

Aquíferos com fluxos controlados simultaneamente por porosidade intergranular e planar: aplicação a rochas metassedimentares do Alto Paraguai, MT

Aquifers with flow controlled simultaneously by intergranular and planar porosity applied to metasedimentary rocks of the Alto Paraguay Region, Mato Grosso State, Brazil

Thiago Luiz Feijó de Paula¹ e José Eloi Guimarães Campos²

thiago.paula@cprm.gov.br; eloi@unb.br

^{1,2}Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil

Recebido: 03/03/15 - Revisado: 21/09/15 - Aceito: 13/11/15

RESUMO

Os reservatórios de águas subterrâneas com fluxos controlados simultaneamente por porosidade intergranular e planar são conhecidos popularmente como aquíferos de dupla porosidade. As pesquisas acerca destes aquíferos são importantes para o entendimento do comportamento hidráulico de reservatórios com este tipo de fluxo. Os aquíferos Raiçama e Diamantino são constituídos por metassedimentos deformados, de baixo grau metamórfico, distribuídos ao longo de uma faixa arqueada com direção nordeste-sudoeste e concavidade voltada para sudeste. As zonas saturadas apresentam fluxos controlados por anisotropias, com baixa permeabilidade, e o armazenamento é condicionado à porosidade planar e intergranular. Nos aquíferos de dupla porosidade pode ocorrer a predominância de um ou outro tipo de porosidade. Quando comparados a aquíferos exclusivamente fraturados, os sistemas de dupla porosidade estudados apresentam menores rebaixamentos, e maiores valores de capacidades específicas. Os parâmetros hidrodinâmicos de transmissividade e condutividade hidráulica são respectivamente, da ordem de $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ e 10^{-7} m/s para o Aquífero Raiçama, e $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ e 10^{-7} m/s para o Aquífero Diamantino.

Palavras Chave: Aquífero dupla porosidade. fluxo subterrâneo. Formação Raiçama. Formação Diamantino

ABSTRACT

Groundwater reservoirs with flow controlled simultaneously by intergranular and planar porosity are popularly known as double porosity aquifers. Research studies on these aquifers are important to understand the hydraulic behavior of reservoirs with this type of flow. The Raiçama and Diamantino aquifers consist of deformed, low grade metamorphic sediments, distributed along a northeast-southwest belt with southeast concavity. Saturated zones flow is controlled by anisotropy, with low permeability, and the storage is conditioned by fracture and intergranular porosity. In double porosity aquifers the predominance of one or another type of porosity can be observed. When compared to fractured aquifers, double porosity systems present lower drawdown and higher specific capacity values. The transmissivity and hydraulic conductivity hydrodynamic parameters are respectively on the order of $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ and 10^{-7} m/s for the Raiçama Aquifer, and $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ and 10^{-7} m/s for the Diamantino Aquifer.

Keywords: Double porosity Aquifer. groundwater flow. Raiçama Formation. Diamantino Formation

INTRODUÇÃO

Apesar da existência de importantes trabalhos realizados com temática em hidrogeologia, não há enfoque específico na caracterização dos aquíferos sedimentares e metassedimentares paleozoicos e proterozoicos com detalhamentos específicos em seu comportamento hidráulico. Comparando diferentes trabalhos de cartografia ou de diagnóstico podem ser notadas formas diferentes para a classificação e descrição do comportamento hidráulico para um mesmo tipo de aquífero.

O aprofundamento dos estudos é necessário para melhor entendimento sobre a descrição e disponibilidade hídrica de aquíferos mistos, gerando assim, conhecimento para consolidar políticas confiáveis de gerenciamento de recursos hídricos e embasar futuros trabalhos de pesquisa.

O desenvolvimento do presente trabalho se justifica pela necessidade de se ampliar as discussões e o conhecimento sobre aquíferos de características hidráulicas mistas com porosidade simultaneamente intergranular e fissural.

APLICAÇÃO DO CONCEITO DE AQUÍFERO DE DUPLA POROSIDADE

O modelo de dupla porosidade foi proposto pela primeira vez para descrever fluxos em meios porosos-fraturados na indústria do petróleo por Barenblatt, Zheltov e Kochina (1960).

De acordo com Barenblatt, Zheltov e Kochina (1960), entende-se como meio de porosidade dupla aquele em que existem dois sistemas entrosados, um de blocos porosos, com permeabilidade baixa, mas com elevada capacidade de armazenamento, e outro de fraturas, com permeabilidade mais elevada em direções preferenciais, mas com escassa capacidade de armazenamento. Considera-se então que a porosidade total resulta da existência de dois tipos distintos: a porosidade correspondente aos blocos e a correspondente às fraturas.

Os meios porosos-fraturados foram considerados como compostos de dois sistemas que se sobrepõem, um representando uma rede de fraturas e o outro blocos porosos, portanto, dando origem ao termo "dupla porosidade" (WONG et al., 2007).

É importante destacar que apenas podem ser considerados aquíferos mistos ou de porosidade intergranular/fraturada aqueles materiais que têm em seu arcabouço descontinuidades planares associadas aos espaços intergranulares. As descontinuidades planares podem ser materializadas por fraturas, juntas ou falhas e pelos planos de acamamento ou discordâncias. A porosidade intergranular pode ser representada por porosidade primária residual, porosidade secundária por dissolução de matriz ou cimento ou porosidade secundária por dissolução de elementos o arcabouço. Desta forma, fica claro que a presença de solo sobre um maciço quartzítico sem porosidade residual não pode ser classificado como de dupla porosidade. Neste caso, se trata de dois aquíferos superpostos, sendo o superior do tipo intergranular e o inferior do tipo fraturado.

Nos trabalhos do Mapa de Domínios e Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil, apresentados por Bomfim (2007) o termo Poroso/Fissural foi empregado para classificar grupos

litológicos como sedimentos litificados e/ou silicificados de bacias sedimentares e parte de metassedimentos de baixo grau metamórfico de províncias tectônicas brasileiras.

A escolha de um modelo conceitual adequado é fundamental para a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos a partir dos dados de ensaios de bombeamento, para os estudos de recarga do aquífero, de fluxo de contaminantes e migração de plumas de contaminação, para a determinação de vazões outorgáveis, dentre outros aspectos. Por outro lado, o uso do modelo conceitual inadequado pode resultar em modelos matemáticos incorretos, parâmetros hidráulicos sub ou superestimados, cálculos de rebaixamentos sub ou superestimados e erros na determinação do potencial quantitativo do aquífero (OLIVEIRA, 2009).

No modelo de porosidade intergranular o fluxo é dado por meios rochosos que têm em seu arcabouço grãos (clastos e/ou matriz), suportados e acomodados entre si, e que permitem a condução e armazenamento de fluidos através dos espaços vazios intergranulares conectados entre si. Neste modelo, a condição de fraturamento não é considerada ou não existe, e sendo assim, a quantificação do fluxo é dada unicamente pelos espaços existentes entre os grãos.

O modelo de fluxo por porosidade planar (fraturado), é dado por um meio em que a condutividade e o armazenamento de águas subterrâneas são resultantes exclusivamente pela interconexão de estruturas planares (fraturas) em blocos rochosos com insignificante ou inexistente matriz porosa. Neste caso, o fluxo é quantificado exclusivamente através da porosidade planar, e sua intensidade dependerá da quantidade, densidade e conectividade de planos abertos. Pode ser analisado por duas abordagens: meio contínuo, em que hidráulicamente o meio fraturado se comporta como um meio poroso equivalente, e descontínuo, em que são considerados os fluxos em cada fratura individualmente.

O modelo de dupla porosidade (intergranular/fraturado) pode ser aplicado a meios rochosos, onde ainda persista porosidade intergranular primária residual, associada à porosidade secundária, com elevada ocorrência de planos de fraturas. O potencial de um sistema aquífero convertido por este sistema de fluxo será tanto maior quanto maior for à ocorrência da porosidade primária, ampliada pela porosidade secundária planar. No geral, o fluxo é quantificado primariamente em função da porosidade planar e secundariamente pela interconexão hidráulica existente entre os grãos (Figura 1).

Para qualquer destes modelos, a zona saturada tem todas as aberturas interconectadas cheias de água que se movem numa direção controlada pelo gradiente hidráulico. O movimento na zona saturada pode ser tanto laminar como turbulento. No fluxo laminar, as partículas de água se deslocam de modo ordenado ao longo das linhas de fluxo. No fluxo turbulento as partículas de água se movem de modo desordenado, irregular, o que resulta numa completa mistura das partículas. Sob gradientes hidráulicos naturais, fluxo turbulento ocorre só em grandes aberturas tais como aquelas em cascalho, corridas de lava e cavernas de calcário. Fluxos são laminares na maioria dos depósitos granulares e em rochas fraturadas (HEATH, 1983).

