baseia-se, principalmente, na geração de informações necessárias ao desenvolvimento da atividade.. De acordo com dados da Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico — Sede — (2009), a atividade extrativa mineral de Minas Gerais representa 44% da produção brasileira do setor (ALMG, 2018).

Em 2017, a produção mineral brasileira gerou um total de 88,5 bilhões de reais (ANM, 2018).

3.2. Geologia Regional

De maneira sintética, a região de estudo pode ser representada pela coluna estratigráfica (Figura 1). A abundância dos recursos minerais esta diretamente ligada à história geológica do território de Minas Gerais e do Brasil. A região na qual a mina se encontra é conhecida como quadrilátero ferrífero⁴ (ALKMIN & MARSHAK, 1998) (Figura 2).

O Quadrilátero Ferrífero é formado por três grandes conjuntos litoestratigráficos: os Complexos granitognáissicos; o Supergrupo Rio das Velhas, ambos de idade arqueana; o Supergrupo Minas, paleoproterozóico (MOREIRA & SILVA, 2018).

A base do quadrilátero ferrífero é formada pelos complexos metamórficos datados entre 2.9 a 3.2 Ga além de duas gerações de intrusões graníticas neoarqueanas, uma a 2.78 Ga e outra a 2.73-2.61 Ga. Os contatos entre as unidades seguintes são de natureza tectônica (NOCE, 1995).

O supergrupo Rio das Velhas é constituído por rochas metavulcânicas e metassedimentares que juntamente com as intrusões plutônicas contemporâneas à deposição caracterizam a unidade como um terreno granítico *greenstone* arqueano clássico. O supergrupo é dividido em 3 formações:

- a) Formação Quebra-Ossos: rochas máficas e ultramáficas;
- b) Formação Nova Lima: *greenstone belt* aonde se encontram reservas de Ouro (ENDO, 1997);
- c) Formação Maquiné: metaconglomerados, quartzitos e xistos que são interpretados como sedimentos de um meio marinho pouco profundo (ZUCCHETTI, 1998).
- d) Uma unidade metassedimentar paleoproterozóica sobrepõe o supergrupo Rio das Velhas sobre a forma de um contato discordante erosivo e angular. Sua base é formada pelo grupo Caraça, que é dividido em 2 formações:
 - a) Formação Moeda: Meta-arenitos, quartzitos e filitos. A natureza dos sedimentos – aluvionares na base e no topo e marinhos na zona intermediária – indica uma transgressão seguida de uma regressão marinha sobre a zona (VILAÇA, 1981);
 - b) Formação Batatal: constituída principalmente por filitos e cherts.

⁴ O quadrilátero ferrífero (QF) é uma província mineral localizada no sudeste do Brasil, mais precisamente na região centro-sul do estado de Minas Gerais.

Acima do grupo Caraça se encontra o Grupo Itabira. Ele é dividido em 2 formações, cujo contato é transicional:

- a) Formação Cauê: formações de itabirito (VILAÇA, 1981), itabirito dolomítico, lentes de xistos e filitos. A espessura dessa formação é variável: entre 200 e 1000m (ZUCCHETTI, 1998). A presença de itabiritos dolomíticos no topo da formação põe em evidencia a transição entre a formação Cauê e Gandarela;
- b) Formação Gandarela: essencialmente composta de mármore, filitos dolomíticos, dolomito ferruginoso, itabirito dolomítico, itabirito e filitos. A formação data de 2.42 Ga e isso conduziu autores e pesquisadores a estimar a idade da formação Cauê (2.52 Ga) (DORR II, 1963; BABINSKY, 1993).

A unidade superiora do supergrupo Minas é representada pelo grupo Piracicaba:

- a) Formação Cercadinho: quartzito ferruginoso e filitos;
- b) Formação Fecho do Funil: filitos e mármore dolomítico;
- c) Formação Taboões: quartzitos;
- d) Formação Barreiro: filitos carbonatados.

O grupo Sabará (clorita, biotita, quartzito, feldspatos e itabiritos) foi depositado após o grupo Piracicaba. Estudos geocronológicos indicam uma idade máxima de deposição de 2.1 Ga, significativamente mais jovens que as unidades do Supergrupo Minas (BABINSKY, 1993).

Além dessas, ocorrem o Grupo Itacolomi, de distribuição restrita no QF, rochas intrusivas de idades diversas, destacando-se diques básicos que cortam toda a sequência supracrustal, e coberturas cenozóicas, amplamente distribuídas na região (MOREIRA & SILVA, 2018).

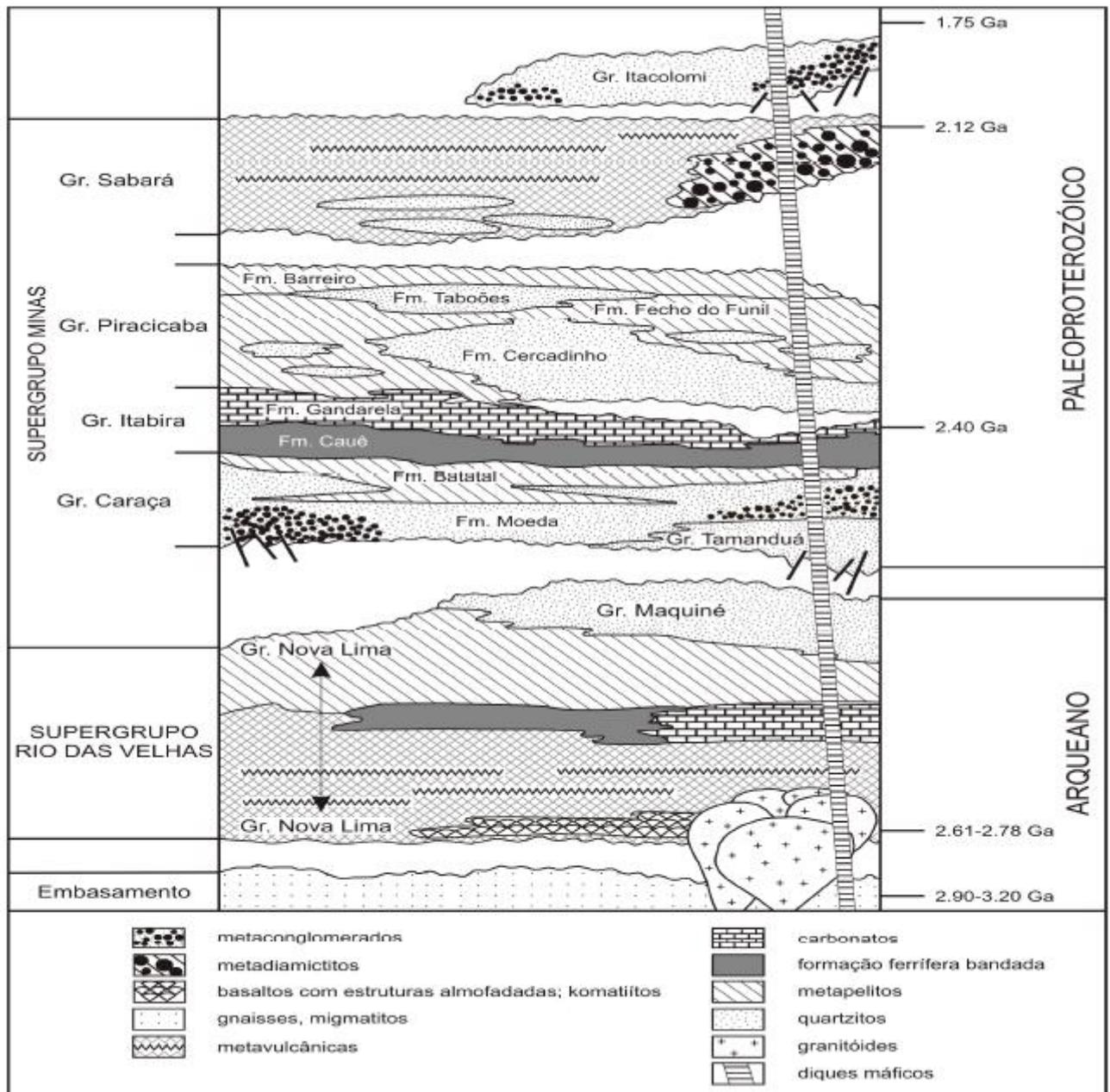


Figura 1: Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Alkimin e Marshak, 1998)

3.3. Hidrogeologia da zona

O presente trabalho debate a hidrogeologia do aquífero Cauê e da região mineradora. Alguns conceitos que serão abordados durante o texto estão aqui explicitados:

3.3.1. Conceitos de Hidrogeologia

Porosidade: Capacidade da rocha de armazenar fluidos ou gases em suas descontinuidades (poros).

$$\eta = Vv/Vt (\%) \quad (\text{Equação 1})$$

Permeabilidade: Capacidade da rocha de transmitir fluidos. Relacionada a interconexão dos poros presentes nas rochas.

