

APLICAÇÃO DE MODELOS DE HIDRÁULICA DE POÇOS EM AQUÍFEROS FISSURAIS DO MUNICÍPIO DE BATURITÉ – CEARÁ

Lysandra Guedes FONTENELE (1); José Sérgio DOS SANTOS (2);

(1) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - Campus Fortaleza, Departamento de Construção Civil, Rua Pedestre D, nº134. Jurema - Caucaia, CEP: 61648 – 040, telefone: (85) 3237-2650. E-mail:

lysandragfontenele@yahoo.com.br.

(2) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – Campus Fortaleza, Departamento de Construção Civil, e-mail: Sergio@ifce.edu.br.

RESUMO

Reservas hídricas subterrâneas são importantes recursos naturais. Elas provêm água para o abastecimento de comunidades, abastece a indústria e a agricultura. Há muito se busca entender o seu movimento nos aquíferos. Mesmo em Estados como o Ceará, que fez a opção pela exploração dos recursos hídricos superficiais, o conhecimento das reservas hídricas subterrâneas é imprescindível, pois os aquíferos, mesmo os fissurais, podem tornar-se o meio mais econômico e eficaz para abastecer pequenas comunidades isoladas, difusamente distribuídas por toda a extensão do Estado. Neste trabalho, procurou-se verificar, dentre seis modelos de hidráulica de poços, qual deles melhor descreveria o fluxo subterrâneo em meio fissural no Estado do Ceará. Para testar a metodologia, foram escolhidos três poços de bombeamento perfurados em embasamento cristalino do referido estado, pertencentes ao município de Baturité. Os resultados mostraram que o modelo Theis para aquífero ideal não deve ser empregado na análise de testes de bombeamento neste tipo de formação. Dos seis modelos testados o que melhor descreveu a hidráulica do aquífero foi o modelo de Papadopulos-Cooper.

Palavras-chave: Aquíferos fissurais, Águas subterrâneas, Hidráulica de poços, transmissividade, coeficiente de armazenamento.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o ponto de vista histórico, as águas subterrâneas encontradas em aquíferos porosos foram os primeiros a serem investigados, provavelmente por serem mais facilmente acessíveis e vantajosos. Posteriormente, o aumento da demanda por fontes hídricas forçou as comunidades a procurar água também em aquíferos fissurais, onde a água move-se através de descontinuidades existentes na rocha. Porém, neste tipo de aquífero o escoamento e os processos de transporte diferem daqueles que ocorrem nos aquíferos porosos.

Dos Santos (2008), comenta que contrastes na condutividade hidráulica entre a fratura e a matriz da rocha podem ser extremos e localizados. Em um caso a permeabilidade da fratura pode ser muitas ordens de magnitude maiores que a da matriz. Em outro, a fratura pode estar completamente selada com diferentes tipos de material. Ademais, o entendimento de como as fraturas se distribuem e se conectam uma com as outras dentro da formação é condição sine qua non para o pleno entendimento do escoamento neste tipo de aquífero. Por isso, há um consenso de que entre os problemas que atualmente se defronta em hidrogeologia nenhum é mais desafiador que aqueles que se relacionam com a caracterização das rochas fraturadas e sua capacidade de conduzir fluidos.

O Estado do Ceará tem seu território quase que completamente inserido no polígono das secas¹, justificando a importância de conhecer o potencial hídrico de seus aquíferos fissurais, visto que predominam em quantidade e estão distribuídos em três quartos do território (Figura 1.1). Embora não sejam aquíferos por

¹ Aproximadamente 85%.

excelência, a sua capacidade como reserva de água não pode ser desprezada, pois constituem uma importante reserva complementar aos armazenamentos superficiais (SANTIAGO, 1996, p. 232). Além disso, estes aquíferos podem tornar-se o meio mais econômico e eficaz para abastecer pequenas comunidades isoladas, difusamente distribuídas por toda a extensão do Estado (DOS SANTOS, 2008).

