

CARACTERIZAÇÃO LITOLÓGICA E HIDRODINÂMICA DO AQUÍFERO ASSOCIADO AO COMPLEXO ALCALINO CARBONATÍTICO DO BARREIRO, OESTE DE MINAS GERAIS

Daniel Bernardes RAPOSO¹ & Sueli Yoshinaga PEREIRA¹

(1) Instituto de Geociências. Universidade Estadual de Campinas- UNICAMP. Av. João Pandiá Calógeras, 51 CEP 13.083-870, Campinas-SP. Endereços eletrônicos: dbraposo@hotmail.com; sueliyos@ige.unicamp.br

- Introdução
- Aspectos geológicos regionais
 - O Complexo Alcalino-Carbonatítico do Barreiro (CACB)
- Materiais, métodos e técnicas
 - Sondagem rotativa diamantada
 - Principais litotipos
 - Perfuração de poços tubulares
 - Método percussivo
 - Método roto-percussivo
 - Ensaio em poços de bombeamento
 - Ensaio de longa duração
- Apresentação dos dados
 - Ensaio de bombeamento de longa duração
 - Ensaio de bombeamento por etapas
 - Ensaio de recuperação
- Discussões, interpretações e resultados
- Considerações finais
- Agradecimentos
- Referências bibliográficas

RESUMO - Esse trabalho apresenta uma caracterização hidrogeológica do aquífero associado ao Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro, com base em dados de testemunhos de sondagem rotativa, ensaios em poços de bombeamento e na observação da variação do nível d'água em piezômetros.

A interpretação dos litotipos em perfis verticais mostra que o principal aquífero, denominado H-2, é um saprolito siltoso com níveis arenosos ricos em magnetita e silexitos e é semi-confinado pelo aquitardo H-1, um saprolito argiloso.

A condutividade hidráulica do aquífero H-2 é de 0,5 m/dia e foi obtida através de ensaios em poços de bombeamento, contudo, nas regiões mais arenosas e com silexitos é cerca de 1 m/dia.

Dois aquíferos confinados também foram identificados, um deles relacionado ao topo da rocha sã, associado aos carbonatitos da parte central da intrusão e o outro relacionado aos quartzitos fenitizados da borda da intrusão, esse último tem relação com as fontes mesotermiais.

Essa pesquisa dá ênfase na importância dos trabalhos de geologia básica e nos diferentes tipos de ensaios em poços de bombeamento como ferramentas indispensáveis na caracterização hidrogeológica de uma região.

Palavras chave: hidrogeologia, poços, teste de bombeamento, carbonatito.

ABSTRACT - This work presents a hydrogeological characterization of the aquifers related to the Alkaline Carbonatitic Complex of Barreiro, southern Brazil, based on core boreholes, pumping well tests and long term observation of the water level in piezometers.

The interpretation of vertical sections showed that the main aquifer, named H-2 is a silty saprolite with bands of coarse magnetite and silexites, it is semi-confinated by the H-1 aquitard, a clayish saprolite.

The hydraulic conductivity of the aquifer H-2 was obtained by pumping well tests and is around 0.5 meters/day, however, in silicite-magnetite-rich saprolites it is around 1 meter/day.

Two confined aquifers have been also identified. One of them is related to the top of the fresh rock that covers the central part of the intrusion and the other is related to the fenitized quartzites on the border and contains mesothermal water as the main characteristic.

This research emphasizes the importance of the basic geology and different kinds of pumping tests as an essential tool to the hydrogeological characterization of an area.

Keywords: hydrogeology, well, pumping test, carbonatite.

INTRODUÇÃO

O Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro (CACB) está localizado no sudeste brasileiro, na cidade de Araxá-MG. Nesse local está a maior mina de nióbio do mundo, uma das mais importantes minas de fosfato do Brasil e um parque de águas termais conhecido como Estância Hidromineral do Barreiro.

A atividade turística, mais antiga, tem convivido com a atividade mineira por mais de 30 anos e nesse contexto essa pesquisa tenta inserir dados sobre o conceito dos aquíferos bem como a hidrodinâmica associada à intrusão.

A hidrogeologia sempre foi tema de interesse nessa região. As primeiras produções científicas são datadas da década de 1920, quando Andrade Jr. (1925) e Guimarães (1925) descreveram a ocorrência de águas minerais e águas radioativas nas proximidades da intrusão. Mais tarde foram produzidos outros dois importantes trabalhos: Viana *et al.* (1999) e

COMIG (2001), em que se destaca o importante inventário feito sobre poços de monitoramento e poços tubulares, bem como algumas informações sobre hidroquímica. Viana *et al.* (1999) também fazem uma abordagem sobre os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero e citam que se trata somente de uma primeira aproximação, sendo necessários maiores estudos para se definir os valores reais.

Bertachini, *et al.* (2006) citam que não existem estudos detalhados envolvendo a caracterização por meio dos parâmetros hidrodinâmicos no CACB ou nas suas rochas encaixantes.

Essa pesquisa buscou, a partir de dados de sondagem rotativa, elaboração de perfis verticais, interpretação geológica e de ensaios em poços tubulares, elaborar o conceito dos aquíferos e os principais parâmetros hidrodinâmicos associados a essas rochas.

ASPECTOS GEOLÓGICOS REGIONAIS

Segundo Almeida (1983), os Complexos Alcalinos do oeste mineiro e sul de Goiás fazem parte província mesozóica do Alto Paranaíba.

Gomes & Comin-Chiaramonti (2005) descreveram que na Plataforma Sul-Americana os Complexos Alcalinos estão distribuídos ao longo das faixas móveis, relacionadas ao ciclo Brasileiro, nas margens intra-cratônicas da Bacia do Paraná, predominantemente sobre seu flanco leste e se estendendo por diversas centenas de quilômetros em dois principais distritos: o primeiro, também referido como Serra do Mar, claramente na direção de lineamentos nordeste, paralelo ao litoral de São Paulo e Rio de Janeiro. O segundo lineamento

leste-oeste é onde se encontram as intrusões mais próximas da costa, como a de Cabo Frio. As ocorrências mais próximas aos limites da Bacia do Paraná são abundantes nas áreas centrais e sul do país, que podem ser agrupadas em três proeminentes lineamentos com direção noroeste: Rio Verde-Iporá, Alto Paranaíba e Ponta Grossa.

Conforme Hasui & Cordani (1968), todas essas eruptivas alcalinas do Alto Paranaíba situam-se no Cretáceo Superior. A maioria das ocorrências parece estar agrupada em torno de 80 milhões de anos, inclusive o carbonatito de Araxá, datado pelo método K/Ar em biotitas, que apresenta idade de 87 milhões de anos.

Hasui *et al* (1975) mostram que importantes estruturas noroeste, presentes entre a Bacia do Paraná e o Cráton do São Francisco estiveram ativas em pelo menos dois episódios no Fanerozóico e são os lineamentos característicos da Faixa Brasília. No Cretáceo Superior ocorreu o soerguimento do Alto Paranaíba, que em conjunção com fraturamentos oeste-noroeste, pré-existent, permitiu o advento dos focos de magmatismo alcalino. Movimentos posteriores ao fim do Cretáceo, menos intensos, permitiram o aparecimento da superfície Pratinha, bem como erosões pirogenéticas.

Segundo Rodrigues & Lima (1984), as rochas das zonas periféricas dessas intrusões são, no geral, mais resistentes aos processos intempéricos, o que permite a formação de saliências anelares com soerguimento topográfico em relação às partes centrais e as rochas regionais. Essa geomorfologia é uma característica da região do Alto Paranaíba e uma importante característica hidrogeológica, já que abrigam muitas nascentes.

