

PERFILAGEM DE POÇOS TUBULARES UTILIZANDO-SE ISÓTOPOS ARTIFICIAIS*

Antônio Plata Bedmar**
Adelbani Braz da Silva***
Paulo Cyro Baptista Escodino***

* Trabalho realizado com auxílio do Conselho Nacional de
Desenvolvimento Científico e Tecnológico — CNPq

** Ministério de Obras Públicas — Espanha

*** Fundação Centro Tecnológico de
Minas Gerais — CETEC

ABSTRACT

Wells profiles using artificial radioactive tracers (Br-82) were obtained in limestone areas of Jaíba, North of Minas Gerais state. Those measurements were done to identify the distribution of the fracture and karstic zones, to calculate the transmissivity value from several points of the aquifer and to obtain informations on flow and water velocity. The results showed that the water circulation in the aquifer is done through well defined fractured zones around the 445 m and 500 m high. The vertical flows in the wells demonstrated that, in some cases, each fracture is part of a system with independent recharge and for this reason were identified some aquifer recharge or discharge zones. The transmissivity values obtained from several points of the aquifer proved to be similar to those found through the pumping tests.

INTRODUÇÃO

O estudo dos fluxos existentes no interior dos poços permite obter informação sobre a velocidade da água no aquífero não perturbado e, portanto, sobre o esquema geral de fluxos do mesmo. Por outro lado permite determinar a locação dos níveis permeáveis nas diferentes áreas do aquífero e identificar zonas de recarga e descarga.

Com o objetivo de se estudar os fluxos de água subterrânea na área do Projeto "Pesquisa e Avaliação de Recursos Hídricos Subterrâneos em Karst, por Sensores Remotos" (Silva, 1979), foi programada a perfilação isotópica de um número elevado de poços. O trabalho experimental realizado durante os meses de Agosto e Setembro de 1978, foi desenvolvido na área do Jaíba, ao norte do Estado de Minas Gerais (Fig. 1).

Devido ao fato da perfilação isotópica ser um ensaio de tipo local, os resultados obtidos não são suscetíveis de extrapolação, a menos que se disponha de ampla informação acerca da homogeneidade do sistema. No caso de aquíferos cársticos, como o em questão, onde as águas circulam através de fendas e canais subterrâneos bem definidos, são necessários ensaios em um número elevado de poços, para que os resultados possam ser considerados representativos. Por esta razão procurou-se estudar o maior número possível de poços. A principal dificuldade encontrada derivou-se da necessidade de utilizar poços sem equipamento para extração de água. A maior parte dos poços da área estavam sendo utilizados para consumo humano ou de gado, o qual constitui uma importante limitação das possibilidades do trabalho.

CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

Tipos de Fluxos

No interior dos poços podem existir fluxos horizontais e verti

cais. Estes últimos podem ser ascendentes ou descendentes.

Quando um poço atravessa um aquífero livre, com uma superfície piezométrica única, os fluxos existentes são, geralmente, horizontais, ainda que existam camadas com diferentes permeabilidades e, portanto, diferentes velocidades do fluxo. O mesmo acontece quando o poço atravessa um aquífero confinado e a permeabilidade das camadas superiores, atingidas pela coluna de água, é desprezível.

Por outro lado, ocorrem fluxos verticais nos seguintes casos:

- Quando o poço põe em comunicação dois aquíferos com superfícies piezométricas diferentes. O fluxo vertical será descendente, se o aquífero superior tiver um nível piezométrico maior do que o aquífero inferior, e será ascendente no caso contrário.
- Quando o poço comunica um aquífero confinado com uma camada superior permeável não saturada (fluxo ascendente).
- Quando penetram no poço águas procedentes de camadas superiores ao nível piezométrico de um aquífero suspenso (fluxo descendente).
- Em alguns casos, podem ocorrer fluxos verticais, quando a direção do fluxo no aquífero se desvia muito da normal ao eixo do poço.

Quando não existem fluxos verticais, os ensaios com traçadores proporcionam um perfil da velocidade do fluxo horizontal. Na presença de fluxos verticais, obtêm-se perfis, que mostram as entradas e saídas de água existentes no poço, assim como o valor dos fluxos em diferentes cotas. Em ambos os casos consegue-se localizar a posição dos diferentes níveis permeáveis do poço (fendas ou trechos fendilhados).

Traçador Utilizado

Todos os ensaios nos poços foram feitos com bromo-82, obtido por irradiação no reator nuclear do brometo de potássio sólido. O material radioativo foi dissolvido com água no campo, e da solução do mesmo, contida numa garrafa de plástico, foram extraídas as frações a utilizar em cada caso, mediante deslocamento com ar comprimido.

Foi utilizada uma remessa de 300 milicúries cada semana, a qual se transportou em carro desde Belo Horizonte até a área do projeto. A preparação do material radioativo foi feita pelo Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN/NUCLEBRÁS.

Para a medida do traçador radioativo injetado nos poços utilizaram-se duas sondas herméticas, com detetor Geiger-Müller, conetadas a medidores com sistema de indicação analógica. (ratemeter).

