

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO E POSSIBILIDADE DE RECARGA ARTIFICIAL DO AQUÍFERO SEDIMENTAR DO GRUPO TAUBATÉ

Hélio Nóbile Diniz¹; Jair Santoro¹; Anna Artemisia Barracco de Azevedo¹; Nathália Torras Correia²; Felipe Rodrigues Carbone² & Luciana Campos de Oliveira Sciotta²

RESUMO

Este trabalho objetiva avaliar o comportamento do aquífero sedimentar do Grupo Taubaté, na bacia do rio Una, assim como a viabilidade da recarga artificial através da captação de águas das chuvas em telhado.

Foi construído um poço tubular profundo para captação de águas subterrâneas que serão utilizadas em irrigação e, que possibilitou a avaliação físico-química e a caracterização hidrodinâmica dos aquíferos através de testes de vazão. Está sendo construído, outro poço, auxiliar, para analisar a viabilidade da recarga artificial a ser efetuada mediante injeção direta.

A construção do poço de extração, que atingiu 115 m de profundidade, apresentou diversos problemas construtivos, principalmente relacionados com às características geológicas do terreno, formado predominantemente por material arenoso, com baixa coesão e elevada porosidade. O poço acabou sendo revestido até 87,1 m.

Os resultados das análises químicas do poço indicaram a presença de elementos acima do permitido pelos padrões estabelecidos na Portaria 518/2004 (ferro e manganês) e presença de bário.

Foram concluídas as obras necessárias à recarga artificial do aquífero através da captação de águas de chuvas em telhado, tratando-se de um ensaio metodológico que visa demonstrar a viabilidade de tal prática, já que esta possui restrições frente à legislação em vigor.

ABSTRACT

The goal of this study is analyze the behavior of the Taubaté Group sedimentary aquifer, in the river basin Una, as well as the artificial recharge viability through the rain captation into roof.

A tubular well for groundwater captation was constructed wich will be use in irrigation and, that it made possible the physicist-chemistry evaluation and the determination of the hydrodynamic characteristics through pump tests. Another well, a observation one, to analyze the viability of the artificial recharge is being built.

The extration well construction, that reached at depth 115 meters, presented diverse constructive problems, mainly related with the geologic characteristics of the land formed predominantly for sandy material with low cohesion and larg porosity. The water well completion it is at 87,1 meters.

The results of the chemical analyses of the groundwater that had indicated the presence of barium and elements above of the allowed one for the standards established in Portaria 518/2004 (iron and manganese).

The necessary workmanships to the aquifer artificial recharge, through the rain water captation in roof, had been concluded and being about a methodologic essay that will aiming to demonstrate the viability of such practical, inasmuch as this one has restrictions front at the legislation ruling.

Palavras-chave: recarga artificial, aquífero sedimentar, poço tubular profundo.

¹Pesquisador Científico do Instituto Geológico do Estado de São Paulo. Av.Miguel Stefano, 3900 – Água Funda – São Paulo - SP, CEP 04301-903
Fone: (11) 5073-5511 r.2072, e-mail:heliodiniz@igeologico.sp.gov.br

²Engenheiro Ambiental do Instituto Geológico do Estado de São Paulo. Av.Miguel Stefano, 3900 – Água Funda – São Paulo - SP, CEP 04301-903
Fone: (11) 5073-5511 r.2072, e-mail:nathaliatorras@hotmail.com

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho foi executado na bacia hidrográfica do rio Una, afluyente da margem direita do rio Paraíba do Sul, no bairro Itaim, Município de Taubaté, Estado de São Paulo.

Foi desenvolvido a partir da construção de dois poços tubulares profundos, um para extração de água subterrânea e outro auxiliar para pesquisar o modelo de recarga artificial dos aquíferos, efetuada através das águas das chuvas captadas no telhado da Fábrica de Alimentos do Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU. Este segundo poço (em construção) destina-se também para efetuar medidas de rebaixamento (como poço de observação) quando do bombeamento do primeiro poço, durante os testes de vazão.

O objetivo do trabalho é analisar a viabilidade da recarga artificial proveniente de águas das chuvas captadas em telhados, como ensaio metodológico, no aquífero sedimentar do Grupo Taubaté, bem como aprimorar o conhecimento geológico e hidrogeológico das camadas sedimentares, assim como analisar a qualidade hidroquímica das águas subterrâneas.

A retenção do excedente hídrico das águas das chuvas através da aplicação de métodos que promovam a infiltração destas águas nos solos, ou ainda, da injeção das águas das chuvas captadas em telhados diretamente no aquífero, são métodos que viabilizam a recarga do mesmo e diminuem o escoamento superficial, já que, este é responsável pela erosão, transporte de sedimentos e assoreamento dos corpos d'água, além de causador das enchentes nas planícies dos rios e ribeirões que percorrem o Município.

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 (figura 1). Os acessos à cidade de Taubaté são feitos pela Rodovia Presidente Dutra, e pela Rodovia Carvalho Pinto.



Figura 1. Mapa de localização do Município de Taubaté, no Estado de São Paulo.

Situado no Vale do Paraíba, entre a Serra da Mantiqueira e a Serra do Mar, Taubaté apresenta, no seu perímetro urbano, bairros localizados em colinas aplainadas, sustentadas pelos sedimentos terciários do Grupo Taubaté. A zona rural, na parte sul-sudeste, avança pela Serra do Mar, enquanto na porção norte-noroeste, pela Serra da Mantiqueira, ambas áreas são caracterizadas por relevo montanhoso (constituído por morros sustentados por rochas cristalinas do Complexo Embu). Na parte central do Município ocorrem as extensas várzeas do rio Paraíba do Sul.

Possui extensão territorial de 655 km², clima tropical com inverno seco, temperatura média anual de 21°C e índice pluviométrico médio anual de 1400 mm.

1.1. Revisão bibliográfica

1.1.1. Geologia

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).

A origem da Bacia Sedimentar de Taubaté deve-se à reativação dos grandes falhamentos E-NE que compõem a Zona de Transcorrência São Paulo (Hasui et al., 1978), representados pelos falhamentos Monteiro Lobato (Sadowski e Carneiro, 1974), do Rio Jaguari (Cavalcante e Kaefer, 1974); e os de Buquira e Bom Retiro (Carneiro et al., 1976). As falhas normais do Palmital, Parateí, São José e Rio Comprido, descritas por Carneiro et al. (1976) representam os deslizamentos gravitacionais e basculamento de blocos (Coltrinari, 1992) que caracterizam as reativações recentes destas antigas falhas transcorrentes.