O complexo Alcalino-Carbonatítico do Barreiro (CACB)

O CACB está localizado a 6 km ao sul da cidade de Araxá. É um dos corpos alcalinos clássicos do Brasil, intrusivo nos terrenos Neoproterozóicos do Grupo Ibiá (Seer, 1999). As encaixantes são muscovita-quartzo-clorita xistos com intercalações subordinadas de quartzito (Moraes *et al*, 2008).

Trata-se de uma estrutura circular com cerca de 4,5 km de diâmetro e 1,5 km² de área. As rochas dominantes são carbonatitos e glimeritos, que ocorrem apenas em profundidade. Não ocorrem afloramentos de rocha, apenas os produtos de intemperismo: solos lateríticos, saprolitos e cangas nas porções interiores e quartzitos nas bordas.

Dados recentes de sondagem rotativa profunda mostraram que o manto de intemperismo tem profundidade média de 150 m, podendo atingir mais de 230 m.

A topografia apresenta cotas mais altas na porção sul, em torno de 1200 m e cotas baixas na porção nordeste, em torno de 950 m (Figura 1).

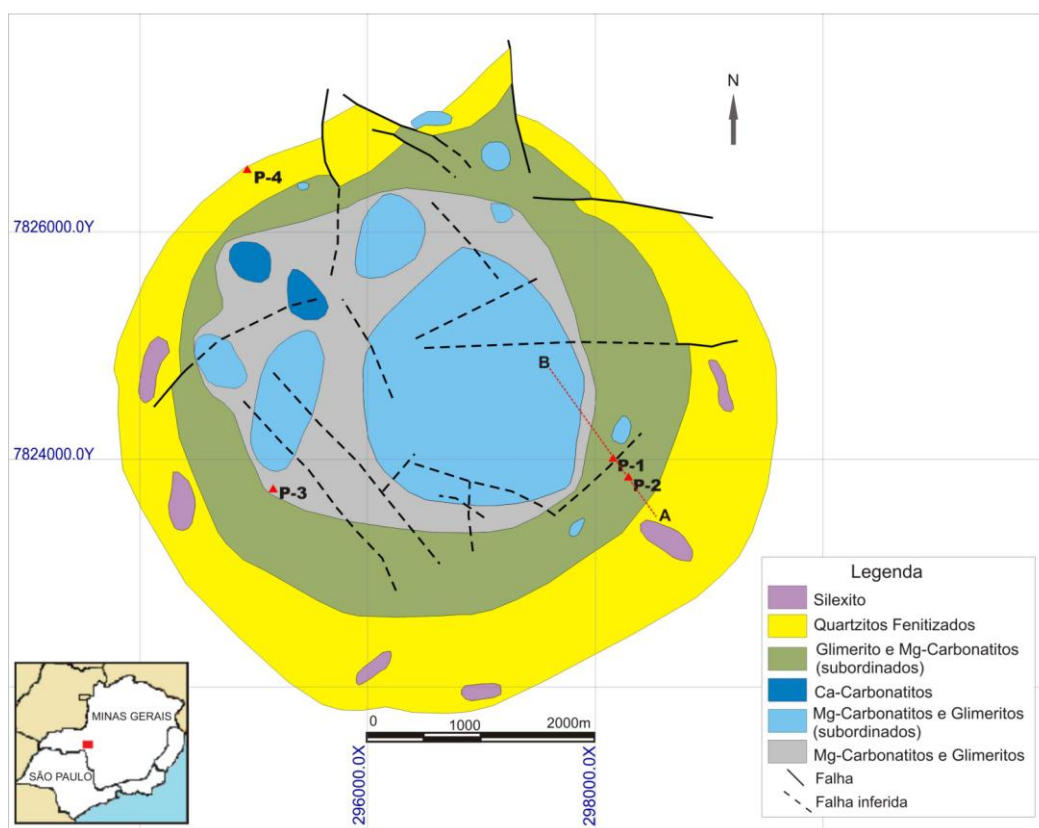


Figura 1. Mapa geológico do CACB (Silva, et al. 1979).
Coordenadas: UTM. Datum: SAD69.

O carbonatito, em termos geoquímicos, possui em média 15% de CaO, 17% de MgO, 12% de Fe₂O₃, 20% de CO₂. Dentre os elementos menores podem ser observados o Ba e Sr, com cerca de 1500 ppm e 1200 ppm, respectivamente (Toyoda et al. 1994). Em algumas porções do CACB ocorrem concentrações supergênicas e econômicas de apatita e pirocloro, que são minerais de minério de fosfato e nióbio, respectivamente. Isso promove a atividade mineral, com a economicidade de lavras a céu aberto que estão sendo operadas desde a década de 1970.

Conforme Issa Filho *et al* (1984), três principais tipos litológicos foram estudados em furos de sondagem: carbonatitos, glimeritos e uma rocha formada por carbonato, flogopita, apatita e magnetita, denominada de foscorito.

O carbonatito é predominantemente magnesiano. Os glimeritos são formados essencialmente por flogopita e localmente com piroxênio e olivina. Os foscoritos, que são rochas ricas em magnetita e apatita, formam uma massa espessa dentro dos carbonatitos, em bolsões descontínuos.

MATERIAIS, MÉTODOS E TÉCNICAS

Essa pesquisa está baseada na interpretação de sondagem rotativa, perfuração e ensaios de poços de bombeamento, que são descritos com mais detalhes a seguir.

Sondagem rotativa diamantada

Para a interpretação dos litotipos foram analisadas informações de testemunhos de sondagens profundas, mais especificamente de

sondagem rotativa diamantada (Figura 2). Trata-se de um método direto para coleta de amostras de pesquisa geológica através de um equipamento mecânico, conhecido como sonda, que perfura o solo através do movimento de rotação das suas hastes e uma peça cortante na extremidade, conhecida como coroa, que pode ser de vídia ou aço cravejado com diamante industrial.



Figura 2. Sonda rotativa na área sudeste da intrusão.

A finalidade da perfuração é a investigação do subsolo a partir da coleta da amostra do intervalo perfurado, essa amostra é denominada testemunho de sondagem. Atualmente os equipamentos de sondagem podem ser estruturas não móveis, sobre rodas, sobre esteiras rolantes e desmontáveis, estas utilizadas em locais de difícil acesso.

A perfuração geralmente começa com 4 polegadas em solo e assim que é atingida a rocha diminui para 3 polegadas. As perfurações podem ser verticais ou inclinadas, a depender do tipo de mineralização, já que o ideal é que a perfuração ocorra o mais perpendicular possível a estrutura geológica de interesse. Todas as sondagens aqui mencionadas foram realizadas verticalmente.

Para que ocorra a perfuração é necessário o resfriamento da coroa e limpeza dos detritos, para isso é usada bentonita ou algum polímero artificial misturado com água, costumeiramente conhecido como lama de perfuração.

O procedimento de sondagem consiste em injetar a lama de perfuração por dentro das hastas. Essa lama sai pela coroa e, devido a pressão hidráulica, retorna pelo espaço entre a haste e a parede do furo juntamente com os detritos de rocha que foram cortados pela coroa. Após passar por uma caixa de decantação, a lama é separada das partículas de solo e pode ser reaproveitada.

Furos com até 60° de inclinação é possível a instalação de piezômetros, que são tubos com diâmetro variando de 1 a 2 polegadas, inseridos no solo ou rocha, com finalidade de medir do nível de água ou o nível piezométrico.

O testemunho de sondagem é colocado em caixas com a marcação da profundidade, avanço (intervalo linear de cada trecho perfurado), e o intervalo recuperado de rocha. O ideal é que a recuperação seja próxima a 100%, contudo, recuperações acima de 85% podem ser aceitas. Recuperações muito baixas podem ser indicativas de cavidades ou erros operacionais.