Procedimentos Experimentais

Medida de Fluxos Horizontais

A técnica experimental, utilizada para a medida da velocidade de fluxos horizontais, está baseada na marcação, com traçador radioativo, de toda a coluna de água do poço, de maneira uniforme. A marcação é feita da forma seguinte:

- a) Uma mangueira de plástico de seção conhecida é introduzida até o fundo do poço, sendo, então, preenchida com a solução radioativa até o nível piezométrico. A mangueira leva no seu extremo inferior um lastro que ajuda a descida.
- b) Quando a mangueira é retirada lentamente, a solução radioativa fica distribuída uniformemente ao longo da coluna de água (a mangueira está aberta nos dois extremos).

Uma vez realizada a marcação da coluna de água, são obtidos perfis verticais de concentração por meio do detetor, o qual se desloca através desta coluna em intervalos regulares. A frequência dos perfis

depende da magnitude do fluxo existente. Logicamente, a concentração de traçador diminui com o tempo nos trechos do poço que tem fluxo. Quando não existe fluxo, a concentração permanece invariável durante longos períodos de tempo. Este método de medida da velocidade do fluxo é conhecido com o nome de método de diluição. (Plata, 1972).

Para obter a lei matemática de variação da concentração de traçador em função do tempo e da velocidade de fluxo, são definidos os seguintes parâmetros:

d = diâmetro do poço;

h = altura de coluna de água em um determinado trecho, onde existe um fluxo horizontal uniforme e estacionário de velocidade V_D (velocidade no aquífero definida pela lei Darcy);

$V_0 = \frac{\pi d^2}{4} \cdot h$, volume da coluna de água no trecho de altura h ;

$S = d \cdot h$, seção do poço em um plano vertical;

V_s , velocidade de circulação da água dentro do poço através da seção S ;

$Q = V_s \cdot h \cdot d$, vazão que circula no poço através de S .

Em tais condições, a concentração de traçador em V_0 , representada por C , diminui em função do tempo, segundo a equação diferencial:

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{C}{V_0} \frac{dv}{dt}; \quad (1)$$

Onde $dv/dt = Q = V_s \cdot h \cdot d$. Substituindo este valor em (1), têm-se:

$$-\frac{dC}{C} = \frac{V_s \cdot h \cdot d}{V_0} dt$$

Integrando-se esta expressão obtém-se:

$$-\ln C_t = \frac{V_s \cdot h \cdot d \cdot t}{V_0} + \ln C_0;$$

$$\ln \frac{C_t}{C_0} = -\frac{V_s \cdot h \cdot d \cdot t}{V_0};$$

$$\frac{C_t}{C_0} = \exp. -\frac{V_s \cdot h \cdot d \cdot t}{V_0}; \quad (2)$$

Sendo C_0 a concentração inicial para $t = 0$ e C_t a existência após um tempo t .

A velocidade da água através do poço, V_s , se relaciona com a velocidade Darcy através do aquífero, V_D , pela expressão:

$$V_s = \alpha V_D; \quad (3)$$

Sendo α um coeficiente que é necessário introduzir para levar em conta a perturbação hidrodinâmica dos fluxos devido a presença do poço. Este coeficiente equivale a relação Q/Q_s , sendo Q_s a vazão que circula através de uma seção do aquífero igual a S .

Substituindo em (2) os valores de V_0 e V_s , obtém-se.

$$\frac{C_t}{C_0} = \exp. -\frac{4\alpha \cdot t \cdot V_D}{\pi \cdot d} \quad (4)$$

Desta expressão é fácil deduzir que o tempo $t_{1/10}$, necessário para que a concentração inicial do traçador se reduza a décima parte, isto é, para que se cumpra $C_t/C_o = 0,1$, será dada por:

$$t_{1/10} = \frac{1,81 \cdot d}{\alpha \cdot V_D}$$
$$V_D = \frac{1,81 \cdot d}{\alpha \cdot t_{1/10}} \quad (5)$$

Esta é a fórmula prática utilizada para efetuar os cálculos de V_D . O valor de $t_{1/10}$ é obtido através do ensaio.

O coeficiente α depende de permeabilidade do tubo de revestimento do poço (permeabilidade dos filtros), da permeabilidade do aquífero e da permeabilidade e dimensões da possível camada de cascalho utilizada, frequentemente, como pré-filtro e disposta em torno da tubulação. Na ausência de tubulação de revestimento ou em tubulação 5 a 10 vezes mais permeável do que o aquífero, obtém-se experimentalmente que o valor de α é igual a 2.

No caso presente não existe tubulação, mas, no entanto o valor de α é difícil de conhecer com precisão. Devido a se tratar de circulação através de fendas, o valor deste coeficiente depende da magnitude e forma das fendas. Com fendas bem abertas e de largura maior do que o diâmetro do poço, o valor de α deve aproximar-se a 1, o que quer dizer que o poço não perturba o fluxo existente no aquífero. Este será o valor utilizado por nós para o cálculo de V_D em função de $t_{1/10}$. Em qualquer caso, o erro cometido por conceito do coeficiente α será, quase sempre, menor do que o erro cometido na determinação de $t_{1/10}$.

