

HISTÓRICO DA PERFURAÇÃO DE POÇOS TUBULARES PROFUNDOS E HIDRODINÂMICA DOS AQUÍFEROS, NO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

Hélio Nóbile Diniz¹; Jorge Luiz Monteiro²; Marcelo Luiz Arsillo Braga¹; Mário Pero Tinoco²;
Sonia Emi Tanaka¹; Victor Hugo Alves da Silva¹ & Vivian Citelli de França¹

Resumo - Neste trabalho é apresentado um histórico dos processos de captação de água subterrânea, com destaque ao Município de São José dos Campos e os resultados da análise dos testes de vazão de poços cadastrados no município.

De um total de trezentos e sessenta e três poços cadastrados no município, em cerca de cinquenta e cinco dos poços obteve-se dados de testes de vazão, realizados quando do término das perfurações. A partir destes dados e utilizando o software Origin 5.0, foi calculado graficamente a Transmissividade e o Coeficiente de Armazenamento. A análise dos gráficos mostrou quais os tipos de aquíferos predominam na região. Através do software SURFER 8.0 analisou-se estatisticamente os dados e obteve-se a distribuição do Coeficiente de Armazenamento e as áreas de recarga, a distribuição da Transmissividade e as zonas mais produtivas dos aquíferos do Município de São José dos Campos.

Abstract - This paper contains the water wells development history and its pump tests results of Sao Jose dos Campos Municipality, in Sao Paulo State.

Whithin the total of three hundred sixty three wells have been cadastered, and among than, fifty five had pump test data. Those tests were done soon after the perforation finished. Using these datas and software Origin 5.0, it was graphically calculated the Transmisivity and the Storativity. The graphs analysis showed which kind of aquifers predominate in this region. Using software SURFER 8.0 the data statistical and the Storativity distributions were analyzed and the recharge area was obtained. The Transmisivity distribution and the most productive aquifers zones of the Sao Jose dos Campos Municipality were obtained with the same method.

¹ Instituto Geológico do Estado de São Paulo - Av. Miguel Stéfano, 3.900 – Água Funda – São Paulo – SP, CEP 04301903, Fone (11) 5073-9992, Fax (11) 5077-2219, e-mail: heliodiniz@igeologico.sp.gov.br

² SABESP de São José dos Campos

Palavras-Chave - São José dos Campos; Transmissividade; Teste de Vazão.

HISTÓRIA E DESENVOLVIMENTO DAS PERFURAÇÕES DE POÇOS TUBULARES PROFUNDOS

Os primeiros vestígios da utilização das águas subterrâneas datam de 12.000 A.C. Acredita-se que os chineses foram os primeiros a dominar a técnica de perfurar poços. Os antigos persas construíram túneis e poços para atingirem os aquíferos. Os chineses estavam bastante familiarizados com métodos de perfuração que lhes permitiam obter água do subsolo, e consta que foram os primeiros a usar o método da percussão para a perfuração de poços. Através de um pórtico feito de bambu, sustentavam uma vara com ponteira de ferro e com ajuda de um cinzel batiam para perfurar o poço.

Cerca de 2.100 anos A.C., próximo do fim da 11ª dinastia, um chefe das forças egípcias de Mentuhotep relata a abertura de quatorze poços por um exército de três mil homens.

A perícia revelada na construção do poço de José, no Cairo, o faz um dos mais conhecidos dentre os poços antigos. Escavado em rocha sólida, foi construído em duas partes: uma superior, com cerca de 50 m de profundidade e secção de 5,50 m por 7,30 m, e outra inferior, com cerca de 40 m de profundidade, perfazendo ao todo uma profundidade de 90 m. A água era levantada por meio de caçamba sobre uma corrente sem fim. As do poço inferior eram acionadas por jumentos que se moviam em uma câmara no fundo do poço superior (PUPPI, 1978).

O interesse geral na perfuração de poços, substituindo a escavação, foi despertado no século XII, quando se perfurou com sucesso um poço em Artois, França, em 1126. A palavra “artesiano” deriva do nome dessa localidade.

Os relatos sobre tecnologia para perfuração de poços começaram a ser registrados com mais frequência a partir de 1800, com o surgimento de jornais, revistas, catálogos, etc.

Em 1808, foi perfurado o primeiro poço nos Estados Unidos pelo método de percussão, em Buffalo Lick, Virginia. Um poço iniciado em 1833 e concluído em 1841, em Grenelle, perto de Paris, foi por muitos anos o poço mais profundo do mundo, com 549 m. A sua construção proporcionou muita experiência na sondagem de poços, na perfuração de rochas e na recuperação de ferramentas quebradas.

O êxito alcançado na França prosseguiu com as perfurações profundas na Inglaterra e na Alemanha. Alguns desses poços eram de grandes dimensões e proporcionaram aos geólogos oportunidade de examinarem as rochas em profundidades relativamente grandes.

O precursor da moderna indústria de equipamentos para poços profundos, foi John W. Miller. Em 1855 fundou a Star Drilling Machines Corporation em Akron, Ohio, que tornou-se a pioneira na

construção de equipamentos para perfuração de poços dos Estados Unidos. Este país foi sem dúvida o pioneiro no desenvolvimento de equipamentos modernos para poços. Entre 1884 e 1889, a Star Drilling produziu perfuratrizes móveis, acionada a vapor, considerável avanço para a época. A figura 1 ilustra uma propaganda de um modelo desse equipamento.



Figura 1- Perfuratriz de poços tubulares profundos movida a vapor.

Em 1904, os catálogos da Star Drilling mostravam mais de 20 modelos diferentes de perfuratrizes, com capacidades para atingirem entre 45 a 900 m de profundidade.

Somente em 1912 é que surgiram as primeiras máquinas acionadas a gasolina.

Em 1930, a Star Drilling criou um dos mais modernos equipamentos para perfuração de poços profundos, a conhecida "Speed Star". Era um avanço tecnológico sem paralelo. Curiosamente, durante a construção do Canal do Panamá a Star Drilling alcançou o auge de seu sucesso, com um aumento considerável em sua produção para poder fornecer inicialmente 218 máquinas para perfurar poços secos que depois eram explodidos com dinamite para facilitar os trabalhos de abertura do canal. No final, cerca de 1700 máquinas da Star Drilling estavam trabalhando nas obras do canal.

Em 1941, durante a segunda guerra mundial, surgiram as máquinas rotativas, utilizadas na perfuração de poços profundos para abastecimento de água potável das tropas em litígio.

Em 1989, a GEFCO (George Failing Corporation) adquiriu o acervo das sucessoras da Star Drilling, e se tornou praticamente a maior empresa produtora de equipamentos e ferramentas para poços profundos, no mundo, tendo como linha de frente a Speed Star e as Failing.

No Brasil, até meados da década de 80, boa parte dos equipamentos para poços era importada dos Estados Unidos, da Suécia e da Alemanha. Posteriormente começaram a ser desenvolvidos pela empresas nacionais. Dos Estados Unidos foram importadas as perfuratrizes Speed Star, Failing, Joy e Aquadrill. Da Alemanha, as Wirth.

Os equipamentos usados pela Companhia T. Janer (uma das maiores empresas do país até a década de 80) para perfuração de seus poços, foram quase todos importados da Suécia.

Entre as inúmeras empresas nacionais surgidas na esteira do desenvolvimento das perfurações de poços profundos, podemos citar a Tringil em Santo André/SP, a Wirth Latina e a Prominas Brasil, ambas de São Carlos/SP. No entanto, dentre elas a Prominas Brasil, fundada em 1953, foi a que mais se aparelhou e cresceu tecnicamente. Começou com perfuratrizes a percussão, passou para as máquinas mistas, depois para as rotativas e evoluiu para as roto-pneumáticas, além de desenvolver extenso ferramental para as sondas.

Antes das empresas nacionais iniciarem seu desenvolvimento na construção de equipamentos e ferramental para poços profundos, o que se tinha era verdadeiramente resultado de puro artesanato. As máquinas eram acionadas por motores a gasolina, ou às vezes, elétricos, e seus acionamentos eram feitos através de correias e polias. Boa parte das transmissões eram feitas com peças de tratores ou caminhões e nem sempre eram novas. Na maioria das vezes eram adaptações grosseiras. Isso fazia com que as perfurações, além de imperfeitas, se tornassem demasiadamente demoradas. Poços levavam meses ou até alguns anos para ficarem prontos, para desespero dos perfuradores e dos próprios clientes.

Com o desenvolvimento da indústria petrolífera nacional, através da Petrobrás, as empresas de perfuratrizes e de equipamentos para perfuração tiveram um vertiginoso crescimento e hoje o mercado nacional atende as empresas de poços para captação de água subterrânea com absoluto sucesso. Os poços passaram a ter um padrão de qualidade na sua execução e os tempos foram reduzidos drasticamente, a ponto de levarem poucos dias para ficarem prontos e em condições de operação.

HISTÓRICO DA EVOLUÇÃO DAS PERFURAÇÕES DE POÇOS EM SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

Dentro do acervo de poços tubulares profundos, pertencente ao Instituto Geológico – Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (IG-SMA/ SP), os poços cadastrados no município de São José dos Campos, somam trezentos e sessenta e três, distribuídos em sua maioria dentro da Bacia Sedimentar de Taubaté.

No gráfico da figura 2 são apresentadas as empresas que mais perfuraram poços tubulares profundos, em porcentagem do total, no Município de São José dos Campos.