Aquífero: Um meio rochoso que tem capacidade de armazenar e liberar água. Isto é, que possui porosidade e permeabilidade. Pode ser livre ou confinado.

Aquiclude: Um meio rochoso que embora possa armazenar água, não a libera. Isto é, possui porosidade, mas é impermeável.

Aquitardo: Um meio rochoso que armazena água, porém a libera muito lentamente. Isto é, possui porosidade e permeabilidade baixas.

Condutividade Hidráulica: Grandeza que exprime a aptidão de um meio poroso deixar passar um fluido sob efeito de um gradiente de pressão. Esta relacionada a permeabilidade (k), à densidade do fluido (ρ), à viscosidade dinâmica (μ) e à gravidade (g).

$$K = \frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu} \quad (\text{Equação 2})$$

Transmissividade: Grandeza utilizada em cálculos de movimento de água subterrânea resultante do produto da condutividade hidráulica pela espessura do aquífero.

$$T = Kb \quad (\text{Equação 3})$$

Coefficiente de Estocagem: Relação entre o volume de água liberada por unidade de superfície sob efeito de uma variação na carga hidráulica. Relacionado com a porosidade.

3.3.2. Hidrogeologia Regional

Em escala regional, as estruturas dominantes do quadrilátero ferrífero são as grandes dobras que circundam todo o grupo de rochas metassedimentares pré-cambrianas. As três principais estruturas que condicionam o fluxo de água subterrânea são:

- a) Homoclinal inverso da serra do Curral;
- b) Sinclinal Moeda;
- c) Bloco Tamanduá Mutuca.

Os compartimentos podem ser tratados como aquíferos distintos por haver uma conexão hidráulica fraca ou nula entre eles (MOURÃO, 2007).

A mina está localizada no compartimento hidrogeológico do sinclinal Moeda. O centro do sinclinal é formado pelas formações Cauê e Gandarela além dos grupos Piracicaba e Itacolomi. Essa estrutura leva ao acúmulo de águas subterrâneas onde os pontos de descarga estão condicionados a estruturas tectônicas.

Aquífero Cauê

A formação Cauê, constituída por hematitas e itabiritos, é o principal reservatório de água subterrânea de todo o Quadrilátero Ferrífero. A formação constitui um aquífero heterogêneo variando de poroso à fissural, devido ao amplo domínio dos corpos de itabiritos e hematitas pulvulentos sobre os itabiritos e hematitas duros. Essa porosidade foi conferida a essas rochas pelo abrandamento provocado pela lixiviação preferencial da sílica e do dolomito sobre a hematita.

As hematitas friáveis apresentam elevada capacidade de armazenamento, enquanto as zonas fraturadas conferem elevada condutividade hidráulica ao maciço. A Transmissividade do aquífero Cauê apresenta valores médios entre 150 a 300 m² por dia, e os valores do coeficiente de armazenamento são compatíveis com aquíferos livres a semiconfinados, da ordem de 0.01 a 0.0001. A porosidade efetiva das rochas varia bastante, mas os valores médios estão entre 2 e 5% nos itabiritos friáveis e até 15% nas hematitas friáveis (MOURÃO, 2007).

O aquífero é predominantemente livre e varia desde fracamente heterogêneo e pouco anisotrópico até fortemente heterogêneo e anisotrópico. Isso se deve às manifestações de itabiritos friáveis em algumas regiões e de hematitas compactas em outras.

Aquiclude Batatal

Os filitos da formação Batatal são unidades que podem armazenar água, porém não conseguem transmitir. A unidade foi classificada como aquífero ou aquíclode nas imediações de várias minas em função das grandes diferenças dos níveis piezométricos em comparação ao aquífero Cauê.

3.3.3. Hidrogeologia Local

Em termos hidrogeológicos, a mina está localizada em uma formação aquífera (Cauê), entre uma formação aquíclode – que se comporta às vezes como um aquífero (Batatal) – e uma formação menos transmissiva (Gandarela) (Figura 3).

Existem nascentes catalogadas no entorno da região 1370m de altitude no Norte e a 1330 no Sul⁵. Isso indica que há um escoamento natural da água do Norte para o Sul. Há também uma componente de fluxo na direção do centro da mina graças ao rebaixamento. A recarga de água da chuva acontece principalmente na região da mina, onde a topografia permite um escoamento superficial mais localizado. Além disso, a retirada das antigas coberturas lateríticas permite uma recarga direta na formação aquífera.

⁵ As imagens referentes à região não seguem as normas de georreferenciamento propositalmente. O estudo científico aqui realizado não tem o interesse de expor dados da empresa.

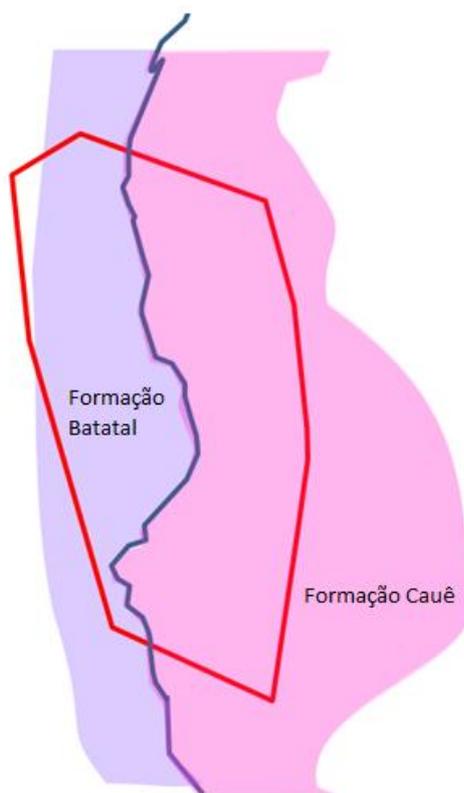


Figura 3: Localização da poligonal da Mina nas formações geológicas de interesse⁵.

Devido à presença de água subterrânea nas profundidades exploradas pela mina, é realizada a técnica de rebaixamento do nível freático pelo bombeamento de poços. Atualmente a mina conta com 36 poços perfurados, dos quais 10 estão em atividade.

4. Metodologia

Os trabalhos que envolvem estudos de sobreposição de rebaixamento com outros poços discutem a potencia desse rebaixamento, somando os rebaixamentos provocados por cada um dos poços. Em termos de raio de influência, pouco referencial foi encontrado. A estratégia para realização do trabalho foi da avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos segundo a criação e calibração de um modelo numérico seguido de cálculos segundo métodos analíticos para determinação do raio de influência.

4.1. Rebaixamento de Nivel Freatico

A técnica de rebaixamento de nível freático por bombeamento de poços é utilizada na lavra a céu aberto para alcançar maiores profundidades e impedir que a água subterrânea desestabilize os taludes, colocando em risco não só os trabalhadores como também todo o empreendimento mineral.

Considerando a presença de um poço tubular profundo sob regime constante de bombeamento a uma vazão medida Q (volume/tempo), o formato do desnível adquirido pela superfície do nível freático é similar a um cone (Figura 4).

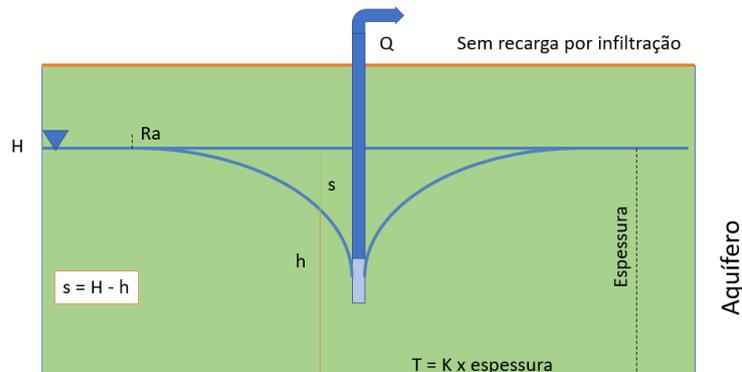


Figura 4: Esquemática do rebaixamento de nível freático via bombeamento.

Antes do início do bombeamento, a água encontra-se a uma altura H , denominado nível estático. Sob um regime de bombeamento constante, a superfície dinâmica (h) ao entorno do poço toma um formato cônico, que, quão mais distante do poço – a um raio de observação (r) mais afastado - mais próxima do nível estático original. Dessa maneira, a diferença entre o nível estático e o nível dinâmico é chamado de rebaixamento (s). Esse rebaixamento é expresso em função da transmissividade do aquífero, que é o produto entre a condutividade hidráulica do mesmo pela sua espessura saturada, e do seu coeficiente de estocagem (S).

4.1.1. Método de Theis

Desenvolvido em 1935, o modelo descreve o comportamento de um aquífero para as seguintes hipóteses:

- O aquífero é confinado em sua base e em seu topo;
- Não existe fonte de recarga para o aquífero;
- O aquífero é compressível e água sai do sistema uma vez que o nível piezométrico abaixa;
- O poço bombeia água a uma vazão constante.

