

# ESTUDO DOS PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS OBTIDOS EM ENSAIOS DE CAMPO EM ITABIRITOS BRANDOS DA PORÇÃO SUDOESTE DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG

Daniele Costa de Mesquita<sup>1</sup>, Júlia Cotta Maciel Dantas<sup>2</sup>, Rodrigo Sérgio de Paula<sup>1</sup>,  
Kênia Janete Guerra<sup>1</sup>

1 - Companhia Siderúrgica Nacional, zona rural Congonhas, s/n – Congonhas, MG – CEP 36415-000. dani.mesquit@gmail.com,  
rodrigo.spdm@yahoo.com.br, geokenia@hotmail.com

2 -Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Campus Morro do Cruzeiro, s/n –  
Ouro Preto, MG - CEP 35.400-000. cmd.julia@gmail.com

Recebido em 9 de maio de 2017; aceito em 26 de agosto de 2017

**Resumo:** O artigo consiste na caracterização dos parâmetros hidrodinâmicos de condutividade hidráulica (K), transmissividade (T) e coeficiente de armazenamento (S) para itabiritos brandos na porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero (QF), MG. O estudo de tais parâmetros é essencial para o conhecimento dos aquíferos, tanto com relação à sua localização como também em termos de qualidade e quantidade das águas. O K foi obtido matematicamente por meio da equação de HVORSLEV (1951) e pela análise gráfica, também pelo método de Hvorslev, no programa AquiferTest, a partir de dados do slug testes em piezômetros. T e S foram obtidos por ajustes gráficos no mesmo programa pelos métodos de Neuman e Boulton, e com base em testes de bombeamento em poços tubulares profundos. Nas análises de condutividade hidráulica, o método gráfico se mostrou mais eficiente e os valores obtidos são coerentes com os resultados de MOURÃO (2007) - indicando uma uniformidade desta característica do aquífero Cauê, em toda porção oeste do QF. Já os valores de T e S obtidos refletem a heterogeneidade e anisotropia do sistema aquífero, possivelmente relacionadas às regiões de confinamento e uma permeabilidade secundária, provavelmente associada ao controle estrutural do fluxo.

**Palavras Chave:** Parâmetros hidrodinâmicos, Slug teste, teste de bombeamento, itabirito brando

**Abstract:** STUDY OF THE HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF SOFT ITABIRITOS IN THE SOUTH-WEST PORTION OF QUADRILATERO FERRIFERO OBTAINED BY FIELDWORK SIMULATIONS. This paper is based on the characterization of the hydrodynamic parameters hydraulic conductivity (K), transmissivity (T) and storage (S) in soft itabiritos of the southwest portion of the Quadrilatero Ferrifero (QF), MG. The study of these parameters is essential to the knowledge about aquifers, in terms of localization, quantity and quality of the water. The K was calculated using Hvorslev's method and obtained by slug tests data for piezometers in the AquiferTest software. On the other hand, T and S had their results achieved using Neuman and Bouton methods also through the AquiferTest. The results were acquired by slope adjust in graphs and the basis for these adjustments were pumping tests in deep tube wells. Considering the hydraulic conductivity, the graphic analyses were more effective and the results show a uniformity of this feature over the west QF, being consistent with MOURÃO (2007) studies. T and S, in turn, display the heterogeneity and anisotropy of the Caue iron formation probably caused by confined areas and secondary porosity due to the local structural complexity.

**Keywords:** Hydrodynamic parameters, Slug test, pumping test, soft itabirito.

## 1. INTRODUÇÃO

O Quadrilátero Ferrífero (QF), localizado na porção central do estado de Minas Gerais, é uma das áreas clássicas da geologia pré-cambriana do Brasil, sendo conhecida desde o século XVII como uma rica província auri-ferrífera. Em sua borda sudoeste, nos arredores da cidade de Congonhas, a província se destaca pela produção de minério de ferro, geologicamente hospedado na Formação Cauê, constituída por formações ferríferas bandadas, de idade paleoproterozoica (~2.0 Ga). Tal formação corresponde também ao principal aquífero do Quadrilátero Ferrífero (Aquífero Cauê), que exhibe grande variabilidade textural e composicional, de origem primária e secundária, o que imprime notável heterogeneidade e anisotropia ao aquífero que pode se comportar como um meio essencialmente poroso ou fissural, com passagens de natureza intermediária ou mesmo maciças (MOURÃO 2007). O entendimento do

comportamento hidrogeológico da Formação Cauê é diretamente relacionado à operacionalização da exploração dos principais depósitos minerais do estado de Minas Gerais.

A determinação dos parâmetros de condutividade hidráulica (K), transmissividade (T) e coeficiente de armazenamento (S) é parte essencial dos estudos hidrogeológicos necessários à localização e caracterização de aquíferos, tanto no aspecto da quantidade como da qualidade das águas. São necessários para que se possam realizar análises sobre o aquífero, auxiliar no seu entendimento, aumentar a previsibilidade do seu comportamento e no gerenciamento dos seus recursos.

Este trabalho, buscou-se obter as propriedades hidráulicas do aquífero a partir de ensaios comumente realizados em poços e piezômetros logo após sua construção, desta forma, seria possível melhorar o modelo conceitual de áreas onde não é possível realizar ensaios mais complexos, a partir de dados já existentes. Em piezômetros a

condutividade hidráulica foi obtida por meio do *slug test*, realizado na zona saturada, enquanto as propriedades hidráulicas T (transmissividade) e S (armazenamento), foram obtidas a partir de testes de bombeamento (*pumping test*).