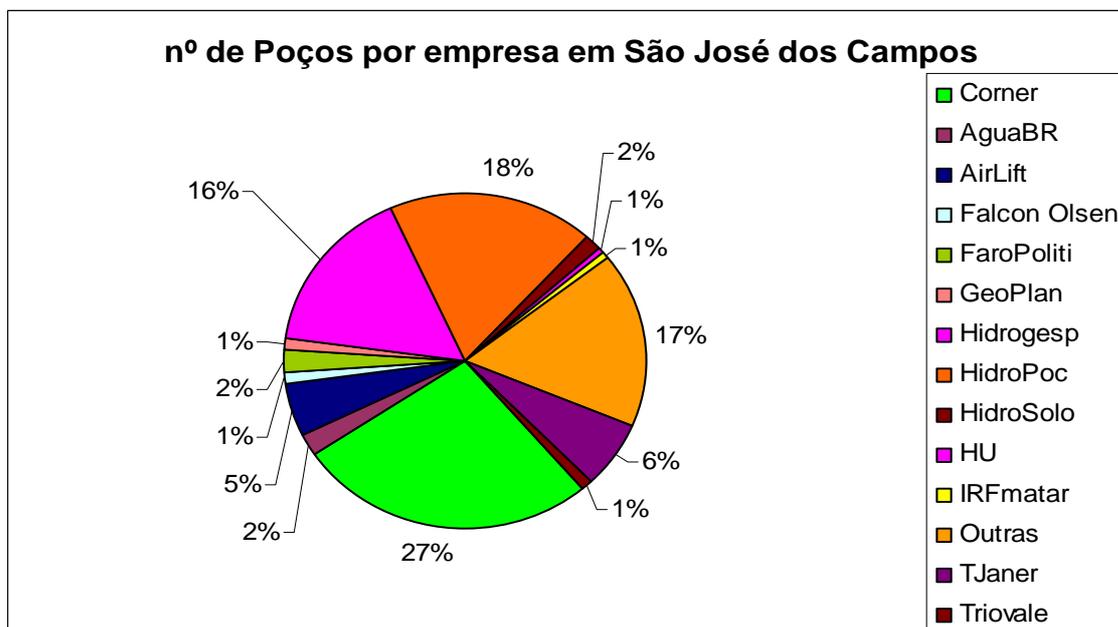


Figura 2 - Distribuição da perfuração de poços no Município de São José dos Campos por empresa perfuradora.

A figura 3 mostra a evolução da quantidade de perfurações de poços tubulares profundos no Município de São José dos Campos. Verifica-se que o início das perfurações ocorreu na década de 1930, com o primeiro poço executado pela Corner S.A., em 1932.

Até durante a década de 1940 os poços eram raros, sendo que, dentre os poços cadastrados, apenas três foram construídos neste período. Na década de 1950, houve um acréscimo significativo na utilização das águas subterrâneas, com a entrada em funcionamento de 18 novos poços. Na década de 1960 prosseguiu o aumento do número de poços, sendo que 33 novos poços entraram em operação. Na década de 1970 foi registrado o auge da perfuração de poços, com 124 novos poços entrando em funcionamento.

Os poços continuaram a ser perfurados na década de 1980, sendo que 64 novos poços foram escavados nesta época, quantidade inferior à década anterior. Na década de 1990 continuou o decréscimo na taxa de crescimento do número de poços, com 52 novos poços perfurados.

Sessenta e oito poços, cerca de 18% do total cadastrado, não tinham registro do ano em que foram perfurados, ficando clara a má documentação destes poços.

Da mesma forma, não foi possível cadastrar nenhum poço construído entre o período 2000 até 2004. Isto se deve ao fato que os poços registrados pelas empresas perfuradoras, que recebem autorga para perfuração e posterior licença de funcionamento pelo Departamento de Água e Energia Elétrica – DAEE, do Estado de São Paulo, levam algum tempo para terem os dados disponibilizados para consulta para o público interessado. Outra razão é que, atualmente, está em vigor a cobrança pelo uso da água na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul e, parte dos usuários das águas subterrâneas omitem os dados e não registram os poços, para evitarem futuras cobranças. Embora esta atitude fraudulenta seja sujeita a penalidades pela legislação vigente, torna o trabalho do pesquisador extremamente difícil, pois grande parte dos dados dos poços é obtida durante a perfuração e são relatados no relatório final do poço, entregue pela empresas perfuradoras aos clientes.

Verifica-se que, a empresa pioneira nas perfurações foi a Corner S.A Poços Artesianos, situada em São Paulo, Capital (figura 3). A empresa, fundada por um italiano, na década de 1920, possuía sondas importadas da Suécia. No início das perfurações os filtros eram de porcelana e importados da Inglaterra.

Esta empresa mostrou um grande incremento nas atividades de obtenção de água subterrânea, até o final da década de 1980, quando entrou em declínio. O seu apogeu ocorreu durante a década de 1970.

A empresa Hidropoços Ltda., de São José dos Campos, seguiu os passos da Corner S.A. e foi responsável por grande quantidade de poços perfurados, desde o seu início, na década de 1950 e com apogeu na década de 1970, vindo a encerrar suas atividades no início da década de 1980. Esta empresa utilizava sondas nacionais rotativas a aço granulado, com baixo rendimento e com torres de perfuração muitas vezes construídas em madeira, ou então, em perfis de aço em L. O seu acervo técnico e equipamentos foram adquiridos pela Hidrogesp S.A., sua sucessora na perfuração de poços em São José dos Campos.

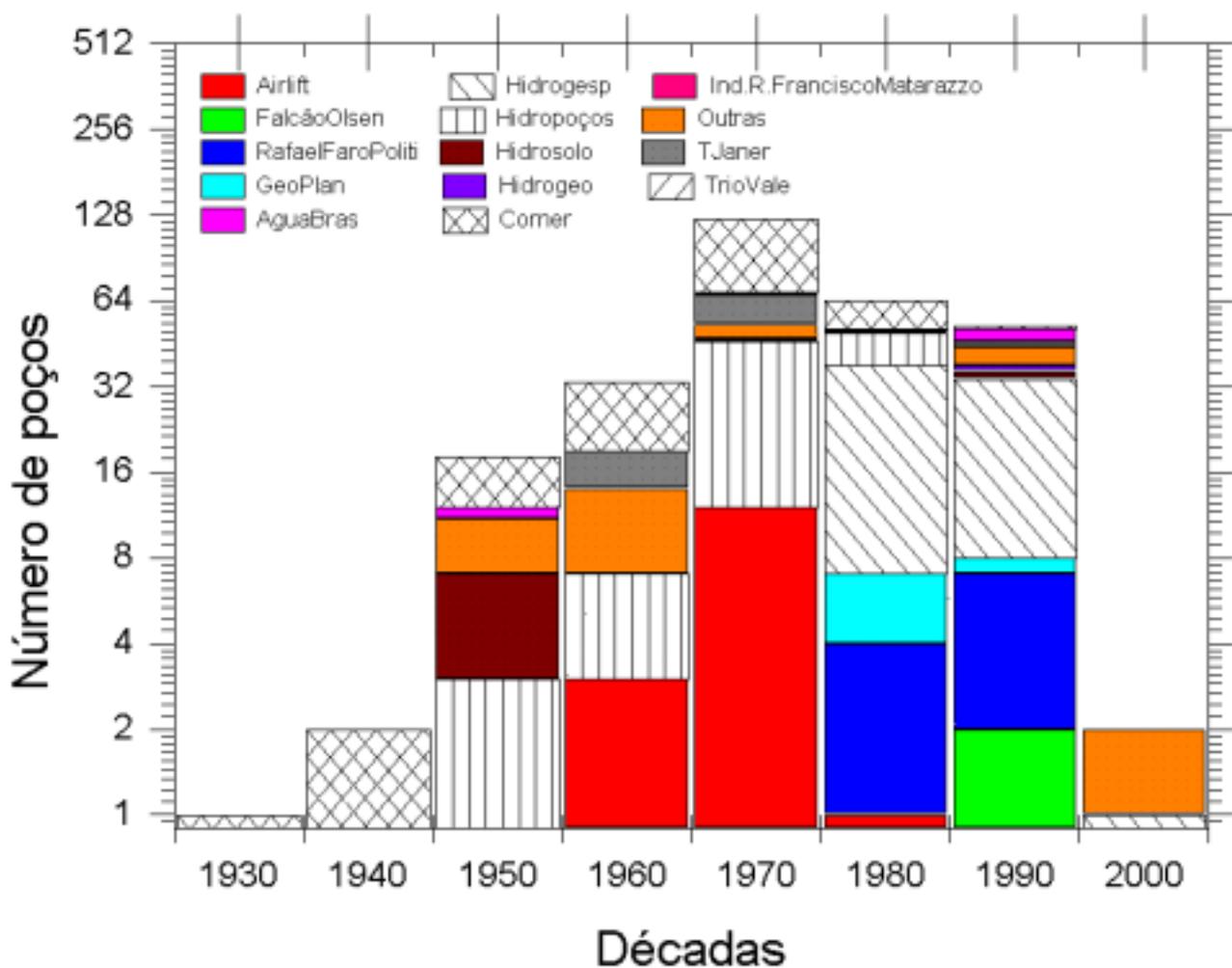


Figura 3- Distribuição da perfuração de poços, por ano e por empresa, no Município de São José dos Campos.