A equação de Theis (1935) descreve o comportamento em função de uma curva $W(u)$ em escala logarítmica, conhecida como função de Theis (Figura).

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (\text{Equação 4})$$

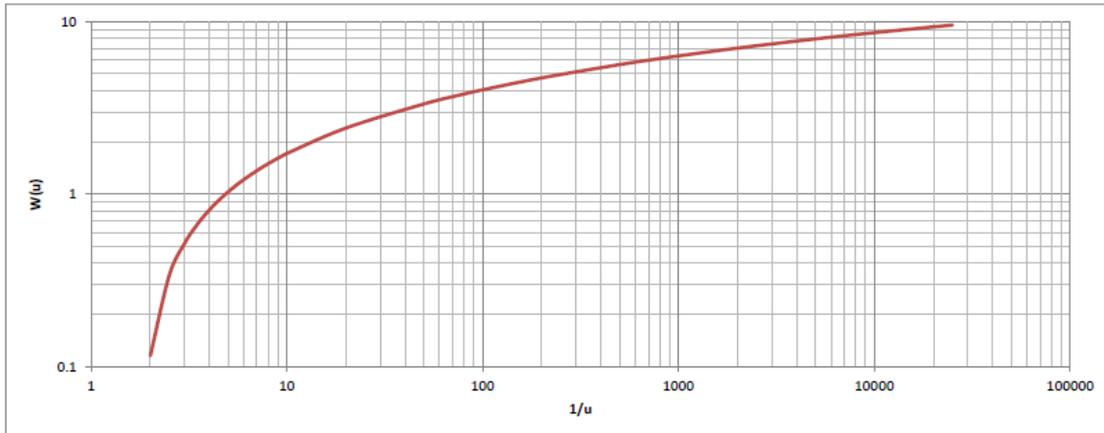


Figura 5: Curva da função $W(u)$ em função de $1/u$, desenvolvida por Theis (1935).

Na qual u pode ser escrito em função do raio de observação, a transmissividade e o coeficiente de estocagem:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde t é o tempo. Reescrita por Jacob em 1946, a equação do rebaixamento em função do ponto de observação e do tempo é dita (2):

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \log\left(\frac{2,25Tt}{r^2 S}\right) \quad (\text{Equação 6})$$

Dessa maneira podemos calcular um rebaixamento nulo a uma certa distância Ra , chamado raio de influência. Para tal, s deve ser igual a zero, logo:

$$\log\left(\frac{2,25Tt}{r^2 S}\right) = 1 \quad (\text{Equação 7})$$

Então temos que o raio de influência pode ser calculado em função da transmissividade, do coeficiente de estocagem e do tempo de bombeamento (3):

$$Ra = \sqrt{\frac{2,25Tt}{S}} \quad (\text{Equação 8})$$

4.1.2. Método de Neumann

A solução de Neuman e Whitherspoon (1975) assume que:

- O aquífero é não confinado;
- A zona vadosa não tem influência no rebaixamento;
- A água bombeada inicialmente vem da liberação instantânea de água do armazenamento elástico;
- Eventualmente água vem do armazenamento graças à drenagem gravitacional de poros interconectados;
- O rebaixamento é negligenciável se comparado com a espessura da zona aquífera saturada;
- A estocagem específica do material é ao menos 10 vezes maior que a capacidade de estocagem elástica;
- O aquífero pode apresentar anisotropia com condutividade hidráulica radial diferente da vertical.

Tendo como base essas premissas, a solução de Neuman é dada por:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u_A, u_B, \Gamma) \quad (\text{Equação 9})$$

Na qual $W(u_A, u_B, \Gamma)$ é a função de poço do aquífero, conforme tabela que segue em anexo.

$$u_A = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (\text{Equação 10})$$

$$u_B = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (\text{Equação 11})$$

$$\Gamma = \frac{r^2 K_v}{b^2 K_h} \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

- s é o rebaixamento (m)
- Q é a vazão de bombeamento (m^3/h)
- T é a transmissividade (m^2/d)
- r é a distancia radial de observação (m)
- S é o coeficiente de armazenamento
- S_y é a estocagem específica
- t é o tempo (d)
- K_h é a condutividade hidráulica horizontal (m/d)
- K_v é a condutividade hidráulica vertical (m/d)
- b é a espessura saturada inicial do aquífero (m)

4.2. As propriedades das unidades geológicas

A tese de Mourão procura trazer valores para a condutividade hidráulica segundo resultados de experimentos realizados no laboratório OMNI do Brasil.

4.2.1. Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica de um material pode ser determinada segundo uma técnica de medição de permeabilidade na indústria petrolífera. A técnica se baseia na lei de Darcy (1856):

$$Q = \frac{-kA(\rho_b - \rho_a)}{\mu L} \quad (\text{Equação 13})$$

No qual o fluxo Q dentro de um meio poroso pode ser expresso em função da relação entre a permeabilidade do meio (k), o gradiente de pressão e a viscosidade do fluido por um comprimento L através de uma superfície de área conhecida A .

A técnica consiste na preparação de amostras para a passagem de ar seco ou de um gas conhecido. O fluxo é proporcional ao gradiente de pressão e a permeabilidade é uma propriedade intrínseca ao meio. O diâmetro máximo da amostra deve ser de uma polegada e o comprimento máximo de 10 cm (Figura 6).

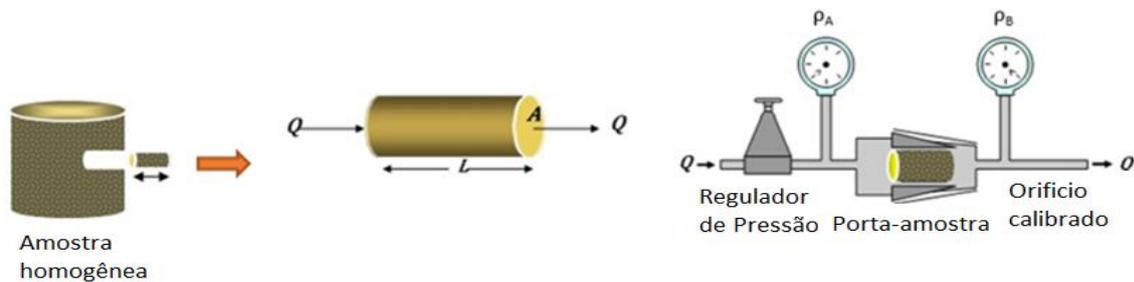


Figura 6: Esquema simplificado de determinação da condutividade hidráulica.

As amostras foram preparadas para dois ensaios – na direção paralela das camadas e na direção ortogonal. As amostras mais friáveis foram congeladas antes de serem preparadas para evitar a possível degradação.

A permeabilidade total foi obtida usando nitrogênio gasoso em um regime permanente à 800 psi de pressão (profundidades não tão elevadas). Os resultados foram corrigidos segundo o método de Klinkenberg (1941).

A transformação de permeabilidade em condutividade hidráulica é dada pela relação seguinte (considerando 1 Darcy = 10^{-12}m^2):

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \cong 1 \times 10^{-5} \text{m/s} \quad (\text{Equação 14})$$

4.2.2. Porosidade Total

O volume dos poros foi determinado com a utilização de gás hélio segundo a lei de Boyle (1662).

$$pV = k \quad (\text{Equação 15})$$

p é a pressão do sistema, V é o volume do gás e k é constante.

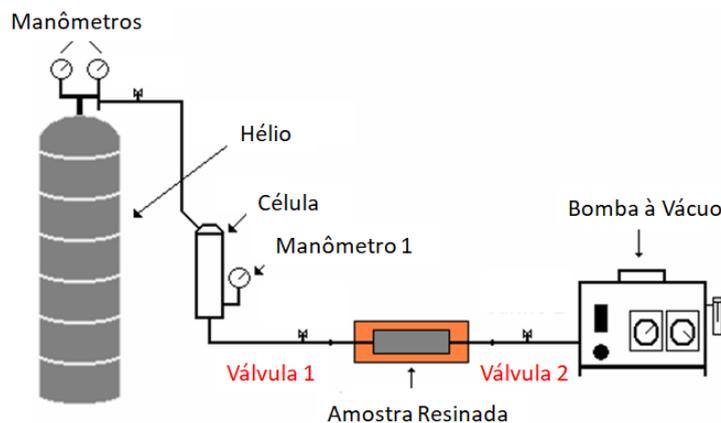


Figura 7: Esquema simplificado do funcionamento de um porosímetro

O porosímetro a gás mede a diferença de pressão em uma célula antes e depois da mesma estar em contato com a amostra. É feito um vácuo dentro da amostra com uma bomba à vácuo, fechando a válvula 1. Fecha-se a válvula 2 uma vez que o vácuo foi criado. A leitura é feita no manômetro 1 antes e depois da abertura da válvula 1 (Figura 7).

