

INTERFERÊNCIA ENTRE POÇOS TUBULARES PROFUNDOS NA BACIA DO RIO UNA, MUNICÍPIO DE TAUBATÉ

Hélio Nóbile Diniz¹

RESUMO

Através do programa de pesquisa Políticas Públicas da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), foram perfurados dois poços tubulares profundos para levantamentos hidrodinâmicos do Aquífero Tremembé, no Município de Taubaté. Os poços foram construídos na área do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade de Taubaté. No local, também foram instalados seis piezômetros. A construção dos poços possibilitou o conhecimento do perfil estratigráfico da Formação Tremembé do Grupo Taubaté, no local, por meio da obtenção de amostras de sedimentos coletadas nos testemunhos das sondagens. A realização de testes de vazão durante o avanço das perfurações dos poços possibilitou o conhecimento dos aquíferos perfurados, que vão de livres, freáticos até confinados. Por meio da realização de testes de interferência entre os dois poços (simultaneamente bombeados) foi elaborada uma teoria sobre a contribuição da área circular, do aquífero, situada entre os dois poços e de seus respectivos raios de influência. As características hidroquímicas do Aquífero Tremembé foram determinadas por meio de análise físico-química e plotagem no diagrama de Piper.

ABSTRACT

Through the research in Public Policies Program by FAPESP (Foundation of Support for Research - São Paulo State) were drilled two wells for hydrodynamic research of the Tremembé aquifer, in Taubaté Municipality, São Paulo State, Brazil. The wells were drilled in the area of the Agricultural Sciences Department of the Taubaté University, and also were installed six piezometers. The borehole wells enabled the stratigraphic knowledge of Tremembé Formation, in place, through the sedimentaire sample obtained. Pump tests conducted during the drilling progress allowed the knowledge of aquifer's types, like phreatic, unconfined to confined. By means the interference tests between the two wells (simultaneously pumped) was developed a theory about the contribution to the flow rate of the circular aquifer area between the two wells and their radius of influence. The hydrochemical characteristics of the Tremembé aquifer were determined by physical and chemical analysis and these datas were plotted in Piper's diagram.

Palavras-chave: interferência entre poços, aquífero sedimentar, poço tubular profundo.

¹ Instituto Geológico do Estado de São Paulo – Secretaria do Meio Ambiente: Av. Miguel Stéfano nº3900 – Cep: 04301-903 – Água Funda –SP, Fone: (11) 5073-5511, Fax: (11) 5077-2219, heliodiniz1@yahoo.com.br

1 - INTRODUÇÃO

Este trabalho é resultante de pesquisas hidrogeológicas efetuadas por meio da perfuração de dois poços tubulares profundos em sedimentos da Formação Tremembé, do Grupo Taubaté, na bacia hidrográfica do rio Una, Município de Taubaté, Estado de São Paulo.

A perfuração dos poços teve por finalidade efetuar pesquisas geológicas e hidrogeológicas sobre o aquífero sedimentar da Formação Tremembé, e avaliações sobre recarga artificial e interferência entre poços. Um dos poços tubulares profundos está sendo utilizado para extração de água subterrânea, a fim de suprir as demandas de irrigação do curso de Agronomia, Departamento de Ciências Agrárias, Universidade de Taubaté. O outro poço, auxiliar, foi utilizado nas pesquisas realizadas, principalmente, como poço de observação para medidas de rebaixamento, recuperação e interferência entre poços.

Neste trabalho é desenvolvida uma teoria sobre hidráulica de poços relativa ao raio de influência de poços interferentes e as respectivas vazões contribuintes.

2 – ASPECTOS FÍSICOS DO MUNICÍPIO DE TAUBATÉ

O Município de Taubaté está localizado no Vale do Paraíba, região sudeste do Estado de São Paulo, a aproximadamente 160 km da cidade de São Paulo. A partir da capital, os acessos à cidade de Taubaté são feitos pela Rodovia Presidente Dutra (ligação entre São Paulo e Rio de Janeiro), e pela Rodovia Carvalho Pinto.

O Município de Taubaté, situado na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, no leste paulista, apresenta uma extensão territorial de 655 km². Possui clima tropical com inverno seco onde a temperatura média anual é de 21°C e índice pluviométrico médio anual de 1400 mm. Está situado em uma área com elevada quantidade de precipitação, de modo que, em quase todos os meses do ano, excetuando o mês de agosto, há excedente hídrico. No Município, a média multianual de excedente hídrico, já descontando a água dos processos de evapotranspiração, situa-se em torno de 410,4 mm (média obtida no período 1993-2002, utilizando dados do Posto Meteorológico UNITAU/INMET, Estação 83784).

O Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU situa-se na parte sudeste do Município de Taubaté, entre as confluências do rio Una e um dos seus afluentes, o ribeirão Itaim. O rio Una é um dos principais afluentes da margem direita do rio Paraíba do Sul, no Estado de São Paulo.

Ocorre, na área do Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU, relevo colinoso desenvolvido sobre os sedimentos terciários da Bacia Sedimentar de Taubaté. Os solos são constituídos por espessos latossolos vermelho-amarelos (LVA40), em relevo suavemente ondulado (Oliveira et al., 1999).

A Bacia Sedimentar de Taubaté no Estado de São Paulo é constituída por coberturas sedimentares cenozóicas e sedimentos terciários, está inserida no bloco tectônico Paraíba do Sul,

caracterizado pelos Terrenos Embu e Apiaí, do Complexo Cristalino de idade Pré-Cambriana. A falha de Buquira, ao norte e a falha do Alto da Fatura, ao sul, limitam lateralmente a Bacia de Taubaté destas rochas cristalinas (Hasui e Ponçano, 1978).

Os Terrenos Embu e Apiaí que, na região são denominados Grupo ou Complexo Embu e Grupo São Roque, apresentam gnaisses e migmatitos, bandados e oftálmicos, com diferentes graus de migmatização, intercalados por metassedimentos e injeções graníticas retrabalhadas no Ciclo Brasileiro (Santoro et al., 1991).

A Bacia Sedimentar de Taubaté pertence ao “Rift Continental do Sudeste do Brasil”, de Riccomini (1989). As espessuras da Bacia Sedimentar de Taubaté (Hasui et al., 1978; Melo et al., 1986) na área situam-se em torno de 200 m. Abaixo desta profundidade ocorrem rochas cristalinas do Complexo Embu, de idade Pré-Cambriana, constituído principalmente por granitos, xistos e gnaisses.

Riccomini (1989), baseando-se em mapeamento geológico e análise de imagens de sensoriamento remoto, admite que a Bacia de Taubaté teria sua compartimentação regida por uma série de falhamentos com direções NE-SW, NW-SE e N-S. Marques (1990), estudou a compartimentação tectônica e reconheceu seis depocentros individuais ao longo da linha central da Bacia de Taubaté. As sub-bacias separam-se por altos estruturais transversais associados a falhamentos normais de direção NW-SE. A sedimentação ocorreu de maneira sin-tectônica (Souza, 2004), relacionado com sistemas flúvio-lacustres.

Franco Filho e Souza (1994), ao analisarem a exploração de água em São José dos Campos, reconhecem na Bacia Sedimentar de Taubaté duas unidades, a Formação Tremembé, na base, constituída por folhelhos com níveis pirobotuminosos e argilitos de cores verde acinzentadas, com intercalações centimétricas à decimétricas de arenitos, siltitos e brechas intraformacionais, originadas em ambiente lacustre. Na parte superior descrevem a Formação Caçapava, que é constituída por sedimentos arenosos e siltosos, com intercalações pelíticas, nas cores cinza, amarelo e vermelho, originadas em ambiente fluvial.

Segundo DAEE (1977), a maior parte dos aquíferos desta região está sob condições freáticas e pouco confinadas, enquanto em algumas áreas limitadas estão sob pressão, formando raros aquíferos confinados.

Franco Filho e Souza (1994) reconhecem na Bacia Sedimentar de Taubaté duas unidades, a Formação Tremembé, na base, constituída por folhelhos com níveis pirobotuminosos e argilitos de cores verde acinzentadas, com intercalações centimétricas à decimétricas de arenitos, siltitos e brechas intraformacionais, originadas em ambiente lacustre. Na parte superior descrevem a Formação Caçapava, que é constituída por sedimentos arenosos e siltosos, com intercalações pelíticas, nas cores cinza, amarelo e vermelho, originadas em ambiente fluvial.

3 - MATERIAL E MÉTODOS

Foram construídos dois poços tubulares profundos no Departamento de Ciências Agrárias da Universidade de Taubaté para investigações geológicas e hidrogeológicas dos sedimentos e aquíferos sedimentares da Formação Tremembé, do Grupo Taubaté.

A construção dos dois poços tubulares profundos proporcionou:

- o conhecimento estratigráfico dos sedimentos da Bacia de Taubaté, no local do projeto por meio da obtenção de testemunhos das sondagens, constituídos por amostragem de toda a seqüência sedimentar perfurada;
- o conhecimento das características hidrodinâmicas dos aquíferos perfurados, por meio da realização e interpretação de testes de vazão em diversas profundidades e testes de interferência entre poços;
- e coleta de amostras de água para fins de caracterização físico-química dos aquíferos profundos.

Um dos poços tubulares profundos construídos está sendo utilizado para a extração de água subterrânea para fins de irrigação. Este poço é denominado de extração, e o outro, necessário para medidas do nível potenciométrico e amostragem de água do aquífero profundo, é denominado de auxiliar.