A T.Janer e a Airlift, ambas de São Paulo, Capital, foram contemporâneas na perfuração de poços no Município de São José dos Campos e encerraram suas atividades no final da década de 1970. Todo o acervo técnico de dados dos poços da T.Janer atualmente pertence a Hidropar S.A., sucessora da Hidrogesp S.A.

A empresa Geoplan, de Sorocaba, e as empresas Águabras, Falcão Holsen e Rafael Faro Politi, da Capital de São Paulo, tiveram participação modesta na perfuração de poços no Município de São José dos Campos, sendo que as duas últimas empresas encerram suas atividades em meados da década de 1990. O acervo de dados de poços da Falcão Holsen atualmente também pertence a Hidropar S.A.

HIDRODINÂMICA DOS AQUÍFEROS NO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

Parâmetros Hidrodinâmicos dos Aquíferos

Os parâmetros hidrodinâmicos que caracterizam os aquíferos quanto às propriedades físicas de velocidade de escoamento e quantidade de água armazenada são: a Condutividade Hidráulica, a Transmissividade e o Coeficiente de Armazenamento. Os parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos são calculados quando se dispõem de ensaios de bombeamento ou testes de vazão em poços.

Logo após o término da construção dos poços, as empresas de perfuração realizam testes de vazão para fins de dimensionar o equipamento de extração de água. Nestes testes de vazão são 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.

A partir da interpretação dos dados dos testes de vazão, pode-se calcular: a Capacidade Específica do Poço, Transmissividade, Condutividade Hidráulica, Coeficiente de Armazenamento do aquífero no local do poço e a vazão ótima de exploração.

A Transmissividade 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, quando não se dispõe de um poço de observação, ao contrário do que ocorre quando se utiliza este método para obter-se o Coeficiente de Armazenamento. Sob esta condição, o ponto de observação é considerado como sendo as paredes do poço. Assim sendo, a distância do poço onde a água está sendo extraída até o ponto de observação é tomado como sendo o raio do poço.

O Coeficiente de Armazenamento de uma camada aquífera é caracterizado pelo volume de água desprendido ou armazenado como resultado de uma mudança de pressão unitária ou mudança de uma unidade do potencial hidráulico (KOVÁCS, 1981).

A totalidade dos poços construídos em sedimentos apresenta 4 tipos de comportamento distintos frente aos rebaixamentos observados durante os testes de vazão e que definem o tipo do aquífero em que captam água. Frente a estes 4 tipos de comportamentos os aquíferos considerados podem ser: livres, confinados, semi-livres e semi-confinados.

Os aquíferos constituídos por sistemas fissurados (típicos de rochas cristalinas), em geral anisotrópicos, também podem ser descritos segundo os tipos e modelos descritos acima, embora os testes de vazão em poços construídos neste sistema apresentem diferenças no que se refere às curvas de rebaixamento e recuperação, o que leva a uma interpretação diferenciada.

Uma vez determinados os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero, usando os métodos apropriados, pode-se calcular o equipamento de extração de água do poço empregando-se as tabelas fornecidas pelos fabricantes. Essas tabelas geralmente contêm gráficos com correspondentes alturas

manométricas, vazões de exploração e rendimento do equipamento, para cada modelo disponível. Desta forma, a finalidade do teste de vazão é a mesma da construção do poço, ou seja é de ordem econômica e visa o dimensionamento do equipamento para a extração de água do poço.

Apesar deste fato, os hidrogeólogos de empresas de perfuração podem realizar de forma adequada os testes de vazão e a sua interpretação correta permite a estimativa dos parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos. O conhecimento desses parâmetros permite prever o comportamento hidráulico do poço frente a qualquer regime de extração e, possibilitará prever a dos que venham a ser perfurados futuramente nas vizinhanças.

Rebaixamento do Nível d'água em um Poço Inteiramente Penetrante em um Aquífero Confinado (ou Livre) – Método da Superposição de Theis

A aplicação do método da superposição de Theis é mostrado nas figura 4 e 5. Os dados foram interpretados utilizando os softwares EXCEL, da Microsoft, e ORIGIN 5.0, da Microcal, conforme descrito por DINIZ & MICHALUATE (2002).

Os testes de vazão efetuados pelas empresas de perfuração responsáveis pela construção dos poços tubulares profundos, e que foram cadastrados nesta pesquisa, foram interpretados utilizando o software Microcal Origin conforme descrito por DINIZ & MICHALUATE (2002).

De todo o arquivo de poços de São José dos Campos, ao todo 363, 55 foram utilizados na pesquisa pois que possuíam dados dos testes de vazão. Dos que foram interpretados a partir dos modelos das funções de THEIS (1935), para poços perfurados em aquíferos confinados e livres, são mostrados dois exemplos, a seguir.

No primeiro exemplo, o ponto do gráfico bi-logarítmico (figura 4) contendo à curva padrão $W(u) \times 1/u$ com coordenadas (1; 1.000) tem como correspondência o ponto da curva de dados $s \times t$ com coordenadas (4,37; 6,12).

Utilizando a equação de Theis:

$$h_0 - h = s = Q \cdot W(u) / 4\pi \cdot T$$

teremos:

$$4,37 \text{ m} = 26,7 \text{ m}^3/\text{h} \cdot (1) / 4\pi \cdot T \Rightarrow T = 0,49 \text{ m}^2/\text{h}$$

O argumento u , para o cálculo do Coeficiente de Armazenamento, é dado por:

$$u = r^2 \cdot S / 4T \cdot t \text{ (Theis, 1935)}$$

onde, substituindo u por 1/1000, r^2 por 0,07 m e $t = 0,102$ h, temos: $S = 2,73 \cdot 10^{-3}$

No segundo exemplo, o ponto do gráfico bi-logarítmico (figura 5) contendo à curva padrão $W(u) \times 1/u$ com coordenadas (10; 10.000) tem como correspondência o ponto da curva de dados $s \times t$ com coordenadas (4,75; 1,55).

$$h_0 - h = s = Q.W(u)/4\pi.T$$

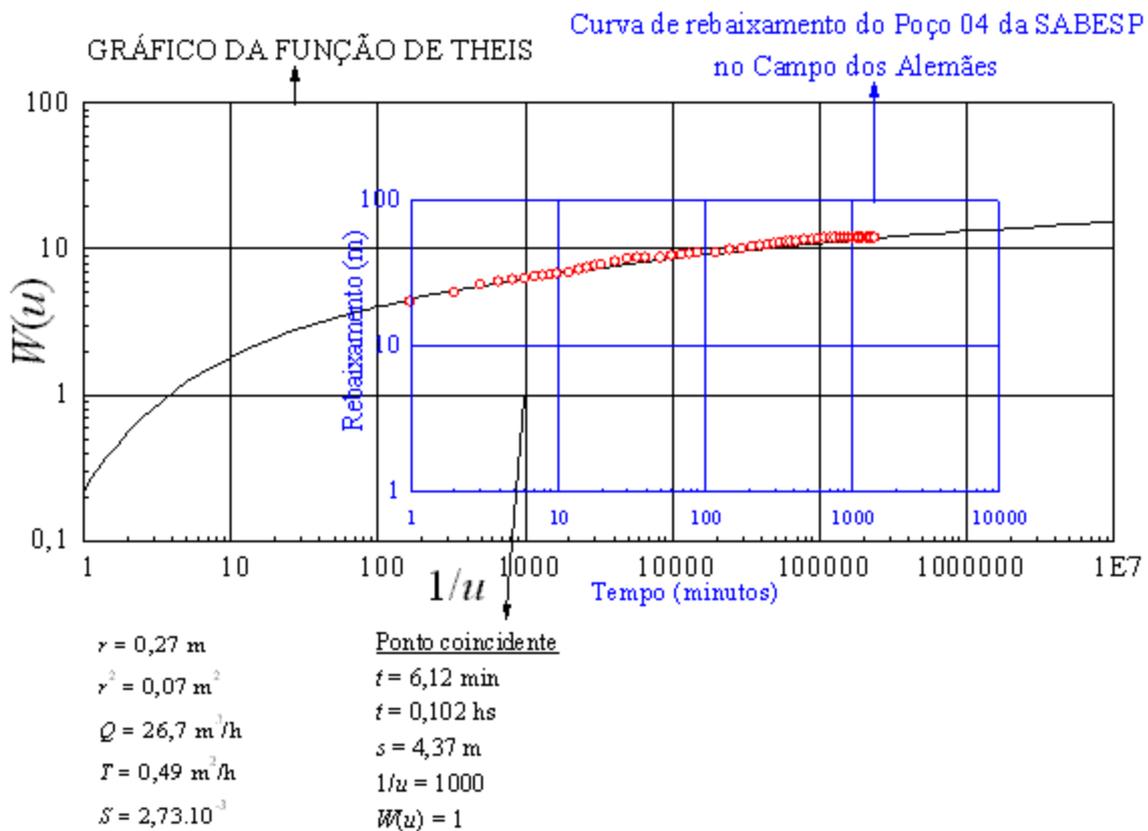


Figura 4 - Utilização do método da superposição de Theis para cálculo dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero sedimentar da Formação Caçapava, no local do Poço n° 4 da SABESP no Campo dos Alemães em São José dos Campos.

teremos:

$$4,75 \text{ m} = 37,71 \text{ m}^3/\text{h} \cdot (1) / 4\pi.T \Rightarrow T = 6,318 \text{ m}^2/\text{h}$$

Substituindo, na fórmula para o cálculo do Coeficiente de Armazenamento, o argumento u por $1/10000$, r^2 por $0,18 \text{ m}^2$ e $t = 0,025 \text{ h}$, obtemos: $S = 3,42 \cdot 10^{-4}$.