Onde p_1 e V_1 são respectivamente a pressão e volume antes da abertura da válvula 1 e p_2 e v_2 a pressão e o volume após a abertura da válvula. Com a diferença de pressão é possível determinar o volume dos vazios. O volume das amostras é conhecido e a relação entre volume de vazios e volume total é chamada de porosidade.

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad (\text{Equação 16})$$

A tabela a seguir trás os valores de condutividade hidráulica e listados por MOURÃO para o aquífero Cauê:

Tabela 1: Valores de condutividade hidráulica e porosidade encontrada para as diferentes litologias no aquífero Cauê. Modificado de MOURAO (2007)

Formação	$K_x = K_y$ (m/dia)	Porosidade
Hematitas Laminadas	0,6 a 3	30%
Hematitas Compactas	4×10^{-8}	3%
Itabiritos Friáveis	0,02 a 2	30 a 41%
Itabiritos Compactos	1×10^{-7}	4 a 18%
Itabiritos Dolomíticos	0,1 a 1	42 a 28%
Filitos	1×10^{-3}	30%
Quartzitos	0,3	4%
Rochas Metabásicas	$1,2 \times 10^{-5}$ a $6,4 \times 10^{-5}$	5 a 33%

4.3. O rebaixamento de nível freático da Mina do Pau Branco

Considerando a atividade na mina desde 2000, um bombeamento constante vem sendo realizado para possibilitar o avanço das atividades minerárias na região. Tendo em mente a teoria de rebaixamento de poços e os dados de vazão ao longo dos anos, considerando a outorga vigente de $700\text{m}^3/\text{h}$, levanta-se o questionamento sobre a real extensão da zona de influência direta do bombeamento, uma vez que existem nascentes e comunidades ao entorno do empreendimento. Esse trabalho tem como objetivo o dimensionamento do raio do cone de influência através de cálculos e ferramentas numéricas além de análises de medidas de vazão e piezometria feitas desde o início da atividade mineradora.

A estratégia abordada utilizou de um modelo numérico construído seguido de análises dos próprios piezômetros na região da mina.

Para o desenvolvimento do modelo numérico faz-se necessária a definição de um modelo conceitual, que explique o funcionamento dos regimes de água subterrânea pela região na qual a mina se encontra. Após essa definição, podemos utilizar softwares que contenham o algoritmo MODFLOW em sua programação.

4.4. Modelamento Numérico

4.4.1. ModFLOW

O software ModFLOW é um modelo de fluxo de diferenças finitas modular do USGS, nos Estados Unidos. Ele é um código que resolve a equação de fluxo de água subterrânea.

A equação tridimensional utilizada pelo ModFLOW é :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Equação 17})$$

K_{xx} , K_{yy} , e K_{zz} = condutividade hidráulica segundo os eixos x, y, e z (L/T),

h = nível potenciométrico (L),

W = a vazão por unidade volumétrica (efeitos de entrada ou saída de água) (1/T),

S_s = coeficiente de estocagem (1/L),

t = tempo (T).

A equação 17 resolve a relação entre níveis potenciométrico e a variação dos mesmos segundo os eixos x, y e z, relacionando esses níveis aos efeitos de entrada e saída de água.

4.4.2. Método das Diferenças Finitas: Condições de Contorno

O método dos elementos finitos tem sua origem nos anos 40 e vem sendo utilizado desde então nas áreas de análises de estrutura, escoamento de fluidos, distribuição de temperaturas e eletromagnetismo graças à sua flexibilidade e estabilidade numérica. Em muitos casos práticos o método dos elementos finitos é a única ferramenta capaz de fornecer uma solução aceitável, ainda que aproximada.

A resolução numérica pelo método de elementos finitos pode depender de maneira intensa da definição das condições de contorno (CHENG & CHENG, 2005). Considerando as três condições de contorno usuais para equações diferenciais, tem-se:

- Condição de Dirichlet: essa condição é válida para segmentos do contorno no qual a variável é constante (ou igual a zero).
- Condição de Neumann: se aplica a segmentos do contorno no qual a variável é regida por um gradiente.
- Condição de Gauchy: essa condição é uma combinação linear das duas condições anteriores.

4.5. Modelo Conceitual

De uma maneira geral, o aquífero Cauê é um aquífero fraturado. O caráter metamórfico da região e a sua história geológica o tornam uma região complexa em termos hidrogeológicos. As intrusões básicas geram diversas compartimentações, com faixas de maior condutividade hidráulica. Os contatos com as formações Batatal e Gandarela trazem as primeiras imposições de um modelo conceitual: os limites.

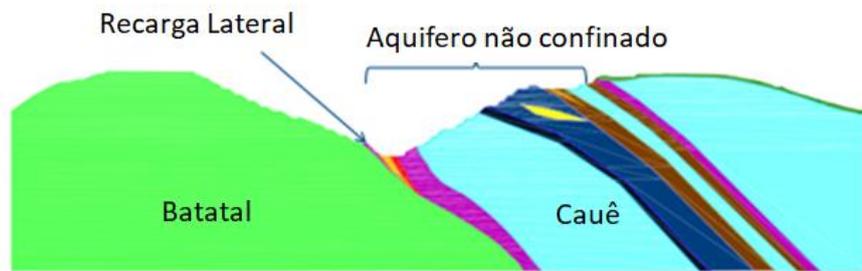


Figura 8: Seção Transversal da Mina, exemplificando o acamamento Batatal. As cores na formação Cauê são associadas aos teores de ferro.

A formação batatal, como um acamamento inclinado, facilita a recarga pelo talude oeste (Figura 8). O compartimento do Sinclinal Moeda se estende até o Homoclinal da Serra do Curral (MOURÃO, 2007).

O modelo precisa de 4 definições estruturais básicas:

- Topo do aquífero
- Base do aquífero
- Limites
- Parâmetros hidrodinâmicos

4.5.1. Topo e Base do aquífero:

Considerando a base topográfica atualizada de 2017, utilizando as cotas dos poços e piezômetros e uma interpolação segundo o quadrado da distância, uma superfície foi criada para ser o topo da camada aquífera (Figura 9).

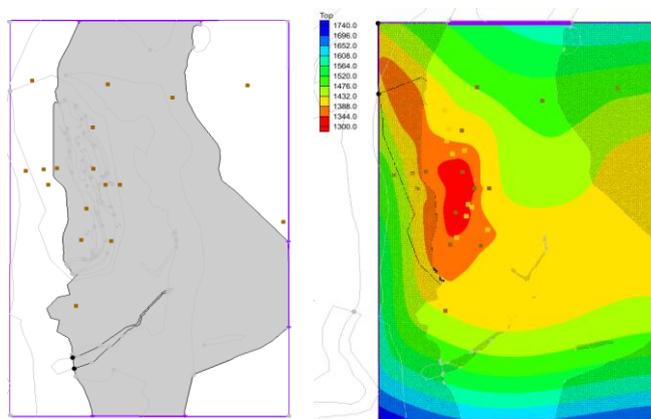


Figura 9: Pontos utilizados para interpolação do topo do aquífero (topografia da Mina de 2017)

A base do aquífero é um conceito difícil de definir devido à ausência de informações em profundidade. O mapa geológico e os estudos sobre a zona indicam que a camada Cauê teria centenas de metros de profundidade. Usando dados do planejamento da Mina, considerou-se a profundidade máxima da camada aquífera de 120m. Com o uso de pontos fictícios na interpolação, criou-se um aquífero de espessura conhecida, para o modelo (Figura 10).

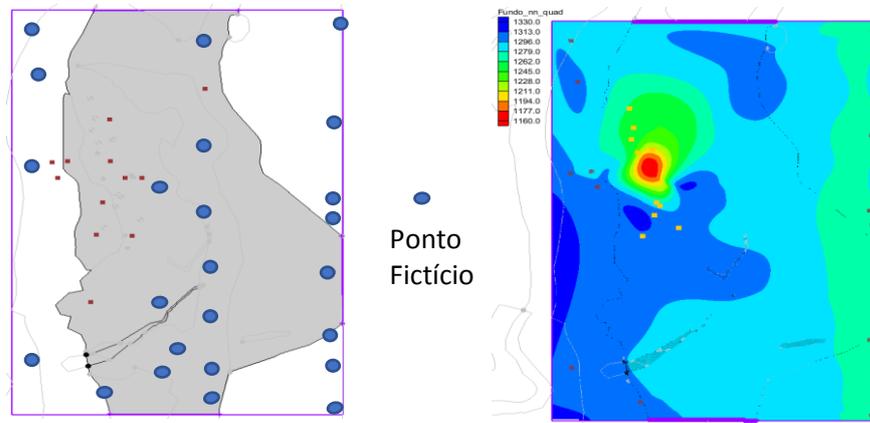


Figura 10: Pontos utilizados para interpolação da base do aquífero (fixadas a 120m de profundidade)

4.5.2. Limites do modelo

Considerando a formação batatal no talude oeste da mina o limite à oeste do modelo, definiu-se os limites à leste, norte e sul. A região é limitada por formações menos impermeáveis que a camada aquífera (Batatal à oeste e Gandarela à leste). Importante salientar que o contato entre as formações Cauê e Gandarela foi considerado de transição, tendo uma diminuição da condutividade hidráulica à medida que se adentra a formação Gandarela (Figura 11).