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A região do estudo localiza-se na porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero (QF), próximo à cidade de Congonhas, Minas Gerais. Geologicamente, está situada em um setor de grande complexidade estrutural do QF, com influência do Sinclinal de Dom Bosco, de orientação geral E-W, e do Sinclinal da Moeda, cujo traço axial é aproximadamente N-S (Figura 1).

A região está inserida na borda meridional do antepaís brasileiro, o Cráton São Francisco, na zona de influência entre a Faixa Alto Rio Grande, localizada a sul e a Faixa Araçuaí, a leste, ambas de idade brasileira (ALMEIDA & HASUI 1984, FUCK *et al.* 1993).

O Quadrilátero Ferrífero (DORR 1969) é caracterizado pelo arranjo grosseiramente quadrangular de sinclinais onde afloram sedimentos plataformais do Supergrupo Minas, de idade paleoproterozoica, separados por estruturas antiformais irregulares com terrenos arqueanos do tipo greenstone belt do Supergrupo Nova Lima, e domos de rochas cristalinas arqueanas e

proterozoicas, (MACHADO *et al.* 1992, MACHADO & CARNEIRO 1992, NOCE 1995) incluindo granito-gnaisses, metatonalitos a sienogranitos, pegmatitos, anfibolitos, ultramáficas, além de supracrustais metamorfisadas na fácies anfibolito.

A porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, onde se encontra a área de estudo (Figura 2), é marcada pela junção entre duas estruturas regionais, os sinclinais Moeda e Dom Bosco, onde também se faz presente um grande número de falhas de empurrão e transcorrentes. Nessa região, estão presentes todas as unidades que compõem a coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Figura 3), desde o Complexo Metamórfico do embasamento e o Supergrupo Rio das Velhas, ambos de idade arqueana, até as unidades de idade paleoproterozoica do Supergrupo Minas, sua principal feição, e Grupo Itacolomi.

No Supergrupo Minas, especificamente no Grupo Itabira, tem-se a unidade inserida em sua porção mediana, especificamente a Formação Cauê, que abriga o objeto principal de investigação deste trabalho: o Aquífero Cauê. Tal formação corresponde a uma sequência de rochas metassedimentares de origem fluvial a marinha plataformais de idade paleoproterozoica, empilhadas em quatro grandes unidades que totalizam mais de 4.000 m de espessura.

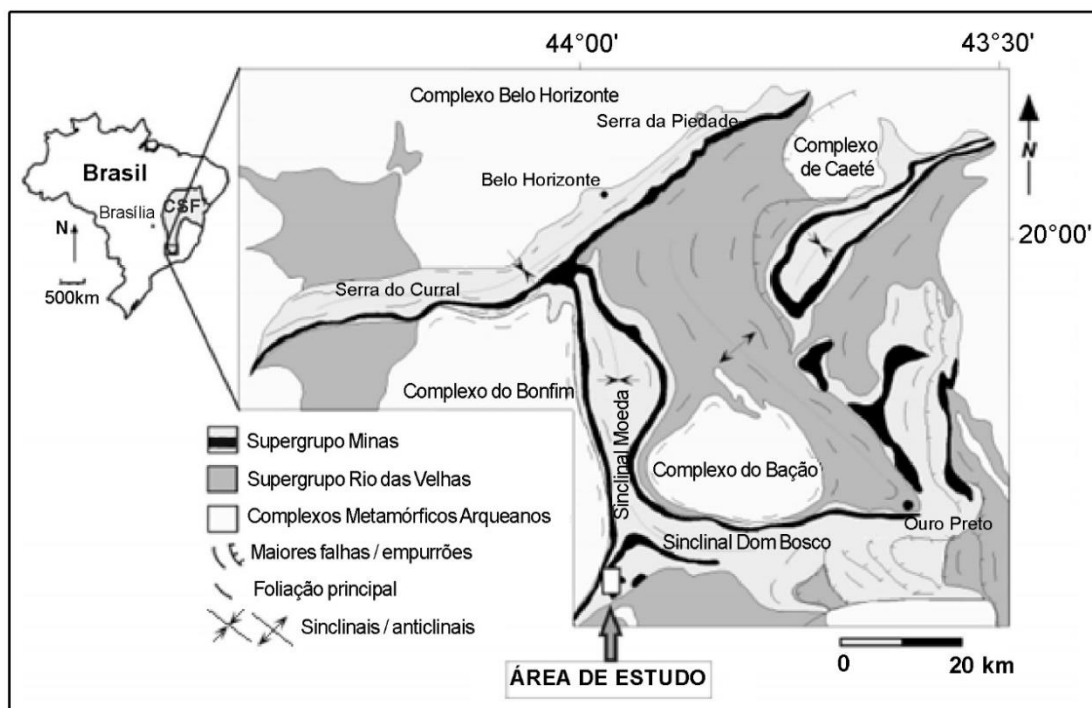
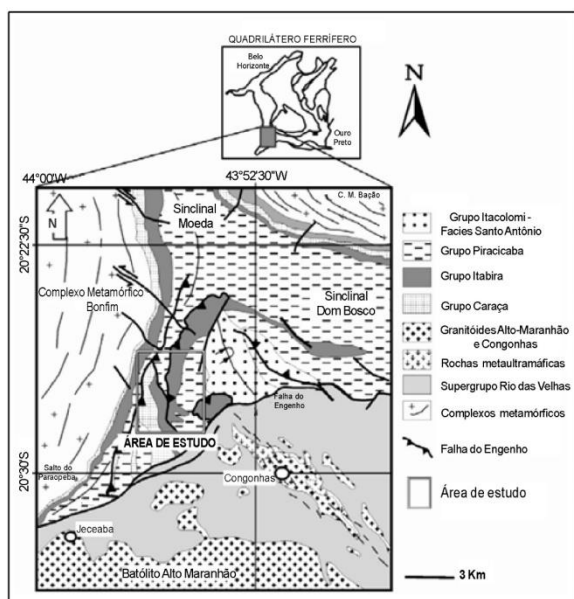