3.1 - Realização de testes de vazão nos poços

Os parâmetros hidrodinâmicos que caracterizam os aquíferos quanto às propriedades físicas de velocidade de escoamento é a Transmissividade (T) e quantidade de água armazenada é o Coeficiente de Armazenamento (S). Os parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos são calculados quando se dispõem de ensaios de bombeamento ou testes de vazão em poços (Diniz, 1996).

Assim sendo, foram realizados testes de vazão no poço de extração/recarga, quando estava nas profundidades de 48 m (em 03/04/2006), 66 m (em 28/04/2006) e na profundidade final de 115 m (em 17/10/2006).

No poço auxiliar foram realizados testes de vazão nas profundidades de 49 m (em 18/09/2006) e 93,03 m (em 18/07/2007).

Nos testes de vazão foram medidos o nível estático, os valores de rebaixamento do nível d'água em função do tempo de bombeamento, a vazão e a recuperação do nível d'água depois de cessado o bombeamento. Os testes de vazão foram realizados com um compressor de 250 pés cúbicos por minuto e com motobomba submersa de 32 HP, ambos pertencentes ao Instituto Geológico do Estado de São Paulo.

A Transmissividade (T) do aquífero no local do poço é um parâmetro que pode ser obtido com razoável precisão mesmo quando o rebaixamento ou recuperação, durante o teste de vazão, é medido no próprio poço bombeado, isto é, quando não se dispõe de um poço de observação. O Coeficiente de Armazenamento é um parâmetro inversamente proporcional ao quadrado da

distância entre o ponto de observação e o poço bombeado. Assim, para a determinação precisa deste parâmetro é necessário um poço de observação.

A construção de dois poços tubulares profundos, situados próximos (13,2 m), no Departamento de Ciências Agrária da UNITAU, possibilitou o cálculo preciso da Transmissividade e do Coeficiente de Armazenamento dos aquíferos sedimentares da Formação Tremembé, no local, pois, parte dos testes de vazão realizados foram utilizando um dos poço, como de bombeamento e outro, como de observação.

3.2 - Interferência entre poços

Para o bombeamento de um poço, um aquífero é considerado infinito e toda a vazão extraída advém de uma área circular cujo raio (r) é conhecido como raio de influência.

O raio de influência de um poço é controlado pelos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero, que são a Transmissividade (T) e o Coeficiente de Armazenamento (S), conforme mostrado na figura 1 (Freeze e Cherry, 1979). Outra variável importante é a vazão de extração.

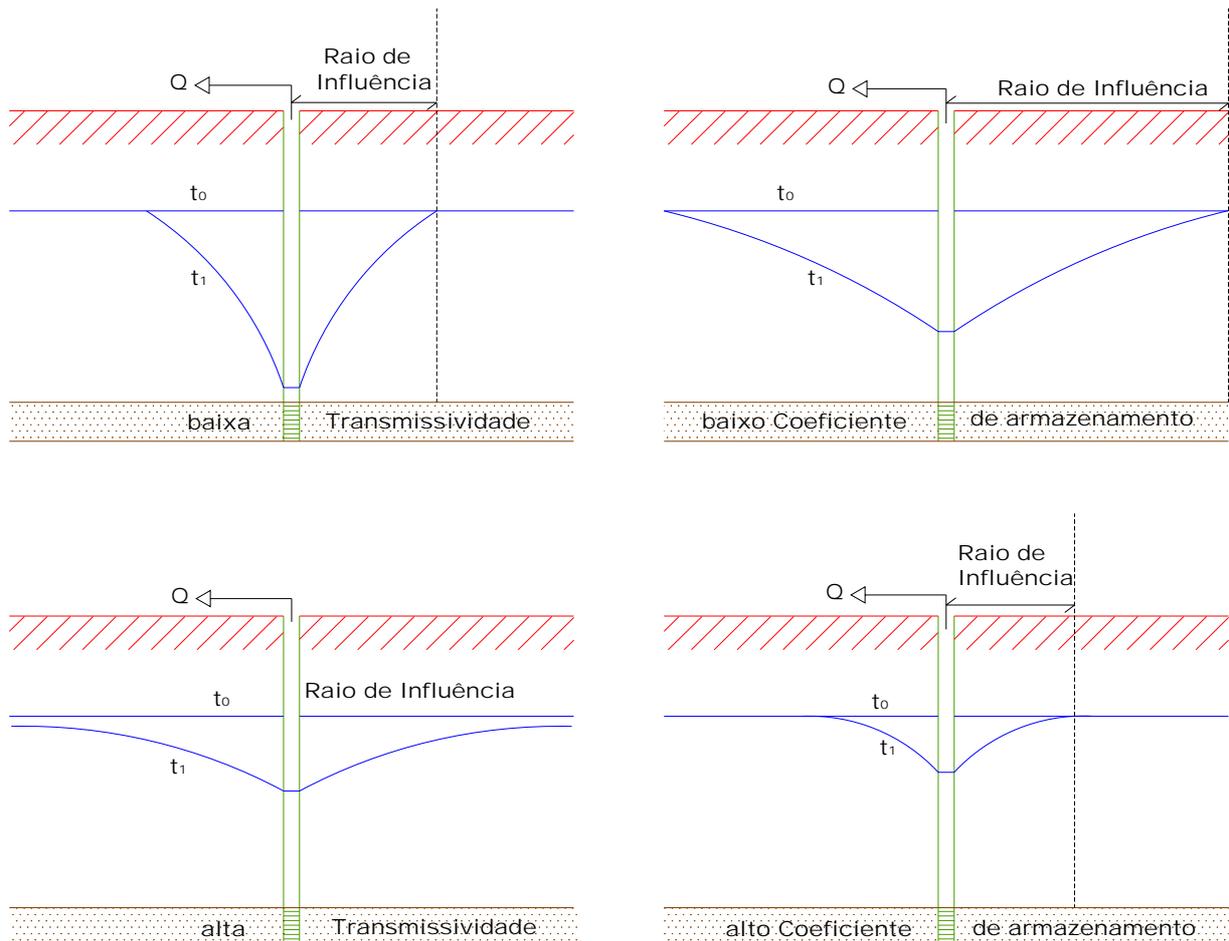


Figura 1. Extensão e profundidade do raio de influência de um poço em função dos valores da Transmissividade e Coeficiente de Armazenamento dos aquíferos.

Em qualquer ponto dentro do raio de influência, o rebaixamento é dado pelas expressões:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \text{ para aquíferos confinados (THEIS, 1935), (1)}$$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u, \frac{r}{B}) \text{ para aquíferos semi-confinados (HANTUSH, 1956), (2)}$$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u_A, u_B, \Gamma) \text{ para aquíferos semi-livres (NEUMAN, 1972), (3)}$$

Nas expressões mostradas acima, quer seja (1), (2) ou (3), uma relação é consistente, a proporcionalidade direta existente entre a vazão (Q) e a Transmissividade (T) para qualquer rebaixamento (s).

Quando um outro poço é construído e bombeado dentro do raio de influência do primeiro, há interferência entre ambos, ou seja, os raios de influência de cada poço (r_1 e r_2 , figura 2) são intervenientes. Desta forma, o efeito do rebaixamento no poço (s_1), produzido pela extração da vazão Q_1 é somado ao produzido pelo raio de influência do outro poço (s_2) bombeado com a vazão Q_2 , resultando em um rebaixamento $s' = s_1 + s_2$.

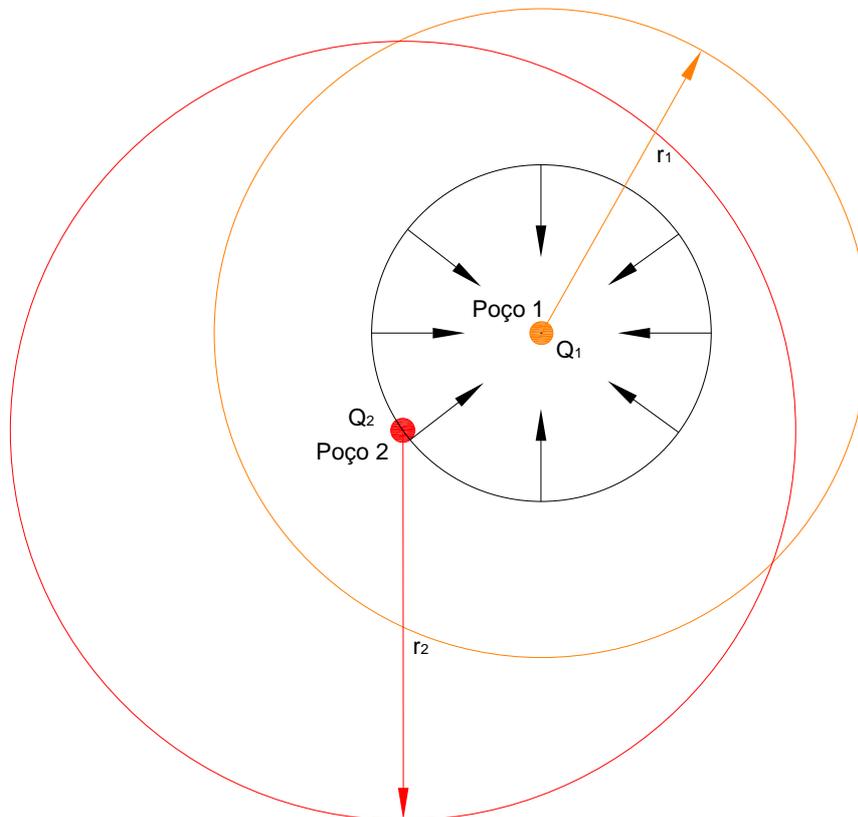


Figura 2. Representação esquemática da interferência entre poços construídos dentro do raio de influência de cada um deles.