Os dados de sondagem são melhores interpretados em seções verticais de forma que

os diferentes litotipos possam ser identificados. Modelos geológicos em 3D foram aplicados por Ahmed (2009) para estudar a variabilidade vertical de sedimentos e mostrou que uma interpretação geológica detalhada tem influência substancial na interpretação do comportamento do sistema aquífero.

Principais litotipos

O perfil litológico foi analisado em dezenas de furos de sondagem e também em amostras de calha obtidas na perfuração de poços de bombeamento. Com a análise dos testemunhos de sondagem foi possível correlacionar as diferentes unidades hidrogeológicas, e elaborar o modelo conceitual do aquífero associado à intrusão. Os principais litotipos observados são descritos a seguir:

- Cangas: cobertura ferruginosa que aflora em diversos locais do domo. Onde afloram cangas o saprolito é mais arenoso, sendo comuns espessos pacotes de silexitos, conforme foi observado em amostras de calha da perfuração de um poço, coletadas a cada metro. Na Figura 3 é possível observar as amostras, coletadas a cada metro, dos primeiros 30 metros da perfuração de um poço sobre uma região com predomínio de cobertura de cangas. Geralmente os poços apresentam ótimas vazões devido à granulação grossa desse saprolito.



Figura 3. Amostras da perfuração do poço P-2, coletadas a cada metro, composta por silexitos.

- Saprolito laranja: aquífero denominado como H-1, argiloso a pouco siltoso, cor vermelha no topo passando a laranja em profundidade. Esse saprolito cobre quase toda a porção interna da intrusão, exceto onde afloram manchas de canga. Sua espessura pode variar de poucos metros nas bordas até mais de 100 metros nas porções centrais.

- Saprolito marrom: horizonte denominado H-2, siltoso, pouco argiloso, com intercalações

muito arenosas ricas em magnetita (Figura 4), que certamente são os foscoritos intemperizados. Ocorre silexito intercalado com espessuras que variam de poucos centímetros até 40 metros. Trata-se do principal aquífero que fornece a água dos poços de bombeamento através desses pacotes arenosos e silexíticos que são muito porosos (Figura 5). Os poços perfurados em regiões com grande espessura de silexito apresentam vazões maiores.



Figura 4. Testemunhos de sondagem com amostras variando de 0,5 a 1 metro de comprimento: saprolito marrom arenoso.



Figura 5. Testemunho de sondagem: silexito.

- Saprolito verde, micáceo: aquíclode denominado como H-3. Trata-se de um saprolito muito argiloso, que ocorre logo acima da rocha sã.

- Rocha carbonatítica fraturada: rocha sã muito fraturada que forma o aquífero fissural com cerca de 20 metros de espessura abaixo do horizonte H-3. Trata-se de um aquífero pouco expressivo que possui o nível piezométrico em condição de artesianismo, localmente jorrante.

- Quartzitos fenitizados alterados: horizonte arenoso com cerca de 60 metros de espessura que aflora nas bordas da intrusão. Trata-se de um aquífero livre e uma importante zona de recarga, abastecendo tanto o complexo carbonatítico quanto as drenagens que nascem nas cabeceiras do domo e seguem na direção da rocha encaixante. O nível d'água está em torno de 50 metros de profundidade.

- Quartzitos fenitizados não alterados: aquífero fissural associado aos sistemas de

falhas e fraturas profundas. Na área norte da intrusão ocorre uma fonte mesothermal denominada Andrade Júnior, com temperatura em torno de 31°C, junto a uma dessas falhas.

- Xistos alterados: aquífero associado ao manto de alteração dos xistos e quartzitos do Grupo Ibiá. Sua espessura pode variar de poucos metros até cerca de 60 metros.

Em termos hidrogeológicos, a intrusão é um sistema aquífero complexo, cercado por rochas metamórficas com permeabilidade muito baixa.

A partir das descrições dos litotipos em testemunhos de sondagem foi possível elaborar seções geológicas verticais e assim verificar que essas rochas seguem um padrão tridimensional onde o topo e a base de cada unidade litológica pode ser representada. A Figura 6 mostra uma seção típica passando pelos poços P-1 (200 m de profundidade) e P-2 (163,5 m de profundidade).

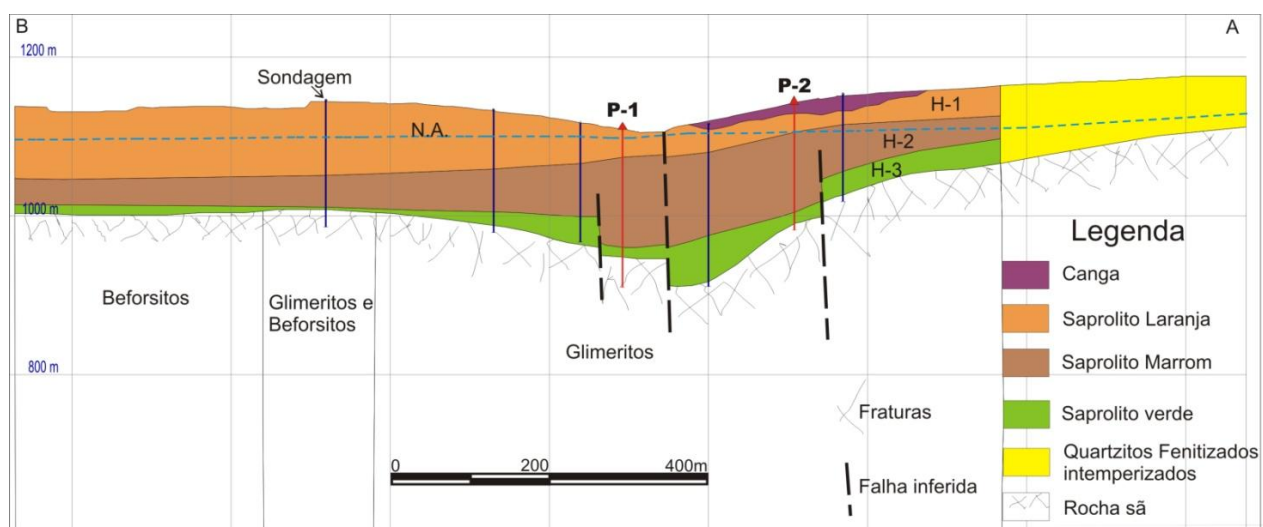


Figura 6. Seção geológica vertical típica.
(escala vertical igual escala horizontal)

A partir da interpretação geológica, o modelo conceitual aponta para um aquífero granular semi-confinado representado pelo saprolito marrom, um aquífero confinado representado pelo saprolito laranja, e um aquífero fraturado, confinado, de menor expressão, no topo da rocha sã (beforsitos e glimeritos).

Perfuração de poços tubulares

A perfuração dos poços de bombeamento é feita atualmente utilizando três principais técnicas: roto-percussivo, circulação

reversa e percussiva. Os poços descritos nessa pesquisa foram perfurados através do método roto-percussivo, com exceção do poço P-3, mostrado no mapa da Figura I, que foi perfurado através do método percussivo a cabo.

Método percussivo

Trata-se de um método empregado basicamente em solos e saprolitos. Consiste em utilizar o impacto das hastas, que são suspensas por um cabo de aço, contra o solo usando uma grande cunha de aço na ponta ou uma ponteira

de vdia e o material perfurado   removido através de um tubo com uma válvula de reten o na ponta.

  um método geralmente usado para situa es onde existe perda de lama do poço, ou seja, a lama não retorna pela boca do poço. A perda de lama   uma das principais complica es e pode ser causada pela presença de fraturas ou cavidades no solo ou rocha. Esse método   lento, cerca de 7 metros por dia, no máximo.