Figura 1. Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero e localização da área de estudo a sudoeste. Modificado de TRZASKOS *et al.* (2011).

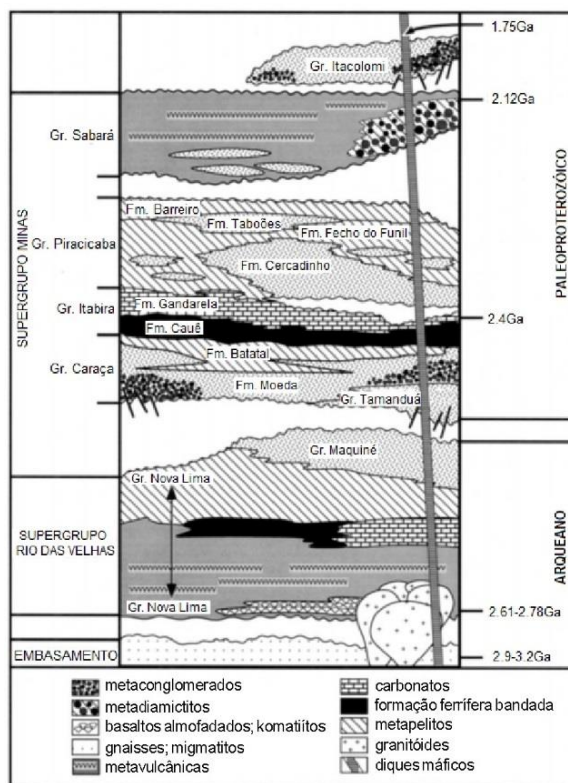


**Figura 2.** Mapa geológico da porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero abrangendo a área de estudo. Modificado de TRZASKOS et al. (2011).

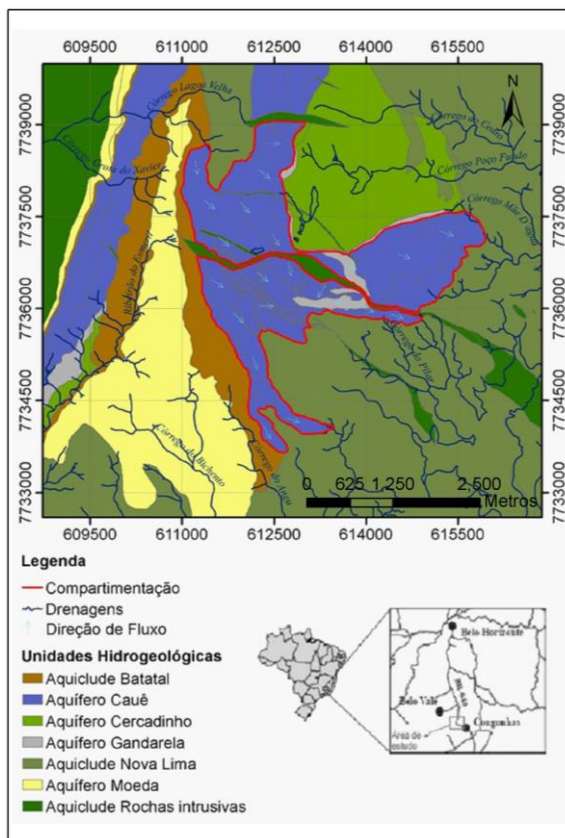
A Formação Cauê é predominantemente caracterizada por formações ferríferas bandadas (BIF) do tipo Lago Superior (GROSS 1965) e subordinadamente caracterizada por lentes de quartzitos ferruginosos, itabiritos manganíferos e filitos. Essas formações ferríferas foram metamorfisadas em fácies xisto-verde a anfibolito, configurando algumas variedades litológicas como: itabiritos, itabiritos anfibolíticos, itabiritos dolomíticos e “hematititos” (corpos de minérios compostos predominantemente por hematita). As mais importantes

O Aquífero Cauê, constituído pelos itabiritos e hematitas da Formação Cauê, é a principal unidade hidrogeológica do local de estudo, que possui ainda zonas aquíferas associadas ao fraturamento dos dolomitos da Formação Gandarela e quartzitos da Formação Moeda (NEVES & BERTACHINI 2004). Devido a complexa estruturação, com dobramentos, falhas e fraturas, o aquífero local apresenta caráter heterogêneo. O aquífero Cauê local é subdividido em compartimentos, denominados Norte e Sul, separados por diques básicos e filitos que funcionam como aquitardos e aquícludes. Existe uma ligação entre os compartimentos, devido ao fraturamento destas rochas, que permite um fluxo do Compartimento Norte para o Sul. Grandes falhas de caráter regional também interligam estes compartimentos, notando-se fluxo por estas estruturas, conforme constatado em análises hidroquímicas de inorgânicos realizados em diferentes pontos da região. O fluxo no Compartimento Norte do aquífero se dá de noroeste para sudeste, enquanto no Compartimento Sul, ele

ocorre de quase de norte para sul, mas ainda com uma componente noroeste-sudeste (Figura 4).



