

Modelo Hidrogeológico de uma Cava de Minério

Adrian Siacara

Engenheiro Civil, D.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, adrian.torrico@usp.br

Camila Xavier do Couto

Engenheira Civil, GeoSafe Engenharia, São Paulo, Brasil, camila.xavier@geosafe.eng.br

Marina Mendes Coura

Geóloga, M.Sc., GeoSafe Engenharia, São Paulo, Brasil, marina.coura@geosafe.eng.br

Danielle Hoffert Machado

Engenheira Hídrica, M.Sc., GeoSafe Engenharia, São Paulo, Brasil, danielle.machado@geosafe.eng.br

João Paulo Freitas

Engenheiro de Minas, M.Sc., Aura Minerals, São Paulo, Brasil, joao.freitas@auraminerals.com

RESUMO: A modelagem hidrogeológica é uma importante ferramenta para a concepção da estrutura geológica da área de estudo em conjunto com a determinação do sistema do fluxo de água subterrânea. Este trabalho apresenta o desenvolvimento do modelo hidrogeológico da Cava Nosde, propriedade da Aura Minerals, para direcionar o plano de bombeamento necessário para o rebaixamento da superfície freática, determinar a profundidade e o caudal necessário a ser bombeado e o espaçamento necessário entre os poços de alívio. Dessa forma, a metodologia aplicada no desenvolvimento dos estudos de cunho hidrogeológico foi subdividida em três etapas: a primeira preliminar, de revisão bibliográfica da geologia regional e local da área em epígrafe; a segunda, de caráter de campo e mapeamento local; e a terceira etapa, voltada para compilação dos dados obtidos em campo e análises e interpretações desenvolvidas no contexto das etapas anteriores. Foram definidos os principais parâmetros hidrodinâmicos que condicionam o comportamento das águas subsuperficiais: Condutividade, Vazão e Transmissividade. A ordem de grandeza desses valores varia em função das diversas variedades mineralógicas para os tipos de rochas discretizados. Assim sendo, os dois tipos básicos de unidades hidrogeotécnicas (aquífero fissural e poroso) definidas para a área da Cava Nosde foram analisados sob esses aspectos.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrogeologia, Fluxo, Cava Nosde, Rebaixamento, Superfície Freática.

ABSTRACT: Hydrogeological modeling is an important tool for designing the geological structure of the study area in conjunction with the determination of the groundwater flow system. This work presents the development of the hydrogeological model for the Nosde Cava (Aura Minerals) to direct the pumping plan necessary to lower the water table, to determine the depth and flow required to be pumped and the necessary spacing between the relief wells. The methodology applied in the development of hydrogeological studies was subdivided into three stages: a bibliographical review of the regional and local geology of the area; field work and local mapping; treatment, analysis, and data interpretation. The main hydrodynamic parameters that condition the behavior of subsurface waters were defined: Conductivity, Flow and Transmissivity. The order of magnitude of these values varies depending on the different mineralogical varieties for the discretized rock types. Therefore, the two basic types of hydrogeotechnical units (fissural and porous aquifer) defined for the Cava Nosde area were analyzed under these aspects.

KEYWORDS: Hydrogeology, Flow, Nosde Cave, Drawdown, Phreatic Surface.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Fetter (2001), a modelagem hidrogeológica é empregada em duas principais situações, como aprimorar a compreensão de como o fluxo se desenvolve de forma específica e para antecipar as possíveis ocorrências ao longo do tempo no sistema. A partir de dados obtidos sobre o sistema estudado é possível realizar análises de situações hipotéticas.

O estudo consiste na identificação, discretização e caracterização as unidades hidroestratigráficas existentes no contexto da cava atual, realização do balanço hídrico para a bacia hidrográfica de influência direta sobre a área e elaboração do modelo hidrogeológico conceitual da cava com base na concatenação das informações de cunho regional e local.