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 faz parte de um conjunto de bacias tafrogênicas continentais, “o sistema de rifts da Serra do Mar” de Almeida (1976) e, mais recentemente, de “Rift Continental do Sudeste do Brasil” de Riccomini (1989). Estes processos tectônicos ocorreram durante a abertura do Atlântico Sul, formando grabens assimétricos, com basculamento ora para SE, ora para NW, preenchidos por sedimentos a partir do Terciário. Possui formato alongado com 170 km de comprimento e de 10 a 20 km de largura.

A espessura dos sedimentos (Hasui et al., 1978; Melo et al., 1986) é variável, atingindo, na porção próxima à Serra da Mantiqueira, na sub-bacia de Roseira, 850 m.

A sedimentação ocorreu de maneira sin-tectônica (Souza, 2004), com típicos depósitos psefíticos, decorrentes de processos de *debris-flow*, atuantes nas bordas falhadas da bacia, além de depósitos psamíticos e pelíticos, na sua parte central sendo estes ligados a sistemas flúvio-lacustres.

A bacia é parcialmente seccionada por três altos estruturais transversais (Alto de Caçapava, Alto Capela Nossa Senhora do Socorro e Alto Capela Santa Luzia), que formam um conjunto de quatro sub-bacias, intituladas, de norte para sul, Lorena, Roseira, Quiririm e Eugênio de Melo (Marques, 1990).

Neste trabalho adota-se a coluna estratigráfica de Hasui e Ponçano (1978) que reúne no Grupo Taubaté, as Formações Tremembé e Caçapava, sendo estas designações propostas inicialmente por Carneiro et al. (1976) para os depósitos de canais e planícies de rios anastomosados na região de São José dos Campos e Caçapava.

1.1.2. Hidrogeologia da bacia do rio Paraíba do Sul no Estado de São Paulo

Na UGRHI-2 (Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Rio Paraíba do Sul) há dois sistemas aquíferos principais: o das coberturas sedimentares cenozóicas (Formações Caçapava e Tremembé, e sedimentos quartenários), e o das rochas cristalinas. Os terrenos sedimentares cenozóicos formam o principal e melhor aquífero da região. Suas características não são uniformes e variam segundo a litologia das formações sedimentares.

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.

As rochas cristalinas ígneas e metamórficas Pré-Cambrianas não formam um aquífero regional contínuo, mas apresentam localmente condições aquíferas através de falhas, fraturas e outras descontinuidades que permitem a circulação das águas subterrâneas que podem, ser exploradas.

O Paraíba do Sul, é um rio efluente, cujo fluxo subterrâneo é descarregado nas fontes que o abastecem. Devido à grande demanda de águas subterrâneas exploradas pelos fortes bombeamentos nos poços tubulares profundos que abastecem grande parte das populações e das indústrias, principalmente nos Municípios de Jacareí, São José dos Campos e Lorena, o rio Paraíba do Sul mudou de comportamento e passou a recarregar os aquíferos, rebaixados, como observado no estudo realizado pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE, 1977b). Nestes locais, o

rio Paraíba do Sul, de rio efluente tornou-se um rio influente, infiltrando suas águas que recompõe os aquíferos intensamente explorados.

Devido às características físicas dos solos sobrepostos aos sedimentos terciários do Grupo Taubaté, geralmente formados por latossolos vermelho-amarelos, profundos, muito porosos e permeáveis, existe uma tendência à percolação profunda das águas infiltradas provenientes do excedente hídrico. O escoamento superficial fica restrito às áreas impermeabilizadas pela ação antrópica, ou então, às áreas onde ocorrem solos hidromórficos, constituídos por argilas orgânicas, como em alguns locais da várzea do rio. Assim, em Taubaté, os aquíferos recebem grande quantidade de recarga, todos os anos

Segundo DAEE (1977a), de Jacareí até São José dos Campos, o fluxo tornou-se influente, ou seja, os aquíferos recebem água proveniente do rio Paraíba do Sul. Esta situação é provocada pelas condições severas de exploração dos poços tubulares profundos, que induziram a recarga dos aquíferos a partir das águas superficiais disponíveis permanentemente.

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

1.1.3. O Sistema aquífero sedimentar Paraíba do Sul ou Taubaté

O modelo de circulação regional aceito para o Sistema Aquífero Sedimentar Paraíba do Sul - SASPS (CONSÓRCIO ICFKAISER-LOGOS, 1999) mostra que as águas das chuvas recarregam os aquíferos em toda a sua extensão não impermeabilizada (figura 2). Uma vez ingressando no aquífero, as águas fluem em direção às drenagens superficiais, suas áreas de descarga. Suas características hidrogeológicas estão intimamente relacionadas aos ambientes de deposição da Bacia Sedimentar de Taubaté. Neste sentido, podem-se distinguir, regionalmente, duas unidades com diferentes comportamentos hidráulicos, de acordo com o ambiente em que os sedimentos foram depositados.

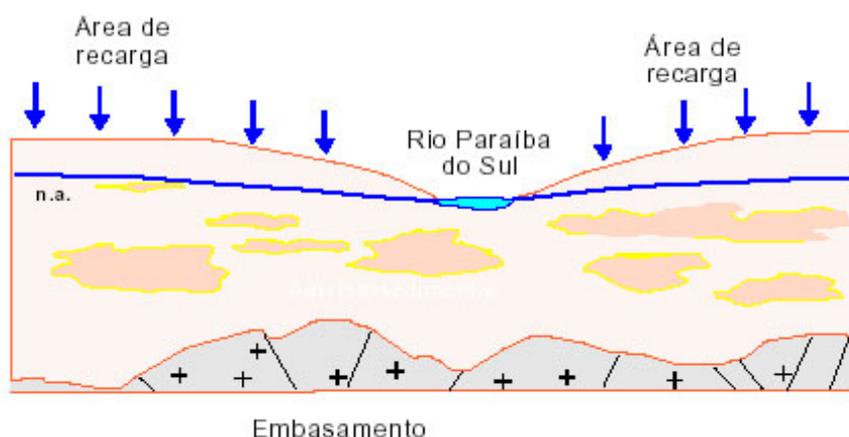


Figura 2. Modelo de circulação regional para o sistema aquífero sedimentar da Bacia de Taubaté (Consórcio ICFKAISER-LOGOS, 1999).

A primeira unidade, nas porções sudeste e noroeste da Bacia Sedimentar de Taubaté (respectivamente, Jacareí/São José dos Campos e Lorena/Cachoeira Paulista), está associada ao ambiente sedimentar fluvial com altas vazões em poços profundos que podem superar 200 m³/h e médias de 50 m³/h, e Transmissividades em torno de 100 m²/dia. A outra, ocorre na região entre Taubaté e Pindamonhangaba, no centro da Bacia Sedimentar, e está associada ao ambiente sedimentar lacustre, apresentando valores menores de vazão, da ordem de 20 a 30 m³/h, com e Transmissividade entre 10 a 50 m²/dia.