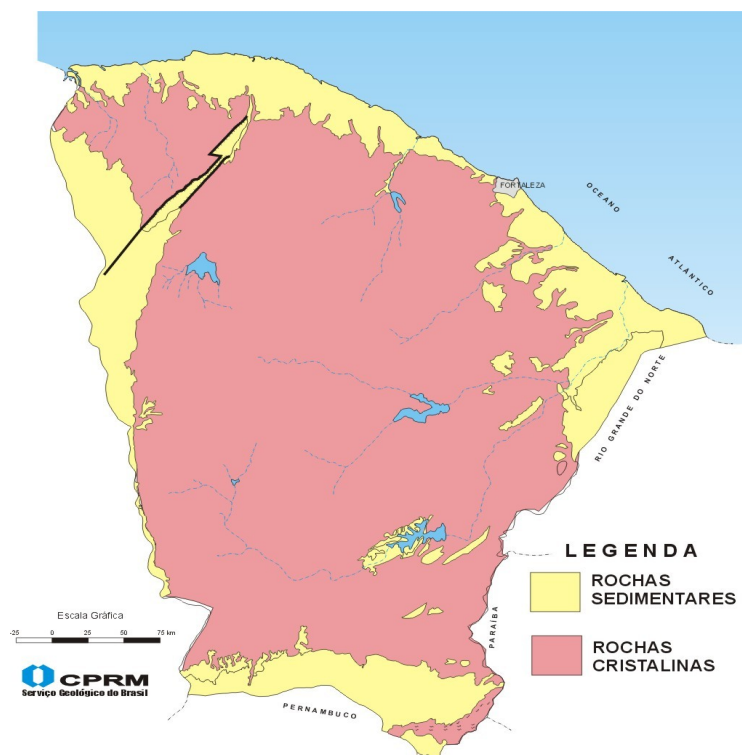


Figura 1.1 – Geologia Simplificada do Ceará: Cristalino e Coberturas Sedimentares.

Fonte: CPRM, 2007 *apud* DOS SANTOS, 2008.

O município de Baturité está localizado na porção nordeste do estado do Ceará e inserido na Serra de Baturité, sendo alguns municípios que também compreendem a Serra: Mulungu, Guaramiranga e Pacoti, estes têm as suas demandas atendidas por água subterrânea a partir de poços perfurados em rochas cristalinas (FRACALOSSO JÚNIOR, 2001).

Com isso, esta pesquisa se propõe a estudar e analisar alguns modelos de hidráulica de poços que melhor representa o fluxo hidrodinâmico acerca da transmissividade e do coeficiente de armazenamento de um aquífero fissural, a partir de dados de poços perfurados neste tipo de formação no município de Baturité no estado do Ceará.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Generalidades

Os aquíferos são definidos como uma formação geológica com suficiente permeabilidade e porosidade interconectada para armazenar e transmitir quantidades significativas de água, sob gradientes hidráulicos naturais (CLEARY, 2007, p.10).

O movimento das águas subterrâneas nas formações geológicas está intimamente ligado a litologia, estratigrafia e estrutura dos sistemas geológicos. Tais características geológicas são definidas por Manoel Filho (2008, p.62) da seguinte forma:

- a litologia trata da composição mineral, da granulometria dos grãos e do grau de compactação dos sedimentos ou rochas.
- a estratigrafia corresponde a descrição das relações geométricas e cronológicas entre os vários elementos constituintes do sistema geológico, tais como lentes, camadas e formações de origem sedimentar.

- a estrutura diz respeito às características geométricas produzidas no sistema geológico por deformação, após deposição ou cristalização, como é o caso das juntas, fraturas, falhas e dobras.

2.2 Abordagens existentes

A modelagem dos aquíferos fissurais no presente trabalho seguirá duas abordagens distintas. A primeira denominada dupla porosidade, o aquífero é considerado como sendo composto de fraturas e de blocos da matriz rochosa. E a segunda, considerada a mais simples, é a do meio poroso equivalente. Em outras palavras, esta abordagem consiste em tratar o sistema de rochas fraturadas como se fosse um meio poroso não consolidado.

2.2.1 Modelos de Dupla Porosidade

As fraturas são assumidas como possuindo alta permeabilidade, mas baixa porosidade e capacidade de armazenamento. Somente as fraturas produzem escoamento diretamente para o poço, enquanto que a matriz atua como a fonte armazenadora que fornece água para as fraturas (BÄUMLE, 2003, p.9). As suposições realizadas sobre o escoamento da matriz de baixa difusividade para fraturas com alta difusividade resultaram, basicamente, em três modelos de dupla-porosidade de formações naturalmente fraturadas. O primeiro modelo referido como estado de quase permanente, o segundo chamado de escoamento gradiente e o terceiro modelo, cujo é utilizado nesta pesquisa e foi desenvolvido por Moench (1984), é também baseado na suposição do escoamento difusivo matriz-fratura, mas introduz uma resistência ao fluxo na interface do bloco da matriz com a fratura na forma de efeito de parede. Se a condutividade da superfície da parede da fratura é consideravelmente menor que a da matriz da rocha, o intercâmbio de fluidos entre matriz e fratura não ocorre, e a variação espacial da pressão dentro dos blocos da matriz torna-se desprezível.