2 CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo encontra-se situada no contexto da Faixa Móvel Aguapeí, localizada na porção sudoeste do Cráton Amazônico, no trend NNW, com 25 a 50 km de largura e aproximadamente 600 km de extensão (Geraldes et al., 2001). A Faixa Móvel Aguapeí pode ser compreendida como um cinturão de dobramentos de idade meso a neoproterozóica (~1 Ga), com mineralizações auríferas em sua porção central, com sedimentos deformados e metamorfizados na fácies xisto verde. A faixa é sustentada pelos metassedimentos do Grupo Aguapeí, que recobrem os terrenos Rio Alegre e Santa Helena.

2.1 Geologia Regional

O Grupo Aguapeí é subdividido em três formações, sendo descritas por Souza & Hildred (1980), Saes & Leite (1993) e Saes (1999) como Fortuna, Vale da Promissão e Morro Cristalina. A Formação Fortuna, base do grupo, é composta por conglomerados oligomíticos com seixos de quartzo e matriz sericítica ou cimento ferruginoso, ocorrendo na forma de lentes que podem apresentar até 30 m de espessura. Também são descritos arenitos quartzosos com eventuais intercalações de siltitos. As Serras de Rio Branco e Aguapeí apresentam feições sedimentares de ambiente deposicional marinho raso como estratificações cruzadas espinha de peixe, cruzadas tabulares, marcas de onda, ondulações, truncadas, interpretados como sedimentos depositados em estágio rift. Já na Serra de São Vicente há ocorrência de sedimentação fluvial observada em associação de depósitos de rios do tipo *braided*.

A Formação Vale da Promissão é caracterizada pela presença de pelitos amarelados e subarcóseos, siltitos argilitos e arenitos subordinados. Apresentam estruturas linsen, flaser, wavy, gretas, brechas intraformacionais, ondulações truncadas e estruturas diapíricas típicas de ação de tempestades em depósitos marinhos de plataforma rasa. No topo do grupo está a Formação Morro Cristalina, formada por quartzo-arenitos intercalados por conglomerados e siltitos com deposição associada a ambientes fluviais e dunas eólicas.

Segundo Fernandes et al. (2005), o embasamento do Grupo Aguapeí na região dos depósitos auríferos é representado por Gnaisse e Tonalitos (Lavrinha) e Granito-Gnaisse Santa Helena e pela sequência vulcanossedimentar Pontes e Lacerda. Ainda segundo o autor, o Tonalito Lavrinha se restringe à porção interna da Anticlinal do Cágado (Anticlinal de abrangência regional sustentada pelos metassedimentos do Grupo Aguapeí). É de coloração cinza a verde, com anfibólio e biotita além de plagioclásio e quartzo com textura em mosaico. O Terreno Santa Helena é caracterizado como um complexo granítico batolítico, alongado NW e formado por granitos e granodioritos (Geraldes et al., 2001).

Com relação à estruturação regional e local, há aloctonia de SW para NE nas rochas do Grupo Aguapeí sobre o embasamento. Próximo a região de trabalho, este transporte proporcionou, no contato destas litologias com o embasamento a formação de uma zona de cisalhamento (ZC), denominada por Silva & Santos (2001) como Zona de Cisalhamento Morro Solteiro. Um evento mais tardio, caracterizado por uma intensa tectônica compressional, que gerou a ZC, formou também foliações miloníticas penetrativas e milonitos no contato entre a Formação Fortuna (Grupo Aguapeí) e o Tonalito Lavrinha (Fernandes et al., 2005).

3 METODOLOGIA

A metodologia aplicada no desenvolvimento dos estudos de cunho hidrogeológico foi subdividida em três etapas, a saber: uma preliminar de escritório; a etapa de campo; e uma terceira para o tratamento dos dados para a confecção do modelo e relatório. Abaixo são listadas as atividades em ordem cronológica de execução.