A recarga dos aquíferos do sistema sedimentar (Aquíferos Caçapava e Tremembé) faz-se em todas as suas áreas de afloramentos e a descarga nos rios e ribeirões que desaguam no rio Paraíba do Sul, nível de base regional (fluxo efluente). As curvas equipotenciais acompanham a topografia, os gradientes hidráulicos variam de 0,002 a 0,02, e são função da topografia e da permeabilidade dos depósitos sedimentares (DAEE, 1977a).

Embora o rio Paraíba do Sul represente a zona de descarga regional dos aquíferos, as fontes que abastecem seus afluentes comportam-se como áreas de descarga local, conferindo curtos tempos de trânsito para as águas subterrâneas. Reconhece-se, também, pela geometria de alguns aquíferos e composição química de suas águas, a presença de uma circulação regional de longo período.

1.1.4. Hidroquímica das águas subterrâneas no Vale do Paraíba do Sul

Vidal e Kiang (2002), relacionaram os tipos hidroquímicos encontrados nos poços com a origem dos sedimentos da Bacia Sedimentar de Taubaté e definiram os seguintes grupos:

Tipo I: salinidade entre 28 e 207 mg/L com águas predominantemente bicarbonatadas sódicas. Estão associadas aos sedimentos fluviais da Formação Caçapava, presentes nas bordas da Bacia Sedimentar e principalmente na região de São José dos Campos;

Tipo II: associadas aos sedimentos fluviais terciários, distantes da borda da Bacia Sedimentar, caracterizando águas bicarbonatadas cálcicas e sódicas, com salinidade entre 165 e 350 mg/L;

Tipo III: águas bicarbonatadas sódicas com teores de magnésio e cálcio baixos. A salinidade varia em torno de 275 e 438 mg/L. Sofrem forte influência dos sedimentos lacustres terciários, e estão presentes nas regiões de Taubaté e Lorena;

Tipo IV: exclusivamente bicarbonatadas sódicas e estão em altas temperaturas (superiores a 35°C). A salinidade dessas águas é a mais elevada, atingindo 712 e 842 mg/L, sendo encontradas em áreas em que ocorrem sedimentos lacustres terciários.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Na área estudada, foram construídos dois poços tubulares profundos, um completado e outro em fase de perfuração, ambos com sonda nacional rotativa a aço granulado do Instituto Geológico da Secretaria do Meio Ambiente. Os poços tem por objetivo efetuar pesquisas hidrogeológicas sobre o comportamento hidráulico e hidroquímico do aquífero sedimentar da Formação Tremembé, do Grupo Taubaté, levantamentos geológicos sobre a estratigrafia, palinologia, mineralogia e paleontologia, e como projeto piloto de recarga artificial de aquíferos. O primeiro poço, já completado, após o término das pesquisas que estão sendo efetuadas, deverá ser utilizado para irrigar culturas experimentais no Departamento de Ciência Agrárias numa área de 2 hectares. O outro poço, em construção, é auxiliar devendo ser usado como poço de observação para medição dos níveis d'água durante a realização de testes de vazão e ensaios de bombeamento que serão realizados para avaliação hidrodinâmica do aquífero sedimentar e, também, como poço de bombeamento para avaliação da interferência entre poços.

Durante as pesquisas hidrogeológicas de recarga artificial do aquífero sedimentar, o poço auxiliar servirá como poço de observação (para medidas de nível d'água durante os testes de vazão) e de coleta d'água para injeção no aquífero, substituindo a injeção direta das águas das chuvas captadas no telhado da Fábrica de Alimentos da Faculdade de Agronomia da Universidade de Taubaté, a fim de atender a legislação vigente no Estado de São Paulo, pois o artigo 9º da Lei Estadual nº 7.663 de 30/11/1991 estabelece que *“A implantação de qualquer empreendimento que demande a utilização de recursos hídricos, superficiais ou subterrâneos, a execução de obras ou serviços que alterem seu regime, qualidade ou quantidade dependerá de prévia manifestação, autorização ou licença dos órgãos e entidades competentes de forma a não alterar a qualidade das águas subterrâneas”*.

Assim sendo, nas pesquisas de injeção de água no aquífero sedimentar, através da recarga artificial, será utilizado o poço auxiliar de forma a não mudar as características físico-químicas das águas subterrâneas, atendendo a legislação acima citada.

O poço de captação atingiu 115 m de profundidade, possibilitou a avaliação físico-química das águas subterrâneas e, por ter sido perfurado com barriletes amostradores, permitiu o conhecimento estratigráfico dos sedimentos da Bacia de Taubaté no local. Através dos testes de bombeamento, realizados em três profundidades distintas, obteve-se as características hidrodinâmicas dos aquíferos. Sua construção teve por finalidade, além do uso da água em irrigação, o monitoramento dos níveis potenciométricos do aquífero sedimentar em função das vazões de exploração.

O poço auxiliar está sendo construído a 13,4 m do primeiro, e atingiu, até o momento a profundidade de 80 m, estando previsto chegar a 125 m. O aparato de recarga foi construído para mostrar a viabilidade da recarga artificial dos aquíferos através da injeção das águas de chuvas.

Para estudos e pesquisas de recarga artificial optou-se pela captação advinda do telhado da Fábrica de Alimentos, devido ao fato deste ser bastante abaulado, com alto ângulo de escoamento (figura 3), constituído por chapas zincadas novas, o que diminui a possibilidade do desenvolvimento de microorganismos patogênicos ou materiais tóxicos que porventura venham a ser carregados pelas águas das chuvas.

Para a captação, instalou-se um sistema de calhas e rufos que levam a água do telhado para tubulações de PVC de esgoto branco de 4” de diâmetro e ângulo de 60°. Estes tubos, em número de 6 em cada lado da Fábrica, descem do telhado ao calçamento onde encontram derivações de 4”, por sua vez ligadas a uma tubulação mestra em PVC de esgoto branco de 6”, enterrada. A conexão entre os tubos de 4” para 6”, e vice versa, foram feitos com, cotovelos, joelhos e redutores.

A tubulação mestre, enterrada a cerca 0,5 m de profundidade, foi instalada de um lado e do outro da Fábrica de Alimentos. Em subsuperfície, ambas foram interligadas através de um “T”, a uma linha de tubos de PVC também com 6”, que segue até uma caixa de alvenaria, com capacidade para 15,4 m³ de água, construída para reter e injetar água no poço de recarga artificial. Antes de chegar à caixa d’água, a linha do tubo de 6” recebe um cavalete onde foi instalado um hidrômetro proporcional de ¾”, para leitura dos volumes que passam pela linha principal de recarga. O hidrômetro é igual àqueles utilizados pela SABESP para abastecimento público. A caixa d’água é conectada ao poço de recarga através de um tubo de 4” em PVC marrom, que possui maior resistência que o PVC branco.