Medida de Fluxos Verticais

a) Marcação de toda a coluna de água

O procedimento experimental, descrito no item anterior, para a medida de fluxos horizontais, proporciona também uma indicação inequívoca da existência de fluxos verticais e da magnitude aproximada dos mesmos. Quando se efetua a marcação de toda a coluna de água em um poço que tem fluxo vertical, observa-se que esta coluna se limpa de traçador de uma forma progressiva, começando pelo trecho em que ocorre a entrada de água e terminando no trecho onde se produz a saída. Os sucessivos perfis de concentração tomam uma forma típica, que indica, claramente, a presença de fluxo vertical.

A velocidade do fluxo é obtida comparando os sucessivos perfis de concentração. Se determina a posição, na coluna de água, de pontos das curvas correspondentes a dois perfis consecutivos com a mesma concentração de traçador. A distância entre ambas as posições, dividida pelo tempo transcorrido entre os dois perfis, dá a velocidade do fluxo vertical. Geralmente, o erro que se comete com este procedimento é pequeno. O produto da velocidade pela seção do poço proporciona a vazão que circula por cada trecho.

b) Injeção pontual

O método mais exato para a medida de fluxos verticais é o baseado em uma injeção pontual de traçador. No caso de fluxos suficientemente lentos, após a injeção do traçador na profundidade desejada, desloca-se o detector ao longo do poço, para determinar a posição da nuvem de traçador. Esta operação é repetida periodicamente, obtendo-se assim a posição ocupada pela nuvem em função do tempo. A velocidade do fluxo é calculada a partir da distância vertical percorrida pela nuvem, durante um período de tempo determinado, tomando como posição da nuvem o pico de concentração ou mais exatamente, o centro de gravidade da mesma.

No caso de fluxos verticais muito rápidos, a injeção de traçador é feita com dois detectores introduzidos dentro do poço, a uma distância conhecida. Os dois detectores permanecem fixos e se controla a

passagem da nuvem de traçador por cada um deles. A velocidade se calcula dividindo a distância existente entre os detetores pelo intervalo de tempo entre a passagem da nuvem por cada um deles, tomando, como antes, o pico da curva de passagem ou o centro de gravidade.

TRABALHOS EXECUTADOS

Fazendo uso dos procedimentos experimentais descritos nos itens anteriores, foram estudados, no total, 42 poços. O comprimento total de coluna de água foi 2169 metros. Todos os poços encontravam-se no sistema calcáreo, com exceção dos poços MA-632 e MA-633, os quais cortam uma camada de material detrítico com 35 e 64 metros de espessura, respectivamente, seguida de um calcário branco, decomposto e permeável.

Dos 42 poços estudados, 2 deles não tinham um fluxo detetável, 14 apresentavam fluxo horizontal, em 13 detetou-se fluxo vertical ascendente e em outros 13 observou-se fluxo vertical descendente. Dos 14 poços com fluxo horizontal, 6 deles apresentavam indícios de provável fluxo vertical muito lento ascendente ou descendente.

A profundidade dos poços estudados variou entre 20 e 155 metros, sendo de 75 metros a profundidade média. O comprimento médio da coluna de água por poço foi de 54 metros.

Para descrever os resultados obtidos, os poços serão classificados de acordo com o tipo de fluxo detetado.

RESULTADOS OBTIDOS

Poços com Fluxo Horizontal

Os resultados correspondentes aos 14 poços, que apresentavam somente fluxo horizontal, encontram-se no Quadro 1.

Na Figura 2, se exemplifica o perfil de concentração de traçador de um poço com fluxo horizontal. A concentração dos diferentes perfis é expressa em impulsos ou contagem por segundo, que é o dado fornecido pelo detetor. Tratam-se, portanto, de medidas relativas de concentração, as quais são suficientes para os fins desejados. Todas as medidas foram corrigidas por desintegração do bromo-82 (36 horas de vida média) e por tempo morto ou de resolução do detetor. Esta última correção é devida a que o detetor não responde de forma perfeitamente linear quando o número de impulsos por segundo é muito elevado, como com seqüência das perdas de impulsos por coincidência destes no tempo.

Para cada perfil de concentração, indica-se o tempo transcorrido, t_1 , t_2 , t_3 , etc., medido a partir do primeiro perfil que é considerado como tempo inicial, $t = 0$. Na coluna de observações, indicam-se os parâmetros seguintes:

a) Velocidade do fluxo (V)

A velocidade do fluxo foi obtida através da equação (4), utilizando para o coeficiente α um valor de $\alpha = 1$. O valor de $t_{1/10}$ obtém-se, para cada trecho fendilhado, representando em papel semilogarítmico a concentração média de traçador em função do tempo transcorrido desde a primeira medição, para a qual considera-se $t = 0$. A determinação de $t_{1/10}$ pode estar afetada por um erro provável de, aproximadamente, 50%. Isto é devido, umas vezes, à falta de mais perfis de concentração e outras aos aportes de traçador por difusão e dispersão das zonas da coluna de água próximas ao trecho fendilhado.

b) Transmitância de velocidade (T_v)

Trata-se de um parâmetro obtido multiplicando a velocidade do fluxo pelo comprimento do trecho fendilhado no qual existe esta velocidade. No caso de ocorrerem dois ou mais trechos fendilhados com velocidades diferentes, o valor de T_v é obtido somando os produtos correspondentes a cada trecho, isto é, $T_v = \sum V_i h_i$, sendo h_i o comprimento dos trechos.