Em um teste de vazão realizado por meio do bombeamento de um dos poços e com medidas de nível em outro, pode-se obter através das expressões (1), (2) ou (3), conforme o caso, a Transmissividade (T), que é um parâmetro do aquífero considerado e não do poço, em particular.

Quando há interferência entre os poços, pois ambos estão sendo bombeados e cada um está dentro do raio de influência do outro, em um deles haverá um rebaixamento (s_1) devido ao próprio

poço bombeado e outro rebaixamento (s_2) causado pela interferência do outro poço e o rebaixamento total (s') será a soma de ambos, maior portanto que somente s_1 .

Um teste de interferência é realizado bombeando-se os dois poços a partir de um momento t_0 , cada um com uma vazão que dependerá da potência do equipamento utilizado e da altura manométrica do nível d'água bombeada. No poço considerado (um dos poços bombeados) obter-se-á a relação $s' \times t$ para a extração de uma vazão constante Q' e, esta vazão será menor do que a vazão Q , obtida sem interferência entre poços pois, para um mesmo equipamento, a altura manométrica será maior devido ao rebaixamento causado pelo outro poço e o rendimento menor, portanto retirando menor vazão.

Com os valores obtidos na relação $s' \times t$ para a vazão constante Q' , plotados em gráfico bi-logaritmico, usando-se o método de Theis, dado pela expressão (1), Hantush, dado pela expressão (2) ou Neuman, dado pela expressão (3), conforme o caso do aquífero considerado, ter-se-á um valor de Transmissividade aparente (T'). O valor da Transmissividade é aparente pois o rebaixamento medido está sob influência da interferência do outro poço.

De qualquer forma, como foi dito acima, uma relação é consistente, a proporcionalidade direta entre a vazão e a Transmissividade. Assim, pode-se escrever a equação 4:

$$\frac{Q}{T} = \frac{Q'}{T'} \quad (4)$$

onde Q e T são obtidos para um poço, no teste de vazão sem interferência e, Q' e T' , no teste de vazão com interferência.

Então, $Q' \times T = Q \times T'$. Como o valor de Q , T e T' são conhecidos (a partir da interpretação dos testes de vazão sem e com interferência) pode-se obter Q' .

A vazão Q provém da área do aquífero contida no raio de influência do poço (r_1 no poço 1 da figura 2), a vazão Q_i (vazão de interferência) = $Q - Q'$ será devida a água contida no aquífero na área circular entre o poço considerado e o poço interferente. A vazão Q_i é devida à área do aquífero cujo raio é igual à distância entre os poços (figura 2).

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - Perfuração dos poços

O poço de extração, completado e equipado, foi construído no local de coordenadas UTM 447798 EW e 7453025 NS. Suas características construtivas e perfil geológico simplificado, são mostrados na figura 3.

A construção deste poço apresentou diversos problemas, principalmente relacionados com as características geológicas do terreno perfurado.

Como o solo é formado predominantemente por material arenoso, com baixa coesão e elevada porosidade, absorveu grande quantidade de fluido (água e argila bentonítica), além de provocar desmoronamentos à medida que a perfuração avançava.

Para evitar a perda de fluido de perfuração e os desmoronamentos, a técnica empregada foi de iniciar a perfuração com broca de grande diâmetro ($\phi = 24''$) até 5,60 m, $\phi = 17''$ até a profundidade de 16m e revestimento com tubos de chapa de ferro ($\phi = 15''$) com espessura de 1/8'' (tubo de boca). O espaço anelar entre a perfuração de 17'' e os tubos de 15'' foram preenchidos com nata de cimento. Desta forma, toda a secção geológica onde ocorre o lençol freático, que inicia a 7,8 m (profundidade do nível d'água) até 16m (profundidade máxima do solo) foi completamente isolada e vedada, impedindo a mistura das águas do aquífero freático com as do aquífero sedimentar profundo. Dos 16 até os 48 m o poço foi perfurado com broca de 14''.

Entre 48 e 52,50 m, o poço foi perfurado com broca de diâmetro 10'' e, após, até a profundidade de 115m, com broca de 8''. O intervalo entre 87 e 115 m apresentou desmoronamentos e queda de fragmentos das paredes da perfuração. Assim, o poço foi revestido com tubos lisos e tubos de filtro, geomecânicos, de PVC, com diâmetro de 8'' e 6'' até 87,1 m, e a profundidade restante (entre 87,1 e 115 m) foi fechada pelos desmoronamentos.

Distante 13,2 m do poço de extração foi construído outro, auxiliar, no local de coordenadas UTM 447799 EW e 7453028 NS. O esquema construtivo e perfil geológico deste poço encontram-se na figura 4.

Para a construção do poço auxiliar utilizou-se o mesmo método empregado no poço de extração. Assim, para evitar a perda de fluido de perfuração e os desmoronamentos, o início foi realizado com broca de grande diâmetro ($\phi = 24''$) até 5m e este intervalo foi revestido com tambores de ferro soldados uns aos outros. Após a instalação e cimentação dos mesmos, a perfuração seguiu com broca de 17'' até a profundidade de 13,66 m, e todo o intervalo foi revestido com tubos de boca de chapa de ferro ($\phi = 15''$) com espessura de 1/8''. O espaço anelar entre a perfuração de 17'' e os tubos de ferro de 15'' foi preenchido com nata de cimento. Assim, toda a secção geológica onde ocorre o lençol freático, que se inicia a 7,8 m (profundidade do nível d'água) até 13,66 m (profundidade máxima do solo, no local) foi completamente isolada e vedada, impedindo a mistura das águas do aquífero freático com as do aquífero sedimentar profundo.

Prosseguiu-se a perfuração até 64,26 m, nos sedimentos terciários da Formação Tremembé, com broca de 10''. Houve, então, uma tentativa de fazer um teste de vazão para determinar as características hidráulicas do aquífero sedimentar. Como ocorreu desmoronamento dos sedimentos imediatamente abaixo do tubo de boca (13,66 m) optou-se por reabrir a perfuração até a profundidade de 18,1 m com broca de 14''.