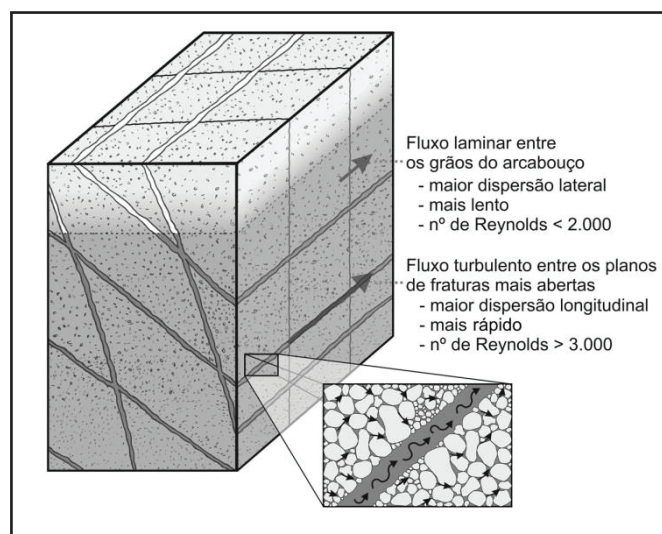


Figura 1 - Representação esquemática da disposição e fluxo em um meio com dupla porosidade (intergranular/fraturado)

No fluxo laminar em meio granular, as diferentes linhas de fluxo convergem em estreitos espaços entre as partículas e divergem nos maiores interstícios. Assim, há alguma interdigitação das linhas de fluxo que resulta em dispersão transversal - ou seja, dispersão a ângulos retos em relação a direção do fluxo da água subterrânea. Também, diferenças na velocidade resultam da fricção entre a água e as partículas de rocha. A menor velocidade ocorre adjacente às partículas e a mais rápida velocidade ocorre no centro dos poros. A dispersão resultante é longitudinal - ou seja, na direção do fluxo (HEATH, 1983).

Os modelos de fluxo esperados para os aquíferos sedimentares e metassedimentares proterozoicos da região do Alto Paraguai mapeados em superfície, são de aquífero intergranular, fissural, e de dupla porosidade, sendo este último o principal foco deste trabalho.

Nos modelos de aquífero de dupla porosidade, as fraturas são assumidas por possuir alta permeabilidade, mas baixa porosidade e capacidade de armazenamento. Somente as fraturas são capazes de produzir escoamento diretamente para um poço, enquanto que a matriz atua como a fonte armazenadora que fornece água para as fraturas (BÄUMLE, 2003).

Em reservatórios naturalmente fraturados, as fraturas podem possuir permeabilidades de várias ordens de grandeza maior que o restante da formação, enquanto que sua porosidade pode ser significativamente menor. Assim as fraturas controlam o fluxo de fluidos, enquanto os blocos são os responsáveis pelo armazenamento deste fluido (REIS, 1990).

A hipótese básica do modelo de dupla porosidade é a de que o fluxo de fluidos ocorre exclusivamente nas fraturas. Os blocos de matriz são isolados entre si e limitados em toda a sua extensão pelas fraturas, estando distribuídos uniformemente ao longo destas e atuando como fontes ou sorvedouros puntiformes (LINS JUNIOR, 1991).

Segundo Fontenele e Dos Santos (2009), para se considerar mecanicamente uma formação fraturada, precisa-se admitir a existência de um meio com dois componentes coexistentes - os blocos rígidos da matriz e fraturas adjacentes, altamente

permeáveis.

O modelo mais conhecido para aquífero livre de dupla porosidade é o que foi desenvolvido por Moench (1984), que é baseado na suposição do escoamento difusivo matriz-fratura e considera as condições de fluxo e armazenamento.

Segundo Costa Almeida (1985), o conceito de dupla porosidade deve ser utilizado para demonstrar que a existência de fraturas permeáveis (macrofraturas) faz com que o meio fissurado fique compartimentado em blocos que, por sua vez, possuem uma porosidade de poros e microfraturas. Os blocos caracterizam-se por armazenar, em geral, um maior volume de água, sendo pouco permeáveis, enquanto que as fraturas são mais permeáveis, mas contribuem pouco para a porosidade total. Sendo assim, o volume de água fornecido por estes meios provém fundamentalmente dos blocos, mas o fluxo é condicionado pelas fraturas.

Oliveira (2009) utilizou o modelo fluxo de dupla porosidade desenvolvido por Moench (1984) aplicando a aquíferos sedimentares psamíticos de ocorrência livre e fortemente litificados por cimentação por sílica em que o meio é considerado homogêneo e anisotrópico com fluxo variando de laminar a turbulento. Em seu trabalho descreve que o cimento resulta na diminuição da porosidade primária, e em função da maior litificação, o conjunto sofre maior influência do fraturamento, portanto, responde a um modelo hidráulico do tipo dupla porosidade, com espaço matricial não superior a 2 ou 3% e porosidade secundária planar com superfície potenciométrica coincidindo com o nível freático da água. Entretanto, esta superfície apresenta continuidade lateral menos evidente, sendo controlada por blocos tectonicamente deslocados. Sendo assim, a modelagem do fluxo por dupla porosidade é mais complexa, pois se deve avaliar o fluxo na porosidade matricial ou primária residual e ao longo das fraturas que pode variar de laminar a turbulento.

PERTINÊNCIA DO TERMO

Embora a maior parte das descrições nos produtos de mapa hidrogeológico e literatura em geral distingam tipos de aquíferos quanto aos tipos de porosidade em apenas três grandes grupos intergranular, fraturado e cárstico, trabalhos relacionados a comportamento hidrodinâmico de aquíferos podem demonstrar uma grande dificuldade para realizar uma classificação simples com os rígidos limites conceituais estabelecidos por estes grupos. Os inúmeros contrassensos, acerca de classificações utilizando parâmetros físicos, podem indicar uma necessidade de uma nova divisão em mais grupos ou, pelo menos um melhor detalhamento mantendo os três grandes grupos e os subdividindo em subgrupos de características físicas e hidráulicas distintas.

Um exemplo bem conhecido de tratamento diferenciado para um destes grupos é dos aquíferos cársticos. Embora seja muito comum encontrar trabalhos que considerem estes aquíferos como um sistema simples que tem sua porosidade desenvolvida por dissolução química de carbonato de cálcio e/ou magnésio, também é comum encontrar trabalhos que ainda os subdividam em outra classe, a dos aquíferos fraturado-cársticos (ou fissuro-cársticos), ex.: Lousada e Campos (2005). Esta terminologia

é especificamente aplicada para sistemas em que ocorram lentes de rochas carbonáticas interdigitadas ou intercaladas a rochas menos permeáveis como lentes de calcários associadas a folhelhos ou lentes de mármore interdigitadas a filitos ou xistos. Para este exemplo, não é muito complicado entender, ou mesmo visualizar, que sistemas de fraturas e falhas existentes em um material carbonático potencializa o desenvolvimento de dissoluções ao longo dos planos de fraturas quando submetido à percolação de água. E sendo assim, o termo é associado a um tipo de comportamento misto, que é representado pela presença de fraturas com aberturas milimétricas a submilimétricas e de dissoluções cársticas que podem ter aberturas desde centimétricas até vários metros.

Sucessivamente, a existência de um comportamento misto, que não se encaixa exatamente em um dos três grandes grupos, mas sim parcialmente em pelo menos dois grupos, sugere no mínimo a possibilidade da existência de outros grupos de comportamento misto. No entanto, o que se tem encontrado nos trabalhos é que normalmente estes casos de categorização mista são classificados como aquele de comportamento que se entende (ou se considera) ser predominante.

São assim definidos comumente em trabalhos técnicos e livros didáticos os tipos: cárstico (e/ou fraturado-cárstico), fraturado (ou fissural ou cristalino) e granular (ou intergranular ou poroso).

Atualmente os produtos de cartografia hidrogeológica desenvolvidos por entidades governamentais, como a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil, no geral, tem seguido o modelo convencional para classificação, que não considera condições mistas de porosidade de unidades aquíferas. No Mapa Hidrogeológico do Brasil, desenvolvido por Diniz et al. (2014), são considerados apenas os grupos granulares, fraturados e cársticos para classificar de forma sintetizada todas unidades hidroestratigráficas brasileiras. Neste trabalho pode ser observado um cuidado especial com o critério de classificação de produtividade de unidades granulares, utilizando-se uma adaptação do critério estabelecido no trabalho de Struckmeier e Margat (1995). No entanto, as unidades fraturadas de metassedimentos não receberam qualquer distinção de comportamento, comparadas as unidades de rochas ígneas e ortometamórficas. Já em outros produtos com escala maiores, como recortes de folhas ou de limites estaduais, podem ser observados maiores cuidados quanto à descrição em legendas e em notas técnicas. No Mapa Hidrogeológico do Estado de Santa Catarina, apresentado por Machado (2013), a área de embasamento é classificada em sua totalidade como fraturada, sendo, no entanto, separadas as áreas de sequências de rochas vulcano-sedimentares com condições mais favoráveis de vazão e indicação de maior vulnerabilidade em locais onde ocorram intercalações de aquíferos porosos.