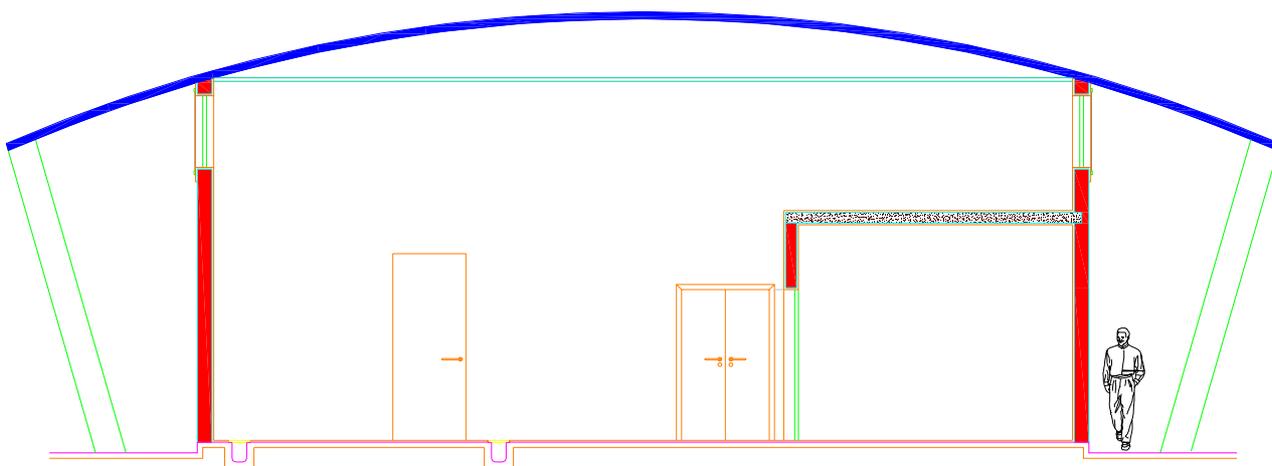


Figura 3. Corte da Fábrica de Alimentos da UNITAU, com vista do telhado abaulado, em azul escuro.

A captação de água das chuvas no telhado da Fábrica envolve uma área total de 491,86 m² (27,54 m × 17,86 m).

O poço completado foi construído a 19,5 m da Fábrica de Alimentos, na sua parte lateral, em local plano, mas com cota dois metros abaixo do piso, de forma a facilitar a condução das águas captadas das chuvas por gravidade. No modelo de recarga em estudo, a água captada deverá ser lançada na parede lateral do revestimento (tubo de boca) com diâmetro de 15", a 0,5 m abaixo da tampa, de forma a permitir a sua injeção sem bombeamentos ou longos condutos. O tubo de boca é vedado evitando-se o contato com as partículas em suspensão na superfície.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Perfuração dos poços

O poço de extração, completado, foi construído no local de coordenadas UTM 447798 EW e 7453025 NS. Suas características construtivas são mostradas na figura 4.

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 em 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 16 m 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 16 m (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 metros 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 115 m, 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 está sendo construído outro, auxiliar, no local de coordenadas UTM 447799 EW e 7453028 NS.

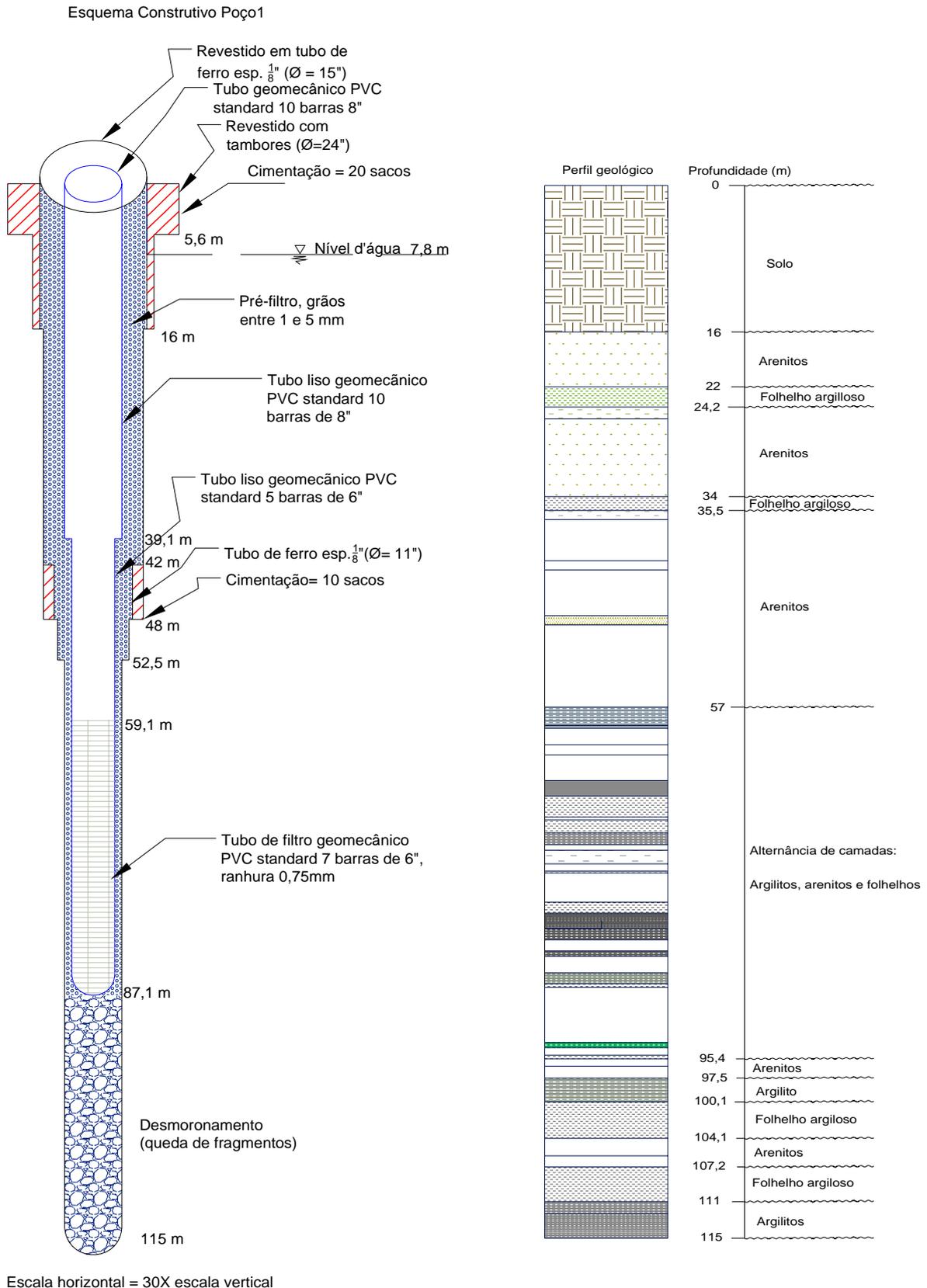


Figura 4. Esquema construtivo e perfil geológico do poço de extração do Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU, Taubaté, SP.