CURVA DE REBAIXAMENTO DO POÇO 306154
EM SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

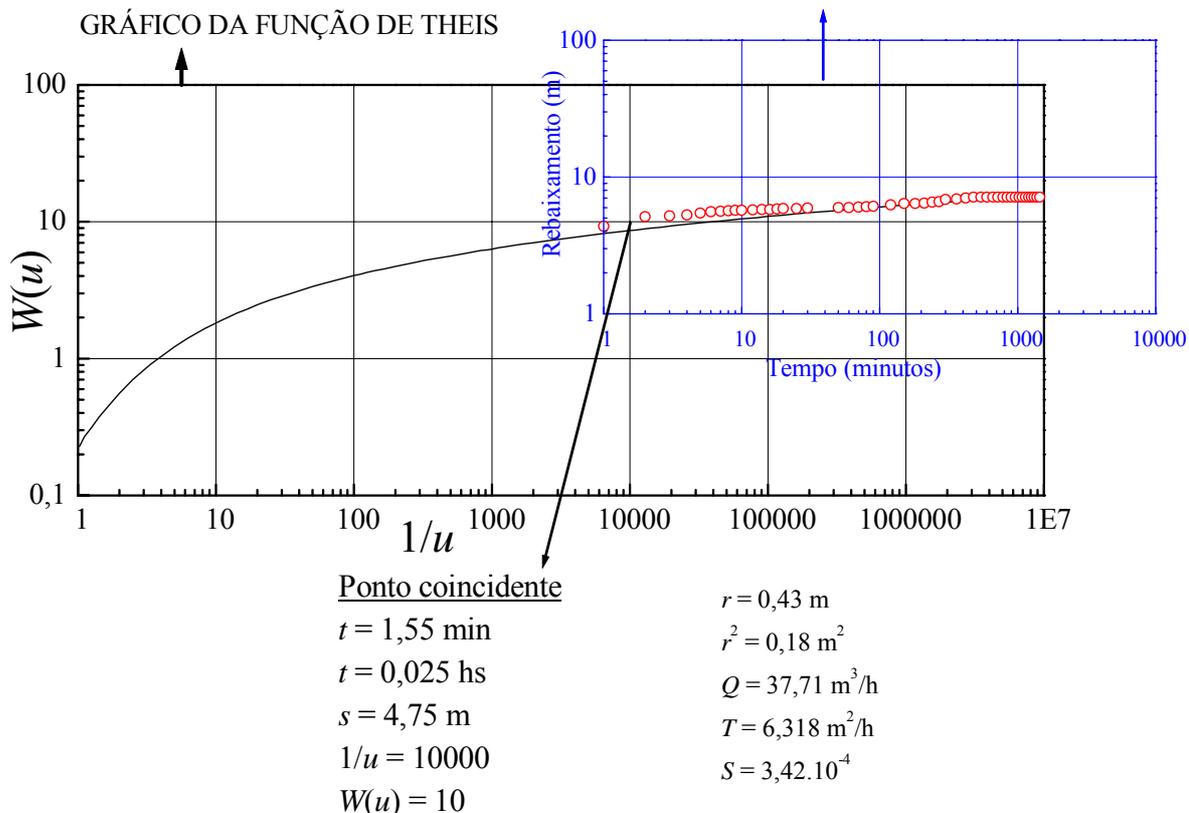


Figura 5 - Utilização do método da superposição de Theis para cálculo dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero sedimentar da Formação Caçapava, no local do Poço nº 306154, do cadastro do DAEE de São José dos Campos.

A interpretação dos parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos a partir unicamente do modelo que Theis desenvolveu para aquíferos confinados pode trazer erros que vão produzir, como consequência, cálculos subdimensionados ou superdimensionados dos equipamentos de extração de água dos poços. Isto poderá acarretar a diminuição da vida útil dos mesmos. Outros modelos, como os de Hantush e Neuman devem ser considerados.

A função de Hantush para Cálculo dos Parâmetros Hidrodinâmicos dos Aquíferos Semiconfinados

Para poços que captam água de aquíferos situados sob um aquífero, HANTUSH (1956) desenvolveu um método onde é possível calcular o rebaixamento para qualquer vazão passível de ser extraída.

Este tipo de aquífero, semi-confinado, é relativamente comum no sudeste brasileiro, e ocorre com muita frequência nas camadas sedimentares da Formação Caçapava, em São José dos Campos.

Devido à constante recarga proporcionada pelo aquífero ao aquífero, o nível d'água em um poço se estabiliza quando este escoamento se iguala à vazão extraída.

O parâmetro que determina o escoamento do aquífero para o aquífero é conhecido como fator de gotejamento (r/B). Este fator relaciona a Condutividade Hidráulica do Aquífero (K'), a espessura do aquífero (b') e a Transmissividade do Aquífero (T), e pode ser calculado pela expressão: $B^2 = T/(K'/b')$.

A família de curvas de Hantush possibilitam o cálculo dos parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos semi-confinados, sem armazenamento importante no aquífero, através do método da superposição (semelhante ao método da superposição de Theis), comparando-a com os dados de rebaixamento \times tempo obtidos em testes de vazão.

A utilização do método de HANTUSH (1956), para poços perfurados em aquíferos semi-confinados é exemplificado nas figuras 6 e 7.

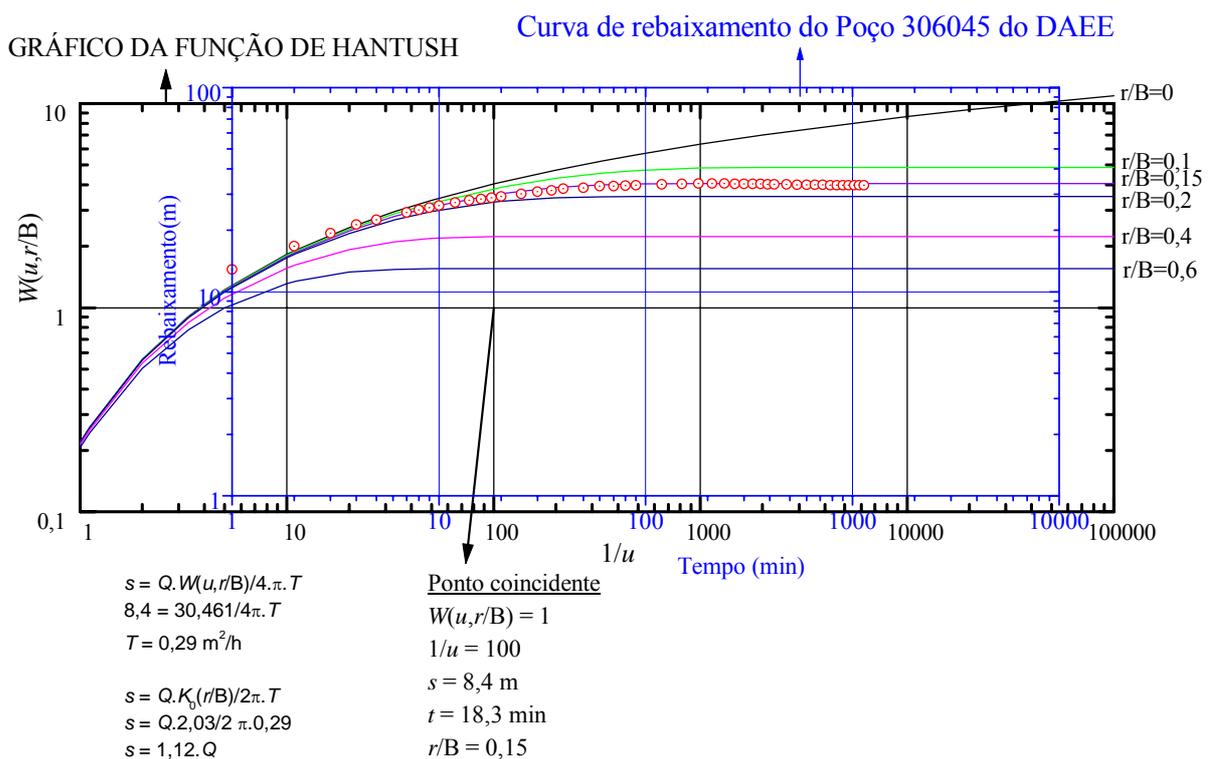


Figura 6 - Utilização do método da superposição de Hantush para cálculo dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero sedimentar da Formação Caçapava, no local do Poço nº 306045, do cadastro do DAEE de São José dos Campos.

Utilizando-se o método da superposição das curvas de rebaixamento dos poços, $s \times t$, com os gráficos das curvas padrões de Hantush, determinou-se um ponto coincidente que permitiu o cálculo da Transmissividade.

Assim, no local do Poço 306045 (os três primeiros algarismos indicam o número da Folha Topográfica, do IBGE, utilizada para o cadastramento, e os três últimos algarismos indicam o número do poço, na Folha Topográfica) do cadastro de poços do DAEE, foi encontrado o valor de $0,29 \text{ m}^2/\text{h}$ para a Transmissividade do Aquífero Caçapava, em São José dos Campos (figura 6). No local do Poço 306099, do cadastro do DAEE (figura 7), foi encontrado o valor de $0,40 \text{ m}^2/\text{h}$ para a Transmissividade.