As generalizações, sobre a classificação, em muitos casos são aceitáveis, principalmente quando objetivam simplificar ou sintetizar a informação disponível. No entanto, qualquer trabalho que se adote tais simplificações não deve omitir as demais possibilidades, e de alguma forma deve registrar quais conceitos ou como são aplicados de forma simplificada.

Um exemplo de tipo de aquífero com comportamento

misto que comumente é simplificado ou mesmo ignorado nos trabalhos de hidrogeologia, é o que apresenta simultaneamente porosidade intergranular e fraturada, que são geralmente chamados de aquíferos de dupla porosidade, ou poroso/fraturado, ou poroso/fissural. Este tipo de aquífero é capaz de armazenar e transmitir água através de sua porosidade primária intergranular e porosidade secundária planar, e mesmo dentro desse universo, existem aqueles que tendem a se aproximar mais de um dos seus extremos que são fundamentalmente intergranulares ou fraturados.

Assim, algumas simplificações surtem efeitos satisfatórios para aqueles casos de aproximação dos extremos, no entanto, aqueles casos em que se posicionam equilibradamente entre os dois tipos de porosidade, por exemplo: porosidade 50% primária intergranular e 50% secundária planar, comumente costumam causar estranheza, pois apresentam os dois comportamentos e dificilmente se encaixam de forma satisfatória em qualquer dos modelos individuais.

Conceitualmente o rótulo “dupla porosidade” pode chamar atenção, tendo em vista que o termo por si só não identifica quais são os tipos de porosidades, a exemplo de como se faz no caso de fraturado-cárstico. Esta forma de citar se popularizou bastante e é facilmente encontrada em trabalhos como os já citados Costa Almeida (1985), Heath (1983), Moench (1984) e Oliveira (2009), além destes, trabalhos como Beskos e Aifantis (1986), sobre a teoria da consolidação com dupla porosidade, e Berryman e Wang (1995), sobre os coeficientes elásticos para transportes de fluidos em rochas de modelos de dupla porosidade, entre outros.

Outros autores preferem chamar de poroso/fissural ou poroso/fraturado. São exemplos, além do trabalho já citado de Bomfim (2007), os trabalhos de Kruglov e Ballesteros (1965), que separam em sua classificação um grupo para águas subterrâneas de estrato intersticial e de fissura, Lyczkowsky (1982), com a simulação multidimensional de fluxo desuniforme em meios porosos fissurais, Maloszewski et al. (2002), que identificam sistemas de fluxos interligados de aquíferos porosos fissurais e canais cársticos, entre outros.

Ambas as formas de citação têm o mesmo significado, e se por um lado é estranho citar “dupla porosidade” em que não identificam quais são os tipos de porosidades, por outro lado não seria correto também citar poroso/fissural ou poroso/fraturado porque a porosidade é uma propriedade intrínseca de todos os aquíferos, restando assim a única forma correta, que é intergranular/fraturado a qual é bastante citada em trabalhos de pesquisa científica.

Ainda no âmbito da pertinência do termo podem-se utilizar exemplos para esclarecer esta discussão. O aquífero fraturado desenvolvido em rochas graníticas-gnáissicas apresenta comportamento distinto de aquíferos fraturados desenvolvidos em quartzitos-metaconglomerados, pois no segundo grupo, além dos planos de fratura, ainda existem outras anisotropias planares como acamamento, discordâncias e clivagens não existentes em granitos e gnaisses. De forma geral as rochas metassedimentares, mesmo em maiores graus metamórficos apresentam comportamento aquífero mais favorável à circulação da água, quando comparados aos sistemas associados a rochas cristalinas

(granitos, gnaisses, granulitos, gabros, etc.).

POTENCIAL PARA ABASTECIMENTO

Os reservatórios com comportamento de dupla porosidade devem ser considerados como importante fonte para abastecimento de água, com potencial de produtividade, no geral, de baixa a moderada. Tal variabilidade ocorre conforme as possibilidades de variações geológicas (litológicas e estruturais), climáticas (pluviometria) e de condições morfológicas do relevo.

Ou seja, estas variações são decorrentes das diferentes contribuições da porosidade matricial e planar. Nos casos em que há convergência das duas contribuições, nos sistemas de dupla porosidade, ocorrem as vazões consideradas anômalas. Quando a porosidade matricial é a principal e com valores reduzidos (menores que 8%) as menores vazões são observadas.

Comparativamente, estes reservatórios têm valores médios de parâmetros hidrodinâmicos inferiores àqueles do tipo essencialmente intergranular, e por outro lado, são melhores que os aquíferos exclusivamente fraturados de qualquer parte do embasamento cristalino (rochas plutônicas, vulcânicas, e metamórficas,) do Brasil, principalmente os da região Nordeste.

Outro argumento é relacionado à sensibilidade das características construtivas dos poços. Em sistemas exclusivamente intergranulares a posição dos filtros (por exemplo) não altera muito a vazão final. Para aquíferos mistos as seções filtrantes, posição da bomba, granulometria do pré-filtro causam um forte efeito sobre a produtividade dos poços. Quando os filtros não estão na zona de maior fraturamento em que os arenitos/quartzitos ainda contenham porosidade intergranular pode haver redução drástica da vazão potencial dos poços. Há ainda, na maioria dos casos, a necessidade de revestimento em zonas friáveis, o que não ocorre em poços de sistemas exclusivamente fraturados em que a rocha apresenta naturalmente maior coesão.

CONDIÇÕES HIDRÁULICAS

Os aquíferos constituídos por material com dupla porosidade no geral estão associados às sequências de rochas sedimentares com considerável litificação, cimentação e/ou sequências metassedimentares de baixo grau metamórfico.

Estes quando se aproximam da condição típica (porosidade 50% primária intergranular e 50% secundária planar) configuram reservatórios subterrâneos de meio heterogêneo e anisotrópico, de comportamento hidráulico variável e de complexa avaliação, conforme a forma de ocorrência da sucessão e empilhamento de fácies sedimentares, bem como o grau de litificação e de metamorfismo.

O armazenamento e circulação das águas em aquíferos de dupla porosidade se dão de forma complexa e distinta, pois apresentam características em comum (e simultaneamente) em relação aos modelos clássicos aplicados a sistemas intergranulares homogêneos e isotrópicos e fraturados heterogêneos anisotrópicos. Dentre as principais feições que podem ser utilizadas para distinção destes sistemas destacam-se:

- Capacidade de acumular e transmitir água conforme a ocorrência e quantidade de poros secundários planares (fraturas e/ou acamamento), permitindo a infiltração e circulação de forma turbulenta, potencializadas quando abertas e intercomunicadas (características comuns ao modelo conceitual de fluxo de aquífero fraturado ou fissural) e
- Tem capacidade de armazenar e transmitir água através de espaços vazios entre grãos do arcabouço, sendo que o fluxo preferencial da água ao longo da camada sedimentar aquífera ocorre de forma laminar (características comuns ao modelo conceitual de fluxo de aquífero intergranular).

Desta forma, os modelos clássicos de fluxos para aquíferos intergranulares homogêneos e isotrópicos e aquíferos fraturados heterogêneos anisotrópicos não podem ser aplicados como modelo conceitual para os aquíferos de dupla porosidade.

O cálculo de parâmetros hidrodinâmicos através de testes de bombeamento em poços tubulares, que captam reservatórios com fluxo por dupla porosidade, deve obedecer criteriosamente todos os parâmetros levantados comuns ao meio. Alguns softwares comerciais para tratamento de dados de bombeamento, já oferecem como método de cálculo o modelo de dupla porosidade. No entanto, mesmo sendo recentes, estes consideram o modelo dupla porosidade como um subtipo do modelo fraturado, o que não gera problema algum para o cálculo, mas pode levar a resultados ambíguos.

No geral, os parâmetros hidráulicos dos reservatórios controlados por fluxo por dupla porosidade tende a ocupar uma condição intermediária em relação aos clássicos modelos intergranular e fraturado. Se por um lado, o condicionante para desenvolvimento de estruturas planares notavelmente abertas é a diminuição dos espaços vazios (entre os grãos) por um cimento ou recristalização diminuindo a capacidade de armazenamento, por outro, as fraturas desenvolvidas podem canalizar fluxos com maiores velocidade.

Num reservatório do tipo intergranular, os poços que bombeiam água proporcionam menores rebaixamentos do que em reservatórios do tipo exclusivamente fraturados. Isto acontece devido às zonas saturadas estarem melhores dispostas e homogeneamente saturadas nos meios intergranulares, ao contrário do que ocorre em reservatórios fraturados, que pode ter zonas aquíferas relacionadas apenas ao um conjunto de fraturas restritas, sem qualquer comunicação hidráulica lateral ou vertical com o restante do aquífero, ou mesmo relacionadas a uma única fratura isolada.