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 5 m e revestindo-se este intervalo com tambores 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 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 15'' foram preenchidos 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''.

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, agora com broca de 8'' de diâmetro, continuou até 64,63 m mas, novos desmoronamentos, obrigaram o revestimento de todo o intervalo, entre +0,67 até 64,63 m de profundidade, com tubos de PVC, geomecânicos, de 8'' (entre +0,67 até 47,7 m), e com tubos de ferro de 8'', com espessura 1/4" (entre 47,7 e 64,63 m).

3.2. Caracterização geológica

Verificou-se, pelas amostras coletadas em diversos locais no Campus do Departamento de Ciências Ambientais, em encostas, taludes e nas sondagens a trado 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 1m, 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 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 e, por vezes, arcozeanos, com cimento e nódulos carbonáticos (figura 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.

3.3. Caracterização hidrogeológica

Durante a construção do poço de extração, o primeiro teste de vazão foi realizado à profundidade de 48 m (em 03/04/2006). Os dados obtidos (valores de rebaixamento \times tempo em gráfico bi-logarítmico) mostraram que o aquífero é do tipo semi-confinado, 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 .

Um segundo teste foi realizado no dia 28 de abril de 2006, quando o poço apresentava 66 m. Este foi realizado para verificar possíveis variações hidrogeológicas já que, durante o avanço da perfuração, de 48 m 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.

O último teste de vazão foi realizado em 17/10/2006 com 14 hs de bombeamento contínuo e 10 hs de recuperação ao término da construção do poço, com 87,1 m.

A interpretação gráfica deste teste encontra-se na figura 5. Observa-se que o aquífero mudou de condição passando a ser do tipo confinado. Isto se deve ao fato que, com o avanço da perfuração, aumentou o número de camadas argilosas, pouco permeáveis, que formam, portanto, os aquiocludes. Camadas arenosas, muito permeáveis, situadas entre dois aquiocludes formam aquíferos do tipo confinado.

3.3.1. Interpretação dos Resultados do Primeiro Teste de Vazão

Para os dados do primeiro teste de vazão, efetuado quando o poço estava com 48 m de profundidade, utilizou-se do modelo preconizado por Hantush (1956) para aquíferos semi-confinados (figura 5), obtendo-se os seguintes resultados: Transmissividade de 0,58 m²/h e fator de gotejamento (r/B) de 0,2. Estes parâmetros mostram que o aquífero da Formação Tremembé, do Grupo Taubaté, é constituído por camadas arenosas porosas e saturadas mas com valores baixos de

Transmissividade, com coluna saturada de 40,27 m {48 m (profundidade atual) – 7,73 m (nível estático) = 40,27 m}.

Apesar do baixo valor de Transmissividade ($0,58 \text{ m}^2/\text{h}$), trata-se de um poço que pode fornecer boa vazão até a profundidade de 48 m, em torno de $2 \text{ m}^3/\text{h}$ por metro rebaixado. Isto indica que, rebaixando-se 1/3 da coluna saturada ($40,27/3 = 13,42 \text{ m}$), a vazão fornecida será de aproximadamente $27 \text{ m}^3/\text{h}$.

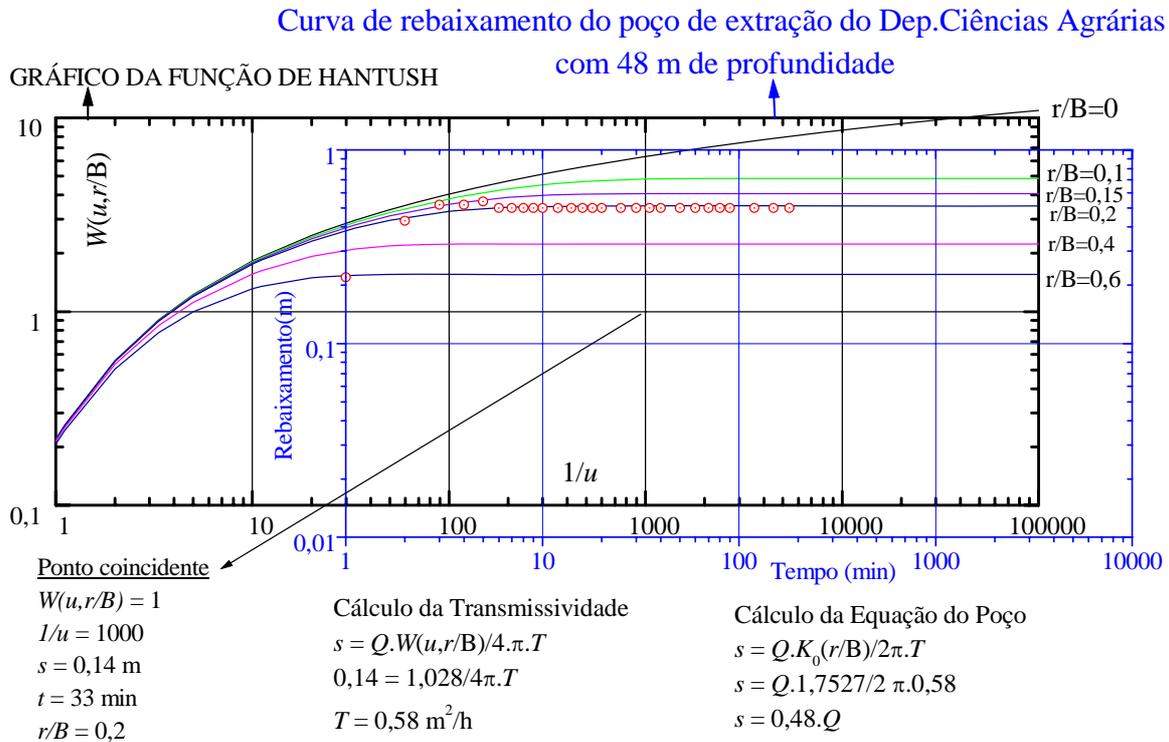


Figura 5. Método da superposição da família de curvas da Função de Hantush com os dados de rebaixamento \times tempo, do teste de vazão, para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero semi-confinado, em Taubaté.