Quando T_v é dividido pelo gradiente local do nível piezométrico, obtém-se a transmissividade do poço T.

Os poços MA-632 e MA-633 encontram-se em materiais mais ou menos granulares. Por esta razão, estes são os únicos poços que apresentam um fluxo horizontal, aproximadamente homogêneo, em toda a coluna de água. Os dois poços estão revestidos com tubulação de aço fendilhado em todo o seu comprimento. A densidade de fendilhamento, dada pelo número e tamanho das fendas, é muito pequena. Portanto, neste caso o valor do coeficiente α válido para a equação (4), deve ser muito menor de 1, sendo difícil calcular um valor exato sem conhecer as características do fendilhamento e a permeabilidade do aquífero. As velocidades do fluxo (quadro 1) correspondentes foram calculadas utilizando um valor estimado $\alpha = 0,1$.

Os outros 12 poços com fluxo horizontal encontram-se todos no sistema calcáreo. É de ressaltar que destes 12 poços, 8 deles, têm somente um trecho fendilhado. Geralmente, quando o poço atravessa dois ou mais trechos fendilhados existe fluxo vertical, o que demonstra que os diferentes sistemas de fendas tem diferentes áreas de recarga e, por isto, diferentes níveis piezométricos. Quer dizer, que o aquífero está formado por um número elevado de sistemas de fendas com recarga individual, mais ou menos, relacionados entre si.

No total, foram identificados 31 trechos fendilhados com fluxo horizontal. Os valores da velocidade do fluxo oscilam 2,4 cm/d e 26 m/d. Deixando de considerar 4 valores extremos de 2,4 cm/d, 3,6 cm/d, 13 m/d e 26 m/d, os outros 27 trechos fendilhados tem valores compreendidos entre 14 cm/d e 2,2 m/d, sendo o valor médio para estes últimos trechos de 50 cm/d. No caso de não levar em conta dois trechos com 2,2 m/d, os 29 trechos restantes têm valores que oscilam entre 13 e 66 cm/d com um valor médio de 24 cm/d. Logicamente, na época de chuva, o valor dos fluxos deve aumentar consideravelmente.

Analisando mais detidamente os sucessivos perfis de concentração, chega-se à conclusão de que os poços IT-504, IT-507 e MA-416 têm um pequeno fluxo vertical descendente, devido a que o trecho compreendido entre a fenda, na qual foi detetado o fluxo horizontal, e o fundo do poço não é totalmente impermeável. Da mesma forma os poços MA-15, MA-630 e MA-607 parecem ter um pequeno fluxo vertical ascendente, devido a que o trecho entre a fenda do fluxo horizontal e o nível d'água não é totalmente impermeável.

Poços sem Fluxo

Nos poços MA-203 e MA-05 não foi detetado fluxo nenhum. O poço MA-05 foi perfurado com uma profundidade de 70 metros, mas no momento de realizar a perfilagem isotópica estava obstruído a 39 metros. Portanto é possível a existência de fluxo no trecho inferior e a água pode passar através do entupimento. Devido a isto, considera-se que o teste realizado não é representativo da produtividade deste poço.

O poço MA-203 está locado no meio de uma dolina importante, mas não atravessa nenhum trecho fendilhado com fluxo detetável. Depois de 142 horas de efetuada a injeção de traçador, o perfil de concentração era, praticamente, o mesmo do perfil inicial. Levando em conta os erros prováveis das medições, pode-se dizer que qualquer fluxo horizontal existente deve ser inferior a 0,5 cm/d.

Poços com Fluxo Vertical Descendente

No Quadro 1 estão resumidos os principais resultados obtidos nos poços perfilados, onde, para os 13 poços com fluxo vertical descendente, estão indicadas as posições aproximadas dos trechos permeáveis pelos quais se efetua a entrada e saída de água. O tamanho exato de tais trechos resulta, às vezes, muito difícil de conhecer, sobretudo os correspondentes às saídas d'água. Indicam-se, assim mesmo, as velocidades de fluxo vertical e as vazões correspondentes para diferentes trechos do poço, a exemplo do poço MA-84 (Figura 3).

Na maior parte dos 13 poços com fluxo vertical descendente, o estudo foi realizado somente com o método de marcação de toda a coluna de água. A diminuição progressiva de concentração de traçador de cima para baixo indica a existência de fluxo vertical descendente. O valor da velocidade do fluxo obtém-se a partir da distância entre os dois pontos da mesma concentração de cada dois perfis consecutivos, no trecho da cur

va onde a concentração passa de zero até o valor constante.