Método roto-percussivo

Esse método   o mais utilizado atualmente dado a maior disponibilidade de sondas. Ele utiliza a força de pistões hidráulicos, brocas tric nicas e bombas de lama potentes para perfurar, conforme pode ser visto na Figura 7. Para saprólitos a velocidade de perfura o pode chegar a mais de 50 metros por dia.



Figura 7. Sonda roto-percussiva.

Ensaio em poços de bombeamento

Segundo Custódio & Llamas (1983), na penetra o da água no poço o fluxo pode deixar de seguir a lei de Darcy e o movimento da água pode ter perdas de carga. Tudo isso irá proporcionar que o rebaixamento dentro do poço seja maior do que o rebaixamento que teoricamente deveria observar. O rebaixamento do nível d'água cresce rapidamente com o aumento da vazão. Conhecendo várias vazões e seus rebaixamentos correspondentes pode se estabelecer uma fórmula geral para o poço e traçar as curvas características que as relacionem, as quais são de grande utilidade para se chegar às vazões de bombeamento, determinar a eficiência do poço e identificar processos de colmata o e incrusta o dos filtros ou da zona filtrante.

O rebaixamento do nível d'água dentro de um poço   a soma do rebaixamento devido a várias causas, como por exemplo: (a) perda de carga do aq ifero, que   fun o do diâmetro do poço e das características do aq ifero, (b) não

validade da lei de Darcy nas proximidades do poço, que pode ser importante em poços de pequeno diâmetro, (c) perda de carga na penetra o da água no poço ou efeito parietal, que pode ser causada por filtros mal projetados ou com aberturas insuficientes, (d) ascensão da água no poço até a bomba e (e) entrada da água na bomba.

Em cada poço foi feito o teste de vazão escalonado em 3 ou 4 etapas de 8 horas e posteriormente o teste de vazão máxima.

A partir do teste escalonado (ou teste de produ o)   possível medir a eficiência hidráulica do poço (Jacob, 1947) que   definida como sendo a rela o entre as perdas de cargas naturais e as perdas de carga totais ocorridas durante o bombeamento. A eficiência hidráulica do poço pode ser obtida através da seguinte equa o: $B.Q / (B.Q + C.Q^2)$, onde: B.Q representa o rebaixamento devido às perdas no regime laminar e C.Q representa as perdas no regime turbulento. O coeficiente B   fun o do tempo de bombeamento e o coeficiente C

independe do tempo. Dessa forma é proposta a equação característica do poço como sendo: $s = BQ + CQ^2$, que determina o rebaixamento real do poço.

Essa metodologia é muito útil para se dimensionar com precisão o sistema de bombeamento e também, no futuro, analisar se um poço apresenta um problema de deficiência de bomba ou incrustação de filtros.

Rorabaugh (1953) define sua formulação para o rebaixamento da água em poços considerando duas principais variáveis. A primeira B.Q que representa as perdas de carga devido ao aquífero e varia com o tempo e a segunda C.Qⁿ devido aos demais fatores e que são independentes do tempo de bombeamento, sendo C definido como coeficiente de perda no poço.

Dessa forma é proposto escrever que: $S_p = BQ + CQ$. Mais geral do que proposto por Jacob (1947), onde sempre $n = 2$.

Para se conhecer os coeficientes B e C é necessário conhecer o rebaixamento, pelo menos, para 3 vazões diferentes.

Ensaio de longa duração

Durante o bombeamento da água de um poço ocorre o rebaixamento da carga hidráulica do aquífero e isso irá gerar um cone de rebaixamento ou cone de depressão. Com a observação do cone de rebaixamento no tempo é possível determinar as propriedades hidráulicas de um aquífero (Fetter, 2001).

Conforme Custódio & Llamas (1983), quando se inicia o bombeamento a vazão constante em um poço ou em qualquer tipo de captação, nos primeiros instantes se extrai a água do armazenamento nos arredores do poço. O coeficiente de armazenamento do aquífero (S) é adimensional e pode ser definido como sendo o volume de água liberado por um volume unitário do aquífero a um decréscimo de carga hidráulica.

Em igualdade de outros parâmetros, a velocidade de expansão e extensão do cone é muito mais rápida em um aquífero confinado que em um aquífero livre. O período no qual o rebaixamento vai aumentando se chama regime não permanente ou variável.

Em um aquífero de extensão muito grande, a velocidade do rebaixamento vai diminuindo paulatinamente até alcançar um

momento que é tão lento que se pode considerar que o rebaixamento está estabilizado e então se alcançou o regime quase permanente. Os aquíferos semi-confinados recebem uma recarga e quando a mesma se iguala a vazão de bombeamento, se estabelece um verdadeiro regime estacionário.

A característica fundamental do regime permanente é que não se toma água do armazenamento do aquífero, pois ele é um mero transmissor da recarga. No regime variável ou transitório o aquífero não apenas transmite a recarga, mas também fornece a água, ao menos em parte, entrando em jogo o coeficiente de armazenamento (S).

Um aquífero em exploração está em regime dinâmico, que pode ser permanente ou variável, conforme a recarga se iguale ou não à vazão extraída.

Para um projeto de rebaixamento de nível de água para uma escavação o ideal é que se mantenha o regime variável até a cota mínima de remoção do material que se pretende extrair. Portanto, o que se busca na fase anterior a lavra são testes de bombeamento de longa duração para analisar o comportamento do aquífero perante as novas condições impostas, em função do rebaixamento do nível d'água.

Nessa fase podem ser obtidos os parâmetros hidrogeológicos que servirão como suporte para a fase de planejamento do rebaixamento.

Para a interpretação dos ensaios de bombeamento de longa duração foi aplicada a teoria de Hantush (1956) para aquíferos confinados e drenantes (aquíferos semi-confinados), em regime variável e sem armazenamento no aquífero. Esse método é conhecido como "Método do Ponto de Inflexão de Hantush" e foi selecionado por ser o que mais se aplica ao modelo conceitual desenvolvido para a área de estudo.

Trata-se de um método que não necessita das conhecidas "curvas tipo", que são substituídas pela representação gráfica do rebaixamento versus tempo em uma base semi-logarítmica.

A partir do ponto de rebaixamento máximo $h_0-h_{máx}$, é traçada uma reta para se obter os seguintes parâmetros: m_i , que é o rebaixamento durante um ciclo logarítmico (ΔS_{10}), h_0-h_i que é o ponto de inflexão e t_i , referente ao tempo para h_0-h_i .

APRESENTAÇÃO DOS DADOS

Não foi realizado o teste escalonado nos poços P-4 e P-5, entretanto, são as únicas informações relacionadas à borda da intrusão, dentro dos quartzitos fenitizados e rocha encaixante. Para os poços P-3 e P-5 serão apresentados os ensaios de recuperação.

O poço P-5 não aparece na Figura 1, pois está localizado a cerca de 2 km para oeste da intrusão, onde aflora a rocha encaixante.

Para o poço P-1 existe a observação do rebaixamento em piezômetros, sendo possível

calcular o coeficiente de armazenamento (S), a condutividade hidráulica do aquífero granular (K) e a condutividade hidráulica do aquífero (K'), já que se trata de um aquífero semi-confinado.

As Tabelas 1 e 2 mostram de forma resumida o perfil construtivo e litológico dos poços, respectivamente.

Tabela 1. Aspectos construtivos dos poços de bombeamento.

Poço	Profundidade. (m)	Diâmetro (pol.)	Nível estático (prof., m)	Vazão (m ³ /dia)	Filtros (tipo)	Entrada de água (m)
P-1	200	10	11,62	3.672	Aço espiralado galvanizado	38,8 a 44,8 51,1 a 63,1 69,5 a 81,5 87,8 a 117,8 124,0 a 130,0 142,6 a 160,6
P-2	163,5	10	41,32	4.800 (previsto)	Aço espiralado galvanizado	59 a 69 84 a 118 121 a 144,2 147,2 a 153,2
P-3	152,4	6	37,72	792	NOLD	39,5 a 44,5 56,5 a 61,5 67,5 a 75 81 a 83,5 89,5 a 97
P-4	90,0	6	16,70	492	NOLD	35,5 a 40,5 46,6 a 49
P-5	100,0	6	22,60	278,4	?	?