3.1 Revisão Bibliográfica

A primeira etapa abrangeu a revisão bibliográfica acerca do contexto tectonoestratigráfico, caracterização geológica, geomorfológica, hidrográfica e climática da região. Esta etapa é essencial para contextualização regional da área de interesse, proporcionando uma base sólida para o presente estudo.

3.2 Trabalhos de Campo

A segunda etapa foi realizada por uma equipe composta por um geólogo e hidrólogo em campo, na área de estudo. O principal objetivo desta etapa foi a identificação dos principais cursos d'água e nascentes, que pudessem influenciar nos caminhos preferenciais de água, zonas de recarga e descarga. Além disso, a etapa de campo proporciona a possibilidade de observar os aspectos geológicos e geomorfológicos da área de interesse.

3.2 Análise e Tratamento de Dados

A terceira etapa do estudo consiste na tratamento, análise e interpretação dos dados. Foi realizado o processamento e integração de dados de campo, com a base topográfica, realização de simplificações e agrupamento das unidades geológico-geotécnicas da região, que relacionou os parâmetros hidrodinâmicos obtidos na revisão bibliográfica para elaboração da modelagem acerca das unidades hidrogeotécnicas estabelecidas. Para análise e tratamento de dados, utilizaram-se os seguintes *softwares* computacionais: QGIS v. 3.26.2, GstarCAD v. 2022 e GeoStudio v. 2018, módulo SEEP/W.

4 RESULTADOS

4.1 Hidrogeologia Regional

De acordo com a premissa básica de uniformidade dos produtos, adotaram-se as quatro bases temáticas principais: planimetria, geologia, poços e hidrologia. A partir dos processos de ajustes e simplificações para adaptação à metodologia aplicada, foi possível obter o mapa hidrogeológico com destaque para os aquíferos mais importantes subjacentes a essas unidades, ressaltando suas características de transmissão e armazenamento de águas subterrâneas, partindo dos seguintes pressupostos (Struckmeir & Margat, op.cit):

- Individualização de corpos contínuos ou descontínuos, conforme suas características geométricas e formas de ocorrência das águas subterrâneas; e
- Classificação de diferentes tipos litológicos de acordo com as características de fluxo dominantes.

A composição final obtida do mapa hidrogeológico regional do estado de Mato Grosso é apresentada na Figura 1 a seguir.