3.3.2. Interpretação dos Resultados do Segundo Teste de Vazão

Nos dados do segundo teste de vazão, realizado quando o poço estava com 66 m de profundidade, utilizou-se do modelo preconizado por Neuman (1972) para aquíferos semi-livres (figura 6), obtendo-se o resultado de $0,56 \text{ m}^2/\text{h}$ para a Transmissividade.

O valor obtido para o parâmetro Transmissividade mostra que praticamente não houve mudança do principal parâmetro hidráulico determinado no primeiro teste realizado, mas que ocorreu uma mudança no comportamento hidráulico do aquífero, passando a ter comportamento do tipo semi-livre.

O poço, com as características hidráulicas acima determinadas, pode fornecer uma vazão melhor do que a encontrada no primeiro teste, pois sendo mais profundo, possui uma coluna saturada de aproximadamente de 59 m {66 m (profundidade atual) – 6,83 m (nível estático atual) =

59,17 m}. Rebaixando-se 1/3 da coluna saturada ($59/3 = 19,66$ m) a vazão é de aproximadamente $39 \text{ m}^3/\text{h}$.

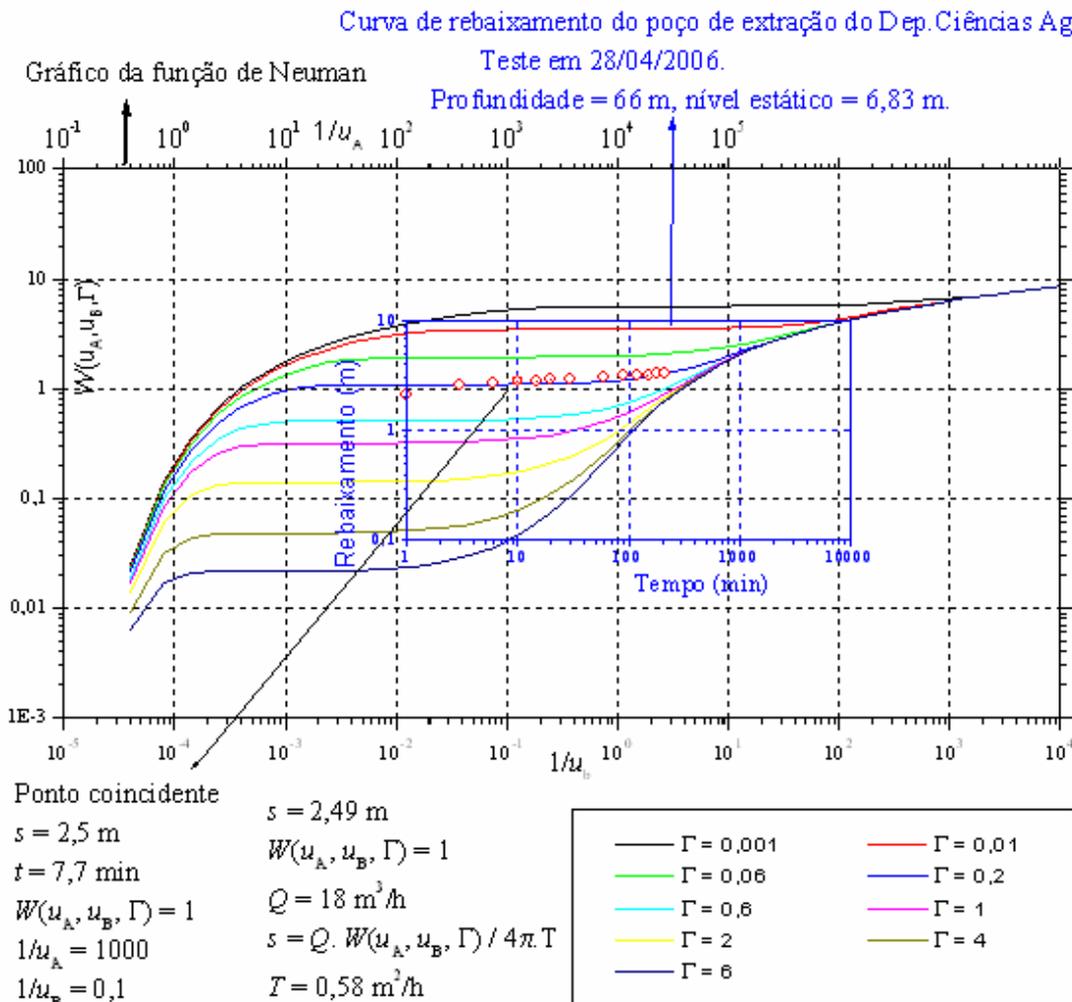


Figura 6. Método da superposição da família de curvas da Função de Neuman com os dados de rebaixamento \times tempo do teste de vazão para determinação da Transmissividade do aquífero semi-livre.

3.3.3. Interpretação dos Resultados do Teste de Vazão Final

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 final em 17/10/2006, com 14 hs de bombeamento contínuo e 10 hs de recuperação

A interpretação gráfica do teste encontra-se na figura 7. Observa-se que houve nova mudança do tipo de aquífero que passou a ser do tipo confinado e, isto se deve ao aumento do número de camadas argilosas, pouco permeáveis, em profundidade, e que formam aquícludes. Camadas arenosas, muito permeáveis, situadas entre dois aquícludes formam aquíferos do tipo confinado.

Na interpretação do teste de vazão final, obteve-se os seguintes parâmetros hidráulicos do aquífero confinado: Transmissividade igual a $8 \text{ m}^2/\text{h}$ e Coeficiente de Armazenamento igual a $0,002$ (adimensional), conforme pode ser observado na interpretação gráfica da figura 7.