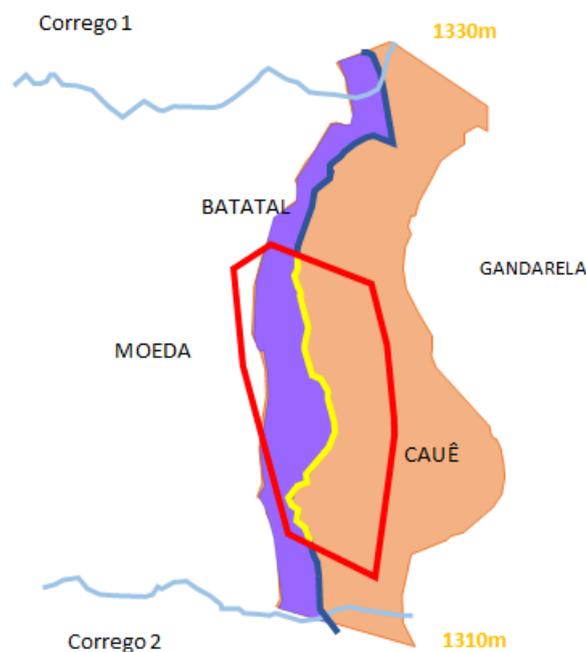


Figura 11: Limites e cargas impostas sobre a zona

Ao sul e à norte existem córregos de vazão considerável, pontos de descarga, que foram definidos como os limites norte e sul. Para um melhor ajuste à calibração eles foram definidos como

uma carga hidráulica imposta (limite do tipo Dirichlet), e não um rio ou um dreno (limite do tipo Neumann).

4.5.3. Parâmetros Hidrodinâmicos

É importante salientar que os valores encontrados em ensaios laboratoriais não refletem necessariamente o comportamento das formações na região de estudo. As rochas metabásicas e os contatos Cauê Batatal são de geralmente de baixa transmissividade, sendo que a formação Batatal é considerada um aquícluído – uma estrutura acumula, mas não tem as propriedades condutoras que permitem fluxo de água em seu interior. As rochas metabásicas dentro da mina atuam como barreiras hidráulicas, compartimentando mais ainda o cenário de fragmentação do aquífero.

Com base em análises de testes de bombeamento e estudos realizados previamente na empresa, o modelo foi definido e através de diversas tentativas permaneceu com os seguintes parâmetros (Figura 12):

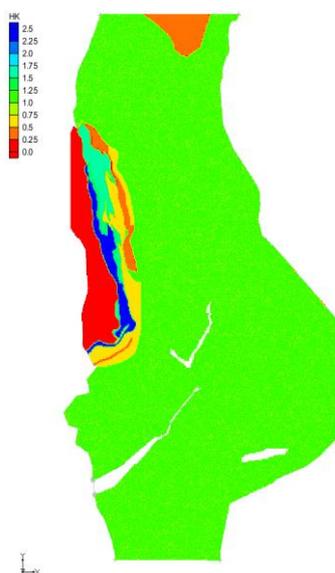


Figura 12: Distribuição das formações no modelo numérico

Tabela 2: Propriedades hidrodinâmicas utilizadas

Formação		Kx e Ky (m/d)	Kz (m/d)	S
Itabiritos Friaveis		0,3	0,1	30%
Itabiritos Compactos		0,7	0,233	12%
Hematitas Friaveis		3	1	25%
Hematitas Compactas		2,4	0,8	5%
Cauê		0,2	0,066	20%
Filitos		0,001	0,0003	10%
Metabásica		$2,5 \times 10^{-10}$	$8,3 \times 10^{-11}$	1%

Para o estudo usou-se a seguinte convenção: $K_x = K_y$ e $K_z = K_x/3$.

4.5.4. Recarga

A recarga pluviométrica foi calculada segundo os dados de outra mina da região, à uma distância inferior a 10km. Além disso, os efeitos de recarga efetiva foram considerados em função da formação de cobertura e a topografia da zona.

Como o trabalho aqui apresentado se baseia no modelo criado à época, os valores de pluviometria utilizados são os da mina no ano de 2016⁶.

Tabela 3: Pluviometria utilizada para o ano de 2016.

Pluviometria 2016 (mm)											
Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Junho	Julho	Ago	Set	Out	Nov	Dez
518.4	100.4	101.7	33	28.4	56.4	0	1.2	60.1	112.8	279	*

Os coeficientes de recarga foram baseados no comportamento das litologias de cobertura e da topografia. Considerando a escavação, a região de recarga tem um coeficiente maior que as demais. Os filitos por seu comportamento de aquíclude foram calibrados com menor percentual e as formações ferríferas com uma leve diferença para ajustes finos (Figura 13).



Figura 13: Coeficientes de recarga efetiva baseada na cobertura.

4.5.5. Estrutura do modelo:

O modelo teve estrutura de 106590 células ativas, com 33 camadas segundo o eixo z. As células tiveram dimensão de 40m x 40m x 30m. Essa definição permitiu que o software MODFLOW rodasse em plena capacidade sem comprometer o tempo do estudo e nem a resolução do modelo (Figura 14).

⁶ O valor da piezometria de dezembro não foi apresentado, pois o trabalho referente estava em andamento.

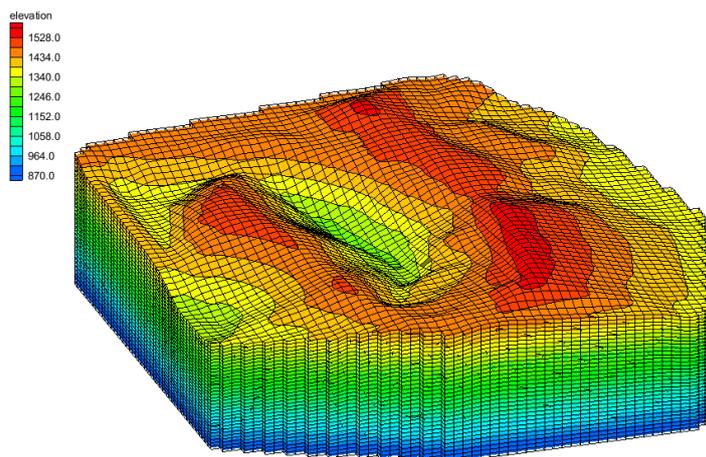


Figura 14: Representação do modelo 3D

Os limites do modelo em suas camadas tiveram a seguinte configuração. Eles foram definidos como cargas impostas (contorno tipo Dirichlet), sendo o limite à leste definido pelas células inativas (Figura 15).

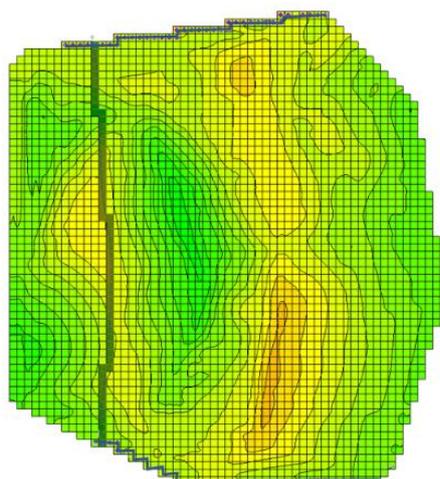


Figura 15: Sinalização das regiões nas quais os limites foram definidos

Tabela 4: Definições das condições de contorno nos limites do modelo

Limite	Camadas do modelo	Carga Imposta
Norte	8 a 10	1330
Sul	8	1310
Oeste (Batatal)	6 a 8	1360

A carga imposta no limite Oeste foi usada como meio de calibrar o modelo em relação aos instrumentos no talude oeste da cava.

4.5.6. Calibração

Em uma calibração em período de chuvas e de seca, definiram-se as zonas de recarga e qual seria a absorção efetiva dessa chuva. Considerando a exposição do terreno por se tratar de uma mina a céu aberto, os valores para calibração foram definidos em diversas tentativas. Os valores de

pluviometria utilizados foram os dos meses de Janeiro, para regime chuvoso (518 mm) e Julho (0 mm).

Após reajustar os valores em regime de chuva e seca, buscando uma atenuação das diferenças simuladas e observadas temporalmente, usou-se um período aleatório para entender melhor em quais regiões o modelo não se encontrava alinhado com a realidade. De uma maneira geral, ficou claro que existem faixas de maior e menor permeabilidade na mina e isso torna o estudo e a elaboração do modelo uma etapa mais complexa para o estudo. A recarga escolhida foi a do mês de Setembro de 2016 (60.1mm).

A intenção do estudo nesse momento é assumir os valores referentes à condutividade hidráulica e estimar o real raio do cone de rebaixamento para o centro de massa de vazão bombeada dentro da cava.