Tabela 2. Perfil litológico dos poços

Poço	De	Até	Litotipo
P-1	0	16	Solo argiloso
	16	28	Saprolito laranja, siltoso com passagens mais argilosas
	28	150	Saprolito marrom siltoso a arenoso com silexitos
	150	162	Rocha alterada, ocorre saprolito verde micáceo
	162	200	Rocha sã, basicamente glimeritos
P-2	0	3	Solo
	3	15	Canga, basicamente óxido-hidróxido de ferro
	15	154	Saprolito marrom muito arenoso com silexitos
	154	163,5	Rocha sã, basicamente glimeritos
P-3	0	39	Saprolito laranja argilo-siltoso
	39	99	Saprolito marrom siltoso até 56 m passando a arenoso
	99	150	Rocha sã, basicamente carbonatito branco
P-4	0	55	Saprolito de quartzitos
	55	90	Quartzitos fenitizados com fendas até 82 m
P-5	0	100	Xistos do Grupo Ibiá

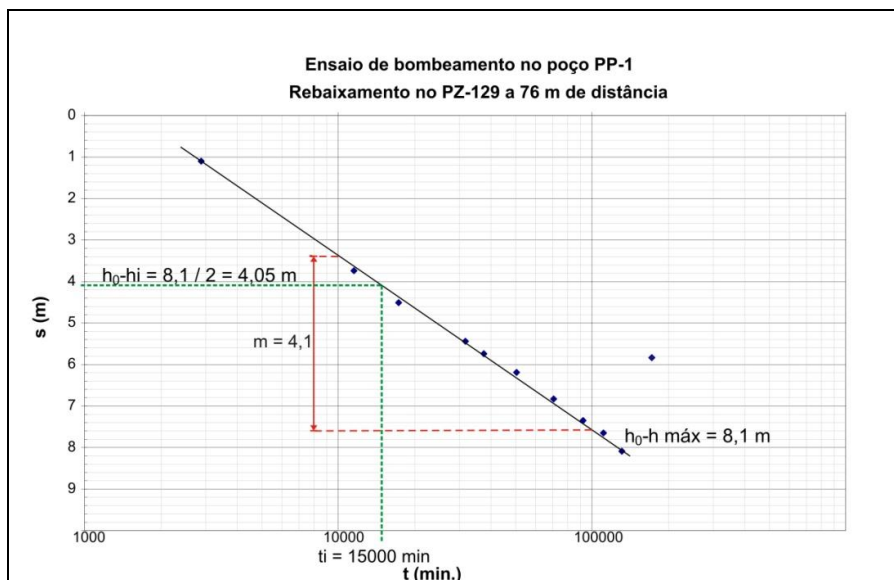
Ensaio de bombeamento de longa duração

No poço P-1 foram feitos ensaios de bombeamento de longa duração com a observação do rebaixamento em vários piezômetros localizados a diferentes distâncias

a fim de se determinar as propriedades do aquífero granular e do aquífero confinado.

O Gráfico 1 mostra o rebaixamento (s) com o tempo (t) em um poço de observação.

Gráfico 1. Ensaio de bombeamento de longa duração no poço P1.



A interpretação das propriedades hidrodinâmicas foi feita com base no método de Hantush (1956) para aquíferos semi-confinados, conforme exemplo apresentado em Fetter (2001).

O mesmo tratamento foi feito para outros 5 piezômetros com distâncias variadas do poço P1, considerando uma vazão de 3.684 m³/dia. Todos os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros hidrodinâmicos do aquífero.

Método do Ponto de Inflexão de Hantush - poço P-1							
Poço observação	PZ-129	PZ-137	PZ-130	PZ-121	PZ-122	PZ-117	MÉDIA
Distância do poço (m)	76	86	157	225	277	300	-----
Rebaixamento (m)	8,1	7,6	6,0	7,4	5,1	5,6	-----
Profundidade do piezômetro (m)	148	155	174	194	183	142	-----
Espessura do aquífero (m)	146	146	146	146	146	146	146
Espessura do aquífero confinado (m)	16	16	42	16	16	16	20
T (m ² /d)	137,5	95,3	210,1	134,9	150,6	110,2	139,8
K (m/d)	0,94	0,65	1,44	0,92	1,03	0,75	0,96
S	0,09	0,16	0,02	0,01	0,01	0,04	0,06
K' (m/d)	0,012	0,025	0,012	0,002	0,002	0,003	0,01

Pode-se observar uma grande diferença entre os parâmetros obtidos, principalmente para T.

A Figura 8 mostra a situação do cone de rebaixamento provocado pelo bombeamento realizado por cerca de 250 dias para uma vazão

de 3684 m³/dia no poço P-1. O nível estático do poço P-1 foi de 11,62 m e seu nível dinâmico de 120 metros.

Pode ser observado que não ocorre uma forma circular típica de aquíferos homogêneos e isotrópicos.

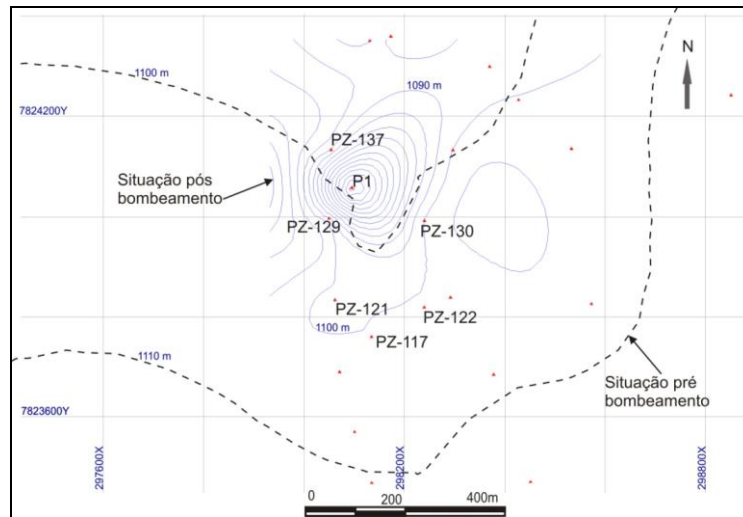


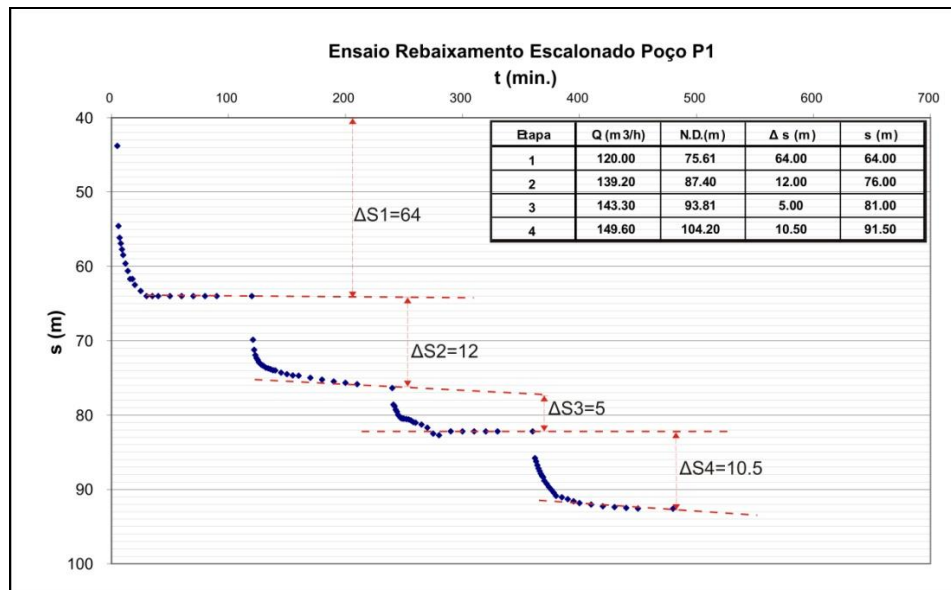
Figura 8. Equipotenciais antes e depois de iniciado o bombeamento do poço P1.