Geralmente, o fluxo vertical está caracterizado pela existência de dois trechos fendilhados separados por um trecho impermeável. São nos casos dos poços MA-69, VL-05 e MA-84 observa-se a presença de mais do que dois níveis permeáveis no poço. Em qualquer caso, as zonas permeáveis estão sempre bem localizadas e correspondem a trechos de uns poucos metros.

Para os poços MA-84 e IT-507 foram feitos testes adicionais baseados na injeção pontual do traçador. No caso do poço JN-403, devido a ser muito elevada a velocidade, foi preciso efetuar um teste, no qual o detector colocou-se a 17 metros de profundidade e o traçador foi injetado a 11 metros.

Poços com Fluxo Vertical Ascendente

Os resultados obtidos para os 13 poços com fluxo vertical ascendente são mostrados no Quadro 1. Em 9 poços o fluxo vertical produz-se somente entre dois trechos fendilhados. Os poços restantes têm três níveis permeáveis.

Nos casos dos poços MA-83, MA-145, MA-400, MA-604 e MA-618 foram realizados testes baseados na injeção pontual de traçador. Os poços MA-83 e MA-400 têm duas fendas para a entrada d'água e uma para a saída.

Os poços MA-123, MZ-200 e JN-405 estavam obstruídos nas profundidades máximas dos perfis medidos, mas parece que a água passa através das obstruções e os fluxos verticais começam a profundidades maiores, isto é, os perfis medidos correspondem à parte final do trecho afetado pelo fluxo vertical.

INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Características do Fendilhamento

Os testes realizados demonstram que, como era de esperar, a circulação da água no aquífero se produz através de fendas ou trechos fendilhados bem definidos. Geralmente, cada fenda ou trecho fendilhado pertence a um sistema de fendilhamento com recarga independente. Isto é demonstrado pelo fato de que, quando um poço atravessa duas ou mais fendas, é normal a existência de fluxo vertical, indicando que as diferentes fendas têm níveis piezométricos diferentes.

Nos 40 poços situados no sistema calcáreo foram localizados 63 trechos fendilhados, cujo comprimento total aproximado foi de 298 metros. Portanto, o comprimento médio dos trechos fendilhados é de 4,7 metros. Os 298 metros dos trechos fendilhados representam 13,7% do comprimento total de coluna de água estudada no sistema calcáreo (2160 metros):

O método de trabalho utilizado não permite uma medição exata do comprimento dos trechos fendilhados. Quando a água, que circula através de uma fenda, passa pelo poço, arrasta o traçador de um trecho, geralmente, maior do que o comprimento da própria fenda. Portanto, a partir dos perfis de concentração, é fácil obter valores imprecisos, por excesso, do comprimento da fenda. No entanto, este efeito é compensado parcialmente pelo fato de que algumas das fendas não são detetadas por ter um fluxo muito baixo. Logicamente, o valor de 13,7% antes indicado, guarda uma estreita relação com a porosidade do aquífero. De forma estimativa, pode-se supor que os trechos fendilhados têm uma porosidade média de 0,2. Neste caso, a porosidade média para o aquífero seria $0,137 \times 0,2 = 0,027$ (2,7%), a qual seria válida para uma camada superficial de uns 75 metros, que é a profundidade média dos poços estudados. Com este valor da porosidade e levando em conta que a superfície do aquífero na área estudada é, aproximadamente, de $5 \times 10^9 \text{ m}^2$, ter-se-ia um volume de água armazenada no período de estiagem $5 \times 10^9 \times 75 \times 0,027 = 1,0 \times 10^{10} \text{ m}^3$. A espessura da lâmina de água seria $75 \times 0,027 = 2,0$ metros. Logicamente, estes dados têm só um valor orientativo. Para comparação, indicam-se a seguir os resultados obtidos no aquífero cárstico do Grupo Bambuí no Estado da Bahia (SUDENE-CONESP-OESA, 1976):

Poços estudados: 48

Comprimento total de coluna de água: 2462 metros

Profundidade média dos poços: 66 metros

Comprimento do trecho fendilhado: 402 metros, isto é 16,3% do comprimento da coluna de água.

Porosidade média supondo um valor de 0,2 para os trechos fendilhados: 0,032

Espessura da lâmina de água: 2,1 metros

Por estes dados pode-se verificar que os resultados dos dois estudos são semelhantes.

Com respeito à distribuição vertical dos trechos fendilhados foram construídos os gráficos da Figura 4. Os gráficos A desta figura representam o número total de fendas encontradas para o conjunto de poços, para as diferentes cotas topográficas. As curvas apresentam um pico elevado para uma profundidade de 30 metros ou cota 445 e um pico menor para a profundidade de 85 metros ou cota 500.

Devido às diferentes profundidades dos poços, resulta mais representativa a distribuição das fendas como percentagem dos poços que atingem cada uma das cotas topográficas. Os resultados estão indicados nos gráficos B da Figura 4. Observa-se também nestes gráficos a existência dos dois picos. Os gráficos C da Figura 4 mostram o número de poços que atingem cada cota topográfica. Observa-se que a estatística só tem um valor razoável nos trechos compreendidos entre 370 e 470 metros de altitude.