**Figura 3.** Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero. Adaptada de ALKMIM & MARSHAK (1998).



**Figura 4.** Unidades hidrogeológicas e compartimentação da região de estudo. Adaptada de CUNHA et al. (2012).

### 3. METODOLOGIA

A metodologia para análise dos parâmetros de condutividade hidráulica (K), transmissividade (T) e coeficiente de armazenamento (S) envolveu o uso dos softwares Microsoft Excel 2016® e AquiferTest 2011.1®, a partir de dados de slug testes realizados em 12 piezômetros e testes de bombeamento em 6 poços tubulares profundos (Figura 5).

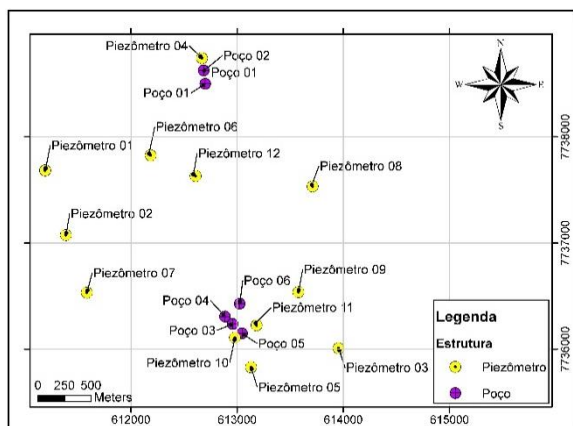


Figura 5. Localização dos poços e piezômetros onde foram realizados testes.

#### 3.1. Metodologia dos slug testes

Os 12 piezômetros foram instalados com tubos de PVC geomecânicos com diâmetro de 2", seções filtrantes ranhuradas de comprimento variável e bases tamponadas por cap de pressão. O espaço anular entre o tubo e a perfuração em cada poço foi preenchido por pré-filtro, constituído por areia tipo pérola essencialmente quartzosa, até cobrir a secção filtrante e, a seguir, com calda de bentonita até a superfície, de modo a garantir a estanqueidade, evitando, deste modo, o trânsito vertical da água subterrânea no espaço anular. As seções filtrantes de todos os poços foram posicionadas na mesma litologia, que consiste em um itabirito brando.

O ensaio *slug test* consiste no lançamento de um volume conhecido de água ou objeto com volume conhecido no poço em estudo e a observação das condições para recuperação do nível estático inicial. As medições de nível foram realizadas manualmente, em intervalos de tempo pré-determinados, com auxílio de medidores de nível e cronometro e organizadas em planilha própria.

A partir dos dados, se obtém o valor de K do aquífero e rochas adjacentes, levando em conta as características do meio poroso e das propriedades do fluido, e pode ser expressa em m/s ou cm/s (FEITOSA & FILHO 2000). Em um meio isotrópico, pode ser definida como a velocidade aparente por gradiente unitário.

Como parâmetros de entrada no AquiferTest foram utilizados o nível estático, a seção filtrante, a espessura saturada, o raio de perfuração e raio de completação do poço ou do piezômetro. Além disso, foram inseridos dados da relação tempo-nível de recuperação de água. Foram então gerados gráficos comparando tempo e recuperação do nível d'água e feito o ajuste de curva, de modo a se obter o parâmetro desejado. Assim, foi possível desconsiderar da análise de K, os primeiros valores obtidos, os quais estão sob influência do efeito de drenança do pré-filtro e escolher o intervalo com menores oscilações. Nos *slug* testes, o K foi analisado sob o método de Hvorslev.

Após a realização das análises gráficas, os dados foram planilhados e tratados no Excel. Todos os dados de slug test foram organizados em planilhas que foram utilizadas para alimentação da fórmula determinada pelo método de vazão de Hvorslev, descrito a seguir.

O *slug test* é o método mais utilizado na definição de K devido ao seu baixo custo, facilidade de execução e rapidez, pois a duração do ensaio demanda um curto período de tempo. No entanto, a acurácia do teste é altamente dependente da qualidade construtiva do poço e, onde há falhas, podem ser gerados valores de condutividade de baixa acurácia.

#### Método de Hvorslev

Método aplicado para aquíferos confinados e livres, homogêneos, isotrópicos, de espessura uniforme, baixo gradiente hidráulico. A fórmula proposta por HVORSLEV (1951) é descrita da seguinte forma:

$$K = \frac{r^2 \ln\left(\frac{L}{R}\right)}{2LT_L} \quad \text{Equação 1. Condutividade - Método de Hvorslev}$$

$$\text{Onde } T_L = \frac{\pi^2}{FK} \text{ e } FK = \frac{\pi^2 dr}{dt}$$

Onde, r = raio do revestimento (m), L = comprimento da seção de filtros (m), R = raio contínuo de interferência do poço de observação e T<sub>L</sub> = tempo para 37% de recuperação.