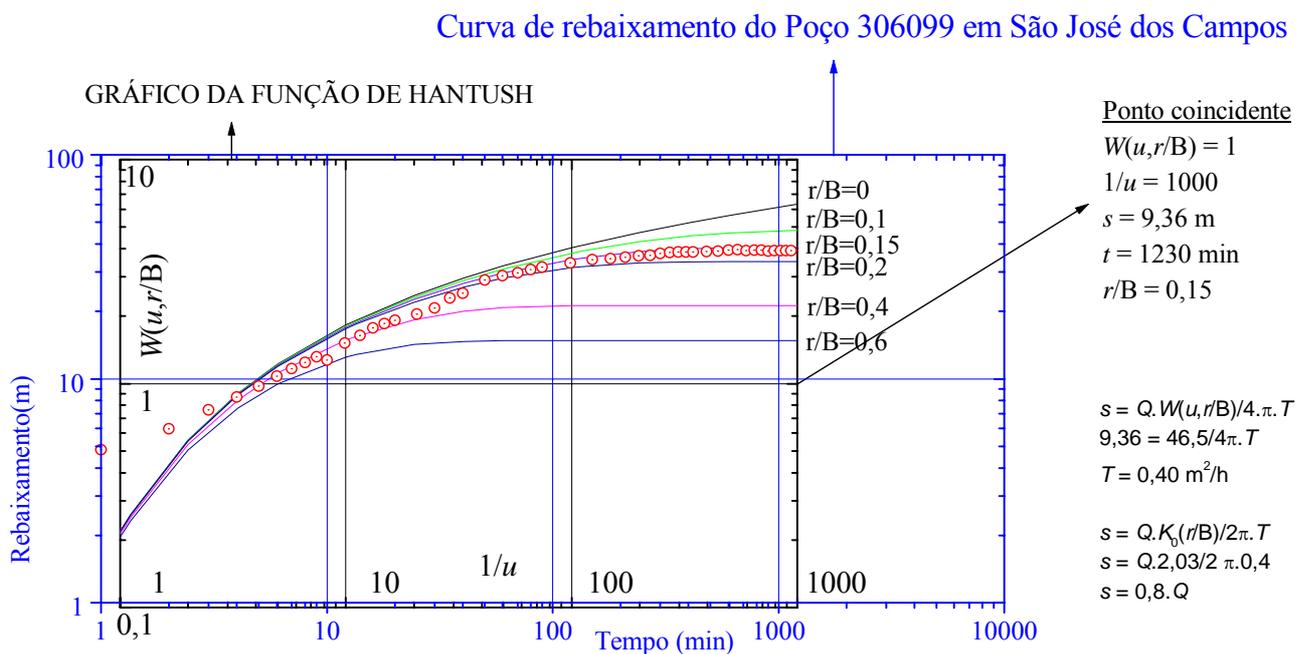


Figura 7 - Utilização do método da superposição de Hantush para cálculo dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero sedimentar da Formação Caçapava, no local do Poço nº 306099, do cadastro do DAEE de São José dos Campos.

Rebaixamento em Poços Perfurados em Aquíferos Semi-livres

Para poços inteiramente penetrantes em aquíferos semi-livres, isto é, aquíferos que produzem um retardamento da função rebaixamento x tempo devido à contribuição da água armazenada na camada aquífera freática, superior, a função $s \times t$ é complexa. Nesta função são considerados os parâmetros hidrodinâmicos da camada aquífera freática superimposta à camada aquífera principal.

NEUMAN (1965), para poços perfurados em aquíferos semi-livres desenvolveu curvas-padrão que mostram a resposta de aquíferos semi-livres ao bombeamento em poços.

Dois conjuntos de curvas-padrão são usados. O conjunto com padrão A é bom para os dados do início até o meio do rebaixamento e o conjunto com padrão B é usado para os dados medianos

até o final do rebaixamento (BEAR, 1979). Os valores da função $W(u_A, u_B, \Gamma) \times u_A$ e u_B foram calculados por NEUMAN (1972). Dois exemplos da interpretação de dados de teste de vazão, em poços que captam água neste tipo de aquífero são mostrados nas figuras 8 e 9.

Curva da função $W(u_A, u_B, \Gamma)$ para o fluxo do poço da SABESP, São José dos Campos, perfurando sedimentos que formam aquífero semi-livre.

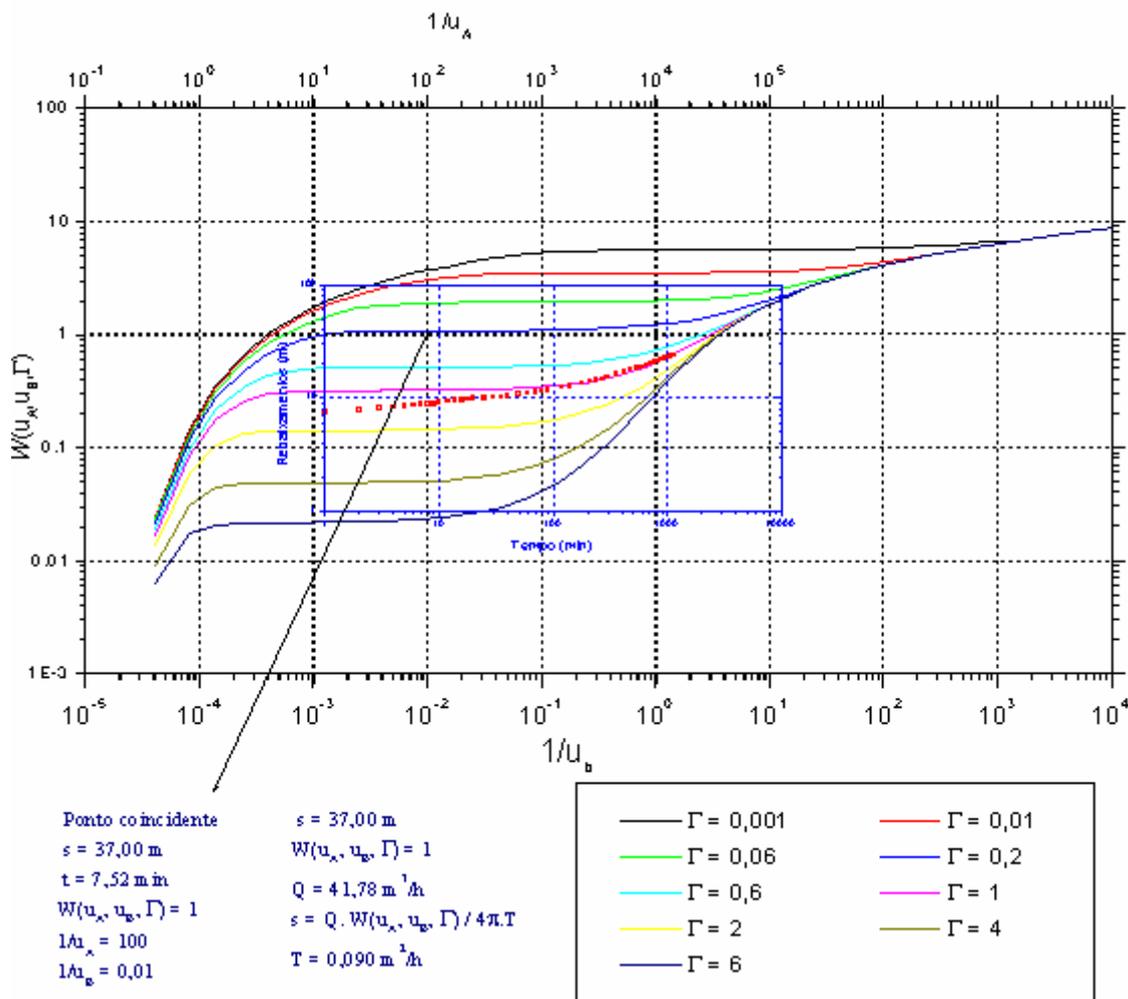


Figura 8 - Determinação da Transmissividade do aquífero sedimentar da Bacia de Taubaté, em São José dos Campos, no local do poço 306149 do cadastro do DAEE, através da superposição da curva de rebaixamento deste poço à curva da função $W(u_A, u_B, \Gamma)$, mostrando que os sedimentos constituem um aquífero semi-livre.

INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DOS TESTES DE VAZÃO

Tipos de Aquíferos

Em 55 dos 363 poços cadastrados para a realização desta pesquisa (tabela 1), no Município de São José dos Campos, foram obtidos dados sobre testes de vazão.

Estes testes de vazão foram devidamente interpretados utilizando o software ORIGIN, como descrito no item anterior, e obteve-se, em 6 poços, características de terem sido construídos em aquífero livre (determinado pela equação de Theis, com Coeficiente de Armazenamento maior que 0,001 e o nível d'água do aquífero encontrado sob pressão atmosférica), em 8 poços foi encontrado comportamento de aquífero confinado (determinado pela equação de Theis, com Coeficiente de Armazenamento menor que 0,001 e o nível d'água do aquífero encontrado sob pressão), em 29 dos poços, comportamento de aquífero semi-confinado (determinado pela equação de Hantush, e com rebaixamento estabilizado após decorrido algum tempo de bombeamento) e, em 10 dos poços, de aquífero semi-livre (determinado pela equação de Neuman, com rebaixamento inicial, estabilização de nível e após algum tempo de bombeamento, novo rebaixamento).