Transmissividade

A transmitância de velocidade T_v foi obtida para os 16 poços que não apresentavam fluxo vertical e para os 6 poços, nos quais o fluxo vertical era muito pequeno; portanto, não é possível calcular a transmissividade destes poços, com precisão, devido às dificuldades de obtenção do gradiente piezométrico local.

Embora o mapa piezométrico do aquífero não permita a obtenção do gradiente piezométrico local, com precisão, devido a sua escala e época das medidas, foi feito o cálculo da transmissividade supondo um gradiente piezométrico uniforme de 5 por mil (0,005), (Quadro 2). A terceira coluna desta tabela mostra as transmissividades obtidas para os poços onde foram feitos testes de bombeamento, as quais foram calculadas a partir do rebaixamento específico, R_e , através da equação aproximada $T = 1,4 q/R_e$, sendo q a vazão de bombeamento. Nos casos dos poços MA-203 e MA-05, onde não foi detetado nenhum fluxo, as transmissividades indicadas correspondem ao valor mínimo detetável de velocidade, de acordo com os testes realizados (0,5 cm/dia). Excetuando o poço MA-69, os resultados dos dois métodos variam em um fator menor de 10, o qual não é muito se levarmos em conta as suposições realizadas, os erros nos dois métodos e que ambos os tipos de testes foram efetuados em épocas diferentes.

No caso do aquífero da Bahia, as diferenças entre as transmissividades obtidas por ambos os métodos foram, geralmente, menores de um fator 10. Também neste caso, os testes foram realizados em épocas diferentes.

Características do Fluxo no Aquífero

Como já foi dito, os ensaios foram realizados durante o período de estiagem, quando os níveis piezométricos se encontravam próximos a seu valor mínimo. Por esta razão, os fluxos medidos representam valores mínimos, sobretudo tendo em conta a rápida resposta do aquífero às precipitações. Logicamente, a maioria dos poços com fluxo vertical descendente deve conservar este tipo de fluxo na época de chuva. Ao contrário, muitos poços com fluxo vertical ascendente podem trocar o sentido do fluxo na época de chuva devido à recarga local.

Observa-se que a maior parte dos poços situados nas proximidades do rio Verde tem fluxo vertical ascendente. Isto é devido a que a

água dos trechos fendilhados profundos está em condições de confinamento por ter sido recarregada em cotas mais elevadas do que as cotas locais e do que as cotas de recarga das fendas mais superficiais. Trata-se de uma situação típica das zonas de descarga. As águas profundas destes poços devem ser das mais antigas do aquífero.

Na zona de Lagedinho e Lagedão, onde foi estudado um número elevado de poços, a situação é muito irregular. De um total de 14 poços, 6 tinham fluxo vertical descendente, 4 fluxo vertical ascendente e 4 fluxo horizontal. Trata-se de uma zona de cota mais elevada do que as zonas vizinhas e portanto de uma zona de recarga. Os fluxos verticais ascendentes detetados podem ser explicados pelo fato de os testes terem sido efetuados na época de estiagem. As fendas superficiais, de renovação mais rápida, deveriam estar nesta época secas e com nível piezométrico baixo. Possivelmente, durante o período de chuva o sentido do fluxo deverá ser o contrário.

A zona dos poços IT-504, IT-507, IT-519, JN-430, JN-405, VL-05 e MA-416 está situada no pé da serra do Sabonetal e, logicamente, deve corresponder a uma área de recarga. Isto é demonstrado pelo fato de todos os poços, menos o JN-405, terem fluxo vertical descendente.

Uma situação semelhante da anterior poderia-se esperar na zona dos poços MA-15, MA-83, MA-198 e MA-84, situados no pé da Serra Azul. Neste caso, os fluxos verticais ascendentes devem ser justificados pela época do ano na qual foram realizados os ensaios. O poço MA-83, com um fluxo vertical ascendente que se inicia por baixo dos 100 metros de profundidade, constitui um caso interessante, que demonstra a existência de carstificação profunda conetada diretamente com a superfície nesta zona de recarga.

A situação ao longo do rio São Francisco não fica bem clara devido ao reduzido número de poços estudados nesta zona. O fluxo vertical descendente do poço MA-405 afeta uma camada muito superficial formada por materiais quaternários e, portanto, não significa que o rio está recarregando o sistema calcáreo nesta zona. Infelizmente, o número de poços estudados na zona central do aquífero (área de Mocambinho) é muito pequeno. Mas é provável que esta zona ofereça grande interesse para a exploração do aquífero através de poços perfurados nos materiais superficiais de tipo granular. Possivelmente, a descarga do sistema calcáreo no rio São Francisco se produza, em grande parte, através destes materiais. Isto pode ser comprovado a partir das análises de trítio, em cujo caso, as concentrações de trítio deveriam corresponder a águas relativamente antigas.