O método pressupõe que: o aquífero é semiconfinante, não drenante, com extensão lateral infinita, homogêneo, isotrópico de espessura uniforme e o lençol freático é horizontal antes do teste. Além disso, a injeção ou retirada do volume de água resulta em uma mudança instantânea no nível da água, a inércia da coluna de água e perdas não-lineares são insignificantes e o poço é totalmente ou parcialmente penetrante, com uma largura infinitesimal em que o fluxo é horizontal em direção ou distante do poço.

### 3.2. Metodologia dos pumping testes

A transmissividade  $T$  corresponde à quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero enquanto o armazenamento é a capacidade de um aquífero em armazenar e transmitir água e depende das características do meio. Para a estimativa das propriedades hidráulicas  $T$  (transmissividade) e  $S$  (armazenamento), utiliza-se o teste de bombeamento (*pumping test*) que consiste no bombeamento a uma taxa fixa durante determinado intervalo de tempo e medição da variação do nível de água (*drawdown*) no poço de controle e/ou em poços e piezômetros adjacentes (estruturas de observação). Com ele é feita a avaliação do desenvolvimento do poço e identificação dos limites do aquífero.

O ensaio de bombeamento foi realizado em 6 poços tubulares profundos, revestidos em diâmetros de 10", com bomba submersa, instalada em cada poço a uma profundidade apropriada. Adotou-se nos ensaios de bombeamento a vazão constante e posterior ensaio de recuperação conforme sugerido por FEITOSA (1996 apud CARVALHO 2004). As bombas utilizadas variaram conforme vazão esperada para cada poço. O estudo preliminar para determinação da vazão foi realizado via bombeamento por compressor, ao fim do processo de desenvolvimento do poço. Os testes foram executados após o término do poço, sendo que as medidas de rebaixamento foram medidas no próprio poço. Segundo Kruseman & Ridder (1979), estes dados podem ser utilizados para uma avaliação geral das características hidráulicas do aquífero.

O ensaio de bombeamento com bomba submersa consistiu na realização de duas etapas principais: a primeira ocorreu de forma contínua, a uma vazão constante, sendo denominada de ensaio de vazão máxima e a segunda foi a observação da recuperação do poço, denominado ensaio de recuperação.

Tendo em vista as características do aquífero Cauê, assume-se que o mesmo apresente comportamento, em geral, livre a localmente confinado. A espessura do aquífero utilizada para ambos os métodos foi a profundidade saturada de cada poço. A distância média entre os poços e pontos de observação é de 180 m.

Para interpretação dos dados obtidos utilizou-se o aplicativo matemático Aquifer Test que permitiu a avaliação pelos métodos de NEUMAN (1975) e BOULTON (1963). O método de Neuman é aplicado para aquíferos livres que atendem as seguintes condições: presença de um poço de observação com distância conhecida e taxa de bombeamento constante. Xiang (1996) concluiu que este método

representa melhor as características de um aquífero livre, mesmo que as curvas de tempo  $x$  rebaixamento não tenham formato em 'S', devido ao curto tempo do teste, já que, diferentemente dos métodos de Theis e Cooper-Jacob, Neuman considera os efeitos da drenagem do aquífero. A equação desenvolvida por Neuman representando o rebaixamento em um aquífero não confinado é dado por:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(uA, uB, \beta)$$

Onde:  $W(uA, uB, \beta)$  é conhecido como função do poço não confinado;  $uA = r^2S / 4Tt$  (Curva Tipo A para momento inicial);

$uB = r^2Sy / 4Tt$  (Curva Tipo B para momento final);

$\beta = r^2Kv / D^2Kh$ ;  $Kv$ ,  $Kh$ : vertical e/ou permeabilidade horizontal;

$Sy$ : Specific Yield

Já o método de Boulton (1963) pode ser aplicado para aquífero livre isotrópico ou anisotrópico que pode ser utilizado tanto para poços parcialmente ou quanto para totalmente penetrantes.

A cada método selecionado foi gerado um gráfico diferente com uma curva para cada estrutura (Figuras 6, 7 e 8).

## 4. ENSAIOS

### 4.1. Resultados do parâmetro K em slug testes

Os dados obtidos nos ensaios pelo método de Hvorslev podem ser observados na Tabela 1 abaixo. A Figura 6 ilustra o gráfico obtido para o piezômetro 10 (P10).