Curva da função $W(u_A, u_B, \Gamma)$ para o fluxo do poço 306119 em São José dos Campos.

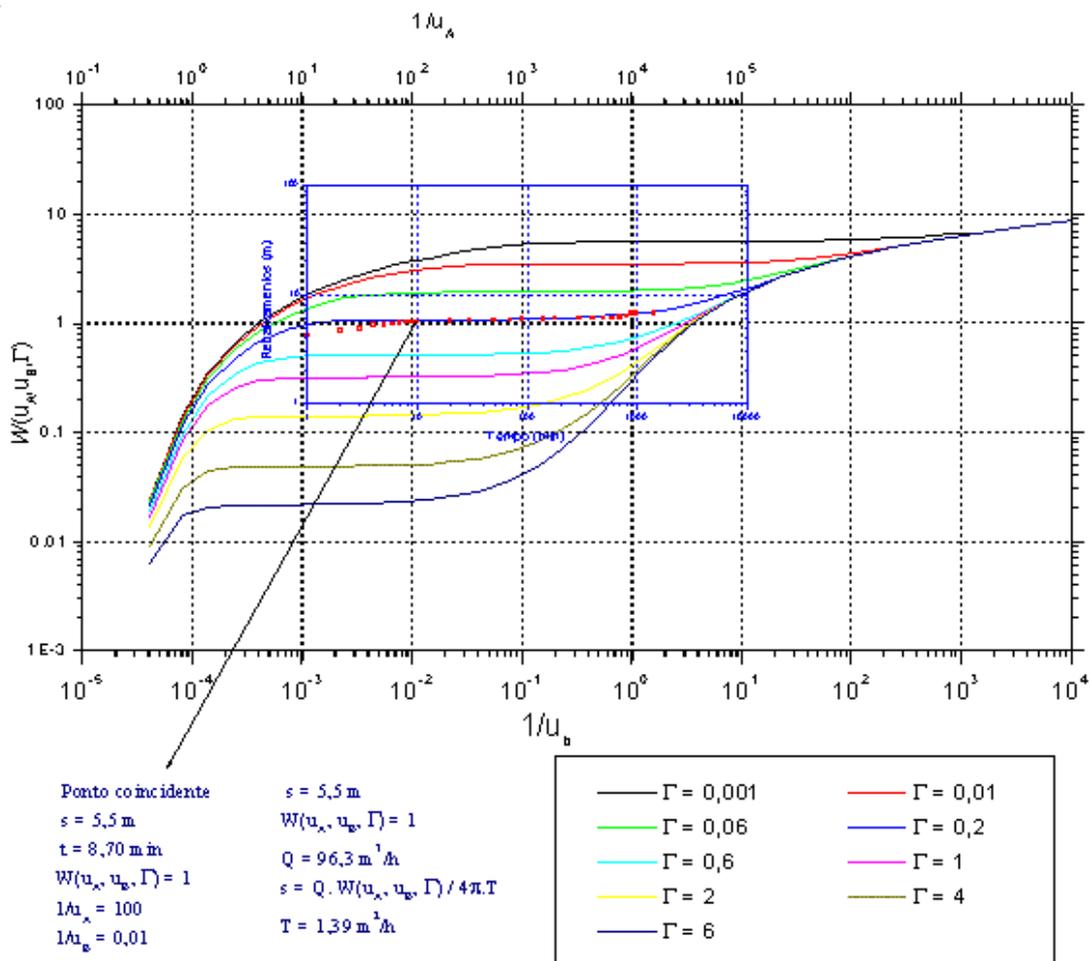


Figura 9 - Determinação da transmissividade do aquífero sedimentar da Bacia de Taubaté, em São José dos Campos, no local do poço 306119 do cadastro do DAEE, através da superposição da curva de rebaixamento deste poço à curva da função $W(u_A, u_B, \Gamma)$, mostrando que os sedimentos constituem um aquífero semi-livre.

A multiplicidade de tipos de aquíferos determinados nos testes de vazão realizados nos poços de São José dos Campos (figura 10), muitas vezes de poços construídos próximos, é típico de aquíferos multicamadas, com variações de tipos litológicos que formam aquíferos, aquíferos e aquíferos, tais como: arenitos, conglomerados, siltitos e argilitos. São depósitos sedimentados em bacias tafrogênicas fechadas, com predominância de ambiente deposicional fluvial, anostomosado e meandrante, planícies de inundação e leques aluviais.

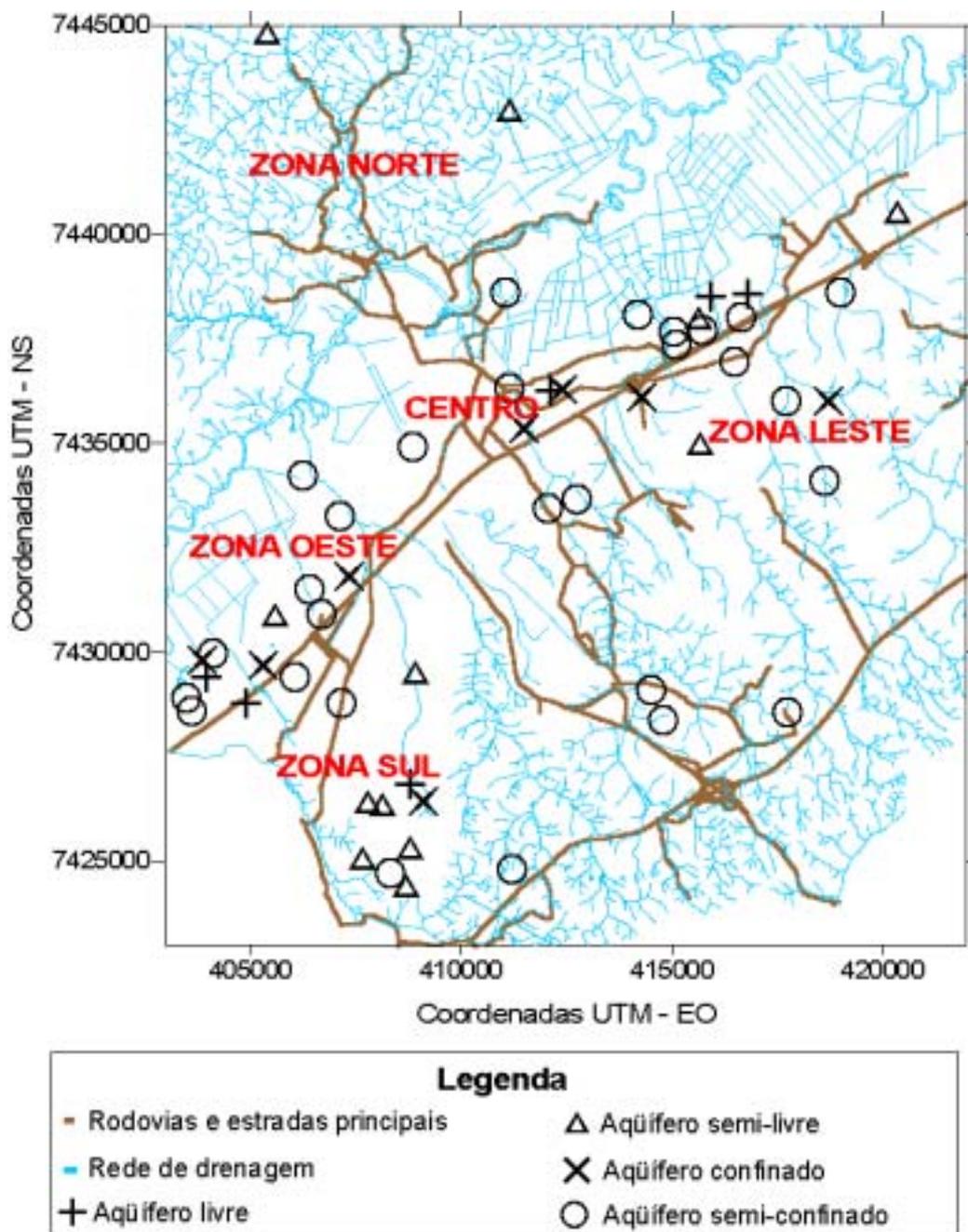


Figura 10 - Distribuição dos tipos de aquíferos no Município de São José dos Campos.

Os locais onde foram determinados aquíferos do tipo livre, indicam a presença de camadas permeáveis, com predominância de arenitos e conglomerados, em toda a secção vertical do depósito

sedimentar. Isto ocorre, na Bacia Sedimentar de Taubaté, no Município de São José dos Campos, ao longo da rodovia Presidente Dutra, que corta a bacia no seu eixo mediano.

Os locais onde foram determinados aquíferos do tipo confinado, estão situados nas imediações dos locais anteriores, e indicam variações litológicas laterais, com a presença de camadas argilosas, impermeáveis, sobre o aquífero constituído por arenitos e conglomerados.