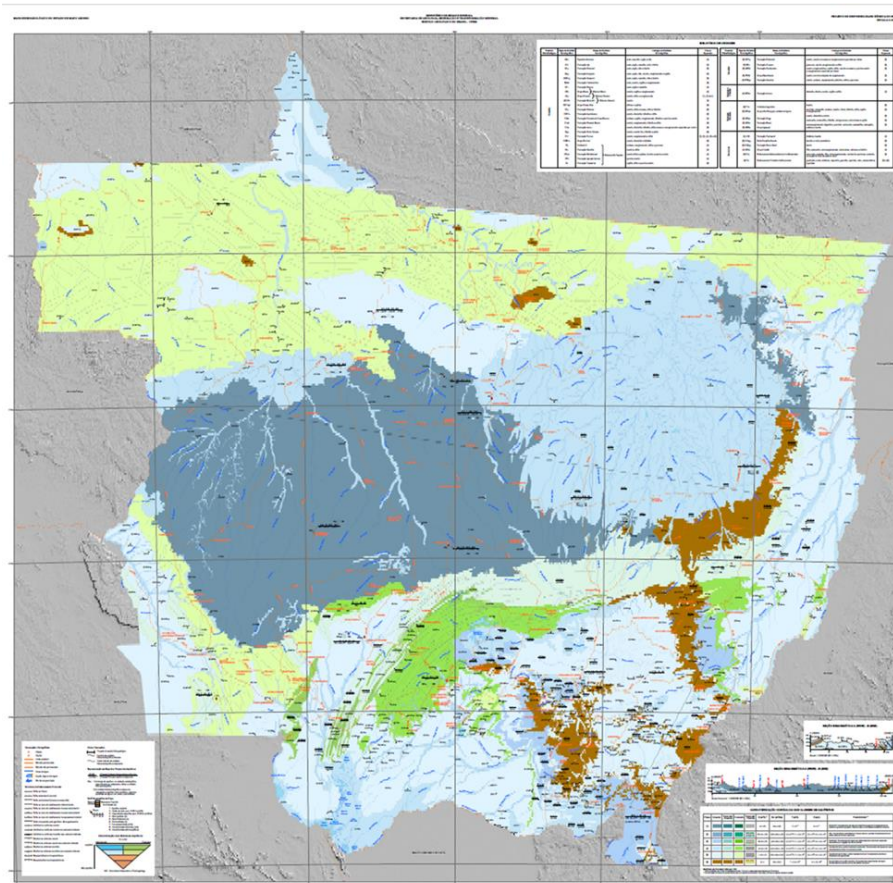


Figura 1 – Mapa Hidrogeológico do estado do Mato Grosso.

4.1.1 Unidade Hidroestratigráfica

Para a comparação das produtividades de cada ponto analisado, foram definidos intervalos de bombeamento de 0 a 12 horas contínua e rebaixamento da coluna d'água fixado em 25 metros. As informações hidráulicas e hidrodinâmicas foram obtidas a partir de 3.747 registros de poços tubulares disponíveis no Sistema de Informações de Água Subterrânea — SIAGAS (CPRM, 2020).

A partir da análise estatística dos dados de vazão desses poços, em conjunto com as demais características hidráulicas, cada unidade hidroestratigráfica foi classificada com base em sua produtividade. Foram consideradas ainda as informações sobre o relevo e a capacidade de drenagem interna dos solos, que influenciam diretamente na capacidade de recarga dos aquíferos.

A unidade hidroestratigráfica definida na análise é apresentada na Figura 2 a seguir.

Domínio Hidrogeológico	Sigla da Unidade Estratigráfica	Nome da Unidade Estratigráfica	Litologia da Unidade Estratigráfica	Classe Esperada
Granular	(5) NP1p	Formação Palmeiral	arenito, arenito-arcoseano e conglomerado suportado por clastos	(5)
	(5) NPu	Formação Urucum	grauvaca, arenito, conglomerado e siltito	(5)
	(5) MP2d	Formação Dardanelos	arenito conglomerático, argilito, siltito, arenito arcoseano, quartzo-arenito e conglomerado suportado por clastos	(5)
	(5) PP4b	Grupo Beneficente	arenito com intercalações de conglomerado	(5)
	(5) PP3go	Formação Gorotire	arenito, arcóseo, conglomerado polimítico, siltito e grauvaca	(5)
Faturado - Cárstico	(4) NP3ar	Formação Araras	dolomito, silexito, arenito, argilito e siltito	(4)
Faturado - Granular	(6) T1a	Unidade Araguaiha	brecha	(6)
	(5) NPapt	Grupo Alto Paraguai, unidade terrigena	quartzito, metapelito, arcóseo, arenito, ritmito, folhelho, siltito, argilito e conglomerado	(5)
	(5) NPpu	Formação Puga	arenito, diamictito e lamito	(5)
	(6) NPbr	Formação Baiú	metarenito, metassiltito, folhelho, metagrauvaca, metarcóseo e argilito	(5)
	(5) MP3a	Grupo Aguipeí	metaconglomerado oligomítico, quartzito, metarenito, metassiltito, metargilito, ardósia e arenito	(5)
Faturado	(4) J1βt	Formação Tapirapuã	diabásio, basalto	(4)
	(5) K1Apg	Suíte Paredeio Grande	basalto e rocha piroclástica	(6)
	(6) K1Bsg	Formação Serra Geral	diabásio	(6)
	(4) NPcu	Grupo Cuiabá	filito, metarenito, metaconglomerado, metarcóseo, mármore e itabirito	(4)
	(5) Fm	Embasmamento Metasedimentar Indiferenciado	mica-xisto, andesito, filito, metaconglomerado, metarenito quartzoso, metatufo, formação ferrífera bandada e chert	(5)
(5) Frc	Embasmamento Cristalino Indiferenciado	granitoide, rocha vulcânica, migmatito, granulito, quartzito, xisto, metavulcânica e gnaisses	(5) e (6)	