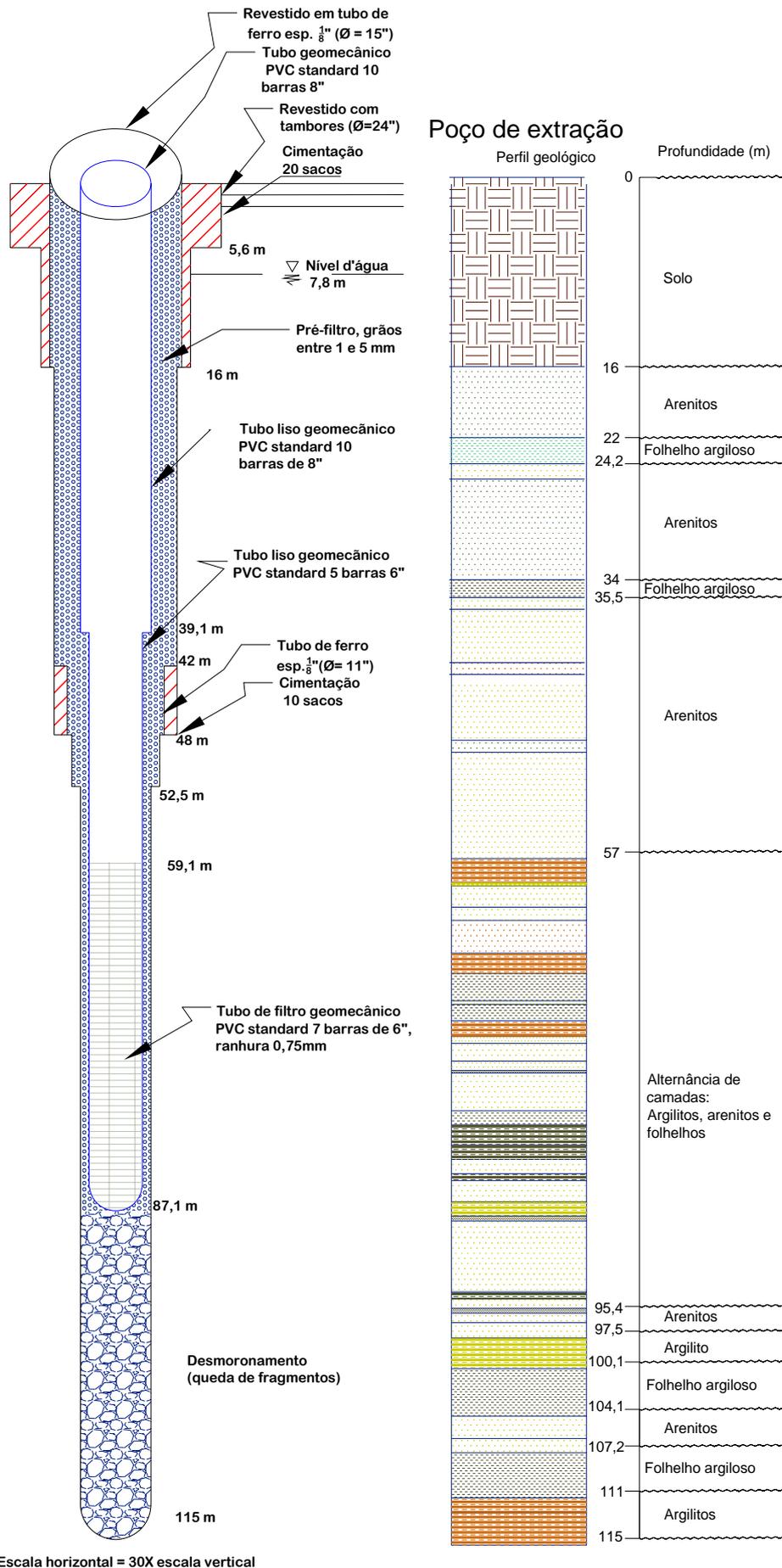
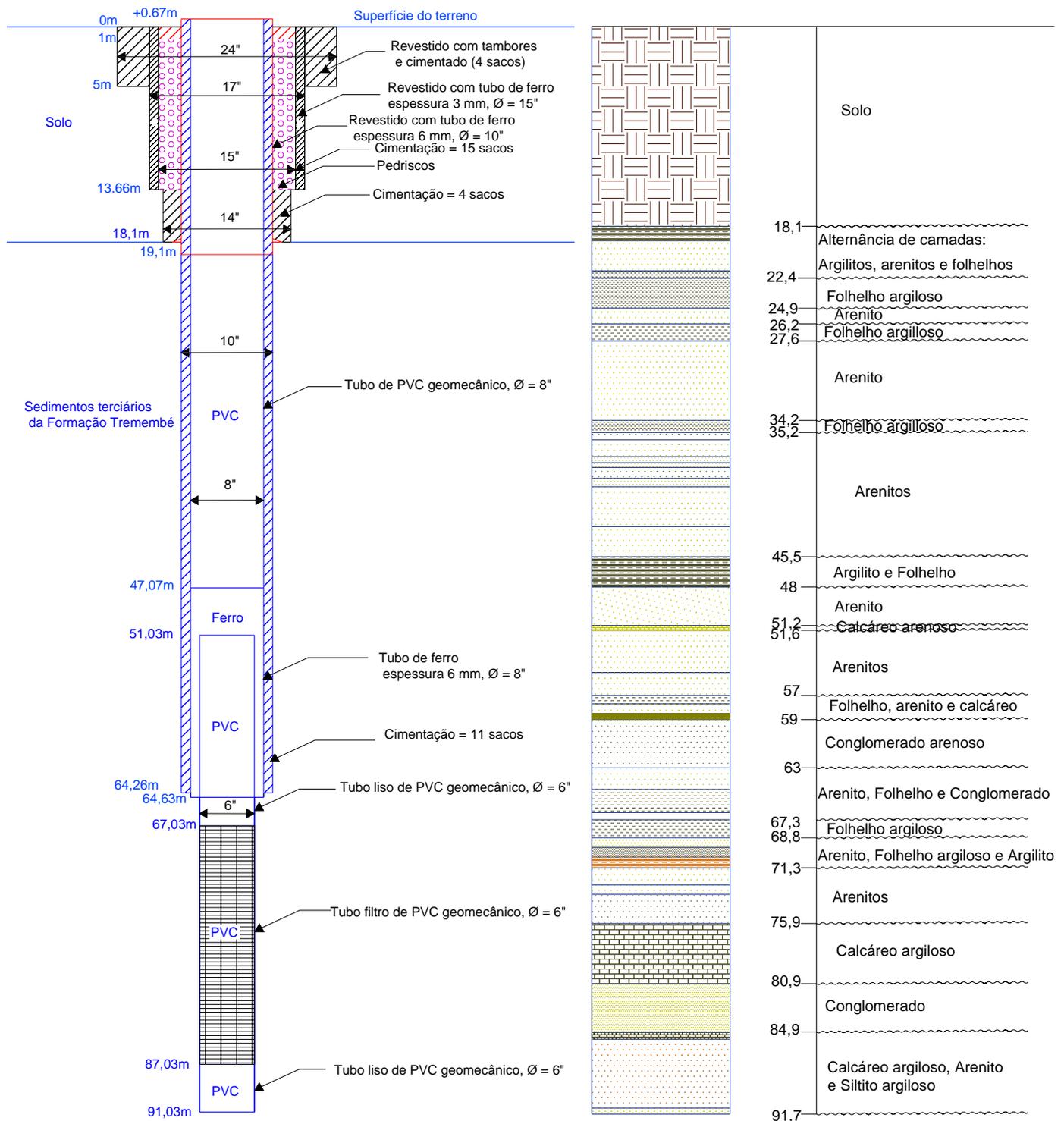


Figura 3. Esquema construtivo e perfil geológico do poço de extração.



Escala horizontal = 30 x escala vertical

Figura 4. Esquema construtivo e perfil geológico do poço auxiliar.

De uma altura de 0,67 m acima da superfície do terreno até a profundidade de 19,1 m foi utilizado um revestimento interno, em tubo de ferro com diâmetro de 10" e espessura de 1/4" (um novo tubo de boca). A 18,1 m de profundidade foi colocada uma sapata (com 14"), soldada aos tubos de 10", de forma a ancorar a coluna de revestimento nos sedimentos situados na base da perfuração de 14".

A perfuração foi retomada da profundidade de 64,26 m com broca de 8" de diâmetro, continuando até 64,63 m. Novos desmoronamentos, obrigaram o revestimento de todo o intervalo, entre 0,67 m acima da superfície do terreno até 64,63 m de profundidade, com tubos de PVC, geomecânicos, de 8" (posicionados entre +0,67 m até 47,7 m), e com tubos de ferro de 8", com espessura 1/4" (posicionados entre 47,7 e 64,63 m).

Após as operações de descida deste novo revestimento, a perfuração avançou, com diâmetro de 6" até os 91,03 m de profundidade, quando novos desmoronamentos de camadas arenosas e conglomeráticas, obrigaram a paralisação. Assim, para impedir o fechamento do poço, revestiu-se o intervalo compreendido entre 51,03 até 91,03 m com tubos lisos e tubos de filtro em PVC, geomecânicos standard, de 6" e a perfuração foi encerrada.

4.2 - Caracterização geológica

Verificaram-se, pelas amostras coletadas em diversos locais no Campus do Departamento de Ciências Ambientais, em encostas, taludes e em sondagens a trado manual realizadas para construção de piezômetros, que ocorrem solos com espessuras variadas, cujas profundidades seguem aproximadamente a topografia do terreno, variando entre 10 m (na várzea do rio Una) até 20 m no topo das colinas aplainadas. O perfil textural é formado, até 1 m, por areias variando de muito finas a grossas, pouco argilosas, de 1 a 2 m por areias de muito finas a grossas, argilosas, e de 2 m até a profundidade máxima do solo, por areias de muito finas a grossas.

Abaixo do solo formado por latossolo vermelho-amarelo ocorrem sedimentos da Bacia de Taubaté até, pelo menos, a profundidade amostrada no poço de extração (115 m). São caracterizados por uma sucessão de camadas terciárias formadas por argilas esmectíticas compactas e folhelhos, intercalados por arenitos quartzosos, com cimento e nódulos carbonáticos (figuras 3 e 4).

No poço de extração, de 16 até 57 m de profundidade, ocorrem predominantemente camadas de arenitos terciários da Formação Tremembé, do Grupo Taubaté, de origem fluvial, indicando que estes sedimentos são derivados de areias de barras de rios anastomosados, de longo curso. De 57 m até a profundidade final do poço (115 m), aparecem, com maior frequência, depósitos de argilitos puros, intercalados por arenitos quartzosos micáceos e folhelhos argilosos. O ambiente deposicional resultante é formado preferencialmente por lagos rasos, com muita vida animal e vegetal submersa, o que originou a matéria orgânica preta encontrada nas camadas argilosas.

4.3. Caracterização hidrogeológica

Durante a construção do poço de extração foi realizado um primeiro teste de vazão com a profundidade de 48 m (em 03/04/2006). Os dados obtidos (figura 5) mostraram que o aquífero é do tipo semi-confinado (Hantush, 1956), isto é, recebe recarga de uma camada semi-confinante situada

em posição topográfica superior e que houve uma estabilização de nível para a vazão de 1,028 m³/h. A Transmissividade do aquífero semi-confinado encontrada foi de 0,58 m²/h.