Sendo assim, os reservatórios com dupla porosidade admitem uma forma intermediária entre modelos extremos, podendo apresentar comportamento de capacidade específica com valores intermediários, ou valores que ora se aproximam dos encontrados em aquíferos intergranulares, ora, dos valores verificados aquíferos fraturados, conforme a ocorrência em percentual dos dois tipos de porosidade.

PROPOSTA PARA CLASSIFICAÇÃO

Tendo em vista a necessidade de uma melhor categorização dos tipos de aquífero, neste trabalho será considerado, além das possibilidades de agrupamento classicamente utilizadas (intergranular, fraturada e cárstica), o tipo de dupla porosidade (intergranular/fraturado). Os aquíferos desta natureza constituem aquelas rochas sedimentares como arenitos com considerável grau de litificação ou cimentação, e as sequências metassedimentares como quartzitos e metarritmitos de baixo grau metamórfico. Nestes metassedimentos, os planos de acamamentos são responsáveis por uma anisotropia planar bastante contínua em maciços psamíticos e até psefíticos.

Na presente proposta são considerados aquíferos intergranulares aqueles que apresentarem mais de 75% da porosidade total do tipo intergranular. Aquíferos fraturados serão os que apresentarem mais de 75% dos espaços vazios vinculados a fraturas e outras anisotropias planares. Os demais que se estabelecerem na faixa entre estes limites são classificados como de dupla porosidade (Figura 2).

O termo “porosidade livre para fluxo” utilizado na proposta se refere à porosidade total, soma da porosidade matricial mais a porosidade planar (acamamento ou fraturas) que é livre para o fluxo. Nesta proposta a porosidade livre para fluxo é equivalente à vazão específica aplicada a meios intergranulares.

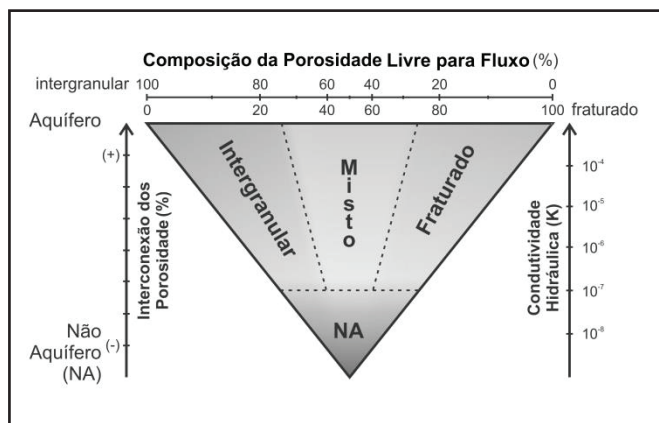


Figura 2 - Proposta para classificação dos tipos de aquíferos, quanto à porosidade

Os limites determinantes para classificação do tipo de aquífero de dupla porosidade não são matematicamente rígidos. Estes, na verdade, são definidos a partir da reunião de informações analíticas e descritivas que realmente comprovem a existência dos dois tipos de porosidade, incluindo:

- Descrições de afloramentos, amostras de mão e seção delgadas que identifique a existência de texturas e estruturas primárias e secundárias simultaneamente;
- Métodos de perfuração de poços tubulares que utilizam maquinários diferentes, sonda rotativa, a percussão e rotopneumática, conforme varia a natureza das camadas;
- Necessidade da utilização de revestimentos e filtros para manter a estabilidade das paredes do poço conforme

o tipo de material;

- Ensaios de bombeamento com menores rebaixamentos e boas capacidades específicas, quando comparados a dados de ensaios em aquíferos exclusivamente fraturado;
- Curvas de rebaixamento versus tempo mais suaves e estabilizadas, quando comparados a dados de ensaios em aquíferos exclusivamente fraturado.

São alguns exemplos de ocorrência de reservatórios de dupla porosidade:

- Aquíferos Furnas e Aquidauana - em algumas regiões próximas a borda norte-noroeste da Bacia sedimentar do Paraná, podem apresentar a porosidade dividida em aproximadamente 25% de porosidade secundária planar e 75% de porosidade primária intergranular;
- Aquífero Botucatu, na região de Mineiros, estado de Goiás - apresenta a porosidade dividida em aproximadamente 20% de porosidade secundária planar e 80% de porosidade primária intergranular; e
- Aquíferos Raizama e Diamantino - têm a porosidade extremamente variável, mas pode chegar em algumas áreas a proporção de 70% de porosidade secundária planar e 30% de porosidade primária intergranular.

Os aquíferos intergranulares são constituídos por rochas sedimentares com arcabouço (grãos, matriz, cimento e porosidade primária) favorável à circulação de água entre os grãos, como por exemplo, arenitos e conglomerados existentes em bacias sedimentares paleo-mesozoicas, e excetuando aquelas condições em que haja ocorrência de cimentação (exemplo, sílica) e fraturamento. Além dos clássicos exemplos também constituem aquíferos deste tipo os depósitos de materiais arenosos e/ou cascalhos inconsolidados, encontrados em aluviões ou bacias sedimentares cenozoicas, e alguns tipos de solos e mantos de alteração (considerados separadamente em relação à unidade subjacente) cuja importância em termos de potencialidade normalmente é mais reduzida em função de menores espessuras saturadas.

São alguns exemplos de ocorrência de reservatórios intergranulares:

- Aquífero Urucuia, a maior parte de sua expressão, ao longo de toda a sua distribuição, apresenta 100% de porosidade do tipo intergranular (GASPAR; CAMPOS, 2007); e
- Aquífero Bauru na região de Araguari, em Minas Gerais, cascalhos e areias não litificadas compõem o arcabouço dos reservatórios responsáveis integralmente pelo abastecimento urbano (OLIVEIRA; CAMPOS, 2003).

Por fim, serão consideradas como litótipos típicos de aquíferos fraturados as rochas ígneas, metamórficas ou cristalinas, densas, litificadas e maciças, onde haja circulação da água através de fraturas e fendas abertas, excetuando aquelas condições em que ocorram baixo grau metamórfico para os metassedimentos.

São exemplos de ocorrência de reservatórios fraturados:

- Aquíferos cristalinos do nordeste do Brasil que apresentam 100% da porosidade constituída por espaços secundários planares associados a fraturas; e
- Aquíferos de embasamento fraturados contendo granitos e gnaisses em Goiás que apresentam espaços para circulação de água relacionados a fraturas (ALMEIDA et al., 2006).

AQUÍFEROS COM DUPLA POROSIDADE DA REGIÃO DO ALTO PARAGUAI

Duas unidades presentes na região do Alto Paraguai no estado do Mato Grosso são tratadas como aquíferos de dupla porosidade e serão utilizadas como exemplos no presente estudo. As formações Raizama e Diamantino são unidades integrantes do Grupo Alto Paraguai e suas principais feições petrográficas e hidrogeológicas permitem classificá-las como aquíferos de dupla porosidade.

ASPECTOS DESCRITIVOS

Formação Raizama

Os litotipos desta formação mostram-se deformados por baixo grau metamórfico e descrevem uma extensa faixa de braquianticlinais e braquissinclinais de direção NE-SW. Em função da propagação do metamorfismo compressivo com sentido SE- NW, no geral, a porção interna da faixa apresenta fácies mais compactas, com crescimento secundário de quartzo, e comumente mais fraturado. Já na porção externa, a norte e noroeste, os litotipos preservam mais as texturas primárias de sedimentação, e os planos de fraturas são menos frequentes.

No município de Nobres, a 13 km a norte pela rodovia BR-163 (BR-364), os afloramentos observados mostram sucessões de camadas decimétricas de arenitos de cor clara a bege e granulação média com intercalações de pelitos e arenito fino arcoseano de coloração avermelhada (Figura 3).



Figura 3 - Exposição de sucessão psamo-pelítica da Formação Raizama. Este conjunto apresenta anisotropias determinadas pelos planos de fraturamento subverticais, além do acamamento

As estruturas primárias encontradas são acamamento de baixo ângulo, 55°/310, marcas onduladas simétricas, e estratificação cruzada tabular. Texturalmente boa parte dos arenitos se mostram submaturos (Figura 4).



Figura 4 - Amostra de mão mostrando textura submatura e considerável porosidade intergranular primária residual nos arenitos da Formação Raizama

Localmente, apresentam-se silicificados (Figura 5), onde fica mais evidente a presença de fraturas, que comumente são abertas ou podem estar preenchidas a partir de infiltração mecânica de argilas.



Figura 5 - Amostra de mão mostrando pequenos planos abertos com alteração ao longo das paredes indicando percolação de água em uma porção silicificada e de pouca porosidade residual matricial da Formação Raizama

Nas seções delgadas produzidas a partir de amostras de diferentes sucessões as texturas primárias e secundárias podem ser facilmente identificadas. Em um mesmo afloramento algumas camadas mostram seus clastos com considerável grau de arredondamento, ausência de recristalizações ou estiramento dos grãos (Figura 6a), e em outras camadas mostram registros de desenvolvimento de porosidade secundária gerada por fraturas abertas e intersticiais em função da solubilização de cimentos e matriz (Figura 6b).