BIBLIOGRAFIA

- CUSTÓDIO, E. e LLAMAS, M.R. - 1976 - Hidrologia Subterrânea Tomo II, Ediciones Omega S.A., Barcelona, p. 1278-1280.
- HALLEVY, E. et al - 1967 - Boreole Dilution Techniques: a critical review: Isotopes in Hidrology, Proc. Symp. Vienna, 1966, IAEA, Vienna, 1967.
- PLATA, A. - 1972 - Isotopos en Hidrologia Editoria Alhambra, Madrid, 328 p.
- SIEGENTHALER, U., OESCHGER, H. e TONGIORGI, E. - 1970 - Tritium and oxygen-18 in natural water samples from Switzerland: Isotope Hidrology International Atomic Energy, Proc. Symp. Vienna, 1970, p. 373-385.
- SILVA, A.B. - 1979 - Pesquisa e Avaliação de Recursos Hídricos em "Karst" por meio de Sensores Remotos. Rev. Mineração e Metalurgia, nº 415, Rio de Janeiro.
- SUDENE-CONESP-OESA - 1976 - Estudos de Reconhecimento e Estudos Hidrológicos para Aproveitamento Integrado da Região Central da Bahia.
- YURTSEVER, Y. e PAYNE, B.R. - 1978 - Application of environmental Isotopes to groundwater investigations in Qatar: International Symposium on Isotope Hidrology, Neuherberg, Germany, Fed. Rep. of 19-23 June 1978, paper IAEA-SM-228/24.
- W.M.O. e IAEA: World Survey of isotope concentration in precipitation, Environmental Isotope Data Volume nºs 1, 2, 3, 4, and 5, IAEA, Vienna.

QUADRO 1 - RESULTADO DAS PERFILAGENS DOS POÇOS

Continua....

POÇO PERFILADO	TIPO DE FLUXO	COTA DAS FENDAS (m)	PROF. DO POÇO (m)	COTA DO NE (m)	VELOCIDADE DO FLUXO (m/h)	VAZÃO DA FENDA (l/h)	OBSERVAÇÕES
IT-504	F.H.	443-440	85,00	450	0,5400	-	
IT-507	F.H.	484-481	83,00	488	0,0500	-	Entrada de água com fluxo horizontal e componente vertical de fluxo descendente.
	F.V.D.	449-445			5,8400	106,6	
IT-519	F.H.	438-427	161,00	468	0,0150	-	Fluxo horizontal predominante com provável componente de fluxo vertical descendente.
JN-403	F.V.D.	-	32,00	-	78,0000	1420,0	O poço não foi nivelado. Sua cota se aproxima de 480 m (ref. folha de Januária 1:100.000). Fendas detectadas aos 9-10m e as 17-18m de profundidade (cotas aproximadas de 470-471 e 463-464 m). N.E. = 3 m.
JN-405		497-496	37,00	503	0,2600	4,7	Provável componente horizontal de fluxo na fenda superior.
	F.V.A.	<488			0,2600	4,7	
MA-003	F.V.D.	461-459	96,00	466	2,6200	48,0	Provável componente horizontal de fluxo na fenda inferior.
		449-447			2,6200	48,0	
MA-005	-	-	70,00	453	-	-	Neste poço não foram detectadas fendas nem fluxos.
MA-015	F.H.	460-442	115,00	474	0,0120	-	Fluxo horizontal com possível componente de fluxo vertical ascendente.
MA-069	F.H.	435-432	120,00	452	0,0180	-	Corresponde a um trecho fendilhado.
	F.V.D.	430-417			0,2200	6,9	
MA-079	F.V.A.	435-432	80,00	437	7,6000	246,0	
		426-424			17,6000	571,0	
MA-083	F.V.A.	438-425	120,00	442	4,2000	77,0	Realizados testes especiais.
		400-397			6,7000	122,7	
		385-382			4,8000	88,5	
MA-084	F.V.D.	461-459	75,00	462	1,8500	34,0	
		444-441			0,3300	6,0	
		428-424			0,1500	3,0	
MA-123	F.V.A.	441-439	173,00	442	0,1200	2,2	
		<434			0,1200	2,2	
MA-131	F.H.	450-448	80,00	453	0,0010	-	Fluxo horizontal na parte superior do poço.
	F.V.A.	442-439			0,5000	16,0	
	F.V.A.	418-415			1,0000	32,0	
MA-144	F.H.	456-454	102,00	457	0,0015	-	
	F.H.	437-426			0,0066	-	
MA-145	F.H.	456-439	85,00	459	0,0045	-	Corresponde a trecho fendilhado.
	F.V.A.	416-412			0,8600	15,7	
MA-146	F.H.	449-447	103,00	454	0,0540	-	Poço obstruído na cota 433
	F.V.D.	<433			0,1500	68,0	
MA-151	F.H.	451-446	102,00	457	0,0090	-	Poço completado com filtros entre 453-446.
MA-198	F.H.	462-457	65,50	469	0,0140 (FH)	-	Fluxo horizontal na entrada de água superior, com componente de fluxo vertical descendente e saída de água abaixo da cota 433
	F.V.D.	<433			0,4400 (FVD)	8,1	
MA-203			110,00	466	-	-	Neste poço não foram detectadas fendas nem fluxo.
MA-400	F.V.A.	452-438	100,00	461	7,7000	391,6	
		431-428			20,0000	1013,0	
		419-417			9,6000	486,0	
MA-405	F.V.D.	431-428	100,00	436	1,0000	79,0	
		411-407			1,0000	79,0	
MA-416	FH/FVD(?)	512-509	44,00	514	0,0270	-	Não foi possível definir o tipo de fluxo predominante.
		500-498			0,0270	-	
MA-427	F.H.	490-489	-	492	0,0090	-	O restante da coluna de água do poço sem fluxo
MA-602	F.H.	442-440	65,00	457	0,1370	-	Fluxo horizontal na entrada de água superior, com componente de fluxo vertical descendente e saída de água abaixo da obstrução do poço.
	F.V.D.	<412			1,9000	35,0	
MA-603	F.V.D.	464-459	72,00	459	0,4700	8,5	
		<429			0,4700	8,5	