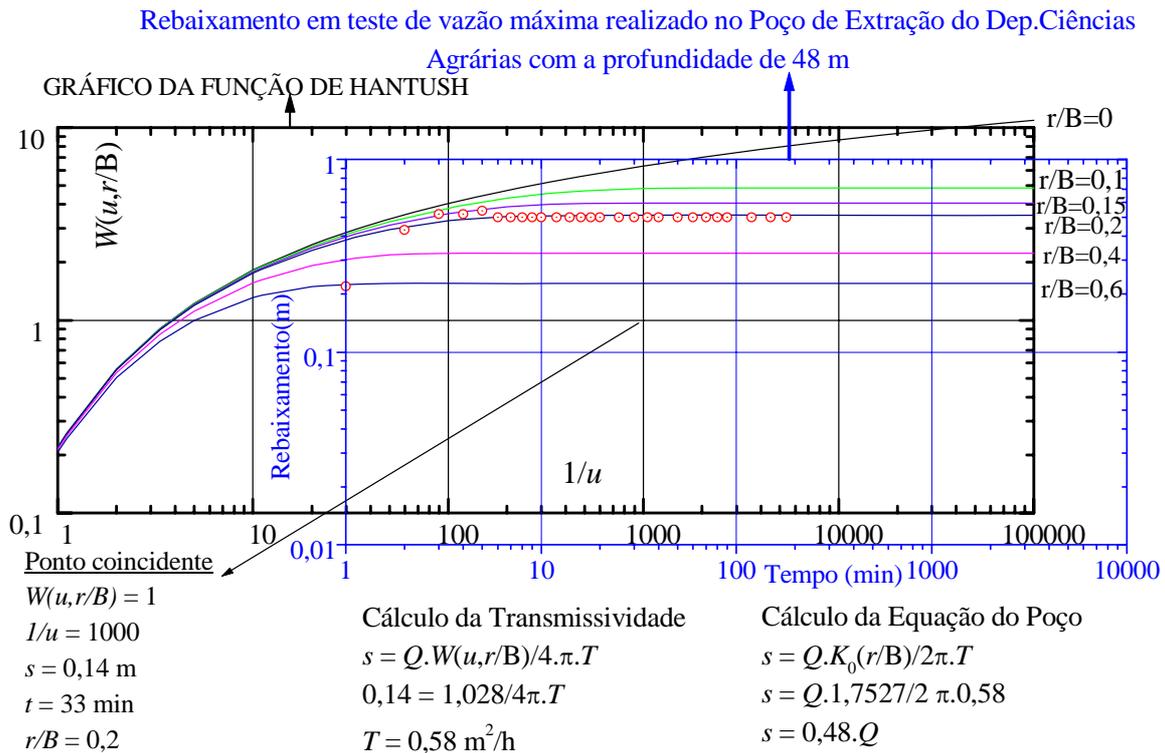


Figura 5. Interpretação dos dados do teste de vazão realizado no poço de extração, em 03/04/2006.

Um segundo teste foi realizado no dia 28 de abril de 2006 (figura 6), quando o poço estava com 66 m. Este teste teve por finalidade verificar possíveis variações hidrogeológicas já que, durante o avanço da perfuração, de 48 para 66 m, foi constatado que o nível da água subiu, o que indica uma clara mudança de comportamento do aquífero. Seus dados indicaram que aquífero mudou de comportamento, passando de semi-confinado para semi-livre (Neuman, 1972). O valor de Transmissividade não mudou (0,58 m²/h).

O poço de extração do Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU foi perfurado até a profundidade de 115 m quando sofreu desmoronamentos e terminou sendo revestido com tubos lisos e de filtro até a profundidade de 87,1 m. Com esta profundidade, foi realizado um teste de vazão, em 17/10/2006, com 14 horas de bombeamento contínuo e 10 horas de recuperação. A interpretação gráfica do teste encontra-se na figura 7.

A partir da profundidade do teste anterior (66 m) surgiram intercalações significativas de argilitos compactos, pouco permeáveis, em profundidade, e que formam aquícludes que confinaram o aquífero subjacente testado neste novo ensaio de bombeamento. Camadas arenosas, muito permeáveis, situadas entre dois aquícludes formam aquíferos do tipo confinado. A interpretação do ensaio (figura 7) mostra que houve mudança do tipo de aquífero, que comprovadamente passou a ser do tipo confinado.

Rebaixamento em teste de vazão máxima no Poço de Extração com a profundidade de 66 m, em 28/04/2006, com nível estático a 6,83 m.

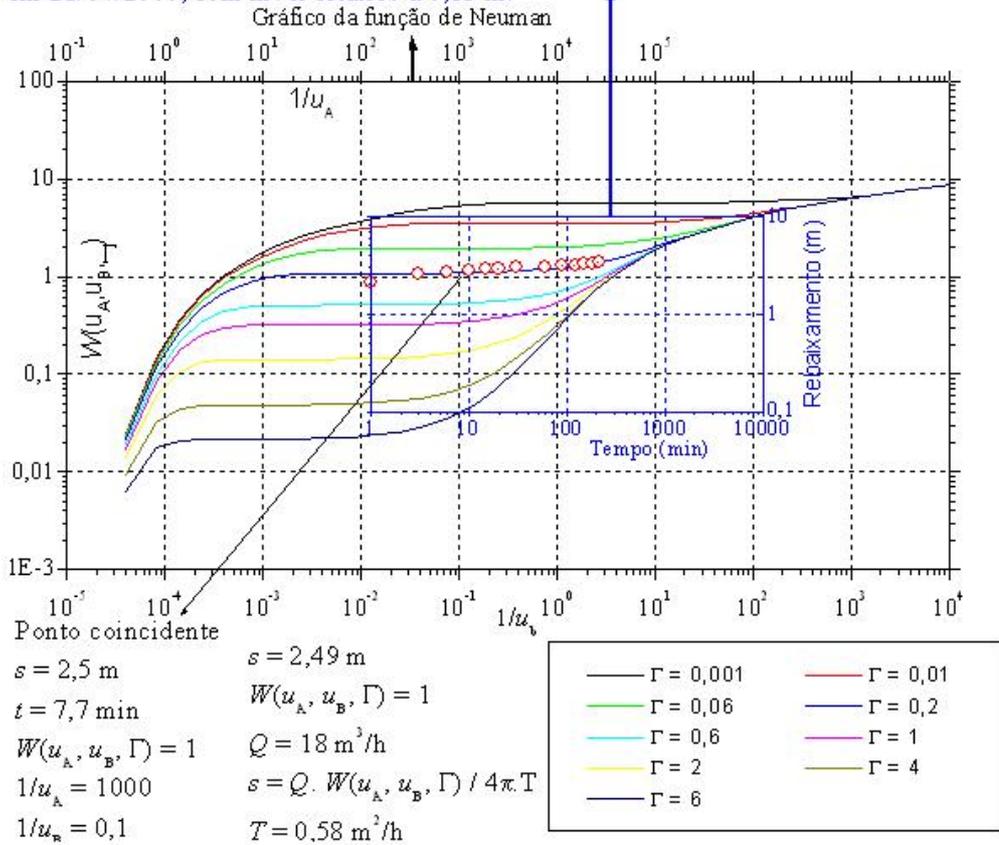


Figura 6. Interpretação dos dados do teste de vazão realizado no poço de extração com a profundidade de 66 m.

Dados de rebaixamento do Poço de Extração do Departamento de Ciências Agrárias em 17/10/2006, com a profundidade de 115 m

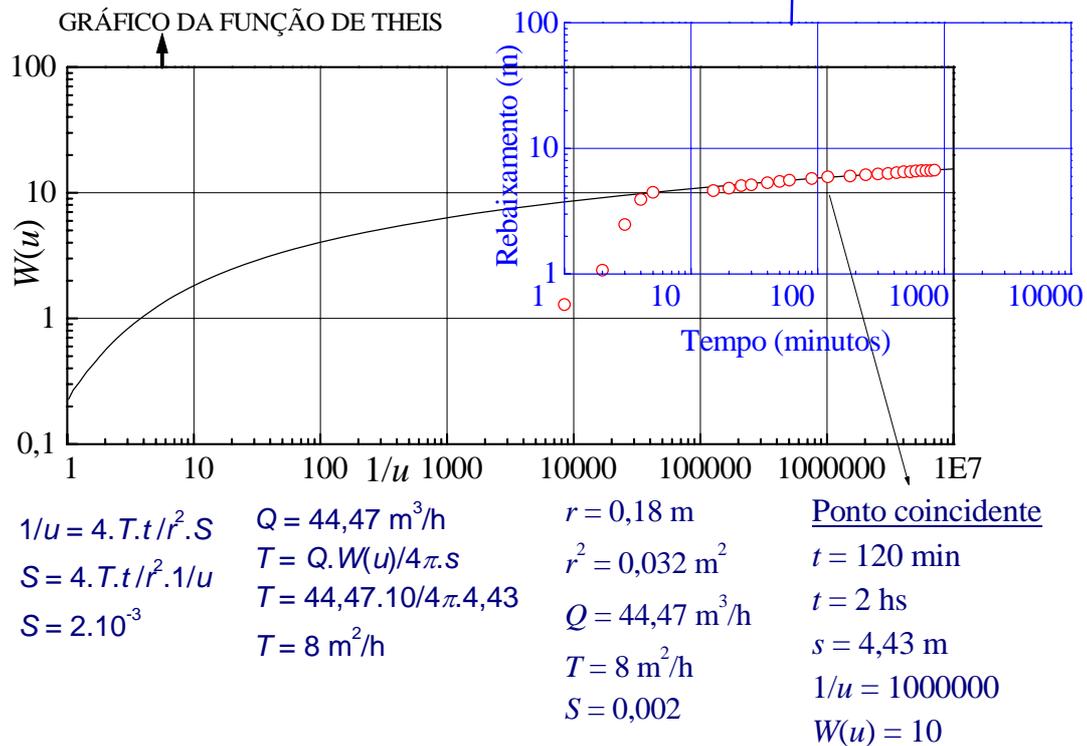


Figura 7. Interpretação do teste de vazão realizado no poço de extração com profundidade de 115m.