Os aquíferos do tipo semi-confinado são predominantes e estão distribuídos por toda a bacia sedimentar e também, pelas rochas cristalinas. Na bacia sedimentar indicam camadas semi-permeáveis, argilitos arenosos e siltosos, sobrepostas às camadas permeáveis do aquífero principal. Nas rochas cristalinas, indicam fraturas principais recebendo recarga de sistema de fraturas secundárias, superimpostas às principais.

Os aquíferos do tipo semi-livre indicam camadas menos permeáveis sobrepostas a camadas mais permeáveis, ou seja, arenitos finos, arenitos silticos ou argilosos sobre arenitos e conglomerados. Indicam, também, contribuição do aquífero freático, livre, na vazão final dos testes realizados nos poços em que os aquíferos semi-livres foram determinados. Sua distribuição principal está nas zonas sul e norte do Município de São José dos Campos, principalmente nas áreas com as maiores elevações altimétricas.

Distribuição do Coeficiente de Armazenamento

Os resultados dos Coeficientes de Armazenamentos encontrados nos poços perfurados em aquíferos livres e confinados na Bacia Sedimentar de Taubaté, no Município de São José dos Campos são mostrados na figura 11.

Como os valores de $S < 0,001$ indicam que o aquífero é livre, sob pressão atmosférica, a secção sedimentar é predominantemente arenosa, porosa e permeáveis, desde a superfície, sendo portanto, uma área favorável à recarga.

No mapa da figura 11 é mostrado que as áreas favoráveis à recarga dos aquíferos da Formação Caçapava estão situadas na parte sudoeste, norte e leste da cidade de São José dos Campos, compreendendo os seguintes bairros: Palmeiras de São José, Jardim Petrópolis, 31 de março, Vale do Sol, Rio Comprido, Chácaras Reunidas e Campo dos Alemães, na parte sudoeste; Jardim Boa Vista, Vila Paiva e Santana, na parte norte; Jardim Valparaíso, Jardim Motorama, Jardim Pararangaba, Jardim Santa Inês II, Jardim das Flores, Coqueiro e Eugênio de Melo, na parte leste.

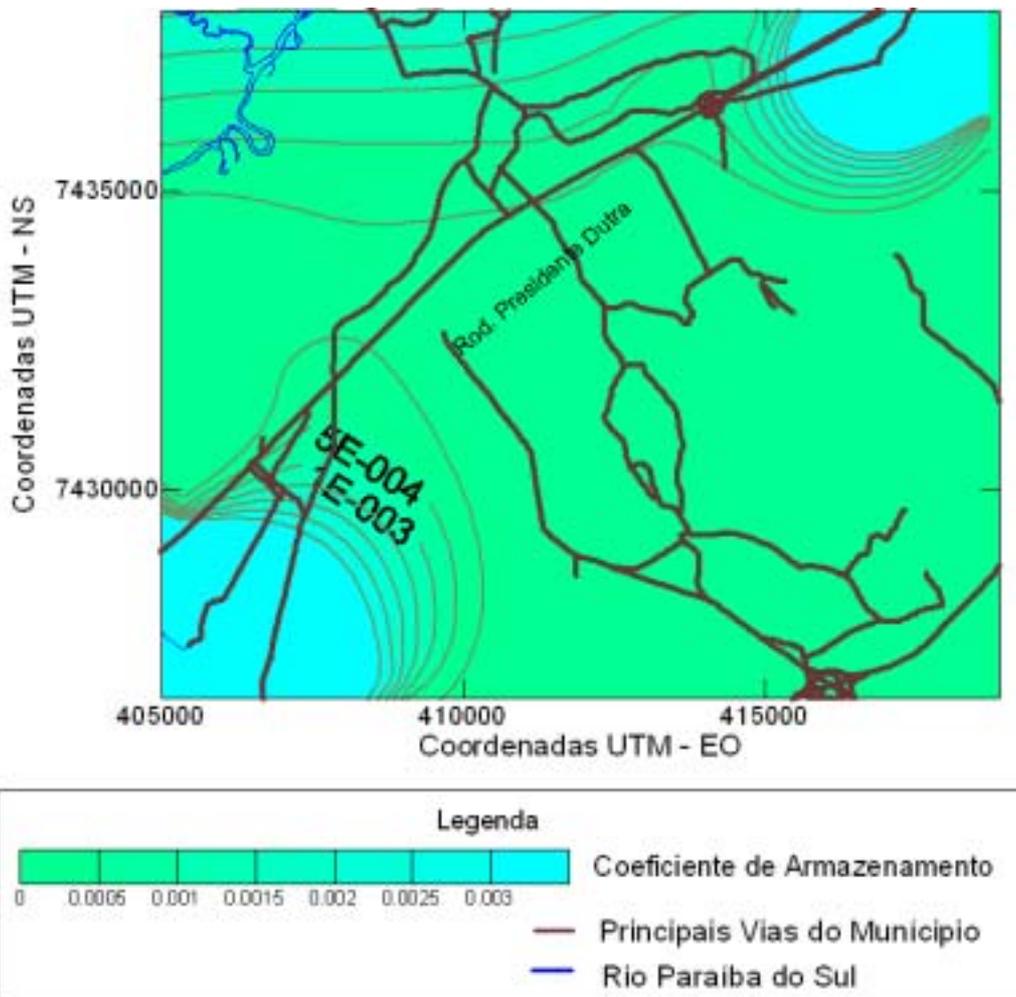


Figura 11 - Mapa de distribuição do Coeficiente de Armazenamento dos aquíferos do Município de São José dos Campos.

Distribuição da Transmissividade

Na figura 12 é mostrado o mapa da distribuição da Transmissividade (em m^2/h), do aquífero Caçapava, no Município de São José dos Campos.

Verifica-se que nas bordas da Bacia Sedimentar de Taubaté os valores da Transmissividade variam em torno de $1 m^2/h$. Estes valores, relativamente baixos para o aquífero Caçapava, são devidos a um perfil geológico vertical contendo camadas arenosas e freqüentes intercalações de camadas argilosas. Indicam, também, relativa pequena espessura das camadas arenosas. O ambiente sedimentar que formou este tipo de seqüência era provavelmente formado por planícies de inundação de rios anastomosados e/ou meandrantas, pantanosas e contendo lagoas.

Em direção ao centro de massa da bacia sedimentar (não coincidente com o centro geométrico, pois a bacia é basculada na direção noroeste-nordeste) os valores de Transmissividade aumentam bruscamente, atingindo valores de 3, 5, 7 até $9 m^2/h$. São valores extremamente elevados (há poços fornecendo vazões de até $250 m^3/h$), e indicam a predominância de camadas arenosas e conglomeráticas, com poucas camadas argilo-siltosas, na secção sedimentar. O ambiente sedimentar

que formou este tipo de seqüência era constituído por rios anastomosados com deposição freqüente de barras arenosas e canais preenchidos por sedimentos arenosos e conglomeráticos.

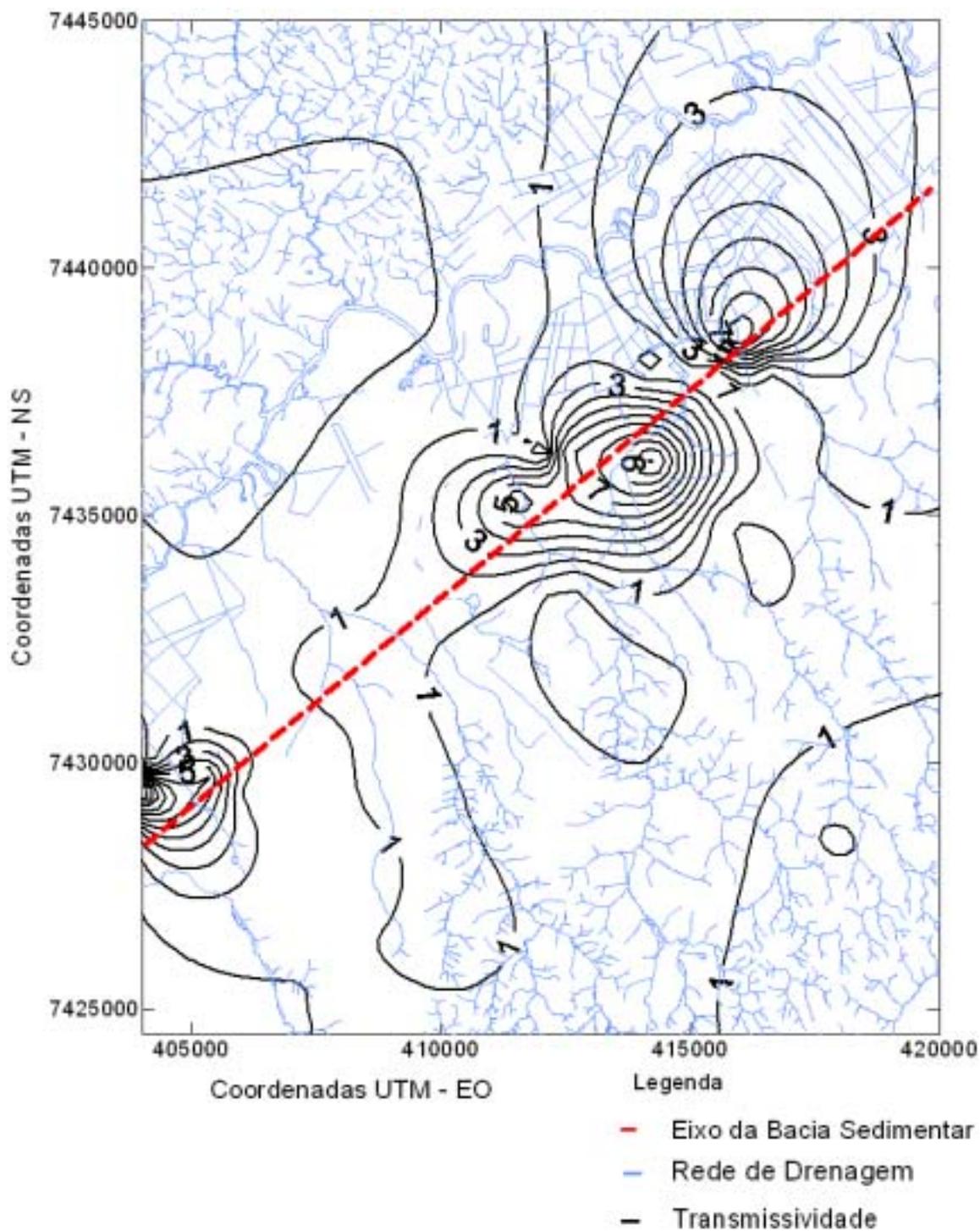


Figura 12 - Mapa de distribuição da Transmissividade dos aquíferos do Município de São José dos Campos.