As equipotenciais foram obtidas através da interpolação dos pontos de medida de nível d'água, em relação aos piezômetros descritos na Tabela 3, antes e depois do teste de bombeamento de longa duração no poço P-1.

Ensaio de bombeamento por etapas

Nos poços P-1, P-2 e P-3 foram feitos teste de vazão por etapas também conhecido como ensaio de bombeamento escalonado. Os resultados obtidos para o poço P-1 são apresentados no Gráfico 2.

Gráfico 2. Ensaio escalonado

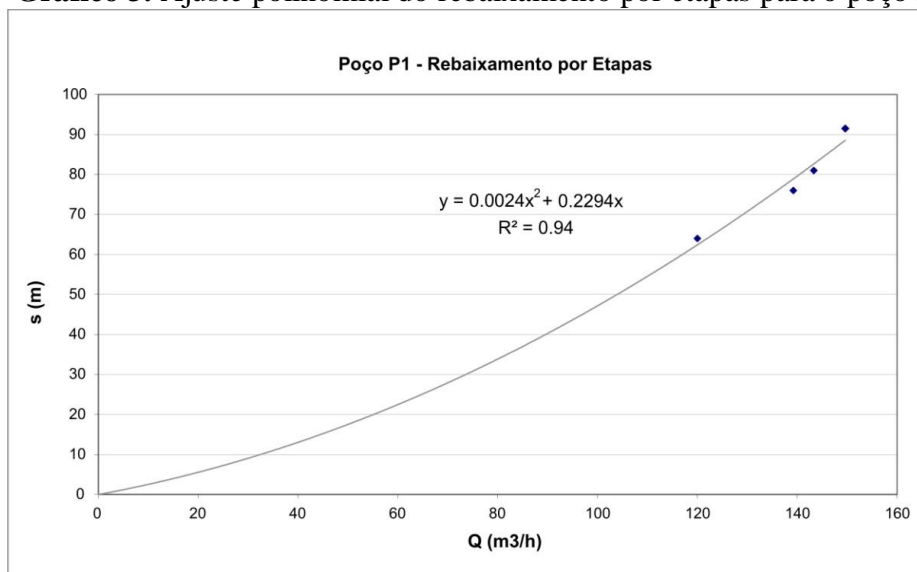


Para os poços P-1 e P-2, cada etapa do ensaio teve duração de 120 minutos, com medidas do nível d'água a cada minuto nos primeiros 10 minutos, a cada 2 minutos entre 10 e 20 minutos, a cada 5 minutos entre 20 e 40 minutos e a cada 10 minutos após 40 minutos. No poço P-3 cada etapa teve duração de 8 horas

com metodologia das medidas igual ao descrito anteriormente.

Fez-se a opção pelo ajuste polinomial (Shekhar, 2006) do gráfico de rebaixamento (Δs) pela vazão (Q) em cada etapa, a fim de se obter a perdas de carga e eficiência dos poços, conforme apresentado no Gráfico 3.

Gráfico 3. Ajuste polinomial do rebaixamento por etapas para o poço P-1



A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos para os poços P-1, P-2 e P-3.

Tabela 4. Resultados dos testes de rebaixamento por etapa

Poço / Etapa	Tempo (min.)	Vazão, Q (m³/h)	Rebaixamento observado, s (m)	Coefficiente de perda da formação, C	Coefficiente de perda do poço, B
P-1 / 1	120	120,0	64,0	0,0024	0,2294
P-1 / 2	120	139,2	76,0	0,0024	0,2294
P-1 / 3	120	143,3	80,5	0,0024	0,2294
P-1 / 4	120	149,6	90,0	0,0024	0,2294
P-2 / 1	120	71,7	24,0	0,0002	0,3216
P-2 / 2	120	91,5	31,0	0,0002	0,3216
P-2 / 3	120	111,1	38,0	0,0002	0,3216
P-2 / 4	120	131,5	45,5	0,0002	0,3216
P-3 / 1	480	11,0	6,0	0,0247	0,2596
P-3 / 2	480	22,0	17,5	0,0247	0,2596
P-3 / 3	480	33,0	35,5	0,0247	0,2596

Tabela 4 (continuação). Resultados dos testes de rebaixamento por etapa

Poço / Etapa	BQ	CQ ²	Rebaixamento calculado (BQ+CQ ²)	Eficiência do Poço BQ/(BQ+CQ ²)*100, %
P-1 / 1	27,5	34,6	62,1	44
P-1 / 2	31,9	46,5	78,4	41
P-1 / 3	32,9	49,3	82,2	40
P-1 / 4	34,3	53,7	88,0	39
P-2 / 1	23,1	1,0	24,1	96
P-2 / 2	29,4	1,7	31,1	95
P-2 / 3	35,7	2,5	38,2	94
P-2 / 4	42,3	3,5	45,7	92
P-3 / 1	2,9	3,0	5,8	49
P-3 / 2	5,7	12,0	17,7	32
P-3 / 3	8,6	26,9	35,5	24

Ensaio de recuperação

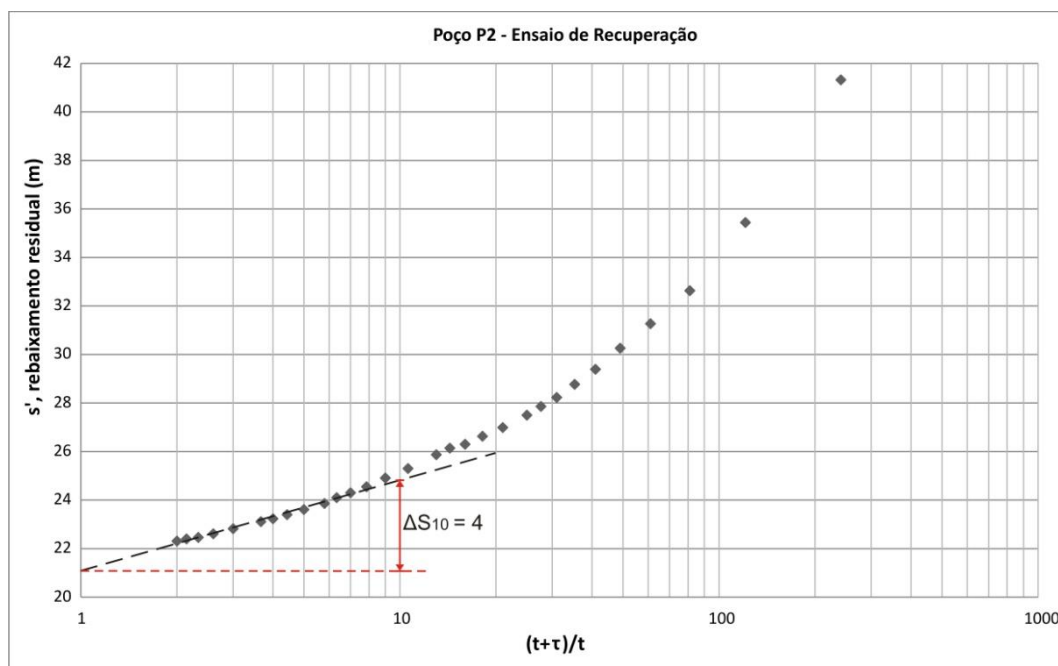
Na ausência de poços de observação, os ensaios de recuperação do nível d'água em poços de bombeamento podem fornecer uma boa aproximação da transmissividade (T) e da condutividade hidráulica (K) a partir da fórmula da aproximação de Jacob, que considera $T = 0,183 \times Q / \Delta s$, (Custódio & Llamas, 1983).