**Tabela 1.** Valores de condutividade obtidos nos ensaios em piezômetros

Piezômetro	Litologia	K (m/s) AquiferTest	K (m/s) Calculado
P01	Itabirito brando	2.26E-08	2.50E-05
P02	Itabirito brando	3.06E-09	5.99E-07
P03	Itabirito brando	7.84E-09	4.15E-07
P04	Itabirito brando	2.56E-08	8.79E-07
P05	Itabirito brando	8.46E-09	2.57E-08
P06	Itabirito brando	1.15E-08	1.36E-07
P07	Itabirito brando	5.66E-10	3.28E-09
P08	Itabirito brando	4.64E-08	3.96E-07
P09	Itabirito brando	5.22E-10	7.16E-09
P10	Itabirito brando	1.06E-08	8.30E-08
P11	Itabirito brando	1.07E-09	2.39E-07
P12	Itabirito brando	1.06E-09	-

Os dados apresentados na Tabela 1 demonstram, em sua maioria, boa uniformidade entre os valores obtidos pelo AquiferTest. A variação entre esses valores é pequena, apenas de uma ordem de grandeza, oscilando entre  $10^{-09}$  a  $10^{-08}$  m/s, com



apenas os poços de monitoramento P07 e P09 apresentando ordem de grandeza de 10-10 m/s. Já para os dados calculados, observa-se grande variação, de  $10^{-05}$  a  $10^{-09}$ , ou seja, até 4 ordens de grandeza.

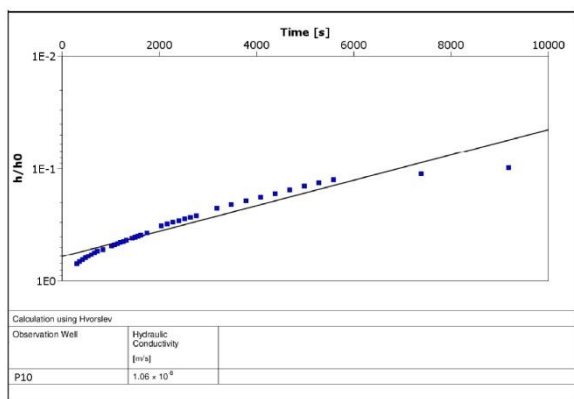


Figura 6. Curva de ajuste do slug teste para o P10 feita no software AquiferTest.

#### 4.2. Resultado dos parâmetros T e S em pumping testes

Os dados obtidos para o armazenamento ( $S_v$ ) e transmissividade (T) são mostrados na Tabela 2, abaixo. As figuras a seguir (7 e 8) ilustram os gráficos referentes às análises por meio de cada método utilizado para o poço 03.

Tabela 2. Valores de T e S obtidos nos ensaios em poços.

Poço	Neuman		Boulton	
	T (m <sup>2</sup> /dia)	$S_v$	T (m <sup>2</sup> /dia)	$S_v$
Poço 01	59.3	8.60E-10	38.0	2.87E-06
Poço 02	11.9	1.70E-04	11.9	1.37E-06
Poço 03	159.8	4.96E-03	159.8	5.11E-04
Poço 04	97.6	5.73E-02	97.6	7.15E-04
Poço 05	0.7	5.00E-01	0.5	2.11E-01
Poço 06	127.0	3.89E-02	127.0	1.15E-03

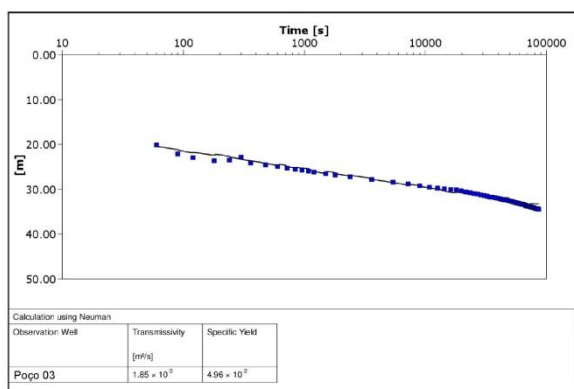


Figura 7. Curva de ajuste do pumping teste para o Poço 03 feita no software AquiferTest pelo método de Neuman.

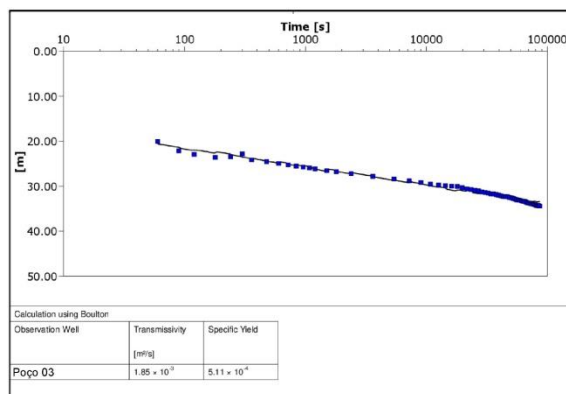


Figura 8. Curva de ajuste do pumping teste para o Poço 03 feita no software AquiferTest pelo método de Boulton.

O armazenamento, nestes ensaios representado por  $S_v$  (specific yield), apresentou grande variação com valores da ordem de  $10^{-10}$  a  $10^{-01}$  para o método de Neuman e  $10^{-06}$  a  $10^{-01}$  para o método de Boulton.

Com relação à transmissividade, os valores se apresentaram mais homogêneos, variando de 0,7 a 159,8 m<sup>2</sup>/dia pelo método de Neuman e de 0,5 a 159,8 m<sup>2</sup>/dia, por Boulton. A média pelo método de Neuman é 76,1 m<sup>2</sup>/s e a média por Boulton é 72,5 m<sup>2</sup>/s.