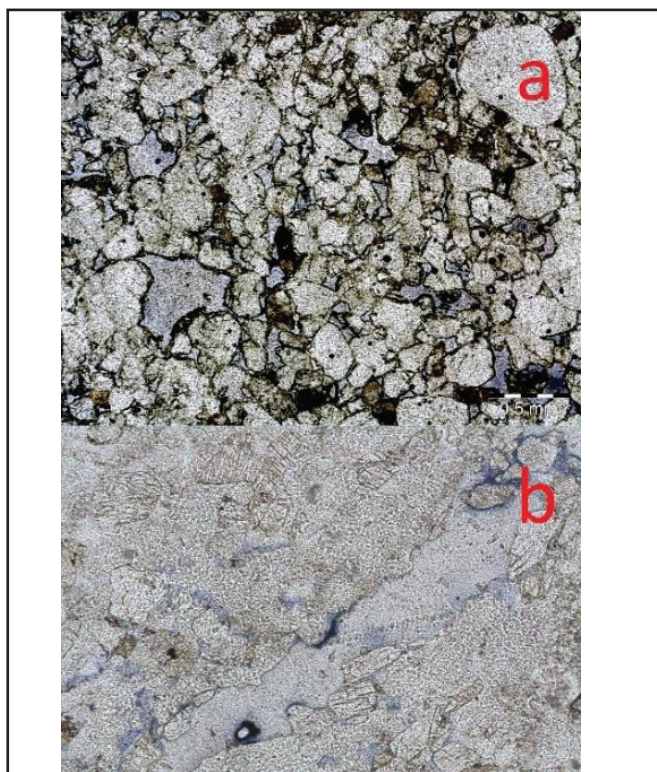


Figura 6 - (a) Seção delgada com nicois paralelos mostrando porosidade intergranular primária existente nos arenitos da Formação Raizama. (b) Seção com nicois paralelos mostrando o plano de fratura responsável pelo amplo volume de porosidade da rocha



Figura 7 - Metapsamito que compõe aquífero de dupla porosidade em que a porosidade planar pode ser primária (plano de acamamento) ou secundária (plano de fraturamento), além da porosidade residual de caráter matricial (porosidade intergranular)

No município de Cáceres, em seção que atravessa a Serra do Mangaval pela rodovia BR-070, as exposições da Formação Raizama constituem-se essencialmente de quartzitos e metarritmitos. Estas rochas apresentam cor bege a amarelado e róseo são dobrados com eixos de braquianticlinais e braquissinclinais alinhados segundo a direção N-S, além de ocorrerem intensamente fraturadas. Planos abertos são frequentemente observados através de superfícies de acamamento abertos por alívio de pressão e fraturas abertas perpendiculares aos estratos primários (Figura 7).

Formação Diamantino

Os litotipos desta formação constituem a parte mais jovem da extensa faixa de braquianticlinais e braquissinclinais de direção NE-SW. Apresentam variação de intensidade da deformação conforme a proximidade da fonte do calor do metamorfismo oriundo de sudeste.

Nos Municípios de Diamantino, Alto Paraguai e Nor-telândia afloramentos da Formação Diamantino podem ser observados ao longo do eixo da rodovia MT-240. Na seção superior ocorrem sequências de siltitos e folhelhos de coloração variando entre tons avermelhados e cremes, sendo finamente laminados e com estratos horizontais.

Na porção basal são encontrados arenitos arcoseanos, de granulometria fina, normalmente muito litificados, de coloração rósea a avermelhada e com estratos horizontais plano-paralelos (Figura 8). Nos locais de extração do arenito para produção de paralelepípedos a rocha apresenta alto grau de compactação e menor densidade de faturamento.

No município de Porto Estrela, distante 38 km ao sul de sua sede e próximo a Comunidade de Salobra Grande, afloramentos podem ser vistos ao longo da rodovia MT-343 mostrando pequenos lajedos de arenitos finos de cor rósea a avermelhado e composição arcoseana, e siltito avermelhado, sendo ambos em geral, intensamente fraturados (Figura 9).



Figura 8 - Arenito arcoseanolitificado com planos de acamamento horizontal da Formação Diamantino



Figura 9 - Arenito arcoseano verticalmente fraturado da Formação Diamantino. Além de intensamente fraturado contém porosidade matricial, evidenciado pelo seu caráter friável mesmo em amostras de rocha fresca

ASPECTOS HIDRODINÂMICOS

Aquífero Raizama

A polygonal deste aquífero é distribuída sobre uma extensa faixa alongada arqueada com direção nordeste - sudoeste e parte interna voltada para sudeste. São constituídos por metassedimentos deformados em baixo grau metamórfico com braquianticlinais e braquissinclinais que acompanham a mesma direção NE-SW, sendo os arenitos e ortoquartzitos os litotipos mais favoráveis para armazenamento e produção de água. Constituem a porção inferior da sequência do Grupo Alto Paraguai, subjacente a Formação Diamantino, e está sobreposto aos calcários da Formação Araras. Sua extensão é regional e ocorre de forma heterogênea, livre, e secundariamente semi-confinado (confinado-drenante), quando recoberto por fácies metapelíticas da Formação Diamantino. Hidraulicamente, o aquífero é anisotrópico, de baixa permeabilidade, e com circulação condicionada a porosidades planares (fraturas, falhas e planos de acamamentos) e intergranulares (primárias e secundárias por dissolução de cimentos e grãos instáveis).

Dentre os registros de poços tubulares cadastrados na base de dados do Sistema de Informação de Águas Subterrâneas - SIAGAS (CPRM, 2013), que captam do aquífero Raizama, os poços selecionados (Figura 10) apresentam profundidades que variam de 72 a 120 metros, com média 93 metros, e diâmetros, em geral, de 12 polegadas para os primeiros intervalos que incluem a zona intemperizada e 6 polegadas para os demais intervalos (Tabelas 1 e 2).

No geral, estes poços podem apresentar padrões construtivos semelhantes a poços que captam aquíferos exclusivamente fraturados e a poços que captam aquíferos exclusivamente intergranulares. As características existentes comuns a poços que captam aquíferos fraturados são: método de perfuração percussivo, utilizado no poço com registro 5200006668, para atravessar sequências de arenitos e argilitos provavelmente silicificados, e perfis construtivos sem qualquer necessidade de utilização de

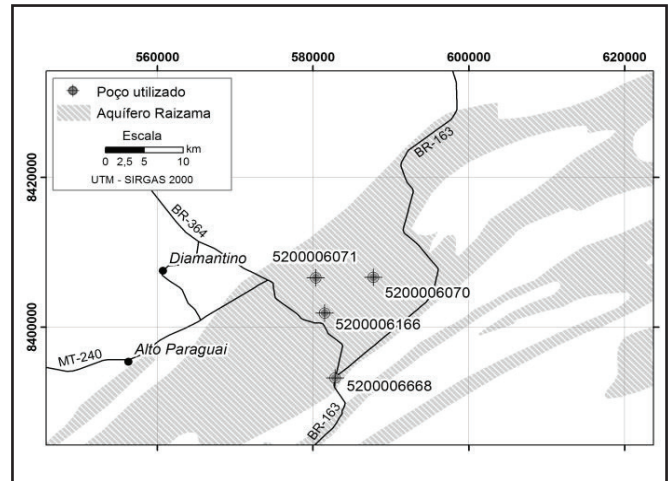


Figura 10 - Localização dos poços utilizados para o Aquífero Raizama

Tabela 1 - Informações sobre os poços de registro 5200006166 e 5200006668

Poço	5200006166	5200006668
Profundidade (m)	80	72
Método Perfuração	Rotativo	Percussão
Diâmetro (polegadas)	0 a 68 m: 12" 68 a 80 m: 6"	0 a 20 m: 12" 20 a 72 m: 10"
Revestimento e Filtro (m)	0 a 48 / 60 a 68: Revestimento; 48 a 68: Filtro	0 a 30 / 32 a 36 / 38 a 46 / 54 a 66 / 68 a 72: Revestimento diâmetro 4"; 30 a 32 / 36 a 38 / 46 a 54 / 66 a 68: Filtro diâmetro 4"
Uso	Abastecimento público, urbano	Abastecimento privado, doméstico
Situação	Bombeando	Bombeando
Tipo de teste	Contínuo com bomba submersa	Contínuo com bomba submersa
Vazão de teste inicial (m ³ /h)	4,8	8
Vazão de teste inicial (m ³ /h)	3,9	4
Estabilização da vazão de teste	Sim, 660 a 1440 minutos	Sim, de 480 a 1440 minutos
Nível Estático (m)	10,3	11
Nível Dinâmico (m)	61,8	29
Estabilização do Nível Dinâmico	Não	Sim, de 480 a 1440 minutos