Na interpretação do teste de vazão na profundidade final, obtiveram-se os seguintes parâmetros hidráulicos do aquífero confinado: $T = 8 \text{ m}^2/\text{h}$ e $S = 0,002$ (adimensional).

O poço de extração, que possui os parâmetros hidráulicos acima descritos, pode fornecer uma vazão muito boa. Por exemplo, bombeando-se ininterruptamente o poço com uma vazão de $120 \text{ m}^3/\text{h}$, após 2 anos, o nível dinâmico será de 35 m, ou seja, igual ao nível estático (8,33 m) mais o rebaixamento (26,59 m, equação 5) obtido a partir da expressão de Cooper e Jacob (1946), portanto, $8,33 + 26,59 = 34,92 \cong 35 \text{ m}$.

O rebaixamento descrito foi calculado utilizando a expressão de Cooper e Jacob (1946), ou seja, fazendo: $r = 14''/2 = 7'' = 0,18 \text{ m}$, $t = 2 \text{ anos} = 2 \times 365 \text{ dias} \times 24 \text{ horas} = 17520\text{h}$, obtendo-se:

$$s = \frac{2,3Q}{4\pi T} \log\left(\frac{2,25Tt}{r^2 S}\right) \Rightarrow s = \frac{2,3 \cdot 120}{4\pi \cdot 8} \log\left(\frac{2,25 \cdot 8 \cdot 17520}{(0,18)^2 \cdot 0,002}\right) \Rightarrow s = 26,59 \text{ m} \quad (5)$$

4.4 - Caracterização hidrogeológica avançada

Após o acabamento dos poços de extração e auxiliar, no mês de julho e agosto de 2007, foram realizados diversos testes de vazão, sendo um de vazão máxima no poço de extração, bombeado com vazão de $36 \text{ m}^3/\text{h}$, e com medição dos níveis d'água nos poços de extração e auxiliar (figura 8) e teste de recuperação dos poços. Como o aquífero profundo é confinado o modelo utilizado para interpretação foi o de Theis (1935).

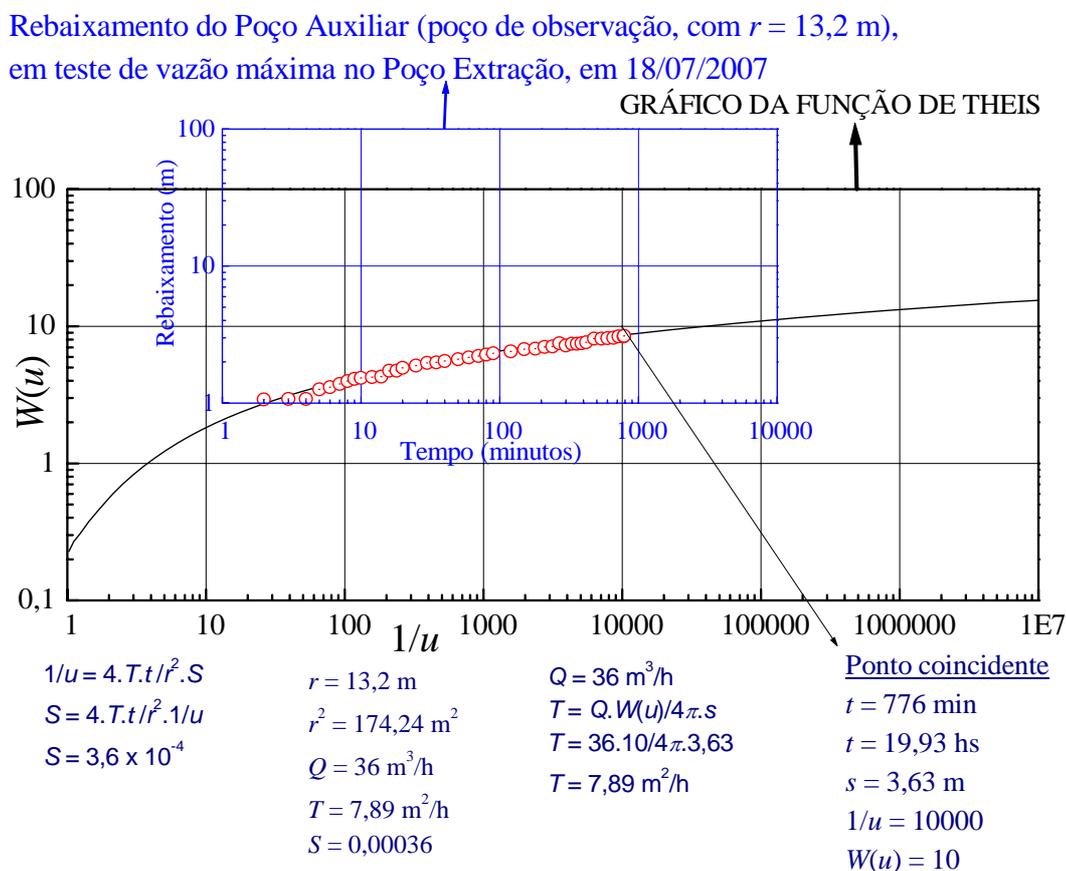


Figura 8. Interpretação dos dados do teste de vazão realizado no poço de extração com rebaixamento medido no poço auxiliar (13,2 m de distância).

A interpretação dos dados de rebaixamento e recuperação realizados nos poços de extração e auxiliar, com bombeamento de 36 m³/h no poço de extração, mostram um valor médio para a Transmissividade de 6,75 m²/h e de 0,00033 para o Coeficiente de Armazenamento.

Outro teste foi realizado no poço auxiliar, com vazão de 84 m³/h e medições de rebaixamento no próprio poço bombeado e no poço de extração (figura 9).

Rebaixamento do Poço Extração do Departamento de Ciências Agrárias (poço de observação, com $r = 13,2$ m), em teste de vazão máxima no Poço Auxiliar, em 18/07/2007

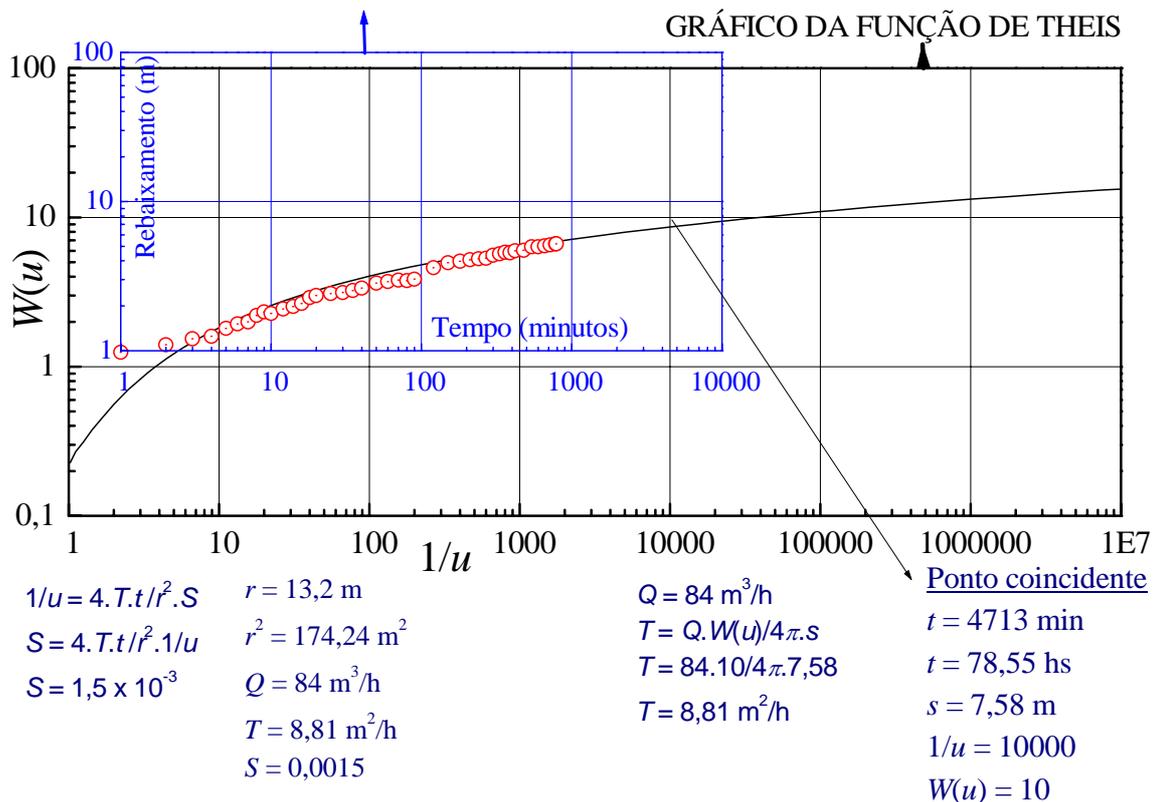


Figura 9. Interpretação dos dados do teste realizado no poço auxiliar, com vazão de 84 m³/h e rebaixamento medido no poço de extração, situado a 13,2 m de distância.

A interpretação dos dados de rebaixamento e recuperação realizados nos poços de extração e auxiliar, com bombeamento de 84 m³/h no poço de extração, resultam em um valor médio para a Transmissividade de 9,8 m²/h e de 0,0025 para o Coeficiente de Armazenamento.

Estes valores encontrados (Transmissividade e Coeficiente de Armazenamento maiores para vazões mais elevadas) mostram que à medida que aumenta a extração, maior quantidade de camadas aquíferas contribuem para a vazão final, com aumento sensível do valor da Transmissividade, pois o Aquífero Tremembé é do tipo, confinado, multicamada.