2.2.2 Modelos de Meio Poroso Equivalente

A solução de Theis é uma das mais tradicionais para a análise do comportamento transiente de um aquífero confinado durante um teste de bombeamento para escoamento radial em sistemas homogêneos, isotrópicos e de extensão infinita. Através de um método gráfico de superposição de dados de campo com curvas padrão baseada na solução de Theis, é possível determinar a permeabilidade e o coeficiente de armazenamento do aquífero.

Porém, quando fraturas são interceptadas por poços de bombeamento, o comportamento transiente do aquífero difere significativamente daquele predito pela solução de Theis e deste modo uma abordagem diferenciada torna-se necessária. Gringarten e Witherspoon (1972) e Gringarten e Ramey (1974a,b) desenvolveram soluções analíticas para escoamento para um poço que intercepta uma fratura única, seja ela horizontal ou vertical. Com a ajuda destas curvas padrão é possível discernir entre aquíferos com fratura horizontal ou vertical e analisar o sistema como um meio poroso homogêneo anisotrópico “equivalente” com uma fratura única de altíssima permeabilidade.

Gringarten e Witherspoon (1972, p. 6) declaram que o modelo desenvolvido por eles “pode ser aplicado a sistemas não porosos tais como o de rochas cristalinas fraturadas [...] Em tal caso o armazenamento específico usado nas equações representaria o fator de armazenamento de um meio poroso equivalente”.

Os métodos convencionais para análise de testes de bombeamento assumem que o armazenamento no poço é desprezível. Esta suposição não é válida para os casos de poços de grande diâmetro. Papadopoulos e Cooper (1967) desenvolveram um método para um poço de grande diâmetro que penetra por completo um aquífero confinado. As suposições foram, basicamente, as mesmas feitas por Theis para aquíferos confinados exceto pelo item sobre o armazenamento no poço, que é substituído por: “O diâmetro do poço não é pequeno, consequentemente o armazenamento no poço não pode ser desprezado”;

Embora desenvolvido para meio poroso, alguns pesquisadores sugerem que este método pode ser utilizado para a simulação do comportamento de sistemas de dupla-porosidade, caso estes possuam fraturas horizontais igualmente espaçadas e intercaladas pelos blocos da matriz, ambos sendo: homogêneos, isotrópicos e de extensão infinita (Barker; Macdonald, 2000, p.15).

Na natureza os aquíferos drenantes (*Leaky aquifers*) ocorrem mais frequentemente que os aquíferos perfeitamente confinados. As camadas confinantes superior ou inferior raramente são completamente impermeáveis, ao contrário, a maioria delas apresenta algum grau drenagem (Kruseman; de Rider, 1990,

p.73). Quando um poço perfurado em um aquífero drenante é bombeado, a água não é retirada apenas do aquífero, mas também das camadas superior ou inferior que o envolvem. No momento em que se inicia o bombeamento a carga hidráulica do aquífero cai o que por sua vez cria um gradiente hidráulico, não apenas no próprio aquífero, mas também no aquíardo.

A água que o aquífero bombeado contribui para a descarga do poço provém do seu armazenamento. A água que o aquíardo cede para a descarga também provém de seu próprio armazenamento e escoar através dele desde o aquífero não bombeado. À proporção que o bombeamento continua a maior parte da água vem do aquífero não confinado e apenas uma pequena parcela do armazenamento do aquíardo. Após certo tempo a descarga do poço entra em equilíbrio com a transmissão de água que vem através do aquíardo e o estado permanente é então atingido. Nestas condições, o aquíardo serve meramente como um meio transmissor e a água originária de seu armazenamento pode ser desprezada.

2.3 Teste de Aquífero

Teste de aquífero ou teste de bombeamento é o experimento que se faz sobre um aquífero, bombeando-o e medindo os tempos e os respectivos níveis de água, visando determinar-lhe características hidrodinâmicas tais como transmissividade e armazenamento. De acordo com Cleary, 2007, tais parâmetros são definidos da seguinte forma:

- a transmissividade é um parâmetro hidrogeológico que corresponde à capacidade de um meio em transmitir água, ou seja, a quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero.
- o coeficiente de Armazenamento: é definido como o volume de água que um aquífero libera ou armazena por unidade de área superficial do aquífero e por unidade de variação em carga.