Tabela 2 - Informações sobre os poços de registro 5200006070 e 5200006071

Poço	5200006070	5200006071
Profundidade (m)	100	120
Método Perfuração	Rotativo	Rotativo
Diâmetro (polegadas)	0 a 40 m: 9” 40 a 100 m: 6”	0 a 36 m: 12” 36 a 120 m: 6”
Revestimento e Filtro (m)	0 a 40: Revestimento diâmetro 6”	0 a 36: Revestimento diâmetro 6”
Uso	Abastecimento privado, doméstico	Abastecimento privado, doméstico
Situação	Bombeando	Bombeando
Tipo de teste	Contínuo com bomba submersa	Contínuo com bomba submersa
Vazão de teste inicial (m³/h)	8,8	2,8
Vazão de teste inicial (m³/h)	8,5	2,1
Estabilização da vazão de teste	Sim, de 300 a 1440 minutos	Sim, de 240 a 1440 minutos
Nível Estático (m)	10,3	8,9
Nível Dinâmico (m)	42,2	94,4
Estabilização do Nível Dinâmico	Sim, de 1020 a 1440 minutos	Sim, de 1140 a 1440 minutos

revestimentos para dar estabilidade às paredes do poço, como registrado nos intervalos posteriores a zona intemperizada nos poços 5200006166, 5200006071 e 5200006070. As características existentes comuns a poços que captam aquíferos intergranulares são: método de perfuração rotativo, como verificado nos poços com registros 5200006166, 5200006071 e 5200006070, e perfil construtivo com utilização de revestimento por tubos cegos e filtros de PVC geomecânico para garantir a estabilidade das paredes do poço, no registro 5200006668.

Nos testes de rebaixamento, utilizando bombas submersas, os poços foram bombeados com vazões que variam de 2,1 a 8,8 m³/h com média de 4,6 m³/h, apresentando rebaixamentos entre 18 e 85,5 metros, com média 43,7 metros, e capacidades específicas variando de 0,02 a 0,26 m³/h/m com média 0,14 m³/h/m.

As curvas apresentadas no gráfico de rebaixamento versus tempo apresentaram comportamentos distintos (Figura 11).

Um primeiro comportamento pode ser verificado a partir da análise da curva de rebaixamento com padrão de decaimento bastante suave e de estabilização contínua que deve estar associada a intervalos litológicos mais homogêneos de sedimento arenosos, como registrado no poço número de 5200006668. O outro comportamento é verificado nas curvas onde não existe o padrão de estabilização, mas sim um padrão do tipo “Z” alongado, como registrado nos poços 5200006166, 5200006071 e

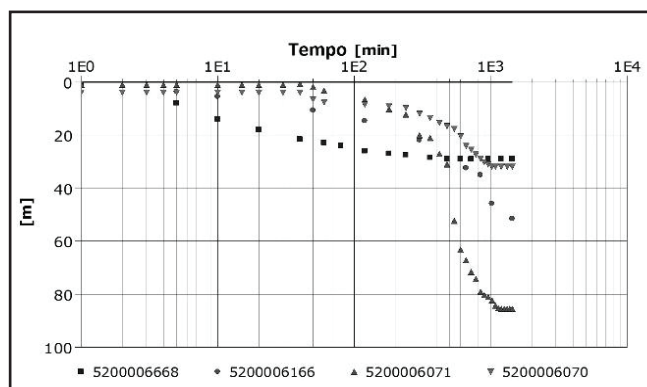


Figura 11 - Gráfico rebaixamento x log-tempo de testes de bombeamento realizado no aquífero Raizama

5200006070, e que deve estar relacionado à presença de materiais associados a rochas sedimentares, e/ou metassedimentares de baixo grau metamórfico com variações faciológicas de camadas ora aquíferas ora não aquíferas. O padrão destas curvas implica que a vazão utilizada durante o teste deve ser maior do que a capacidade do aquífero em fornecer água ao poço.

Os valores calculados para a condutividade hidráulica e transmissividade através dos métodos aplicados a aquíferos de dupla porosidade e fraturado de Moench e para aquíferos intergranulares livres de Cooper & Jacob são apresentados na tabela 3.

Em função das informações observadas quanto à descrição dos perfis litológicos, dados construtivos e valores de vazão e rebaixamento, é considerado que o aquífero Raizama apresente um comportamento do tipo dupla porosidade. Em relação aos métodos de tratamento dos dados de rebaixamento,

Tabela 3 - Transmissividade e condutividade hidráulica calculadas a partir de ensaios de bombeamento no aquífero Raizama. K em m/s e T em m²/s

Método		Dupla porosidade	Fratura de Moench	Cooper & Jacob
5200006668	T	6,9x10 ⁻²	2,9x10 ⁻⁵	7,0x10 ⁻²
	K	1,1x10 ⁻³	4,7x10 ⁻⁷	1,1x10 ⁻³
5200006166	T	1,2x10 ⁻²	6,0x10 ⁻⁶	4,0x10 ⁻²
	K	1,7x10 ⁻⁴	8,6x10 ⁻⁸	5,8x10 ⁻⁴
5200006071	T	2,6 x 10 ⁻³	4,4 x 10 ⁻⁷	2,4 x 10 ⁻²
	K	2,3x10 ⁻⁵	3,9x10 ⁻⁹	2,1x10 ⁻⁴
5200006070	T	3,1x10 ⁻²	8,8x10 ⁻⁶	1,5x10 ⁻¹
	K	3,4x10 ⁻⁴	9,8x10 ⁻⁸	1,7x10 ⁻³

o aquífero responde melhor ao método aplicado a aquífero fraturado de Moench nos registros 5200006668 e 5200006070. Apesar de apresentar comportamento de dupla porosidade, a componente de fluxo controlada por fraturas deve ocorrer com certa predominância, resultando em melhores ajustes das curvas de rebaixamento versus log-tempo para este método. Além do modelo para aquífero fraturado de Moench, estes poços apresentaram ajustes compatíveis com o modelo de dupla porosidade, no entanto, os valores obtidos para transmissividade e condutividade não permitem uma compatibilização com os baixos valores de capacidades específicas e especificação dos perfis litológicos verificados. Em relação ao modelo Cooper & Jacob, que é mais habitual para aquíferos livres e intergranulares, as curvas pouco se aproximaram ao ajuste de padrão linear do gráfico rebaixamento versus log-tempo.

Os registros 5200006166 e 5200006071 não foram considerados para o cálculo dos parâmetros hidrodinâmicos médios, visto que o primeiro não estabilizou o rebaixamento e o segundo não se ajustou de forma aceitável em qualquer um dos três modelos utilizados. Muito provavelmente, estes poços devem estar relacionados a conjuntos de camadas do aquífero que apresentam o comportamento exclusivamente fraturado. Apesar dos valores de condutividade e transmissividade terem sido calculados por diferentes métodos, é importante destacar que estes parâmetros, por definição, têm conceitos relacionados à espessura do aquífero, e por se tratar de poços parcialmente penetrantes, estes valores são superestimados refletindo apenas um valor aproximado para o aquífero relacionado exclusivamente para cada poço.

Os valores de transmissividade verificados nos poços para o Aquífero Raizama são em média na ordem de grandeza de 10^{-5} m²/s. E os valores de condutividade hidráulica, em média 10^{-7} m/s. Estes valores representam a condição em que o aquífero tem dupla porosidade, permitindo a estabilização das vazões e rebaixamento mesmo em situações em que poços utilizam pequenas espessuras penetrantes.

Aquífero Diamantino

O aquífero ocorre sobre a mesma faixa alongada arqueada constituída por braquianticlinais e braquissincliniais com direção nordeste - sudoeste em que se encontram a Formação Raizama e Formação Araras. No entanto, também é importante destacar a porção oeste setentrional onde a unidade ocorre menos deformada e parcialmente recoberta pelos sedimentos da Formação Pantanal. Os litotipos mais favoráveis para circulação de água são arcóseo e metarcóseos. Constituem a porção superior da sequência do Grupo Alto Paraguai, sobrejacente a Formação Raizama. Sua extensão é regional, ocorrendo de forma heterogênea, livre, e secundariamente semiconfinado (confinado-drenante), quando recoberto pela Formação Pantanal. Hidraulicamente, o aquífero se comporta de forma similar ao Aquífero Raizama, sendo anisotrópico, de baixa permeabilidade, e com circulação condicionada a porosidade planar e intergranular.

Para os registros de poços tubulares cadastrados na base de dados do SIAGAS (CPRM, 2013), que captam do aquífero Diamantino, os poços selecionados (Figura 12) apresentam profundidades que variam entre 56 a 100 metros, com média

73 metros, e diâmetros variáveis de 14 a 12 polegadas para os primeiros intervalos que incluem a zona intemperizada e diâmetros de 6 polegadas para intervalos com maiores profundidades (Tabelas 4 e 5).