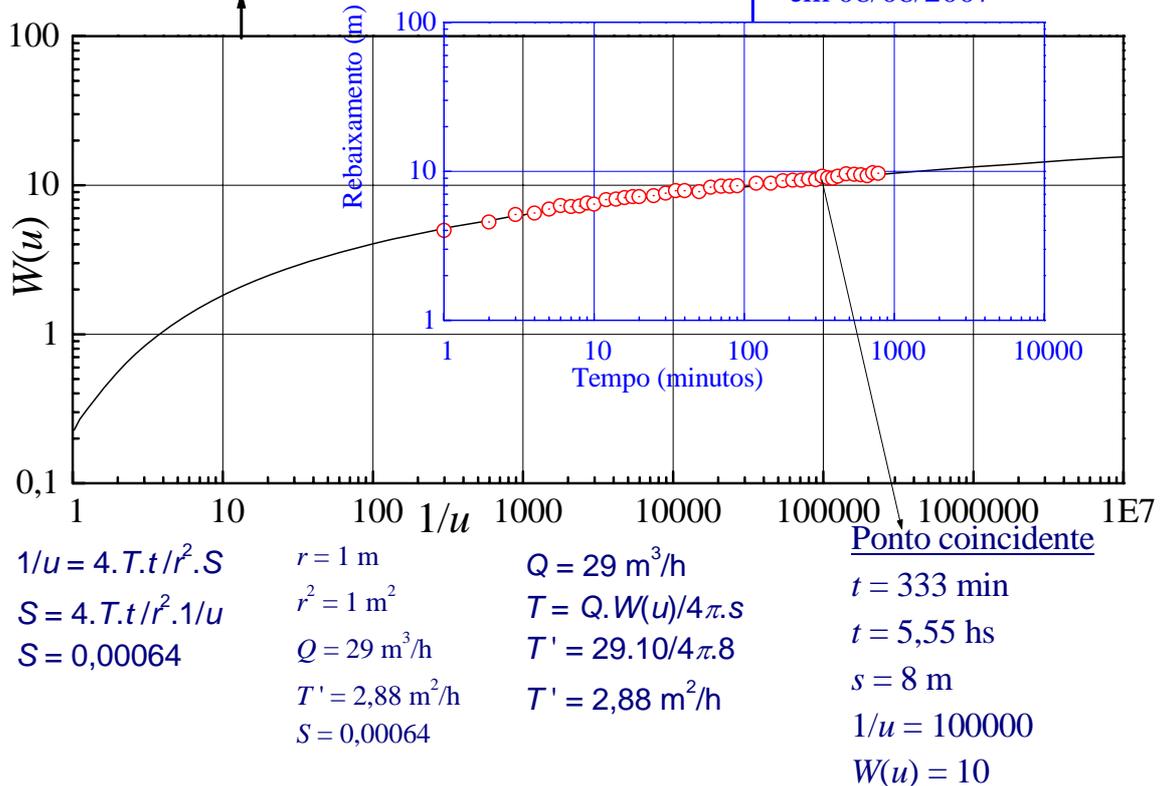
Após a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do Aquífero Tremembé, confinado, foram realizados testes de interferência entre os dois poços. Estes testes tiveram o seguinte procedimento: início de ambos os rebaixamentos (nos poços de extração e auxiliar) simultaneamente, com vazões máximas inferiores à dos testes individuais realizados em cada poço

devido à queda de rendimento dos equipamentos utilizados (em virtude da própria interferência), encerramento do bombeamento em ambos os poços, simultaneamente, e início da recuperação.

Com os parâmetros hidrodinâmicos obtidos por meio do teste de vazão realizado no poço de extração, sem interferência entre poços (Transmissividade de 7,89 m²/h e Coeficiente de Armazenamento de 0,00036) e para o tempo de bombeamento de duração do teste (13 h) o raio de influência do poço é de aproximadamente 792 m.

Os resultados do teste de interferência obtidos no poço de extração mostram que a vazão do teste de bombeamento obtida, de 36 m³/h (sem interferência), correspondente à área do raio de influência do poço (792 m) e que, deste total, cerca de 20 m³/h (dados de interferência interpretados segundo a teoria demonstrada no item 3.2, na figura 10) provém da área cujo raio é igual à distância entre os poços de extração e auxiliar, ou seja, de 13,2 m. A vazão extraída nesta área (20 m³/h) corresponde a 55,6% da vazão extraída no teste de bombeamento sem interferência (36 m³/h).

Rebaixamento do Poço de Extração em teste de interferência com o Poço Auxiliar, GRÁFICO DA FUNÇÃO DE THEIS em 08/08/2007

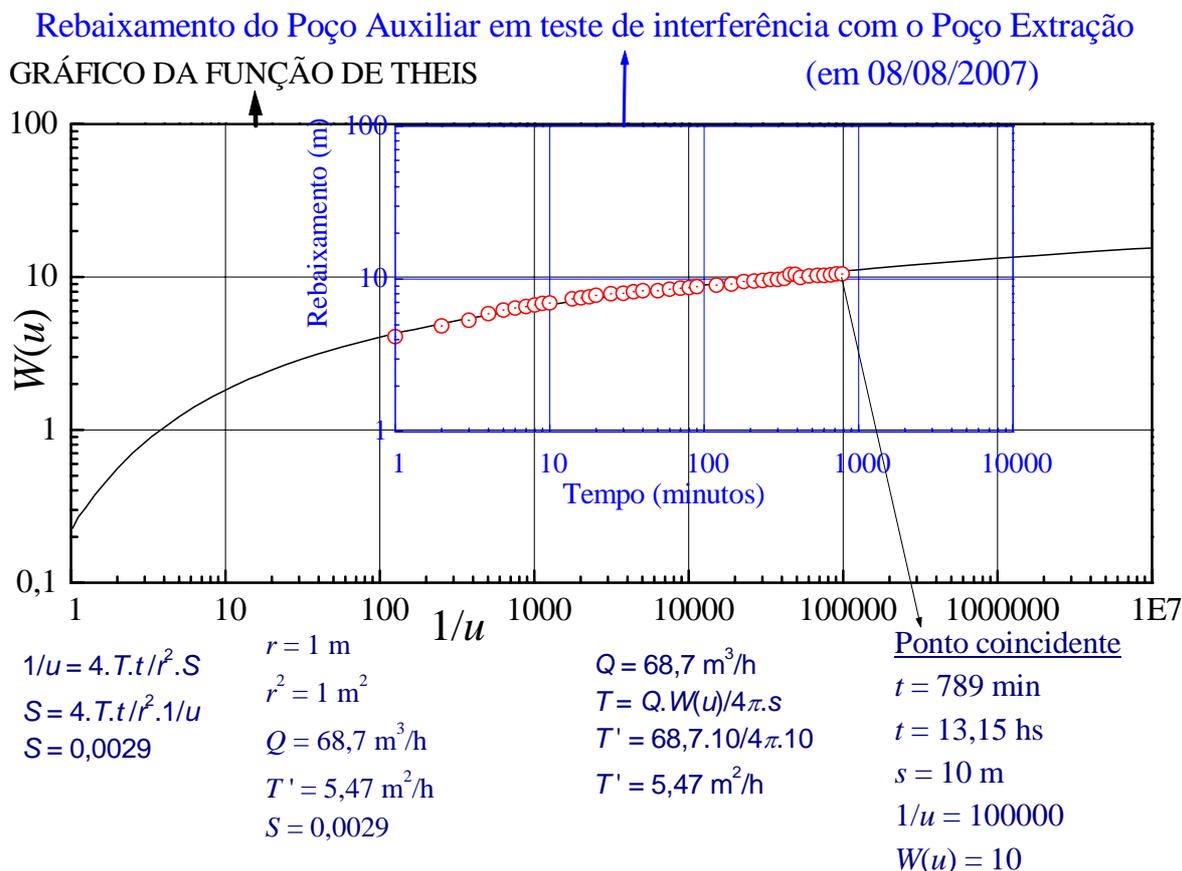


Dados de interferência: $Q \times T' = Q' \times T$ ou, $36 \times 2,88 = Q' \times 5,3$, sendo $Q' = 20 \text{ m}^3/\text{h}$

Figura 10. Ensaio de interferência (rebaixamento) durante o bombeamento dos poços de extração (poço de observação) e auxiliar.

Com os parâmetros hidrodinâmicos obtidos por meio do teste de vazão realizado no poço auxiliar, sem interferência entre poços (Transmissividade de 11,7 m²/h e Coeficiente de Armazenamento de 0,0004) e para o tempo de bombeamento de duração do teste (13 h) o raio de influência do poço é de aproximadamente 923 m.

Os resultados do teste de interferência obtidos no poço auxiliar mostram que a vazão do teste de bombeamento obtida, de 84 m³/h (sem interferência), correspondente à área do raio de influência do poço (923 m) e que, deste total, cerca de 39,3 m³/h (dados de interferência da figura 11) provém da área cujo raio é igual à distância entre os poços de extração/recarga e auxiliar, ou seja, de 13,2 m. A vazão extraída nesta área (39,3 m³/h) corresponde a 46,8% da vazão extraída no teste de bombeamento sem interferência (84 m³/h).