Após o bombeamento de um poço a vazão constante, o bombeamento é

interrompido e é realizada a medida da recuperação do nível d'água até que o nível inicial seja restabelecido.

O Gráfico 4 mostra o exemplo de como os dados da recuperação podem ser representados. O valor de ΔS_{10} representa o rebaixamento residual em um ciclo logarítmico.

Gráfico 4. Rebaixamento residual pelo tempo no ensaio de recuperação do nível d'água para o poço P2.



A Tabela 5 apresenta os valores calculados para a Transmissividade (T) e

condutividade hidráulica (K) através do ensaio de recuperação do nível d'água.

Tabela 5. Resumo dos testes de recuperação.

Poço	Profundidade (m)	Espessura do aquífero (m)	Q (m ³ /dia)	ΔS_{10}	T (m ² /dia)	K (m/dia)
P-2	163,5	154,0	3113	4,0	142,4	1,17
P-3	152,4	60,0	792	6,5	22,3	0,47
P-4	90,0	55,0	492	7,3	12,3	0,17
P-5	100,0	62,5	278	12,9	3,9	0,005

DISCUSSÕES, INTERPRETAÇÕES E RESULTADOS

Os ensaios em poços mostraram que se trata de um aquífero complexo, com muita variação dos parâmetros hidrodinâmicos, contudo, as interpretações dos perfis litológicos

e dos perfis de poços puderam esclarecer que existe uma forte correlação entre os parâmetros obtidos com a geologia interpretada.

Os poços perfurados dentro do CACB, cujas características construtivas e perfis litológicos foram apresentados nas Tabelas 1 e 2, mostram uma grande variação na vazão, mas o que se pode notar é que nos locais onde ocorrem pacotes espessos de silexitos, como nos poços P-1 e P-2, as vazões obtidas são quase quatro vezes maiores que nos demais locais dentro intrusão.

O poço P-4, perfurado nos quartzitos fenitizados apresenta uma vazão menor que a dos poços da intrusão. O poço P-5, perfurado na rocha encaixante apresenta a menor vazão. Estas baixas vazões podem certamente ser causadas pela pequena espessura desses aquíferos.

A transmissividade obtida a partir de testes de bombeamento e recuperação ficou em torno de 140 m²/dia e a condutividade hidráulica em torno de 1 m/dia nos poços P-1 e P-2. A proximidade dos dois valores é explicada pela semelhança litológica.

O poço P-3, apesar de possuir um perfil com cerca de 50 metros de solo arenoso, apresenta valores de transmissividades da ordem de 6,5 vezes menor e a condutividade hidráulica a metade, em comparação aos locais onde ocorrem silexitos.

O ensaio de bombeamento de longa duração realizado no poço P-1 mostrou um cone de rebaixamento suavemente anisotrópico, o que era de se esperar, já que diversas falhas podem ser interpretadas nos perfis verticais. Tais falhas podem originar saprólitos com características físicas diferentes.

A grande variação na espessura e granulometria dos horizontes de saprólito, bem como os resultados discrepantes observados nos poços de observação, conforme apresentado na Tabela 3, indicam que se trata de um aquífero heterogêneo.

Os ensaios escalonados mostraram que a perda de carga do poço não é diretamente proporcional ao desempenho do poço, sendo que ele é menor no poço P-3 do que no poço P-2, sendo o primeiro de 6 polegadas e o segundo de 10 polegadas, ou seja, o poço P-3 poderia ter um diâmetro maior que sua vazão certamente seria a mesma. Nesse caso, pode-se ver que a perda de carga da formação geológica foi fator determinante no desempenho do poço, em termos de vazão.

Outro fato observado é que o principal aquífero é granular e semi-confinado, com a camada semi-confinante com condutividade hidráulica de 0,01 m/dia. O coeficiente de armazenamento do principal aquífero é de 0,06 e a condutividade hidráulica varia entre 0,47 e 1,4 m/dia.

Outro fato importante é que o aquífero associado ao CACB é isolado, ou seja, cercado por outra unidade aquífera, representada pelos xistos, de baixíssima condutividade hidráulica (0,005 m/dia).

Foi observado que a transmissividade tem uma relação linear com a vazão dos poços, conforme pode ser observado no Gráfico 5. Por outro lado, o ajuste polinomial é mais adequado na correlação entre a vazão e a condutividade hidráulica, conforme Gráfico 6.