Para a determinação dos parâmetros de transmissividade e armazenamento nesta pesquisa, utilizou-se cinco diferentes métodos analíticos para a tentativa de identificar o melhor método que descreveria o fluxo hidráulico do poço.

Os modelos utilizados foram: Theis (1935), Cooper-Jacob (1946), Hantush-Jacob (1955), Papadopoulos-Cooper (1967) e Gringarten-Ramey (1974). O método de Theis foi usado com a intenção de verificar o quanto os dados se divergiam do comportamento de um aquífero ideal.

O gráfico semi-logarítmico pelo método de Cooper-Jacob é extremamente utilizado para determinar o tipo de desvio das formações mostradas comparando-as a um aquífero idealizado. Por exemplo, certos padrões aparecem quando o aquífero é confinado, não confinado, drenante, de extensão limitada, ou quando há um suporte de armazenamento no poço.

Em adição, o método de Jacob ajuda na identificação do grau de interconexão entre o poço de bombeamento e o poço de observação. O método de Hantush-Jacob, cuja concepção não admite armazenamento no aquíardo, serviu para a verificação se o aquífero era ou não drenante.

O método desenvolvido por Papadopoulos-Cooper (1967) considera um poço com proporções grandes, ou seja, um poço de grande diâmetro que penetra por completo um aquífero confinado, que pode ser utilizado com o objetivo de se verificar se o armazenamento do poço exercerá considerável influência nos resultados de rebaixamento. Estes efeitos geralmente podem se manifestar nos tempos iniciais de bombeamento, sendo bastante frequente em aquíferos fissurais, mesmo quando o diâmetro do poço é pequeno. O modelo de Gringarten-Ramey (1974) desenvolve solução analítica para o escoamento hídrico de um poço que intercepta uma única fratura horizontal.

3 METODOLOGIA

3.1 Localidade dos Poços

Os poços utilizados para o estudo foram perfurados no município de Baturité, CE. Os dados dos poços foram extraídos do banco de dados do Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS) da Companhia de Recursos Minerais – Serviços Geológicos do Brasil (CPRM).

O município de Baturité apresenta um quadro geológico simples, observando-se um predomínio de rochas do embasamento cristalino de idade pré-cambriana, representadas por gnaisses, gabros e migmatitos. Sobre esse substrato repousam coberturas aluvionares, de idade quaternária, encontradas ao longo dos principais cursos

d'água que drenam o município. Tais condições atribuem um potencial hidrogeológico baixo para as rochas cristalinas sem, no entanto, diminuir sua importância como alternativa de abastecimento em casos de pequenas comunidades ou como reserva estratégica em períodos prolongados de estiagem (FEITOSA, 1998).

3.2 Descrição dos Poços

Para o município de Baturité foram utilizados três poços perfurados nas localidades: Boa Vista, Choro do Junco e Umari. Suas localizações geográficas e vazões de bombeamento estão descritas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Informações gerais dos poços do município de Baturité.

Poço	Localização	Latitude UTM N	Longitude UTM E	Vazão Média (m ³ /s)
PS039/2009	Boa Vista	9.524.746,0	515.987,0	0,002797
PS012/2008	Choro do Junco	9.494.342,0	523.472,0	0,001842
BAT/37/00	Umari	9.514.008,0	513.564,0	0,002779

3.3 Os Testes de Aquíferos dos Poços

Foram utilizados três testes de bombeamento. As vazões obtidas por meio dos testes não foram constantes durante os ensaios, portanto, realizou-se a média ponderada das vazões de cada poço em função do tempo de bombeamento. No gráfico a seguir, encontram-se os dados dos testes de bombeamento de todos os poços utilizados em suas respectivas localidades.