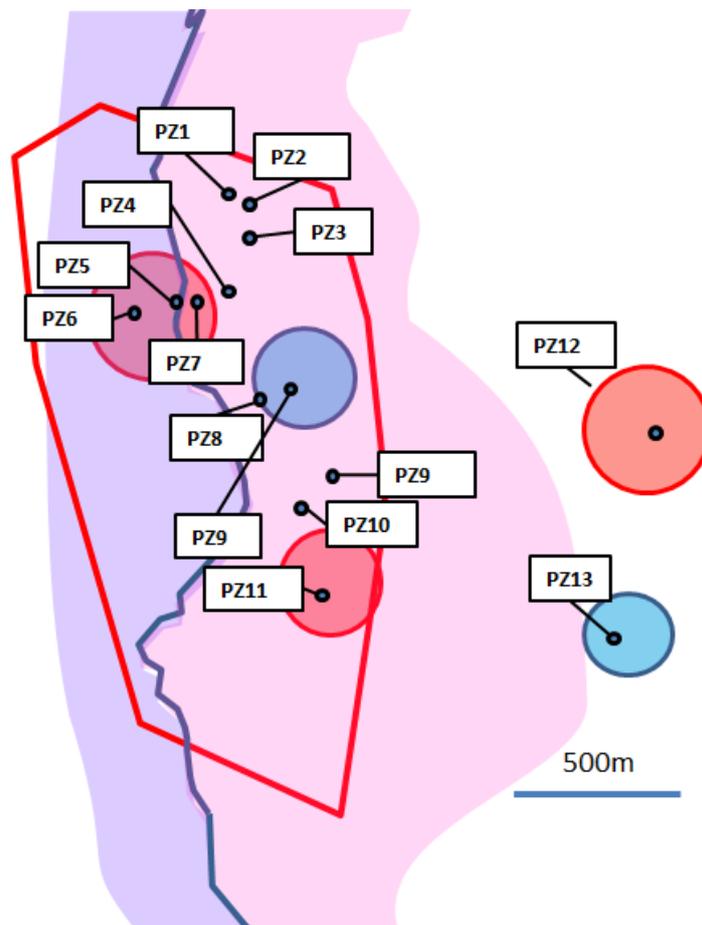


Figura 16: Regiões identificadas com valores de condutividade hidráulica (K) pouco calibradas.

A Figura 6⁷ mostra as conclusões finais do modelo 3D calibrado: o erro ϵ foi determinado como a diferença entre as cotas de água subterrânea simuladas pelo software e as medições temporais.

$$\epsilon = \text{Nível Água Simulado} - \text{Nível Água Observado}$$

^{7 7} As imagens referentes à região não seguem as normas de georreferenciamento propositalmente. Os nomes dos piezômetros também foram alterados. O estudo científico aqui realizado não tem o interesse de expor dados da empresa.

As regiões em azul indicam um $\varepsilon > 0$, o que indica um excesso de água na simulação. Tendo como base a equação de Theis,

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (\text{Equação 4})$$

Vê-se que o rebaixamento é inversamente proporcional à Transmissividade, que é o produto entre a condutividade hidráulica (K) e a espessura do aquífero (b).

$$T = Kb \quad (\text{Equação 3})$$

Isso significa que nas zonas em azul parâmetro K estava superdimensionado. Da mesma forma, a região em vermelho – que apresenta um valor de $\varepsilon < 0$ – indica que as zonas estão com os valores de K subdimensionados.

A anisotropia da região é evidente e as propriedades hidráulicas a serem utilizadas são muito sensíveis. A partir dos valores usados na calibração do modelo numérico e as referências laboratoriais utilizadas em estudos prévios do aquífero Cauê, elaborou-se um estudo analítico para o real alcance do rebaixamento da cava.

4.6. Análise segundo métodos descritivos

Considerando o sistema da mina em questão, podem existir compartimentações ao longo do aquífero, mas isso não o classifica como confinado. O fato de a mina estar justamente na formação aquífera indica que o topo aquífero está livre e exposto, sendo passível de recarga. Ao longo dos anos o bombeamento da mina também não foi constante, tendo encontrado valores médios em períodos diferentes.

A partir disso, passou-se para uma análise segundo modelo de Neuman e Whitherspoon (1969).

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u_A, u_B, \Gamma) \quad (\text{Equação 9})$$

Esse modelo corresponde mais à realidade da mina. A zona vadosa pode ser desconsiderada nessa simplificação – sobretudo na região da mina, aonde não há cobertura vegetal ou orgânica. A espessura da camada aquífera ultrapassa as centenas de metros ^[15], tornando o rebaixamento irrisório perto da capacidade da mesma. A anisotropia das camadas também é um forte ponto a favor da aplicação desse modelo. É entendido que o comportamento hidráulico da camada varia de acordo com a profundidade, mas mais que isso – o contato entre as camadas Cauê e Gandarela também vai gerar uma anisotropia à medida que nos afastamos da origem do bombeamento.

De início é necessário avaliar o bombeamento vigente na cava e como ele se desenvolveu desde sua origem.

4.6.1. Análise de Vazão Bombeada

O banco de dados da Mina trás um bombeamento inicial no ano de 2004 (Figura 17). Após um momento de baixa atividade em 2006, o bombeamento alcançou patamares de 400m³/h até 2010 e em seguida oscilou entre 450m³/h e 650m³/h. A vida útil dos poços varia entre 4 e 8 anos, e a necessidade do rebaixamento faz com que o plano anual inclua a perfuração de novos poços e piezômetros.

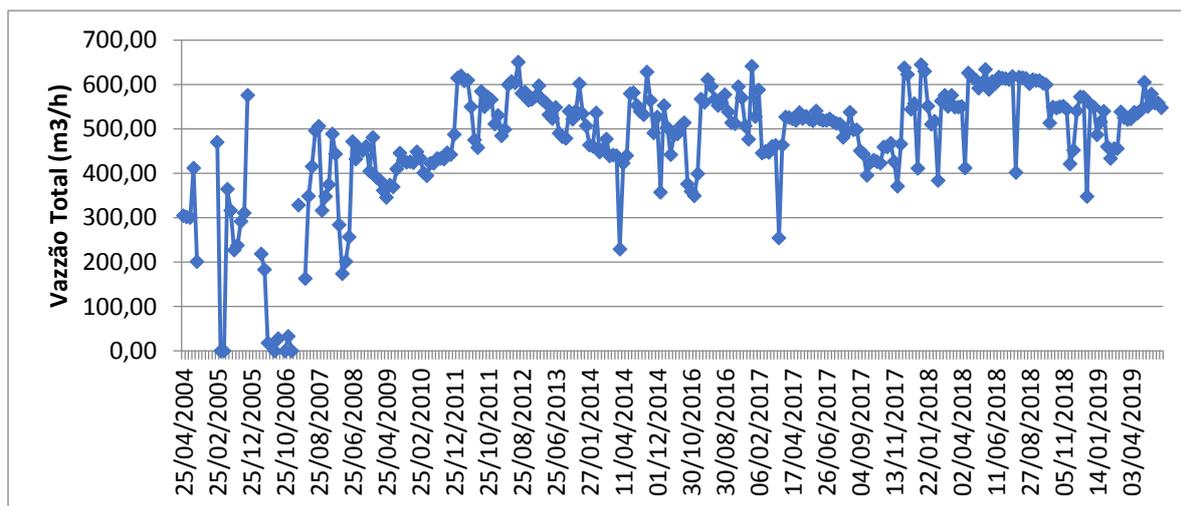


Figura 17: Vazão bombeada pela Mina desde 2004.

Nesse contexto, podemos definir duas épocas de rebaixamento. Um rebaixamento inicial e de média igual a 390m³/h que compreende os anos de 2007 a 2010 e um rebaixamento tardio de patamar mais elevado que compreende os anos de 2011 a 2018, com valor médio de 555m³/h.

Para efeitos de simplificação considerou-se apenas um poço de vazão igual a 600m³/h localizado mais a oeste na cava.

4.6.2. Análise de Parâmetros Hidrodinâmicos

Considerando as discussões levantadas na seção 3.5.6, compreende-se que a simplificação para um valor que represente todo o comportamento do Cauê vai ignorar aspectos geoestruturais cruciais para a real compreensão da extensão do raio de influência do bombeamento da cava. Contudo, é possível projetar diversos cenários diferentes.

Os valores de condutividade hidráulica e coeficiente de estocagem para a formação aquífera podem ser analisados em função dos valores de base da última simulação do software, em um cenário de maior condutividade e outro de menor condutividade.

4.6.3. Pontos de observação

O rebaixamento está relacionado ao tempo de bombeamento e ao raio de observação do mesmo. Por isso é necessário definir os pontos a serem observados e traçar os parâmetros hidrodinâmicos que permitam a determinação do raio de observação (Figura 18).