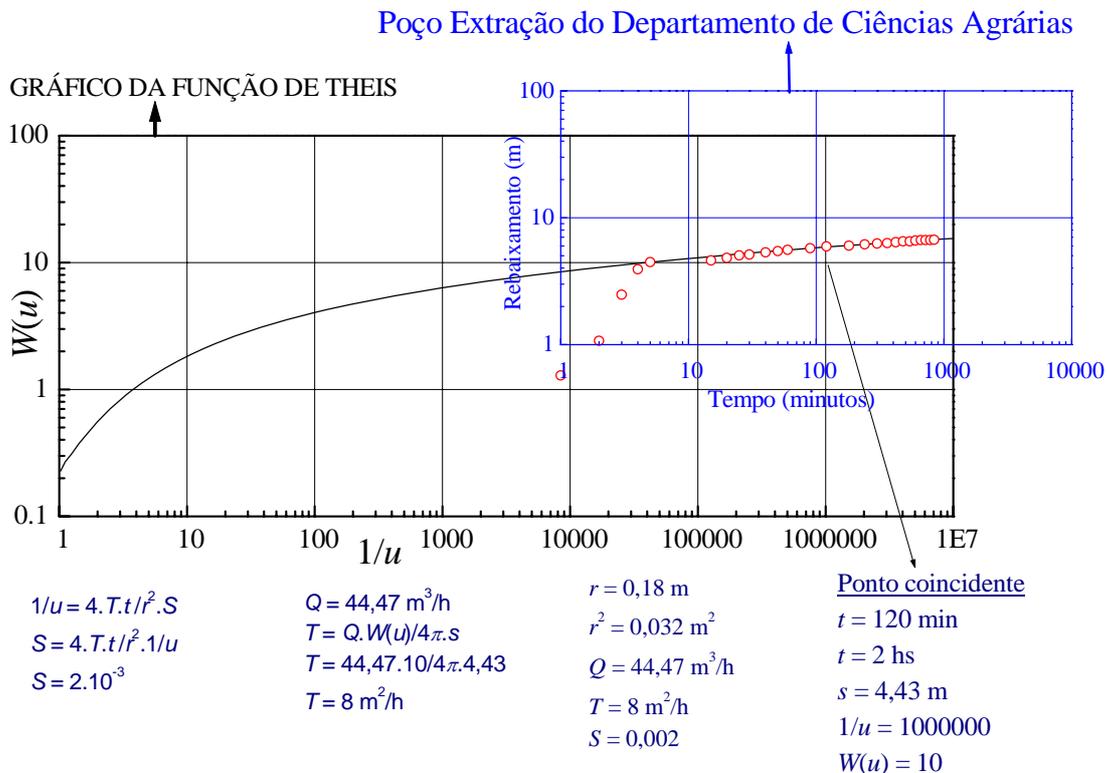


Figura 7. Método da superposição de Theis, entre a curva padrão e os dados de rebaixamento \times tempo do teste de vazão final, para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero confinado da Formação Tremembé, em Taubaté.

Utilizou-se do método da superposição de Theis neste último teste porque a partir da profundidade ensaiada anteriormente (66 m) surgiram intercalações significativas de argilitos compactos que confinaram o aquífero subjacente.

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 $30,5 \text{ m}$, ou explicitando, igual ao nível estático ($8,33 \text{ m}$) mais o rebaixamento ($22,16 \text{ m}$) 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:

$$s = \frac{2,3Q}{4\pi T} \log\left(\frac{2,25Tt}{r^2 S}\right) \Rightarrow s = \frac{2,3 \cdot 120}{4\pi \cdot 8} \log\left(\frac{2,25 \cdot 8 \cdot 17520}{(0,18)^2 \cdot 0,002}\right) \Rightarrow s = 26,59 \text{ m} \quad (1)$$

Na região de Taubaté não é conhecido outro poço que possa fornecer esta vazão ($120 \text{ m}^3/\text{h}$), para um rebaixamento relativamente pequeno ($26,59 \text{ m}$), o que mostra a importância desta pesquisa

no conhecimento hidrogeológico da região, que favorecerá o melhor uso dos recursos hídricos subterrâneos.

3.4. Análises físico-químicas e bacteriológicas das águas subterrâneas

Quando o poço de extração estava com 66 m de profundidade (aquífero semi-livre), foram coletadas amostras das águas para análises físico-químicas. Estas foram realizadas no laboratório da SABESP. Foram investigados 32 parâmetros, principalmente o conteúdo em metais pesados e bacteriológico. Os resultados encontrados (tabela 1) mostram que 6 parâmetros encontravam-se acima dos limites recomendados pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde (realçados em amarelo).

Tabela 1. Resultados das análises químicas e bacteriológicas realizadas pela SABESP, de São José dos Campos, em amostras coletadas no poço de extração, com 66 m de profundidade, em 26/04/2006.

Parâmetros	Unidades	Limite de Detecção	Limite Portaria 518/2004	Resultados
Alumínio	mg/L	0,02	0,2	0,08
Amônia	mg/L	0,02	1,5	0,27
Antimonio	mg/L	0,003	0,005	<0,003
Arsênico	mg/L	0,005	0,01	<0,005
Bário	mg/L	0,05	0,7	3
Cádmio	mg/L	0,001	0,005	<0,001
Cianeto	mg/L	0,03	0,07	<0,03
Chumbo	mg/L	0,005	0,01	0,026
Cloreto	mg/L	1	250	2,72
Cobre	mg/L	0,05	2	<0,05
Cond. Especifica	µS/cm	0,1		173
Cor Aparente	UC	5	15	200
Cromo Total	mg/L	0,005	0,05	0,017
Escherichia Coli	NMP/100ml	1	0	<1
Ferro	mg/L	0,05	0,3	5,68
Fluoreto	mg/L	0,2	1,5	0,2
Manganês	mg/L	0,05	0,1	0,08
Mercurio	mg/L	0,0002	0,001	<0,0002
Monocloramina	mg/L	0,06	3	<0,06
Nitrato	mg/L	0,05	10	3,18
Nitrito	mg/L	0,01	1	0,15
pH	pH			7,5
Selênio	mg/L	0,005	0,01	<0,005
Sódio	mg/L	0,05	200	17,85
Sulfato	mg/L	2	250	18,5
Sulfeto	mg/L	0,03	0,05	<0,03
Surfactantes	mg/L	0,03	0,5	<0,03
Turbidez	NTU	0,1	5	55
Zinco	mg/L	0,05	5	<0,05
Solidos Totais Dis.	mg/L	1	1000	83
Temp.da Amostra	°C			24
Temp.do pH	°C			24

O ferro dissolvido está presente em níveis acima do permitido. Sua origem provém da alteração intempérica dos minerais ferro-magnesianos existentes nas rochas cristalinas, que estão situadas distantes da área, mas em posição topográfica superior, o que permite o seu carreamento através da percolação das águas provenientes de montante.

O bário encontra-se acima dos limites (tabela 1). É um elemento tóxico, natural, proveniente de sais de bário (barita) existentes no cimento intergranular dos sedimentos terciários da Formação Tremembé, existentes no local, em profundidade. O chumbo também encontra-se acima dos limites recomendados. Sua origem pode estar relacionada com o decaimento radioativo do tório existente nas areias monazíticas (Suguio, 1968) encontradas nos sedimentos terciários do Grupo Taubaté.

Quando o poço encontrava-se concluído e acabado com 87,1 m de profundidade (aquífero confinado) foi realizada uma nova coleta de água para caracterização hidroquímica.

O critério para esta análise levou em consideração os parâmetros encontrados na primeira, efetuada com o poço na profundidade de 66 m, que indicava a presença de alguns metais pesados (bário e chumbo), ferro e manganês, além dos cátions e ânions principais (tabela 2).