Figura 2 – Biblioteca de unidades hidroestratigráfica definidas regionalmente (CPRM, 2020).

4.1.2 Classificação Hidráulica das Classes de Aquíferos

A partir da hierarquização das unidades hidroestratigráficas em termos de produtividades hídras, elaborada por Diniz et al (2012), baseada no trabalho de Struckmeir e Margat (1995, Op. cit.), definiu-se a classe, bem como os dos parâmetros hidrodinâmicos estabelecidos para os sistemas aquíferos após compilação dos levantamentos realizados em campo, conforme apresentado na Figura 3.

CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA DAS CLASSES DE AQUIFEROS									
Classe	Granular	Faturado - Granular	Faturado	Faturado - Cárstico	Q (m ³ /h) *	Q/s (m ³ /h/m)	T (m ² /s)	K (m/s)	Produtividade **
(1)					Q ≥ 100	Q/s ≥ 4,00	T ≥ 10 ⁻²	K ≥ 10 ⁻⁴	Muito Alta: Fomecimentos de água de importância regional (abastecimento de cidades e grandes irrigações). Aquíferos que se destaquem em âmbito nacional.
(2)					50 ≤ Q < 100	2,00 ≤ Q/s < 4,00	1,0 × 10 ⁻³ ≤ T < 1,0 × 10 ⁻²	1,0 × 10 ⁻⁵ ≤ K < 1,0 × 10 ⁻⁴	Alta: Características semelhantes à classe anterior, contudo situando-se dentro da média nacional de bons aquíferos.
(3)					25 ≤ Q < 50	1,00 ≤ Q/s < 2,00	1,0 × 10 ⁻⁴ ≤ T < 1,0 × 10 ⁻³	1,0 × 10 ⁻⁶ ≤ K < 1,0 × 10 ⁻⁵	Moderada: Fomecimento de água para abastecimentos locais em pequenas comunidades e irrigação em áreas restritas.
(4)					10 ≤ Q < 25	0,40 ≤ Q/s < 1,00	1,0 × 10 ⁻⁵ ≤ T < 1,0 × 10 ⁻⁴	1,0 × 10 ⁻⁷ ≤ K < 1,0 × 10 ⁻⁶	Geralmente baixa, porém localmente moderada: Fomecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado.
(5)					1 ≤ Q < 10	0,04 ≤ Q/s < 0,40	1,0 × 10 ⁻⁶ ≤ T < 1,0 × 10 ⁻⁵	1,0 × 10 ⁻⁸ ≤ K < 1,0 × 10 ⁻⁷	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa: Fomecimentos contínuos dificilmente são garantidos.
(6)					Q < 1	Q/s < 0,04	T < 1,0 × 10 ⁻⁶	K < 1,0 × 10 ⁻⁸	Pouco Produtiva ou Não Aquífera: Fomecimentos insignificantes de água. Abastecimentos restritos ao uso de bombas manuais.

Modificada de Struckmeir & Margat, 1995
 * Valores válidos para teste de bombeamento de 12 horas e rebaixamentos máximos de 25 metros
 ** Na definição de classe de produtividade para os aquíferos cársticos e faturados, utilizou-se apenas dados de vazão

Figura 3 – Valores dos parâmetros hidrodinâmicos estabelecidos para os sistemas (CPRM, 2020).