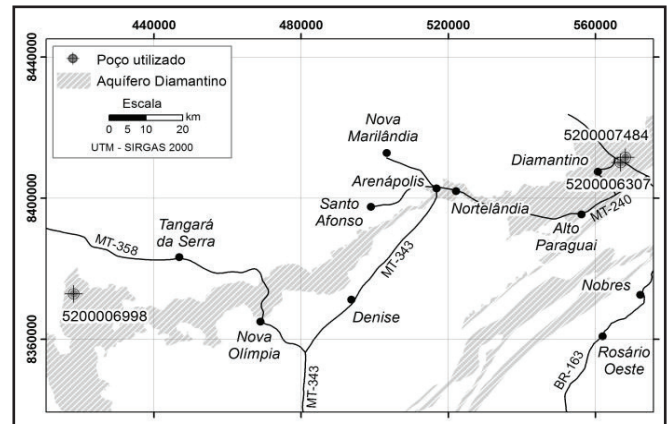


Figura 12 - Localização dos poços utilizados para o Aquífero Diamantino

Tabela 4 - Informações sobre os poços de registro 5200006307 e 5200006998

Poço	5200006307	5200006998
Profundidade (m)	56	100
Método Perfuração	Rotativo	Roto-percussão
Diâmetro (polegadas)	0 a 56 m: 4"	0 a 8 m: 12"; 8 a 13 m: 10"; 13 a 100 m: 6"
Revestimento e Filtro (m)	0 a 26 / 28 a 30 / 32 a 36 / 38 a 42 / 44 a 48 / 50 a 54: Revestimento diâmetro 4"; 26 a 28 / 30 a 32 / 36 a 38 / 42 a 44 / 48 a 50: Filtro diâmetro 4"	0 a 15: Revestimento diâmetro 6"
Uso	Abastecimento privado, industrial	Abastecimento público, urbano
Situação	Bombeando	Bombeando
Tipo de teste	Contínuo com bomba submersa	Contínuo com bomba submersa
Vazão de teste inicial (m ³ /h)	3,9	29,3
Vazão de teste inicial (m ³ /h)	2,7	22
Estabilização da vazão de teste	Sim, de 480 a 1440 minutos	Sim, de 1200 a 1440 minutos
Nível Estático (m)	10	0
Nível Dinâmico (m)	40	48
Estabilização do Nível Dinâmico	Sim, de 480 a 1440 minutos	Não

Tabela 5 - Informações sobre o poço de registro 5200007484

Poço	5200007484
Profundidade (m)	62
Método Perfuração	Rotativo
Diâmetro (polegadas)	0 a 62 m: 6"
Revestimento e Filtro (m)	0 a 30 / 34 a 38 / 42 a 46 / 50 a 54 / 58 a 62: Revestimento diâmetro 6"; 30 a 34 / 38 a 42 / 46 a 50 / 54 a 58: Filtro diâmetro 6"
Uso	Abastecimento privado, rural
Situação	Bombeando
Tipo de teste	Contínuo com bomba submersa
Vazão de teste inicial (m³/h)	6,8
Vazão de teste inicial (m³/h)	5
Estabilização da vazão de teste	Sim, de 60 a 1440 minutos
Nível Estático (m)	10
Nível Dinâmico (m)	32
Estabilização do Nível Dinâmico	Sim, de 60 a 1440 minutos

Estes poços também apresentam padrões construtivos semelhantes a poços que captam aquíferos tipicamente fraturados e a poços que captam aquíferos tipicamente intergranulares. As características comuns aos fraturados são: método de perfuração roto-percussivo para atravessar seqüências de arenitos, provavelmente, silicificados intercalados com folhelhos, e perfis construtivos sem utilização de revestimentos, como registrado nos intervalos posteriores a zona intemperizada no poço número 5200006998. As características comuns aos aquíferos intergranulares perfuração por método rotativo, e perfil construtivo com uso de revestimentos e filtros para suporte das paredes dos poços, como utilizado nos poços 5200006307 e 5200007484.

Para os ensaios de bombeamento com uso de bombas submersíveis, os poços geraram vazões variáveis de 2,7 a 22,0 m³/h com média de 9,9 m³/h, rebaixamentos entre 22 e 46 metros, média de 32,7 metros, e capacidades específicas de 0,09 a 0,48 (m³/h)/m com média de 0,26 (m³/h)/m.

As curvas apresentadas no gráfico de rebaixamento-tempo se apresentam com dois padrões distintos (Figura 13). O primeiro tipo pode ser verificado através dos registros 5200006307 e 5200007484 que têm as curvas de rebaixamento com padrão de decaimento mais suave e de estabilização contínua. O outro é verificado no registro 5200006998, em que a curva apresenta um padrão do tipo "Z" alongado e que na medida em que se dá o bombeamento não ocorre estabilização do rebaixamento.

Os valores calculados para a condutividade hidráulica e para a transmissividade com auxílio dos métodos aplicados a aquíferos de dupla porosidade, fraturados de Moench e de Cooper & Jacob estão organizados na tabela 6.

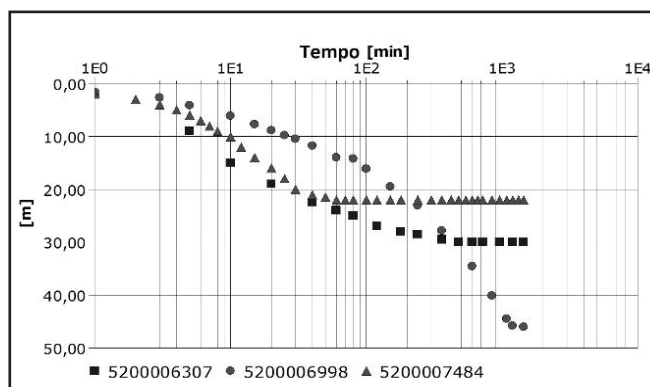


Figura 13 - Gráfico rebaixamento x log-tempo de testes de bombeamento realizado no aquífero Diamantino

Tabela 6 - Transmissividade e condutividade hidráulica calculados a partir de ensaios de bombeamento no aquífero Diamantino. K em m/s e T em m²/s

Método	Dupla porosidade	Fratura de Moench	Cooper & Jacob	
5200006307	T	$4,9 \times 10^{-2}$	$8,6 \times 10^{-6}$	$5,7 \times 10^{-2}$
	K	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,8 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-3}$
5200006998	T	$1,1 \times 10^{-1}$	$3,5 \times 10^{-5}$	$2,8 \times 10^{-1}$
	K	$1,2 \times 10^{-3}$	$3,6 \times 10^{-7}$	$2,8 \times 10^{-3}$
5200007484	T	$1,1 \times 10^{-1}$	$1,1 \times 10^{-1}$	$1,3 \times 10^{-1}$
	K	$2,2 \times 10^{-3}$	$2,2 \times 10^{-3}$	$2,6 \times 10^{-3}$

Analisando os resultados, conforme os modelos aplicados, e confrontando as informações de descrição dos perfis litológicos e construtivos, valores de vazão e rebaixamento pode-se considerar que o Aquífero Diamantino apresenta comportamento de dupla porosidade, identificado nos registros 5200006307 e 5200007484, em que as vazões e rebaixamentos são estabilizados. Como os valores obtidos para transmissividade e condutividade devem ser compatíveis com os baixos valores de capacidades específicas verificados, o primeiro registro, de número 5200006307, apresentou resultado compatível com o modelo Fratura de Moench e inclusive um melhor ajuste da curva de rebaixamento versus log-tempo. Já no poço de registro 5200007484, os valores de transmissividade e de condutividade hidráulica calculados se mostraram muito elevados, não permitindo uma equivalência em termos de potencialidade com os dados descritivos do aquífero e com os dados analíticos do próprio teste de bombeamento. Isto é, os valores elevados não são compatíveis com o comportamento esperado para uma seção de 62 metros de pelitos (ou metapelitos) com nível estático de 10 metros e capacidade específica 0,2 (m³/h)/m. Por outro

lado, isoladamente, o comportamento verificado para o registro 5200006998 deve estar relacionado a fluxos controlados por fraturas existentes em camadas de porosidade planar, uma vez que durante o teste de rebaixamento a vazão e o nível dinâmico não foram estabilizados.

Os valores de transmissividade e condutividade hidráulica do Aquífero Diamantino, verificados para o único registro com resultado satisfatório, são da ordem de grandeza 10^{-6} m²/s e 10^{-7} m/s respectivamente. Estes valores representam apenas a porção, ou conjunto de camadas, do aquífero em que existe dupla porosidade. Também é importante destacar que estes valores de parâmetros hidrodinâmicos devem estar subestimados em função de não representarem a totalidade da espessura do aquífero, mas sim à fração relacionada com a seção perfurada.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Além dos aquíferos de dupla porosidade citados neste trabalho, outros exemplos que apresentam características semelhantes quanto à sua gênese, evolução diagenética e regimes de deformação pós-deposicional podem ser lembrados. Os reservatórios constituídos por rochas metassedimentares de muito baixo grau metamórfico, como metapsamíticos associados a metapelitos e/ou metapsefitos, são sugestivos de apresentar comportamento de fluxo controlado por dupla porosidade. São exemplos de reservatórios que apresentam esse comportamento em pelo menos algumas áreas de ocorrência:

- Sistema Aquíferos Aguapeí, situado na Província Sunsás;
- Aquíferos Raizama, Diamantino e Paranoá, localizados na Província Tocantins; e
- Aquíferos Bebedouro, Morro do Chapéu, Caboclo, Tombador e Formação Três Marias do Grupo Bambuí, associados ao Cráton São Francisco.