Tabela 2. Análise físico-química realizada em amostras coletadas no poço de extração, com 87,1 m de profundidade, no dia 19/10/2006.

PARÂMETROS	UNIDADE	Limite de detecção	Limite Portaria 518/2004	Resultados
Características físicas				
Potencial Redox (Eh)	°C	-	-	+318
pH	pH	-	6,0 a 9,5	7,94
Sólidos Totais Dissolvidos	mg/L	1	1000	131
Compostos				
Dureza Total	mg/L	-	500	50,5
Sílica	mg/L	-	-	5,2
Metais				
Bário	mg/L	0,05	0,7	0,42
Chumbo	mg/L	0,005	0,01	<0,005
Ferro	mg/L	0,05	0,3	1,96
Manganês	mg/L	0,05	0,1	0,12
Ametais				
Fluoreto	mg/L	-	1,5	<1
Cátions principais				
Cálcio	mg/L	-	-	17,21
Potássio	mg/L	-	-	2,17
Magnésio	mg/L	-	-	1,83
Sódio	mg/L	0,05	200	51,75
Ânions principais				
Alcalinidade em bicarbonatos	mg/L CaCO ₃	-	120	9,3
Alcalinidade em carbonatos	mg/L CaCO ₃	-	-	37,1
Cloreto	mg/L	1	250	0,76
Nitrato	mg/L	0,05	10	2,94
Sulfato	mg/L	2	250	2,55

4. CONCLUSÕES

Os estudos realizados até o momento mostraram que a recarga artificial do aquífero sedimentar de Taubaté, na bacia do rio Una, com águas provenientes das chuvas é factível, porém somente será implementada caso a conclusão da pesquisa que está sendo realizada mostre que atende ao disposto na legislação vigente no Estado de São Paulo já que, o artigo nº 43 do Decreto nº 32.955 de 7/2/1991, estabelece que: “A recarga artificial dependerá de autorização do DAEE, condicionada à realização de estudos que comprovem a sua conveniência técnica, econômica e sanitária e a preservação da qualidade das águas subterrâneas”.

Os parâmetros hidrogeológicos obtidos até o presente, nos sedimentos terciários da Formação Tremembé, do Grupo Taubaté, na bacia do rio Una, demonstraram que esta prática poderá vir a ser aplicada no local, após atender ao disposto na legislação vigente. O poço de extração, construído pelo Instituto Geológico será disponibilizado ao Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU para uso em irrigação, após a conclusão da pesquisa. Como o aparato para captação e injeção de águas captadas em telhados encontra-se concluso, após a concessão da outorga do uso da água para irrigação, será solicitado a outorga para a recarga artificial, que servirá como modelo para os aquíferos sedimentares do sudeste brasileiro.

BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA, F.F.M. (1976). “*The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil*”. Anais Academia Brasileira de Ciências, n.48 (Supl.), pp.15-26.
- CARNEIRO, C.D.R.; HASUI, Y.; GIANCURSI, F.D. (1976). “*Estrutura da Bacia de Taubaté na região de São José dos Campos*” in Anais do XXIX Congresso Brasileiro de Geologia, Ouro Preto, 1976, 4, pp.247-256.
- CAVALCANTE, J.C.; KAEFER, L.Q. (1974). “*Geologia da folha de Santos (parcial)*” in Anais do XXX Congresso Brasileiro Geologia, Recife, 1978, 4, pp.227-245.
- COLTRINARI, L. (1992). “*Geomorfologia e dinâmica quaternária no sudeste do Brasil*”. Revista do Departamento de Geografia da FFLCH/USP, São Paulo, 6, pp.7-16.
- CONSÓRCIO ICFKAISER-LOGOS (1999). *Projeto Qualidade das Águas e Controle da Poluição Hídrica na Bacia do Rio Paraíba do Sul, Meta I*. SRHSO-SEPURB/MPO-BIRD-PNUD, São Paulo, maio/1999. Mimeografado.
- 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, 27, pp.526-534.
- DAEE (1977a). *Estudo de águas subterrâneas: Região Administrativa 3 – S.J. dos Campos e faixa litorânea*. Enco/DAEE- – Departamento De Águas e Energia Elétrica, São Paulo, 1, 112 p. (texto).
- DAEE (1977b). *Estudo de águas subterrâneas: Região Administrativa 3, S.J. dos Campos e faixa litorânea*. Enco/DAEE – Departamento De Águas e Energia Elétrica, São Paulo, 5, 160 p. (mapas e tabelas).
- FETTER, C.W. (1988). *Applied hidrogeology*. 2.ed., Macmillan Publ. Comp., New York, 592 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 Anais do VIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Recife, Dez. 1994, 1, pp.113-123.
- HANTUSH, M.S. (1956). “*Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers*”. American Geophysical Union Transaction, pp.702-714.
- HASUI, Y.; GIMENEZ, A.F.; MELO, M.S. (1978). “*Sobre as bacias tafrogênicas do sudeste brasileiro*” in Anais do XXX Congresso Brasileiro Geologia, Recife, 1978, 1, pp.382-392.
- HASUI, Y.; PONÇANO, W. (1978). “*Organização estrutural e evolução da bacia de Taubaté*” in Anais do XXX Congresso Brasileiro Geologia, Recife, 1978, 1, pp.368-381.
- MARQUES, A. (1990). “*Evolução tectono-sedimentar e perspectivas exploratórias da Bacia de Taubaté, São Paulo, Brasil*”. Boletim de Geociências, Petrobrás, 4, (3), pp.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 Anais do XXXIV Congresso Brasileiro de Geologia, Goiânia, 1, pp.321-336.
- NEUMAN, S.P. (1972). “*Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table*”. Water Resources Research, 8, pp.1031-1045.
- PIPER, A.M. (1944). “*A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses*”. American Geophysical Union Transaction, 25, pp.914–923.
- RICCOMINI, C. (1989). *O Rift Continental do Sudeste do Brasil*. Tese de doutoramento, Instituto de Geociências da USP, São Paulo, 256 p.
- SADOWSKI, G.R.; CARNEIRO, C.D.R. (1974). “*O charnoquito de São Francisco Xavier, São Paulo*” in Anais do XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia, Porto Alegre, 1974, 4, pp.207-211.
- SANTORO, J. (1991). Fenômenos erosivos acelerados na região de São Pedro – S.P. Estudo da fenomenologia com ênfase geotécnica. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 140 p.
- SUGUIO, K. (1968). *Contribuição à geologia da Bacia de Taubaté*. Tese de doutoramento, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 106 p.
- VIDAL. A.C.; KIANG, C.H. (2002). “*Caracterização hidroquímica dos aquíferos da Bacia de Taubaté*”. Revista Brasileira de Geociências, 32, (2), pp.267-276.