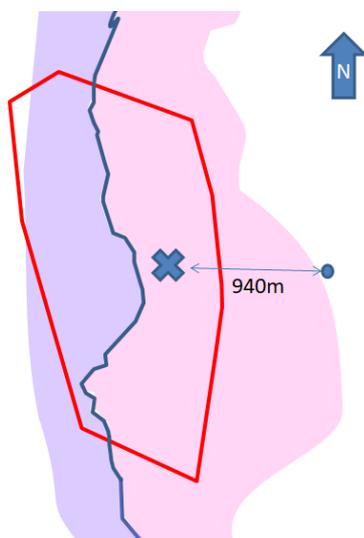


Figura 18: Localização da vazão centralizada e do ponto de observação PZ12

Considerando o ponto de observação PZ12, o histórico de acompanhamento do nível d'água é bem completo – desde 2006 (Figura 19).

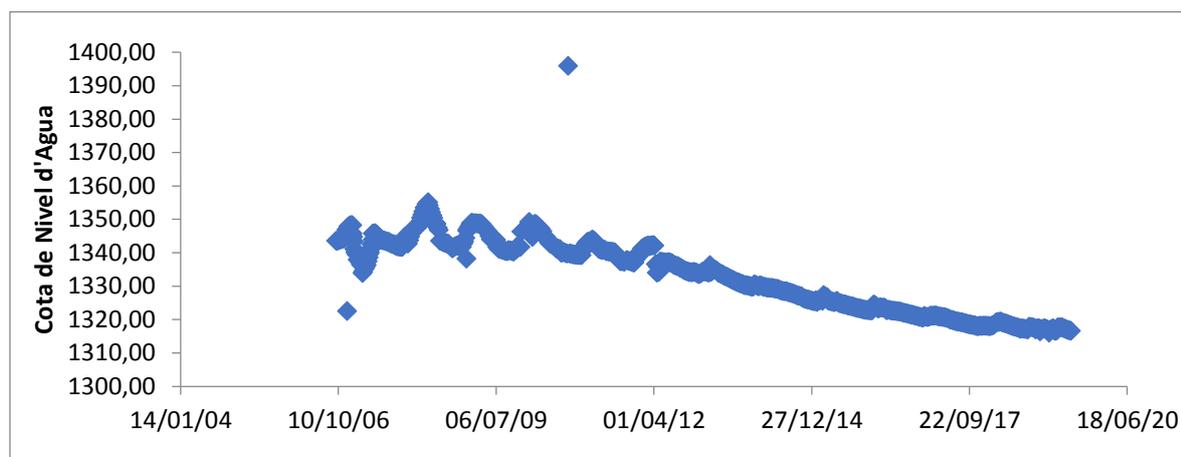


Figura 19: Variação histórica do nível d'água de PZ12.

4.6.4. Aplicação do modelo de Theis

A simplificação de Jacob explicitada na sessão 3.1.1 trás uma solução para o raio de influência do cone de rebaixamento:

$$Ra = \sqrt{\frac{2,25Tt}{s}} \quad (\text{Equação 8})$$

De acordo com os parâmetros utilizados no modelo numérico e com base no período de bombeamento compreendido entre 2007 e 2018, pode-se fazer um calculo estimado desse raio.

Para um bombeamento hipotético constante de 600m³/h, uma condutividade hidráulica de 0,2m/dia, considerando a espessura do aquífero igual a 120m – um total de 24m²/dia de transmissividade, com um coeficiente de armazenamento igual a 0,2 temos que o raio de influência da cava é de 1077m. Uma breve análise de sensibilidade trás a relação entre coeficiente de armazenamento e transmissividade e o raio de influência.

Tabela 5: Análise de sensibilidade segundo a variação de transmissividade, para um coeficiente de estocagem igual a 0,2 via método de Theis.

K (m/d)	Transmissividade (m ² /d)	S	Ra (m)
0,05	6	0,2	538,5
0,1	12	0,2	761,6
0,15	18	0,2	932,7
0,2	24	0,2	1077
0,3	36	0,2	1319

A transmissividade é diretamente proporcional ao raio de influência do bombeamento. Os valores testados de condutividade hidráulica (a espessura manteve-se constante em 120m) foram de 0.05, 0.1, 0.15, 0.2 e 0.3 m/d. Ressalta-se o fato de que esses valores são maiores que os valores listados por Mourão para a condutividade hidráulica dos itabiritos da formação Cauê.

Tabela 6: Análise de sensibilidade segundo a variação de coeficiente de estocagem para uma transmissividade igual a 24m²/dia na solução via método de Theis.

K (m/d)	Transmissividade (m ² /d)	S	Ra (m)
0,2	24	0,1	1523,1
0,2	24	0,15	1243,6
0,2	24	0,2	1077
0,2	24	0,25	963,3
0,2	24	0,3	879,4

O coeficiente de estocagem é inversamente proporcional ao raio de influência. Vê-se que o comportamento da curva se aproxima de uma reta quando coeficiente de estocagem aumenta.

4.6.5. Aplicação do modelo de Neuman

A partir dos parâmetros hidrodinâmicos e de um ponto de observação conhecido, buscou-se verificar a adaptação dos dados de PZ12 em função do regime de bombeamento. Para os valores conhecidos de raio de observação do ponto (940m) e o rebaixamento em nov/2018 igual a 78,245, calculamos os parâmetros hidrodinâmicos segundo Neuman (FETTER, 2014). Os regimes para rebaixamento inicial e tardio foram definidos:

$$t_{\text{inicial}} = 1806 \text{ dias (de 25/04/07 a 04/04/12)} \quad t_{\text{tardio}} = 2459 \text{ dias (de 04/04/12 a 28/12/18)}$$

$$\Gamma = 0,6 \quad 1/u_a \cong 4 \quad 1/u_b \cong 0,14$$

$$Q_{\text{inicial}} = 436,4 \text{ m}^3/\text{h}; \quad Q_{\text{Tardio}} = 522,85 \text{ m}^3/\text{h} \quad R_{\text{observação}} = 940 \text{ metros};$$

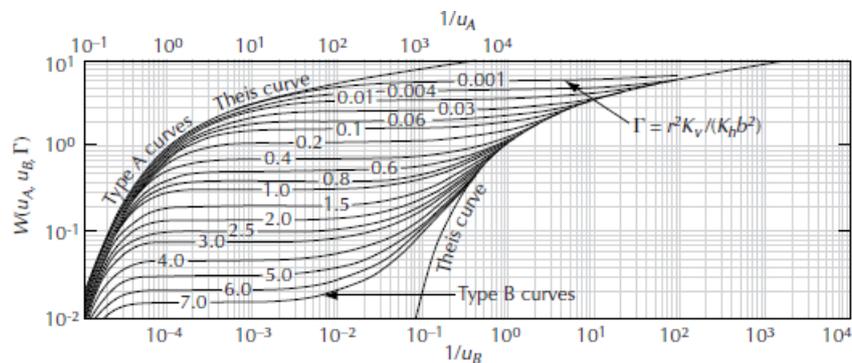


Figura 20: Curvas do tipo A e B do modelo de Neuman (FETTER, 2014)

A superposição gráfica segundo o modelo de Neuman (Figura 20) nos leva aos seguintes resultados:

$$T = 0,284 \text{ m}^2/\text{d} \text{ e } S = 0,2$$

Considerando a espessura do aquífero como 120m, conforme as análises anteriores, a condutividade hidráulica calculada é igual a $2,37 \times 10^{-3}$ m/d. Em termos de raio de influência segundo Jacob isso nos traria um valor igual a 117,24.

Os valores sugerem um meio menos transmissivo e menor poroso, tornando o rebaixamento eficaz, mas de pouco alcance em termos de raio de influencia. Em variação valores de K, temos os seguintes cenários:

Tabela 7: Análise de sensibilidade segundo a variação de transmissividade, para um coeficiente de estocagem igual a 0.2 via método de Neuman.

K (m/d)	Transmissividade (m ² /d)	S	Ra (m)
$2,37 \times 10^{-3}$	0,28	0,20	117,24
$4,74 \times 10^{-3}$	0,57	0,20	165,80
$2,37 \times 10^{-2}$	2,84	0,20	370,74
$1,19 \times 10^{-1}$	14,22	0,20	829,01
$2,37 \times 10^{-1}$	28,44	0,20	1172,39

O cenário de K igual a 0,237 se assemelha ao calculado em Theis em termos de ordem de grandeza de transmissividade (24 e 28,44 m/d) e em termos de raio de influência (1077 e 1172m).

4.6.6. Discussão dos resultados

A determinação do raio de influencia da cava pelos métodos analíticos indica que para Theis e Neuman, a diferença de valores para a transmissividade é considerável. Esse fato está intimamente relacionado à definição de espessura do aquífero, na construção do modelo, uma vez que a transmissividade é o produto da condutividade hidráulica pela espessura do aquífero. O valor de 120m foi definido em função do plano de lavra de 2025.