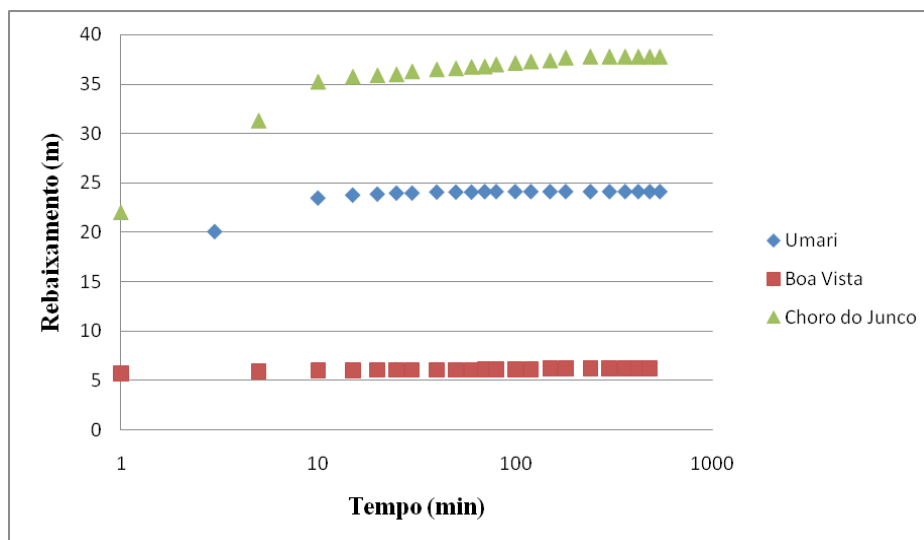


Figura 3.1 – Resultados dos testes de bombeamento dos três poços do município de Baturité.

Para realizar as simulações hidrodinâmicas fez-se uso do software AQTESOLV®. As modelagens em seus respectivos métodos foram realizadas através do sistema computacional AQTESOLV ® for Windows Professional, versão 3.50, desenvolvido pela empresa HydroSOLVE, Inc., sediada em Reston, VA, USA.

4 RESULTADOS ALCANÇADOS

Com a posse de todos os dados de bombeamento dos três poços da localidade de Baturité, o estudo prosseguiu com a realização da análise destes dados utilizando os seis métodos diferentes de hidráulica de poços, numa tentativa de encontrar o melhor modelo que descreveria o comportamento do aquífero. Os valores de transmissividade e de coeficiente de armazenamento encontrados nos modelos foram sintetizados nas Tabelas 4.1 e 4.2. Contudo, é importante salientar que os valores de armazenamento são praticamente

impossíveis de se estimar com precisão, pois os dados obtidos dos poços em estudo são medições realizadas no próprio poço onde se executa o bombeamento.

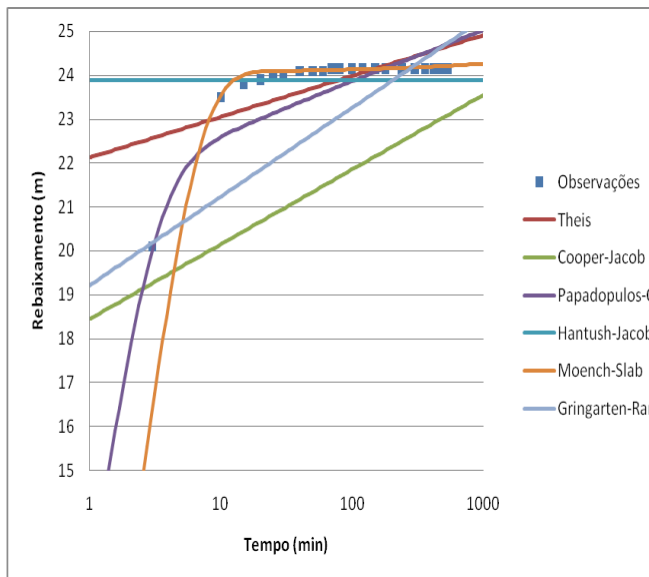


Figura 4.1 - Comparativo dos Modelos com dados observados. Poço BAT/37/00 - Umari – Baturité.