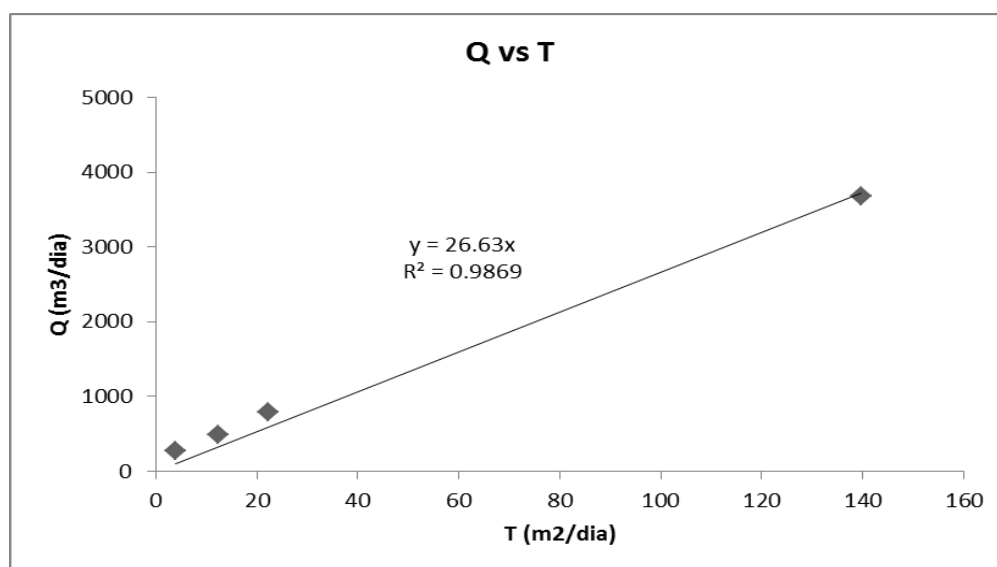


Gráfico 5. Correlação entre a vazão e transmissividade

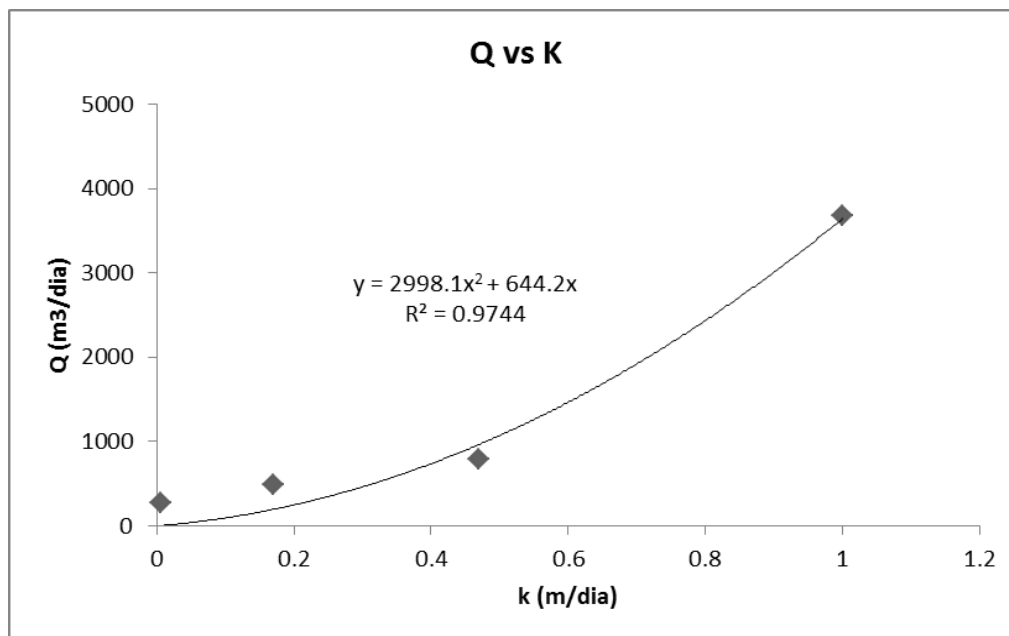


Gráfico 6. Correlação entre vazão e condutividade hidráulica

O poço P-2 não foi considerado nos estudos de correlação, pois ele não estava em operação até a elaboração desse artigo, optou-se

em considerar a vazão real dos poços e não a vazão de teste.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar da grande variação na espessura dos litotipos presentes no manto de intemperismo do CACB, dados de sondagem rotativa e ensaios em poços mostram que os parâmetros hidrodinâmicos estão fortemente ligados aos tipos de saprólitos e sua granulometria.

O modelo conceitual proposto é de um aquífero principal poroso, semi-confinado, e outro aquífero de menor expressão, fissural e confinado, associado ao topo da rocha sã.

Ensaio em poços de bombeamento são ferramentas importantes para se conhecer o K e

T do aquífero. Também foi possível estimar o coeficiente de armazenamento e a condutividade hidráulica do aquífero, através de testes de bombeamento de longa duração e a observação do rebaixamento em piezômetros.

Esses estudos visaram o melhor entendimento do aquífero associado ao CACB, que é uma importante província mineral e turística e podem contribuir para estudos de uso e ocupação do solo e também na elaboração de modelos matemáticos mais próximos a geologia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Bunge Fertilizantes S.A. da cidade de Araxá-MG.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AHMED, A.A. Using lithologic characterization and groundwater flow modeling techniques for aquifer modeling of the Sohag area, Egypt.

- Hydrogeology Journal 17(5) p.1189-1201, 2009.
2. ALMEIDA F.F.M. Relações tectônicas das rochas alcalinas mesozóicas da região meridional da Plataforma Sul-Americana. Rev. Bras. Geoc, 13. p.139-158, 1983.
 3. ANDRADE JR, J.F. Reconhecimento geológico dos arredores de Araxá e outros pontos de ocorrência de águas minerais. Ministério da Agricultura, Indústria e Comercio – Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil. Bol. n° 9 – Contribuições à Geologia Econômica. Rio de Janeiro. p. 65-77, 1925.
 4. BERTACHINI, A.C., NEVES, A.C., CANTARUTTI, C.C., PERES, M.A.G., RODRIGUES, M.P.. Projeto de rebaixamento do nível d'água da mina F4 - Fase I. REL_BUN_001_06. Relatório Técnico Interno. Elaborado pela empresa MDGEO. Outubro de 2006. Vol. I, 2006. 137 p. + Anexos.
 5. COMIG - COMPANHIA MINERADORA DE MINAS GERAIS. Projeto Hidroambiental da Estância Hidromineral do Barreiro de Araxá. Belo Horizonte. 76 p., 2001.
 6. CUSTÓDIO E. & LLAMAS M.R. Hidrologia Subterrânea. 2 edition. Barcelona: Ediciones Omega. 2 vol. 2350 p., 1983.
 7. FETTER, C.W. Applied hydrogeology. 4th ed. 598 p., 2001.
 8. GUIMARÃES, D. Estudo de algumas rochas relacionadas com as fontes minerais de Araxá e outras. Ministério da Agricultura, Indústria e Comercio – Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil. Bol. n° 9 – Contribuições à Geologia Econômica. Rio de Janeiro. p. 79-98, 1925.
 9. GOMES C.B. & COMIN-CHIARAMONTI P. An Introduction to the Alkaline and Alkaline-Carbonatitic magmatismo in and around the Paraná Basin. In: Mesozoic to Cenozoic Magmatism in the Brazilian Plataform. São Paulo. Editora da USP: Fapesp. 749 p., 2005.
 10. HANTUSH, M.S. Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers. Transactions, American Geophysical Union 37: p. 702-14, 1956.
 11. HASUI Y., SADOWSKI G.R., SUGUIO K., FUCK G.F. The phanerozoic tectonic evolution of the western Minas Gerais State. An. Acad. Bras. Ciências. 47, p. 431-438, 1975.
 12. HASUI, Y & CORDANI, U.G. Idades potássio-argônio de rochas eruptivas mesozóicas do oeste mineiro e sudeste de Goiás. Cong. Bras. Geol. 22, Belo Horizonte. Anais...Belo Horizonte, S.B.G., p. 139-143, 1968.
 13. ISSA FILHO, A., LIMA, P.R.A.S., SOUZA, O.M. Aspectos da geologia do complexo carbonatítico do Barreiro, Araxá, MG, Brasil. In: CBMM, Complexos Carbonatíticos do Brasil: Geologia. São Paulo, CBMM, p. 20-44, 1984.
 14. MORAES, L.C., SEER, H.J., BENTO, J.H.B., LEAL, C.F., MADEIRA, M.R. Análise geométrica do alojamento de magmas no entorno do Complexo Alcalino-Carbonatítico do Barreiro, Araxá, Minas Gerais, por meio da atitude espacial de fraturas e diques. IV Simpósio de vulcanismo e ambientes associados. Foz do Iguaçu, PR. Anais, 2008.
 15. RODRIGUES C.S. & LIMA P.R.A.S. Carbonatitic Complexes of Brazil. In: Carbonatitic Complexes of Brazil: Geology. São Paulo, CBMM, p. 1-17, 1984.
 16. SEER, H. J. Evolução Tectônica dos Grupos Araxá, Ibiá e Canastra na sinforma de Araxá, Minas Gerais. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências. Universidade de Brasília, 267 p., 1999.
 17. SHEKHAR, S. An approach to interpretation of step drawdown tests. Hydrogeology Journal, 14, p. 1018-1027, 2006.
 18. TOYODA, K., HORIUCHI, H., TOKONAMI, M. Dupal anomaly of Brazilian carbonatites: Geochemical

correlations with hotspots in the South Atlantic and implications for the mantle source. *Earth and Planetary Science Letters*, 126, p. 315-331, 1994.

19. VIANA H.S., DAVIS E. G., BEATO D.A.C., CABRAL J.A.L. Projeto Araxá: Estudo Geoambiental das Fontes Hidrominerais. COMIG/CPRM. Belo Horizonte. 125 p., 1999.

20. SILVA, A. B., MARCHETTO, M., SOUZA, O. M. 1979. **Geologia do Complexo Carbonatítico de Araxá (Barreiro), MG.** *Mineração e Metalurgia*, v. 415, p. 14-18.

21. RORABAUGH, M.J. 1953. **Graphical and theoretical analysis of step-drawdown tests of artesian well.** *Proc. Am. Soc. Civil Eng.* v.79, n.23.

22. JACOB, C.E., 1947. **Drawdown test to determine effective radius of artesian well.** *Transaction A.S.C.E.*, vol. 112, paper 2321, pp. 1047-1064.

*Manuscrito recebido em: 01 de novembro de 2011
Revisado e Aceito em: 17 de maio de 2013*