Considerando os valores de condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento experimental levantado por MOURÃO, existem evidências que apontam para valores baixos de transmissividade no aquífero, que levam a um rebaixamento expressivo em profundidade, mas pouco difundido. No leste da cava existe a formação Gandarela de natureza dolomítica, o que poderia corroborar com essa hipótese baixa transmissividade.

A simplificação para apenas um poço de rebaixamento de vazão elevada também ignora a compartimentação em menor escala que acontece dentro da Mina, sem colocar em evidência também as faixas de maior transmissividade que estão distribuídas por toda a formação ferrífera.

Destaca-se aqui a correlação observada entre transmissividade, intensidade do rebaixamento e raio de influência, em função da equação 8. Uma alta transmissividade permite que a água na região do rebaixamento seja reposta pelo próprio aquífero, aumentando assim a zona de influência do mesmo. Uma baixa transmissividade vai acarretar num aumento da intensidade do rebaixamento, em detrimento do raio de influencia (Figura 21).

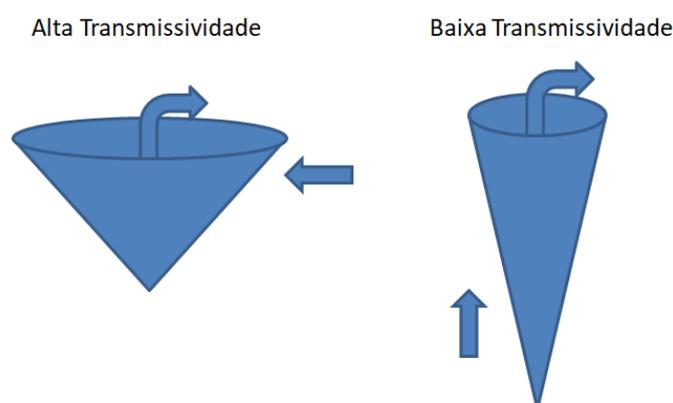


Figura 21: Esquematização do formato dos cones de rebaixamento segundo a transmissividade.

Na tentativa de determinar um raio de influência plausível para a cava, considerando o comportamento de PZ12 a 940m de distância, os resultados convergiram para valores próximos de transmissividade (da ordem de 20 m/d). Contudo, o valor calculado de K para o modelo de Theis está mais próximo da realidade do que o calculado com o modelo de Neuman.

Tabela 8: Valores para raio de influência da cava segundo métodos de Theis e Neuman

Theis			Neuman		
K (m/d)	T (m ² /d)	Ra (m)	K (m/d)	T (m ² /d)	R (m)
0,2	24	1077	2,37 x 10 ⁻³	0,28	117,2

4.6.7. Crítica e sugestões para avanço

De base é importante entender que a premissa de espessura do aquífero afetou intensamente o parâmetro transmissividade. Esse valor deve ser redefinido e repensado em função de informações provenientes de bancos de dados ou de uma nova sondagem específica visando evidenciar a espessura da(s) camada(s) aquífera(s).

Após essa reconstrução do modelo, a calibração do mesmo segundo um regime transiente também é necessária. Os modelos numéricos em regime estático não levam em conta os efeitos de acúmulo de água temporal. Além disso, o regime transiente permite variar a intensidade do bombeamento ao longo do tempo.

A calibração depende do histórico dos piezômetros, sendo importante manter o acompanhamento dos pontos já existentes e sugerir novos pontos de controle. O estudo envolvendo maior número de piezômetros pode confirmar ou não os valores dos parâmetros encontrados. Estudos como ensaios de bombeamento e testes de vida também são sugestões para melhor compreensão da zona.

As ferramentas analíticas permitem respostas em tempo hábil sem a necessidade de reformulações complexas dos modelos numéricos. Considerando os avanços tecnológicos e as novas ferramentas, fica a sugestão para domínio de softwares visando análises mais robustas (AquiferTEST, Visual Modflow, ModelMuse etc.)

5. Conclusão

Ao longo do trabalho desenvolvido, ficou evidente que, apesar dos avanços tecnológicos permitirem a elaboração de modelos complexos e robustos, a utilização de modelos analíticos para soluções pontuais deve ser sempre levado em conta.

O trabalho tem vários pontos passíveis de melhoria – modelos numéricos não são únicos e o refinamento das malhas e a definição dos contornos devem ser sempre revisto. Ainda sim, pôde-se aplicar o conhecimento em hidrogeologia em um cenário de mineração, chegando a um valor para o raio de influência do rebaixamento (aproximadamente 1100m). Esse valor, contudo, pode diferir dependendo da direção, por consequência da anisotropia da zona e das estruturas geológicas existentes na região.

É importante sempre analisar em qual contexto hidrogeológico o problema se encontra para melhor escolha de qual modelo seguir. O alinhamento do modelo conceitual da zona com a resolução matemática é crucial para gerar respostas que façam sentido.

Referências:

1. Assembleia Legislativa de Minas Gerais – Políticas públicas relacionadas à mineração https://politicaspUBLICAS.almg.gov.br/temas/producao_mineral/entenda/informacoes_gerais.html?tagNivel1=20&tagAtual=10161 (acesso em 27/05/2018)
2. Brasil. Agência Nacional de Mineração. Anuário Mineral Brasileiro: Ano base 2017. Brasília, ANM 2018.
3. ALKMIM, F.F.; MARSHAK, S. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, v. 90, p.29-58, 1998.
4. NOCE, C.M. *Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos da região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. 1995. 128 f. Tese. (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo/USP, São Paulo, 1995.
5. ENDO, I. *Regimes Tectônicos do Arqueano e Proterozóico no Interior da Placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, Minas Gerais*. 1997. 243 f. Tese (Doutoramento em Geoquímica e Geotectônica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1997.
6. ZUCCHETTI, M.; BALTAZAR, O.F. (EDS), *Projeto Rio das Velhas: texto explicativo do mapa geológico integrado, escala 1:100.000*. 2ed. Belo Horizonte, Brazil: DNPM/CPRM, 1998. 121 p.
7. DORR II, J.V. N. *Physiographic stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. U.S. Geol. Survey Prof. Paper 614-A, USGS, 1969. 110 p.
8. VILAÇA, J.N. Alguns aspectos sedimentares da Formação Moeda. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia-Núcleo Minas Gerais*, v. 2, p.92-137, 1981.
9. DORR II, J.V.N.; BARBOSA, A. L. M. *Geology and ore deposits of the Itabira district, Minas Gerais, Brazil*. U.S. Geol. Survey Prof. Paper, USGS, 1963, n. 341.
10. BABINSKY, M.; CHEMALE, F.Jr., VAN SCHMUS, W.R. A idade das formações ferríferas bandadas do Supergrupo Minas e sua correlação com aquelas da África do Sul e Austrália. In: SIMPOSIO DO CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, 2, Salvador. 1993. *Anais...* Salvador: Soc.Bras.Geol. Núcleo Bahia/Sergipe, 1993. p.152-153.
11. RAPOSO, F. O. *Formações Ferríferas e Metassedimentos Químicos de Áreas Seleccionadas do Quadrilátero Ferrífero e seu papel como possíveis fontes dos conglomerados da área*. 1996. 136 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1996.
12. NOCE, C.M. *Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos da região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. 1995. 128 f. Tese. (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo/USP, São Paulo, 1995.
13. HASUI, Y. *A Grande Colisão Pré-Cambriana do Sudeste Brasileiro e a Estruturação Regional*. Revista Geociências, v. 29, n. 2. P. 141-169, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2010.
14. MACHADO, N.; SCHRANK, A.; NOCE, C. M.; GAULTIER G. Ages of detrital zircon from Archean-Paleozoic: Implications for Greenstone Belt setting an evolution of a Transamazonian foreland basin. Quadrilátero Ferrífero, southeast Brazil. *Earth and Planetary Science Letters*, n. 41, p.259-276, 1996.
15. MOURÃO, M. A. A., *Caracterização hidrogeologia do aquífero Cauê. Quadrilátero Ferrífero*, 297 p. Universidade Federal de Minas Gerais – Escola de Engenharia, Minas Gerais, 2007.
16. Mapa Hidrológico Bloco Brumadinho – Apêndice B – Bloco Rio Acima, CRPM, 2005
17. MOREIRA & SILVA - *Mapeamento Geológico em Escala 1:10.000 na Região entre as Minas de Córrego do Sítio I e II, Município de Santa Bárbara, Minas Gerais* – UFMG, Belo Horizonte, 2012.
18. THEIS, C. V. 1935. The lowering of the piezometer surface and the rate and discharge of a well using ground-water storage. *Transactions, American Geophysical Union* 16:519–24.

19. MACHADO, M. M., Construindo a imagem geológica do Quadrilátero Ferrífero – Tese de Doutorado, IGC . 2009.
20. Cheng, A. and D. T. Cheng (2005). Heritage and early history of the boundary element method, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 29, 268–302.
21. C W FETTER. *Applied Hydrogeology, Fourth Edition*. 2014