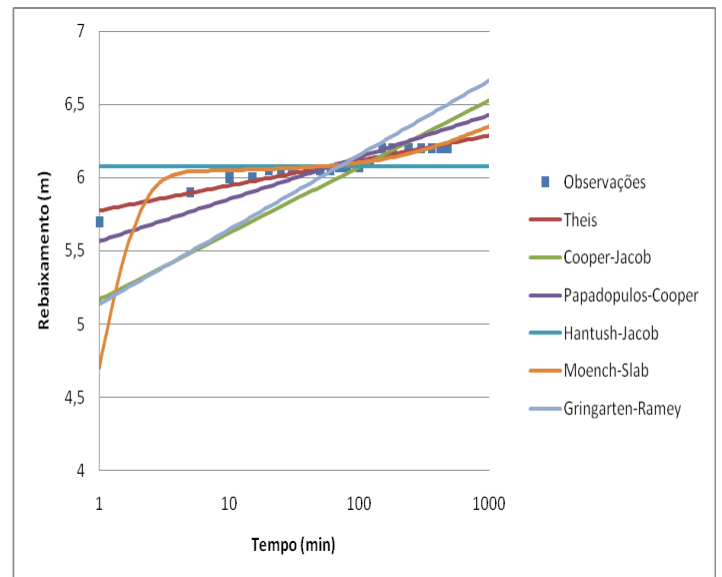


Figura 4.2 - Comparativo dos Modelos com dados observados. Poço PS039/2009 - Boa Vista – Baturité.

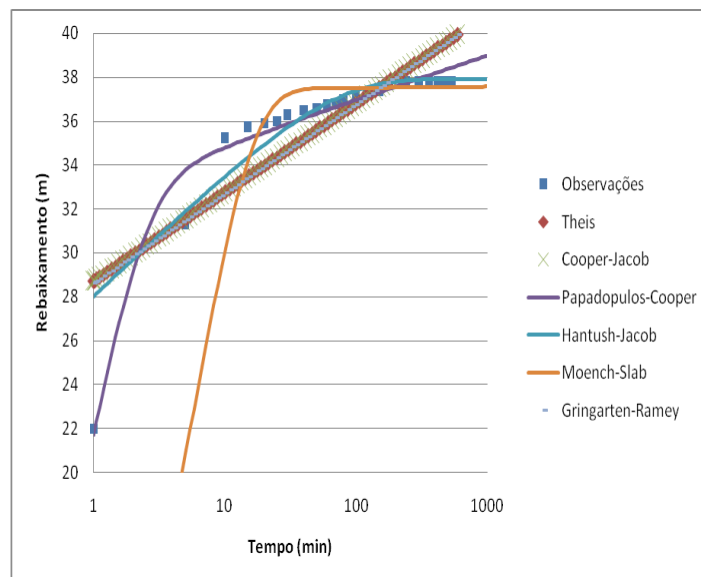


Figura 4.3 – Comparativo dos Modelos com dados observados. Poço PS012/2008 - Choro do Junco – Baturité.

Tabela 4.1 - Transmissividades obtidas para os poços do Município de Baturité.

Poços	Theis		Cooper-Jacob		Hantush-Jacob		Papadopulos-Cooper		Gringarten-Ramey		Moench	
	(m ² /s)	(L/m/d)	(m ² /s)	(L/m/d)	(m ² /s)	(L/m/d)	(m ² /s)	(L/m/d)	(m ² /s)	(L/m/d)	(m ² /s)	(L/m/d)
Boa Vista	3,01E-03	259977,60	1,13E-03	97804,80	7,49E-04	64670,40	1,78E-03	154137,60	6,05E-02	5227200,00	1,41E-03	121824,00
Choro do Junco	8,35E-05	7210,94	8,35E-05	7210,94	5,96E-05	5146,85	1,68E-04	14515,20	4,98E-03	430272,00	1,35E-04	11664,00
Umari	5,48E-04	47304,00	2,99E-04	25859,52	1,90E-04	16407,36	4,43E-04	38292,48	1,51E-02	1304640,00	3,42E-04	29548,80

Tabela 4.2 – Coeficientes de Armazenamento obtidos para os poços do Município de Baturité.

Poços	Theis	Cooper-Jacob	Hantush-Jacob	Papadopulos-Cooper	Gringarten-Ramey	Moench
Boa Vista	8,61E-33	1,00E-10	1,00E-10	1,00E-10	1,00E-10	1,00E-10
Choro do Junco	1,55E-07	1,55E-07	1,55E-05	1,55E-09	9,74E-09	1,55E-09
Umari	2,10E-23	1,00E-10	1,00E-10	1,00E-10	1,00E-10	1,00E-10

5 CONCLUSÃO

Após a análise dos resultados, obtidos através da aplicação de modelos de aquíferos a testes de bombeamento efetuados em poços perfurados em embasamento cristalino, pôde-se chegar a algumas conclusões sobre o comportamento dos aquíferos fissurais.