4.2 Hidrogeologia Local

A adequação adotada seguiu os dados da geologia local, metodologia adotada no contexto hidrogeológico regional e dados acerca de fatores fito fisiográficos influenciadores. Sendo assim, os dois tipos básicos de unidades hidrogeotécnicas (aquífero fissural e poroso) definidos para a área da Cava Nosde são discriminados a seguir:

- **Unidade Fissural:** Constitui um sistema aquífero do tipo fraturado sendo que o fluxo de água subterrâneo ocorre principalmente pelas fraturas existentes no maciço de Metaarenito. Devido as suas características de aquífero fraturado, deve apresentar vazões muito variáveis. A condutividade hidráulica (ou a permeabilidade) e o armazenamento d'água em meios fissurados ou aquífero fissural dependem de uma série de características das descontinuidades que compartimentam o maciço, a saber: da amplitude/abertura; forma e rugosidade das paredes; frequência ou espaçamento; número de famílias ou sistemas; orientação e posição (direção e mergulho); persistência e propriedades do material que eventualmente a preencha. Para o caso em questão acredita-se que a capacidade de armazenamento e transmissão desse aquífero fissural sejam baixos;
- **Unidade Porosa:** Constitui o sistema aquífero do tipo livre, intergranular e não consolidado, constituído por areias finas com frequentes níveis argilosos. É relacionado com o Metarenito, suas alterações, aos perfis de intemperismo mais desenvolvidos sendo menor sua influência no Xisto. A Porosidade e Permeabilidade desse aquífero são controladas pela matriz das variedades litológicas.

4.3 Modelo Hidrogeológico

As Figuras 4 e 5 apresentam os resultados 2D sem e com a condição de contorno do poço de alívio aplicada ao longo da linha de tela do poço, respectivamente. Observou-se que a superfície freática caiu a uma profundidade aceitável (linha freática no poço de bombeio), onde o caudal bombeado necessário para chegar a esta condição seria de $1,14 \times 10^{-4}$ (m³/s) para uma queda na cota 309.35 m do nível freático (Figura 6).

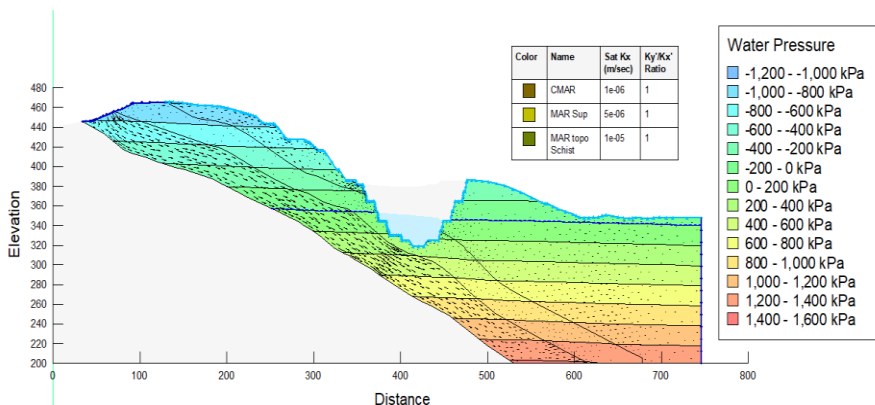


Figura 4 – Modelo sem o poço de bombeio.