CONCLUSÕES

A evolução da perfuração de poços tubulares profundos no Município de São José dos Campos mostram o sucesso na obtenção de água subterrânea de boa qualidade e em grande quantidade, em uma área de bacia sedimentar com relevo relativamente plano e favorável à ocupação antrópica. Uma área com suficiente excedente hídrico proveniente das precipitações e extensas áreas de recarga, onde as infiltrações são favorecidas pela presença (até profundidades superiores a 200 m) de camadas porosas e permeáveis, contendo sedimentos grossos, arenosos e conglomeráticos.

A separação dos poços perfurados por empresa perfuradora mostram o crescimento, apogeu e decadência destas empresas.

A interpretação adequada dos testes de vazão realizados nos poços mostram os tipos de aquíferos predominantes na bacia sedimentar e também, no aquífero cristalino. Mostram as áreas de recarga principais, evidenciadas pelos valores de Coeficiente de Armazenamento ou, onde há contribuição do aquífero freático nas vazões dos poços. Os valores de Transmissividade obtidos mostram os locais onde as perfurações foram mais eficientes e os locais possíveis para executar novas perfurações bem sucedidas.

De qualquer forma, os dados avaliados, mostram que o Município de São José dos Campos possui água subterrânea suficiente para o abastecimento atual e com grande excedente para as demandas futuras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO pelo financiamento da pesquisa executada, através do Projeto de Pesquisa referente ao processo FAPESP nº 2003/06507-8.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BEAR, J. 1979. *Hydraulics of groundwater*. Mc Graw-Hill Inc., Mc Graw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, Jerusalem, 567 p.
- [2] DINIZ, H. N. ; MICHALUATE, W. J. 2002. Interpretação de testes de vazão em poços tubulares profundos – dimensionamento e especificações de bombas submersas. *Boletim do Instituto Geológico*, São Paulo, n.16, 91p.
- [3] HANTUSH, M.S. 1956. Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers. *American Geophysical Union Transaction*, Washington, 37:702-714.

- [4] KOVÁCS, G. 1981. Seepage hydraulics. Elsevier Scientific Publishing Company, Developments in water science, 10 (Translation of A szivárgás hidraulikája), Budapest, 730 p.
- [5] NEUMAN, S.P. 1972. Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table. *Water Resources Research*, Washington, 8: 1031-1045.
- [6] PUPPI, I.C. 1978. Água Subterrânea e Poços Tubulares. CETESB, Tradução da primeira edição de “Groundwater and Wells”, São Paulo, 482 p.
- [7] 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*, Washigton, Part II, p.519-524.

Tabela 1. Poços cadastrados no Município de São José dos Campos, e que possuem dados de testes de vazão.

Nº do Poço	Proprietário	nº poço local	Bairro	Coordena-da NS	Coordena-da EW	Transmis-sividade	Coefficiente Ar-mazenamento	Tipo de Aquífero *
306alep2	SABESP	2	Campo dos Alemães	7426430	409120	2,08	0,0001280	4
306alep4	SABESP	4	Campo dos Alemães	7426830	408780	0,49	0,002730	1
306alep6	SABESP	6	Campo dos Alemães	7426280	408120	0,02	–	3
306alep7	SABESP	7	Campo dos Alemães	7426350	407800	0,08	–	3
306007	Ass. Prop. Chácara Bonsucesso	1	Bairro Pau da Saia	7431800	407350	1,46	0,000339	4
306011	Johnson Clube do Brasil	1	Chácaras Reunidas	7428770	404900	4,95	0,014700	1
306038	Soc. Ben. Bras. N. S. Fátima	1	–	7442900	411150	0,26	–	3
306040	Panasonic do Brasil	1	Jd. Industrial	7430900	406700	0,30	–	2
306045	SABESP	85	Jd. das Indústrias	7430800	405600	0,29	–	3
306046	SABESP	12	Jd. das Indústrias	7431500	406400	0,14	–	2
306053	SABESP	84	Putim Nosso Teto II	7428550	417750	2,12	–	2
306072	SABESP	107	Jd. das Colinas	7433260	407120	0,61	–	2
306074	SABESP	109	Jd. da Granja	7433650	412740	0,18	–	2
306075	SABESP	138	Jd. da Granja	7433450	412050	0,09	–	2
306083	SABESP	106	Vila Lúcia	7436300	412420	6,53	0,000496	4
306084	SABESP	87	Vila Lúcia/Lavapes	7436310	411150	1,51	–	2
306091	SABESP	86	Vila Corinthians	7435350	411500	6,98	0,000341	4
306098	SABESP	110	Sede Centro	7434900	408870	0,56	–	2
306099	SABESP	105	Bairro do Costinha	7444750	405400	0,4	–	3
306101	SABESP	94	Cidade Jardim	7429450	408930	1,45	–	3
306116	General Motors S/A	3	Sede	7437700	415740	0,52	–	2
306117	General Motors S/A	4	Jd. Motorama	7438500	415930	10,32	0,001770	1
306118	General Motors S/A	5	Jd. Motorama	7438080	414190	0,42	–	2
306119	General Motors S/A	6	Sede	7437680	415060	1,39	–	2
306120	General Motors S/A	7	Sede	7437340	415100	3,18	–	2
306122	General Motors S/A	9	Sede	7438000	416640	1,33	–	2
306123	General Motors S/A	10	Sede	7438560	416790	6,95	0,040000	1
306133	Holdercim Brasil S/A	1	Pq. Industrial	7428590	403620	0,15	–	2
306138	SABESP	–	–	7438600	411050	0,3	–	2
306139	Petrobrás Distrib. S/A	1	Jd. Diamante	7434910	415670	0,09	–	3

306141	Monsanto do Brasil LTDA	2	Limoeiro	7429400	403950	14,07	0,007130	1
306142	Monsanto do Brasil LTDA	3	Limoeiro	7429800	403850	9,2	0,000398	4
306143	Solectron Brasil LTDA	1	Eugênio de Melo	7438610	418990	1,66	–	2
306148	Loale Empr. Imobiliários	1	Vila Tatetuba	7436950	416500	0,13	–	2
306149	Sabesp	145	Bairro dos Putins	7429100	414500	0,09	–	2
306150	Kodak Bras. Com. e Ind	5	Jd. das Indústrias	7429400	406070	0,51	–	2
306153	General Motors LTDA	11	Jd. Motorama	7437910	415640	0,82	–	3
306154	Johnson & Johnson Ind.Com. LTDA	6	Jd. das Indústrias	7429700	405310	6,32	0,000342	4
306155	Monsanto do Brasil LTDA	4	Limoeiro	7429960	404110	0,24	–	2
306156	Senac	1	Vila Industrial	7436260	412110	0,28	–	1
306158	Gastro Clinica Assist. Médica	1	Jd. Serimbura	7434210	406240	0,07	–	2
326045	SABESP	112	Jd. Colonial/Imperial	7425000	407660	0,05	–	3
326048	SABESP	92	Elmano Veloso	7425250	408800	0,1	–	3
326050	SABESP	98	São Judas Tadeu	7428370	414800	0,13	–	2
326055	SABESP	53	Jd Colonial	7424710	408330	0,09	–	2
326057	SABESP	67	Jd. Colonial	7424330	408700	0,37	–	3
SAB72	SABESP	72	Limoeiro	7428900	403500	1,46	–	2
SAB74	SABESP	74	Vista Verde	7436100	414300	11,53	0,000480	4
SAB113	SABESP	113	Jd. Morumbi III	7428790	407170	0,24	–	2
SAB141	SABESP	141	Jd. Nova Esperança	7434100	418630	0,43	–	2
SAB148	SABESP	148	–	7424800	411200	0,72	–	2
SAB151	SABESP	151	Jd. Galo Branco	7440440	420350	0,61	–	3
SAB161- CAST	SABESP	161	Jd. Castanheiras	7436020	418720	1,69	0,000322	4
SAB163	SABESP	163	–	7436000	417700	1,15	–	2

***Tipos de Aquífero:**

- 1- Aquífero Livre
- 2- Aquífero Semi-Confinado
- 3- Aquífero Semi-Livre
- 4- Aquífero Confinado