Dados de interferência: $Q \times T' = Q' \times T$, sendo $84 \times 5,47 = Q' \times 11,7$, ou $Q' = 39,3 \text{ m}^3/\text{h}$

Figura 11. Ensaio de interferência (rebaixamento) durante o bombeamento dos poços auxiliar (poço de observação) e de extração.

4.5 – Características hidroquímicas

Foi efetuada uma coleta de água do Aquífero Tremembé, em 19/10/2006, no poço de extração, cuja análise química apresentou os seguintes resultados:

- a) Parâmetros físicos: potencial redox (Eh) = + 318 eV, pH = 7,94, sólidos tototais dissolvidos (STD) = 131 mg/L, dureza (em CaCO₃) = 50,5 mg/L, sílica = 5,2 mg/L;
- b) Metais: bário = 0,42 mg/L, chumbo < 0,005 mg/L, ferro = 1,96 mg/L, manganês = 0,12 mg/L;
- c) Cátions principais: cálcio = 17,21 mg/L, potássio = 2,17 mg/L, magnésio = 1,83 mg/L, sódio = 51,75 mg/L;
- d) Ânions principais: alcalinidade em bicarbonatos = 9,3 mg/L CaCO₃, alcalinidade em carbonatos = 37,1 mg/L CaCO₃, cloreto = 0,76 mg/L, nitrato = 2,94 mg/L, sulfato = 2,55 mg/L, fluoreto < 1 mg/L.

Esta análise mostra que, embora as características físico-químicas das águas provenientes do aquífero confinado sejam resultados das modificações ocorridas no conteúdo iônico das águas provenientes do aquífero freático durante os processos de percolação profunda, elas são bastante diferenciadas. Por exemplo, foram analisados alguns parâmetros físico-químicos do aquífero freático, em amostra de água coletada em piezômetro, situado a 16 m do poço de extração. O pH das águas do aquífero freático, determinado, é de 5,4 (ácido, portanto) enquanto que as do aquífero confinado é de 7,9 (básico, portanto). Da mesma forma, embora o aquífero freático contenha águas que transportam uma grande massa coloidal, constituída principalmente por óxidos e hidróxidos de ferro e manganês, a quantidade de sólidos dissolvidos é pequena, apenas 7 mg/L, e a turbidez elevada (4010), enquanto as águas do aquífero confinado, são cristalinas (turbidez = 1) pois não apresentam colóides em suspensão, mas possuem uma quantidade maior de sólidos totais dissolvidos (131 mg/L).

Na figura 12 é mostrada a plotagem da análise química da água coletada no Aquífero Tremembé (cátions e ânions principais) no diagrama triangular de Piper (1944). Esta água é classificada como sendo bicarbonatada sódica.

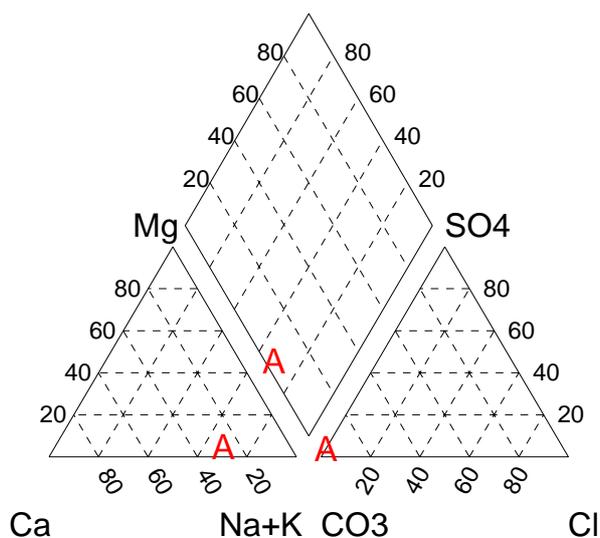


Figura 12. Ponto representativo das águas do poço de extração, no diagrama triangular de Piper.

5 - CONCLUSÕES

A perfuração de dois poços tubulares profundos para fins de pesquisas hidrogeológicas na área do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade de Taubaté, dentro do Programa de Políticas Públicas da FAPESP, possibilitou amplo conhecimento geológico, por meio da obtenção de testemunhos das sondagens executadas para a perfuração dos poços. Também, possibilitou-se conhecimento hidrogeológico, por meio da realização e interpretação de diversos testes de vazão, e de interferência entre os poços, pois ambos foram construídos distantes 13,2 m, dentro do raio de influência de cada um deles.

Foi elaborada uma nova teoria para interpretação dos dados de interferência entre poços.

Os parâmetros hidrodinâmicos obtidos para o Aquífero Tremembé, no local, mostram que o raio de influência do poço de extração, para uma vazão de bombeamento $36 \text{ m}^3/\text{h}$ e por um período de 13 horas, é de aproximadamente 792 m. Para esta vazão, 55,6% ($20 \text{ m}^3/\text{h}$) é proveniente da área circular compreendida entre os dois poços, e o restante 44,4% ($16 \text{ m}^3/\text{h}$) advém da diferença entre a área circular cujo raio é igual a 792 m e a área circular que compreende os dois poços.

O raio de influência do poço auxiliar, para uma vazão de bombeamento $84 \text{ m}^3/\text{h}$ e por um período de 13 horas, é de aproximadamente 923 m. Para esta vazão, 46,8% ($39,3 \text{ m}^3/\text{h}$) é proveniente da área circular compreendida entre os dois poços, e o restante 53,2% ($44,7 \text{ m}^3/\text{h}$) advém da diferença entre a área circular cujo raio é igual a 923 m e a área circular que compreende os dois poços.

A técnica demonstrada neste trabalho sobre determinações de interferência entre poços poderá ser útil em casos de conflitos entre o uso de água subterrânea extraída de poços interferentes ou, em casos de análises de interferência em rebaixamentos de aquíferos.

As análises hidroquímicas realizadas mostram significativas diferenças entre a qualidade das águas do aquífero freático e do aquífero confinado da Formação Tremembé. A plotagem de dados hidroquímicos mostram que estas águas subterrâneas profundas são apropriadas para o consumo humano.

6 - AGRADECIMENTOS

O autor agradece o apoio recebido da FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, através do Processo nº 03/07.183-1, para a consecução da pesquisa.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COOPER JR., H.H.; Jacob, C.E. 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. American Geophysics Union Transaction, Washington, n.27, p.526-534.
- DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. 1977. Estudo de águas subterrâneas: Região Administrativa 3 – S.J. dos Campos e faixa litorânea. Enco/DAEE, São Paulo, v.1, 112p. (texto).
- DINIZ, H. N. 1996. Estudo do potencial hidrogeológico da bacia hidrográfica do rio Baquirivunguaçu, Municípios de Guarulhos e Arujá, SP. Tese de doutoramento, Instituto de Geociências da USP, São Paulo, 296 p.
- FRANCO FILHO, F.W.B.; Souza, J.C.S. 1994. Exploração de água subterrânea em São José dos Campos – efeitos observados ao longo do tempo. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 8. Recife, dez.1994, Anais...Recife,. v.1, p.113-123.
- FREEZE, R.A., Cherry, J.A. 1979. Groundwater. Prentice-Hall, New Jersey, Englewood Cliffs, 604p.
- HANTUSH, M.S. 1956. Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers. American Geophysical Union Transaction, Washington, n.37, p.702-714.

- HASUI, Y.; Gimenez, A.F.; Melo, M.S. 1978. Sobre as bacias tafrogênicas do sudeste brasileiro. In: Congresso Brasileiro Geologia, 30. Recife, 1978, Anais...Recife, SBG, v.1, p.382-392.
- HASUI, Y., Ponçano, W. 1978. Organização estrutural e evolução da bacia de Taubaté. In: Congresso Brasileiro Geologia, 30. Recife, 1978, Anais...Recife, SBG, v.1, p.368-381.
- MARQUES, A. 1990. Evolução tectono-sedimentar e perspectivas exploratórias da Bacia de Taubaté, São Paulo, Brasil. Boletim de Geociências, Petrobrás, Rio de Janeiro, v.4, n.3, p.253-262.
- MELO, M.S.; Caetano, S.L.V.; Coimbra, A.M. 1986. Tectônica e sedimentação nas áreas das bacias de São Paulo e Taubaté. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 34. Goiânia, 1986, Anais...Goiânia, SBG, v.1, p.321-336.
- NEUMAN, S.P. 1972. Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table. Water Resources Research, Washington, v.8, p.1031-1045.
- OLIVEIRA, J.B.; Camargo, M.N.; Rossi, M.; Filho, B.C. 1999. Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida. IAC (Instituto Agrônomo de Campinas) – Embrapa Solos (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), Campinas, 64 p., mapa.
- PIPER, A.M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. American Geophysical Union Transaction, Washington, v.25, p.914-923.
- RICCOMINI, C. 1989. O Rift Continental do Sudeste do Brasil. Tese de doutoramento - Instituto de Geociências da USP, São Paulo, 256p.
- SANTORO, E.; Ens H.H.; Nagata, N. 1991. Geologia das folhas Jacareí, Tremembé, Taubaté e Pindamonhangaba. São Paulo, Parte 1: Embasamento Setentrional da Bacia de taubaté. In: Simpósio Geologia do Sudeste, 2. São Paulo, 1991, Atas...São Paulo, SBG/SP-RJ, p.481-489.
- THEIS, C.V. 1935. The relation between the lowering of piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. American Geophysical Union Transaction, Part II , Washington, p.519-524.