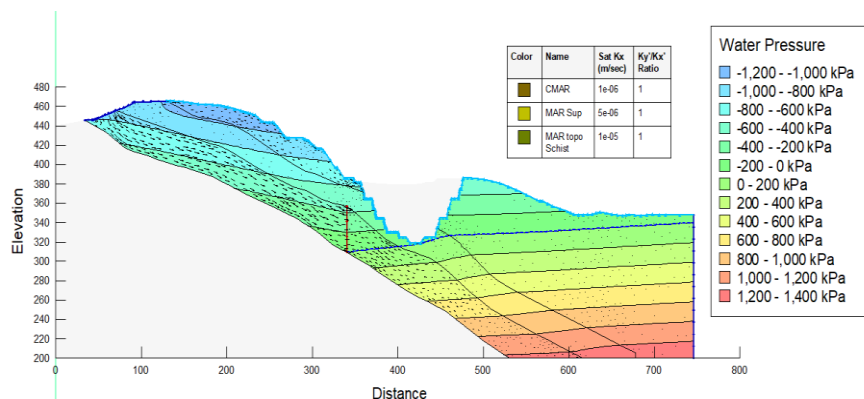


Figura 5 – Modelo com o poço de bombeio.

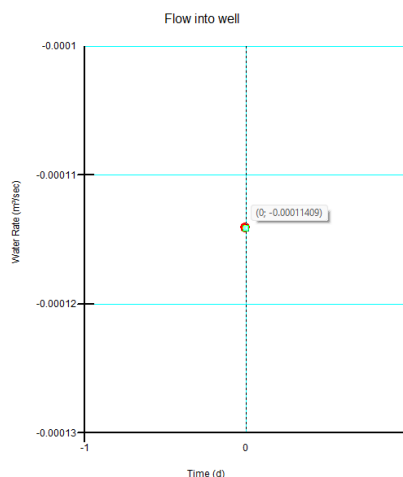


Figura 6 – Caudal de bombeio.

No entanto, isto representou uma situação em que o poço de alívio seria equivalente a uma vala longa e estreita, não representando as condições reais do campo. Como se trata de um fluxo tridimensional em um poço, foi necessária uma análise 3D para avaliar a influência dos poços de alívio.

No modelo numérico 3D, a distância entre poços foi avaliada a partir de uma distância inicial de partida. A distância foi atualizada até chegar no resultado esperado.

Quando considerou-se espaçamento entre os poços de 80 m, a superfície freática resultante apresentou-se um pouco abaixo da capacidade do poço de bombeamento (Figura 7).

No espaçamento entre bombas de 100 m, a infiltração ocorreu na porção limite do poço de bombeamento na cava (Figura 8). Este resultado se mostrou abaixo da capacidade do poço de bombeamento, entretanto, mesmo neste grande espaçamento, os poços obtiveram uma boa influência.

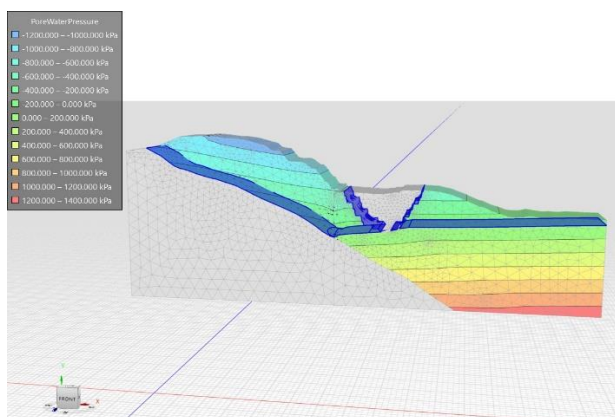


Figura 7 – Resultado do modelo 3D com as bombas espaçadas a 80 m.

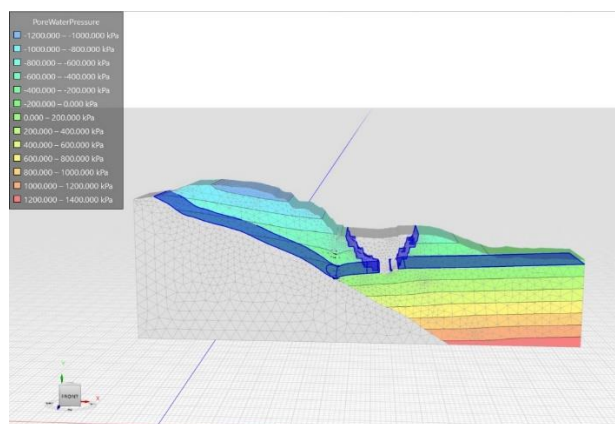


Figura 8 – Resultado com as bombas a 100 m.