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1. Análise do parâmetro K em slug testes

A partir dos resultados obtidos nos slug testes, nota-se que a velocidade inicial de recuperação do aquífero é muito superior àquela observada nos momentos finais do ensaio. Sabe-se que no início do teste há influência dos aspectos construtivos como a saturação dos espaços vazios do pré-filtro, por exemplo. Além disso, o rebaixamento é exponencial e a coluna d'água - maior no início do ensaio - influencia na velocidade do fluxo. Segundo BOUWER (1989), o efeito desta drenagem pode ser eliminado ignorando os dados iniciais e usando a segunda porção linear do gráfico para cálculo da condutividade hidráulica.

Para o tratamento dos dados com as planilhas eletrônicas, faz-se necessário encontrar o tempo a ser utilizado na solução matemática. Para tanto, deve-se encontrar o tempo que corresponda à  $h - h_0 = 0,37$  (ou seja, o tempo gasto para o nível de água subir ou descer para 37% do lançamento inicial). Avaliando-se os dados, observa-se que aqueles obtidos manualmente não permitem a observação do momento exato onde  $h - h_0 = 0,37$ , o que diminui a confiabilidade dos resultados obtidos. Entretanto, o teste pode ser mais assertivo se for utilizado um transdutor de pressão.

Tentativas de comparação com o método de Bouwer & Rice, não foram possíveis, pois o método utilizado, com injeção de água até completação total

da estrutura, não é o mais adequado, causando incertezas na medida de nível no tempo  $t=0$  e impossibilitando a comparação, já que o método não é aplicável se o valor do nível em  $t=0$  for igual a 0.

Considerando-se apenas os valores obtidos pelo AquiferTest, a condutividade hidráulica média encontrada está na ordem de  $10^{-08}$  m/s, condizente com os valores apresentados na literatura para os itabiritos brandos/médios da região (MOURÃO, 2007).

## 5.2. Análise dos parâmetros T e S em *pumping* testes

Admitindo-se o Aquífero Cauê como um aquífero livre na área de estudo e sabendo que todos os poços possuem seção filtrante em itabirito brando, foi feita a análise dos parâmetros de armazenamento ( $S_V$ ) e transmissividade (T).

Os resultados descritos por MOURÃO (2007) para o Compartimento Hidrogeológico do Sinclinal Moeda são importantes a nível comparativo. De acordo com a autora, o Aquífero Cauê possui armazenamento ( $S_V$ ) entre 0,1 a 0,15, com o S variando de  $1,7 \times 10^{-06}$  a 0,15 (representando aquíferos confinados e livres, respectivamente) e T variando de 50 a 1.500  $m^2/dia$ . E ainda, aquíferos confinados a semi-confinados teriam S de  $10^{-04}$  a  $10^{-03}$ , com T de 150 a 450  $m^2/dia$ , ao passo que aquíferos livres teriam S de 0,01 a 0,16 e T entre 600 e 1.100  $m^2/dia$ .

Ainda traçando um paralelo com os valores de MOURÃO (2007), a ampla variação na transmissividade indica elevada heterogeneidade e anisotropia. Nos ensaios realizados, os valores de T apresentam um range significativo desde 0,5 até 159,8  $m^2/dia$ . Tais valores são mais compatíveis com aquíferos confinados a semi-confinados.

## 6. CONCLUSÕES

A análise dos parâmetros hidrodinâmicos de condutividade hidráulica, transmissividade e armazenamento, por meio de *slug* testes e testes de bombeamento, permitiu um maior conhecimento acerca das propriedades do aquífero Cauê na região de estudo.

A condutividade hidráulica, calculada matematicamente, apresentou uma grande variação devido à velocidade de recuperação do aquífero nos primeiros minutos, provavelmente em virtude da drenança lateral acelerada provocada pelo pré-filtro da zona não saturada. Esta rapidez de descida d'água e a insuficiência de dados neste intervalo de tempo propiciaram erros no cálculo da recuperação no intervalo proposto pelo método de Hvorslev indicando que, aparentemente, em instrumentos

profundos, a coleta de dados manual impossibilita o cálculo exato da recuperação a 37% da recuperação do nível. Os métodos gráficos, contudo, possibilitam o ajuste de curva já que desconsideram esta interferência inicial, de modo que os resultados obtidos no AquiferTest apresentam uma variação entre  $10^{-10}$  e  $10^{-08}$  m/s. Estas análises se mostraram compatíveis com os obtidos por MOURÃO (2007) - K variando de  $10^{-09}$  a  $10^{-06}$  m/s revelando uma continuidade desta característica do aquífero Cauê em toda porção oeste do QF (Homoclinal Serra do Curral e Sinclinal Moeda)

Os valores de transmissividade (T) variaram entre 0.5 e 159.8  $m^2/dia$ , com as médias de 68.7  $m^2/dia$  pelo método de Neuman e 81.4  $m^2/dia$  por Boulton. Mais uma vez, os valores encontram-se coerentes com os sugeridos por MOURÃO (2007), que indica uma variação na Formação Cauê de 50 a 1500  $m^2/dia$ . Esta variação indica uma heterogeneidade do sistema aquífero, possivelmente relacionada às regiões de confinamento (transmissividades menores) bem como ao controle estrutural do fluxo associado a uma permeabilidade secundária (transmissividades maiores).