As Figuras 4.1, 4.2, e 4.3 mostram as soluções obtidas dos modelos plotados contra os dados medidos no ensaio. A inspeção visual mostra que não é recomendável a utilização da solução de Theis (1935) para se estimar a transmissividade e o coeficiente de armazenamento de aquíferos fissurais. Conforme esperado, nestes aquíferos os efeitos de armazenamento do poço influenciam significativamente os rebaixamentos e, por isto, o modelo de Papadopulos-Cooper (1967) mostrou-se mais o adequado. Este mesmo comportamento foi encontrado por DOS SANTOS (2008) ao analisar testes de bombeamentos feitos em poços perfurados nos aquíferos fissurais no estado de NH, Estados Unidos da América.

Recomenda-se utilizar valores transmissividade e de coeficiente de armazenamento próximos dos encontrados na simulação de Papadopulos-Cooper para alimentar modelos de fluxo subterrâneos que queiram pesquisar sobre as disponibilidades hídricas subterrâneas na região de Baturité-CE.

REFERÊNCIAS

- BARKER, J.A.; MACDONALD, D.M.J, **A Manual for BGSPT: Programs to Simulate and Analyse Pumping Tests in Large-Diameter Wells**, British Geological Survey, Technical Report WC/00/17, DFID Project No. R7131., 19 p., 2000.
- BÄUMLER, R., **Geohydraulic Characterisation of Fractured Rock Flow Regimes: Regional Studies em Granite and Dolomite**. 2003. Doctoral Thesis, Universität Karlsruhe (TH), 2003.
- CLEARY, R.W., **ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**, Clean Enviromental Brasil, Princeton Groundwater, 2007.
- COOPER, H.H.; JACOB, C.E., A generalizad graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, **AM. Geophys. Union Trans.**, vol. 27, p. 526-534, 1946.
- DOS SANTOS, J.S; **Efeitos do Fraturamento Hidráulico em Aquíferos Fissurais**, Tese de doutorado, Universidade Federal do Ceará, 2008.
- DUFFIELD, G.M.; HIDROSOLVE, INC., **User's Guide – Aqtesolv for Windows**, HidroSOLV, Inc., Reston, Virginia, 2002.
- FEITOSA, Fernando A. C. (Org.). Diagnóstico do Município de Baturité. In: **Programa de Recenseamento de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea no Estado do Ceará**. Fortaleza: CPRM – 1998.
- FRACALOSSO JÚNIOR, M. **O Aquífero Fissural como Fonte Hídrica para o Abastecimento Público – Serra de Baturité – Ceará – Brasil**. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, 2001.
- GRINGARTEN, A.C.; RAMEY, H.J., Unsteady State pressure Distributions Created by a Well with a Single Horizontal Fracture, Partial Penetration or Restricted Entry, **Society of Petroleum Engineers Journal**, p. 413-426, 1974.
- GRINGARTEN, A.C.; WITHERSPOON, P.A., A Method of Analyzing Pump Test Data from Fractured Aquifers, **Symposium of Percolation Through Fissured Rock, Int. Soc. Rock. Mech. / Int. Assoc. Eng. Geol.**, Stuttgart, vol. 3B, p. 1-9, 1972.
- HANTUSH, M.S.; JACOB, C.E., Non-steady radial flow in an infinitive leaky aquifer, **Am. Geophys. Union Trans.**, vol.36, p. 95-100, 1955.

KRUSEMAN, G.P.; de RIDDER, N.A., **Analysis and evaluation of pumping test data**, 2nd edn., Int. Inst Land Reclamation Improvement/ILRI, Wageningen, Netherlands, 1990.

MANOEL FILHO, J. Ocorrência das Águas Subterrâneas. In: Feitosa, Fernando A. C. *et al* (Orgs.). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**, 3ªed. Rio de Janeiro: CPRM/LABHID, 2008. Cap. 2.1, p. 53-73.

MOENCH, A.F., Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin, **Water Resources Research**, vol.20, No.7, p. 831-846, 1984.

PAPADOPULOS, I.S.; COOPER, H.H., Drawdown in a well of large diameter, **Water Resources Research**, vol. 3, No.1, p. 241-244, 1967.

SANTIAGO, M.M.F., Salinidade das Águas Subterrâneas no Semi-árido, **Anais da 4ª. Reunião Especial da SBPC**, p. 232-236, Novembro, 1996.

THEIS, C.V., The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, **Am. Geophys. Union Trans.**, vol.16, p. 519-524, 1935.