No presente projeto foi ilustrado numa forma eficaz o espaçamento e caudal de bombeio de poços para aliviar a pressão artesianas no lado esquerdo da Cava Nosde. Os modelos trabalharam conjuntamente utilizando o software Seep/W 2D e 3D, onde as análises de infiltração 3D forneceram informações poderosas sobre o espaçamento dos poços e as distribuições de carga associadas.

Assim sendo, a distância escolhida entre os poços foi de 100 m, podendo ser necessários estudos de recuperação do poço para estimar o caudal necessário para atingir a cota modelada.

5 CONCLUSÕES

Com base nas observações da inspeção de campo e de acordo com os estudos elaborados, conclui-se que a modelagem hidrogeológica foi uma importante ferramenta para a elaboração do presente trabalho, que possibilitou representar a concepção da estrutura geológica da área de estudo em conjunto com a determinação do sistema do fluxo de água subterrânea, permitindo direcionar o plano de bombeamento necessário para o rebaixamento da superfície freática da cava.

No entanto, não foi possível caracterizar as condições freáticas em profundidade a partir das informações atualmente disponíveis. Devido a este fato, recomenda-se a realização de uma campanha de sondagem a fim de se aferir o nível de água na cava, seguida de outra para a instalação de medidores de nível de água e piezômetros, a fim de entender o comportamento da freática. Ensaio de perda de água no maciço rochoso e de infiltração nos trechos de solo também são recomendados para se aferir os coeficientes de condutividade hidráulica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM (2020) Sistema de Informações de Água Subterrânea (SIAGAS).
- Diniz, J. A. O., Monteiro, A. B., Feitosa, F. A. C., Freitas, M. A., Peixinho, F. C. (2012) Metodologia para *Elaboração de Mapas Hidrogeológicos*. In: XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Bonito, MS. Resumos Expandidos... Bonito, MS: CBAS, p. 1-4.
- Fernandes, C. J., Ruiz, A. S., Kuyumjian, R. M., & Pinho, F. E. C. (2005). Geologia e controle estrutural dos depósitos de ouro do Grupo Aguapéi – Região da Lavrinha, sudoeste do cráton amazônico. *Revista Brasileira de Geociências*, 35(1), 13-22.
- Fetter, C. W. (2001) *Applied Hydrogeology*. 4 ed. New Jersey: Prentice hall. 615 p.
- Geraldes M.C., Van Schmus W.R., Condie K.C., Bell S., Teixeira W., Babinski M. (2001) Proterozoic geologic evolution of the SW part of the Amazonian Craton in Mato Grosso state, Brazil. *Precambrian Research*. 111: 91-128.
- Saes G.S & Leite J.A.D. (1993) Evolução Tectono-Sedimentar do Grupo Aguapéi, Proterozóico Médio na Porção Meridional do Cráton Amazônico: Mato Grosso e Oriente Boliviano. *Revista Brasileira de Geociências*, 23:31-37.
- Saes G.S. (1999) *Evolução Tectônica e Paleogeográfica do Aulacógeno Aguapéi (1.2-1.0 Ga) e dos Terrenos do seu embasamento na Porção sul do Cráton Amazônico*. Inst. de Geociências. Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 135p.
- Souza E.P. & Hildred P.R. (1980) *Contribuição ao Estudo da Geologia do Grupo Aguapéi, Oeste de Mato Grosso*. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 31, Balneário de Camboriú, Anais 2: 813-825.
- Struckmeier, W. F., & Margat, J. (1995). *Hydrogeological maps: a guide and a standard legend*. Hannover: Heise, v. 17.