Também podem ser citados como exemplos de reservatórios de dupla porosidade os sedimentos de algumas bacias sedimentares proterozoicas que apresentam porosidade intergranular residual e secundária por fratura, como por exemplo, rochas associadas às formações Dardanelos, Beneficente e Palmeiral, relacionadas ao Cráton Amazônico.

Além destes, os reservatórios de bacias paleozoicas, caracterizados por sedimentos de forte compactação, acentuada litificação e desenvolvimento de fraturas, pode apresentar comportamento de aquífero intergranular e fraturado simultaneamente. São exemplos que devem ser lembrados nesta categoria de aquíferos em pelo menos algumas porções de sua ocorrência (principalmente em área aflorante e em menores ocorrências quando confinados):

- Sistemas Aquíferos Furnas e Aquidauana, pertencentes à Bacia do Paraná;
- Aquífero Tacaratu, da Bacia do Jatobá; e
- Sistema Aquífero Serra Grande, localizado na Bacia do Parnaíba.

Outro exemplo importante, de idade mesozoica, é representado por algumas áreas de ocorrência do Sistema Aquífero Guarani, localizado na Bacia do Paraná, que apresenta arenitos silicificados intensamente fraturados.

É importante destacar que boa parte destes aquíferos pode apresentar padrões variáveis quanto ao tipo de fluxo das águas subterrâneas. Um reservatório constituído por metassedimentos de uma sequência de baixo grau metamórfico pode apresentar um comportamento exclusivamente fraturado para as zonas mais próximas do núcleo do orógeno, um comportamento essencialmente intergranular para aquelas zonas mais externas, e um comportamento misto, de dupla porosidade, para as zonas intermediárias. Em relação aos reservatórios constituídos por sedimentos de bacias, os padrões divergem em intergranular e de dupla porosidade, conforme a intensidade de atuação dos processos diagenéticos aditivos (cimentação, compactação e infiltração mecânica de argilas) aos quais os materiais tenham sido submetidos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil, pelo fornecimento de dados de poços do Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS), oriundos de um convênio com a Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado de Mato Grosso.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L.; RESENDE, L.; RODRIGUES, A. P.; CAMPOS, J. E. G. *Hidrogeologia do estado de Goiás e Distrito Federal*. Goiânia, GO: Secretaria de Indústria e Comércio, Superintendência de Geologia e Mineração, 2006. (Geologia e Mineração).
- BARENBLATT, G. I.; ZHELTOV, I. P.; KOCHINA, I. N. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks. *J. Appl. Math. Mech.*, v. 24, n. 5, p. 1286-1303, 1960.
- BÄUMLE, R. *Geohydraulic Characterisation of Fractured Rock Flow Regimes: Regional Studies in Granite and Dolomite*. 2003. 149 p. Tese (Doutorado em Ciências Naturais) - Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, Germany, 2003.
- BERRYMAN, J.; WANG, H. F. The elastic coefficients of double-porosity models for fluid transport in jointed rock. *J. Geophys. Res.*, v. 100, n. B12, p. 24611-24627, Dec. 1995.
- BESKOS, D. E.; AIFANTIS, E. C. On the theory of consolidation with double porosity. *Int. J. Eng. Sci.*, v. 24, n. 11, p. 1697-1716, 1986.
- BOMFIM, L. F. C. *Mapa de domínios e subdomínios hidrogeológicos do Brasil*. Salvador, BA: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) - Serviço Geológico do Brasil, 2007. CD-ROM. Escala 1:2.500.000.

COSTA ALMEIDA, C. A. *Hidrogeologia do Algarve Central*. 1985. 333 p. Tese (Doutorado em Geologia, especialidade Hidrogeologia) - Universidade de Lisboa, Portugal, 1985.

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. *SLAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas. Base do Banco de dados*. Rio de Janeiro, RJ, 2013.

DINIZ, J. A. O.; MONTEIRO, A. B.; SILVA, R. C.; DE PAULA, T. L. F. *Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo*. Recife, PE: Programa de Cartografia Hidrogeológica. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) - Serviço Geológico do Brasil, 2014.. Nota Técnica, 45 p. il. 1 mapa, color., 178 cm x 91 cm. Escala 1:5.000.000. CD-ROM.

FONTENELE, L. G.; DOS SANTOS, J. S. Uso de Modelos de Hidráulica de Poços em Aquífero Fissurais. In: CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, 4., 2009, Belém, PA. *Anais...* Belém: CONNEPI, 2009. v. 1.

GASPAR, M. T. P.; CAMPOS, J. E. G. O Sistema Aquífero Urucuia. *Rev. Bras. Geociênc.*, v. 37, n. 4, p. 216-226, dez. 2007. Supl. 1.

HEATH, R. C. *Basic Ground Water Hydrology*. United States: North Carolina Department of Natural and Community Development, 1983. (Geological Survey Water Supply Paper; 2220).

KRUGLOV, V. P.; BALLESTEROS, J. A. *Mapa Hidrogeológico de Cuba*. Havana, Cuba: Ministerio de Industrias, Instituto Cubano de Recursos Minerales, Departamento Científico de Geología y Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, 1965. Mapa, color., 48 cm x 120 cm. Escala 1:1.000.

LINS JUNIOR, A. G. *Injeção de Vapor em Reservatórios Heterogeneos com Dupla Porosidade*. 1991. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1991.

LOUSADA, E. O.; CAMPOS, J. E. G. Proposta de modelos hidrogeológicos conceituais aplicados aos aquíferos da região do Distrito Federal. *Rev. Bras. Geociênc.*, v. 35, n. 3, p. 407-414, set. 2005.

LYCZKOWSKI, R. W. Multi-dimensional simulation of flow nonuniformities in fissured porous media. *Chem. Eng. J.*, v. 24, n. 1, p. 7-26, 1982.

MACHADO, J. L. F. *Mapa Hidrogeológico de Santa Catarina*. Porto Alegre, RS: Programa Disponibilidade Hídrica do Brasil, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) - Serviço Geológico do Brasil. Mapa, color., 119 cm x 84 cm. Escala 1:500.000. 2013. CD-ROM.

MALOSZEWSKI, P.; STICHLER, W.; ZUBER, A.; RANK, D. Identifying the flow systems in a karstic-fissured-porous aquifer,

the Schneealpe, Austria, by modelling of environmental ^{18}O and ^3H isotopes. *J. Hydrol.*, v. 256, n. 1-2, p. 48-59, Jan. 2002.

MOENCH, A. F. Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin. *Water Resour. Res.*, v. 20, n. 7, p. 831-846, July 1984.

OLIVEIRA, L. A. *O Sistema Aquífero Guarani no estado de Goiás: distribuição, caracterização hidrodinâmica, hidroquímica, composição isotópica e CFCs*. 2009. 192 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

OLIVEIRA, L. A.; CAMPOS, J. E. G. Sequência Conglomerática do Membro Araguari - Grupo Bauru - Norte do Triângulo Mineiro. *Rev. Geociênc.*, v. 22, n. 1, p. 43-51, 2003.

REIS, J. C. Oil Recovery Mechanisms in Fractured Reservoirs During Steam Injection. In: SOCIETY OF PETROLEUM SYMPOSIUM ON ENHANCED OIL RECOVERY HELD, 7., 1990, Tulsa - Oklahoma. Tulsa: [s.n.], 1990. p. 313-320. (Paper SPE-20204).

STRUCKMEIER, W. F.; MARGAT, J. *Hydrogeological Maps: a guide and a standart legend*. Hannover, Heise, Germany: International Association of Hydrogeologists, 1995. v. 17.

WONG, H.; LEO CHIN, J.; PEREIRA, J.; M, DUBUJET, P. Sedimentation-consolidation of a double porosity material. *Comput. Geotech.s*, v. 34, n. 6, p. 532-538, Nov. 2007.

Contribuição dos autores:

Thiago Luiz Feijó de Paula: Elaboração da metodologia do trabalho, realização da coleta de dados primários e secundários, desenvolvimento de modelo conceitual, tratamento de dados descritivos e analíticos, interpretação dos resultados e fechamento do texto.

José Elói Guimarães Campos: Elaboração e organização da metodologia do trabalho, realização da coleta de dados primários, desenvolvimento de modelo conceitual, interpretação dos resultados e fechamento do texto.