Os valores de armazenamento ( $S_V$ ) obtidos neste estudo ( $10^{-10}$  a  $10^{-01}$  por Neuman e  $10^{-06}$  e  $10^{-01}$  por Boulton) se enquadram em um modelo de aquífero semi-confinado e apresentaram-se muito menores do que os valores obtidos para  $S_V$  por MOURÃO (2007) (entre 0.1 e 0.16) para Formação Cauê.

Percebe-se que a grande variação dos parâmetros hidrodinâmicos em uma única litologia indica grande anisotropia e heterogeneidade na área estudada. Tais dados são, provavelmente, reflexos da complexidade estrutural da área próxima à junção entre os sinclinais Moeda e Dom Bosco. Além disso, pode se inferir que o aquífero não se comporta como um aquífero livre em toda sua extensão, dados os baixos valores de T e S encontrados, típicos de aquíferos confinados a semi-confinados. Além disso, os maiores valores de T podem indicar uma permeabilidade secundária, influenciada pela complexidade estrutural da área.

Com isso, considera-se que os métodos utilizados, calculados a partir de ensaios de campo, podem ser utilizados a fim de obter parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos.

## 6. REFERÊNCIAS

- ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. 1998. Transamazonian orogeny in the southern São Francisco craton region, Minas Gerais, Brazil: Evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90: 29-58.
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y. 1984. O embasamento da Plataforma Sul Americana. In: *O Precambriano do Brasil*, Ed. Edgar Blucher, São Paulo, p.: 1-5.

- BOULTON, N.S. 1963. Analysis of data from non-equilibrium pumping tests allowing for delayed yield from storage. Proc. Inst. Civil.Eng., 26:469-482.
- BOUWER, H. 1989. The Bouwer and Rice Slug Test - An Update, Ground Water, 27:304-309.
- CARVALHO, M. G.; SILVA JÚNIOR, A. P.; VICENTE, J. F., SILVA, R. M. 2004. Ensaio de bombeamento em poço tubular profundo: uma metodologia para estudo hidrodinâmico em aquíferos fraturados. Revista Universidade Rural: Série Ciências Exatas e da Terra, Seropédica, Rio de Janeiro, 23:99-105.
- DORR, J.V.N. 1969. Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. USGS. Prof. Pap. 641 - A, 110 p.
- FEITOSA, F.A.C & FILHO, J.M. 2000. Hidrogeologia Conceitos e Aplicações. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Universidade Federal de Pernambuco, Fortaleza-CE, Brasil. 391 p.
- FEITOSA, F. A. C. 1996. Teste de Bombeamento em Poços Tubulares. 1ª ed. Apostila do Curso.
- FUCK R.A., JARDIM DE SÁ E.F., PIMENTEL M.M., DARDENNE M.A., PEDROSA-SOARES A.C. 1993. As faixas de dobramentos marginais do Cráton do São Francisco. In: J.M.L. Dominguez & A. Misi (eds). O Cráton do São Francisco. SBG/SGM/CNPq, Salvador, p.: 161-186.
- GROSS, G.A. 1965. Geology of iron deposits in Canada - general geology and evaluation of iron deposits, Canadian Geological Survey. (Report 22).181 p.
- HVORSLEV, M.J. 1951. Time Lag and Soil Permeability in Ground-Water Observations, bul. n.26, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, U.S. Army, Vicksburg, Mississippi.
- KRUSEMAN G.P., DE RIDDER N.A. 1979. Analysis and evaluation of pumping test data. Bulletin 11, International Institute for Land Reclamation and Improvement, The Netherlands, 200 p.
- MACHADO, N.; NOCE, C.M.; LADEIRA, E.A.; BELO DE OLIVEIRA, O.A. 1992. U-Pb geochronology of Archean magmatism and Proterozoic metamorphism in the Quadrilátero Ferrífero, southern São Francisco Craton, Brazil. Geological Society of America, 104:1221-1227.
- MACHADO, N. & CARNEIRO, M.A. 1992. U-Pb evidence of late Archean tectono-thermal activity in the southern São Francisco shield, Brazil. Can. Journal of Earth Sciences, 29:2341-2346.
- MOURÃO, M. A. A. 2007. Caracterização hidrogeológica do aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG [manuscrito]/ Maria Antonieta Alcântara Mourão. enc.: il., 297p.
- NEVES, ANA C.; BERTACHINI, ANTÔNIO C. 2004. Modelo hidrogeológico conceitual e matemático, mineração Casa de Pedra, Congonhas - MG. In: Cong. Bras. de Geologia., 42, Araxá. Anais. Belo Horizonte: SBG-MG, 2004. 1 CD-ROM.
- NEUMAN, S.P. 1975. Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed yield, Water Resources Research, 11:329-342.
- NOCE, C.M. 1995. Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 128 p.
- TRZASKOS, B.; ALKMIM, F.F.; ZAVAGLIA, G. 2011. Arcabouço estrutural e microestruturas do minério de ferro da jazida de Casa de Pedra, Quadrilátero Ferrífero, MG. Revista Brasileira de Geociências, 41:486-497.
- XIANG, Y.; SYKES, J. F; THOMSON, N. R. (1996), Optimization of Remedial Pumping Schemes for a Ground-Water Site with Multiple Contaminants. Ground Water, 34: 2–11. doi:10.1111/j.1745-6584.1996.tb01858.x