QUADRO 1 - RESULTADO DAS PERFILAGENS DOS POÇOS

Continuação

POÇO PERFILADO	TIPO DE FLUXO	COTA DAS FENDAS (m)	PROF. DO POÇO (m)	COTA DE NE (m)	VELOCIDADE DO FLUXO (m/h)	VAZÃO DA FENDA (l/h)	OBSERVAÇÕES
MA-604	F.V.A.	447-439 403-399	89,00	469	1,8000 34,2000	33,0 620,0	
MA-605	F.H.	466-462	79,00	472	0,0060	-	O restante da coluna de água do poço sem fluxo.
MA-607	F.H.	446-437	60,00	458	0,0060	-	Predomina o fluxo horizontal, com provável componente de fluxo vertical ascendente.
	F.H.	428-424			1,0800	-	
MA-608	F.V.A.	452-449 436-434	54,00	458	19,0000 39,0000	346,0 706,0	
MA-610	F.V.A.	439-435 <429	81,00	464	>100,0000 >100,0000	>1810,0 >1810,0	
MA-611	F.H.	441-440	45,00	465	0,5420	-	Possível existência da componente de fluxo vertical ascendente.
MA-612	F.V.D.	451-448 433-431	60,00	453	10,0000 0,4000	180,0 7,0	
MA-614	F.H.	450-443	125,00	455	0,0054	-	
	F.H.	419-415			0,0054	-	
	F.H.	409-405			0,0054	-	
	F.H.	393-390			0,0054	-	
	F.H.	379-374			0,0054	-	
MA-617	F.H.	429-417	150,00	447	0,0200	-	
MA-618	F.V.A.	444-431 329-323	160,00	452	2,1000 2,4000	38,0 44,0	
MA-630	F.H.	410-407	100,00	436	0,0910	-	Predomina fluxo horizontal, com possível componente de fluxo vertical ascendente.
	F.H.	395-392			0,0910	-	
MA-632	F.H.	-	71,00	438	0,0062	-	Cobertura detritica; Poço revestido tendo fluxo horizontal ao longo dos filtros.
MA-633	F.H.	-	70,00	437	0,0020	-	Cobertura detritica; Poço revestido tendo fluxo horizontal ao longo dos filtros.
MZ-107	F.V.A.	432-428 379-376	112,00	441	14,9000 14,9000	286,0 286,0	
MZ-200	F.H.	439-432	50,00	440	0,0010	-	
	F.V.A.	<427			1,5000	27,0	
VL-005	F.H.	552-550	70,00	551	0,0092	-	Fluxo horizontal com entrada de água apresentando componente de fluxo vertical descendente.
	F.V.D.	539-536			0,4000	7,3	

OBS.: F.H. - Fluxo Horizontal; F.V.A. - Fluxo vertical ascendente e F.V.D. - Fluxo vertical descendente.

QUADRO II

COMPARAÇÃO DAS TRANSMISSIVIDADES OBTIDAS ATRAVÉS DOS
TESTES DE BOMBEAMENTO E DOS ENSAIOS COM TRAÇADORES.

POÇO	Tv (m ² /s)	TRANSMISSIVIDADE (m ² /s)	
		TESTE BOMBEAMENTO	TRAÇADORES
MA-203	<0,05	2,6 x 10 ⁻⁵	<1,2 x 10 ⁻⁴
MA-005	<0,02	-	<4,6 x 10 ⁻⁵
MA-602	4,0	-	9,3 x 10 ⁻³
MA-198	1,6	10 ⁻³	3,7 x 10 ⁻³
MA-630	16,6	-	3,8 x 10 ⁻²
MA-151	1,1	8,7 x 10 ⁻³	3,5 x 10 ⁻³
MA-015	5,0	7,7 x 10 ⁻³	1,1 x 10 ⁻²
MA-614	3,2	-	7,4 x 10 ⁻³
MA-416	3,3	-	7,6 x 10 ⁻³
MA-617	6,6	-	1,5 x 10 ⁻²
MA-427	0,27	-	6,2 x 10 ⁻⁴
MA-605	0,6	1,8 x 10 ⁻⁴	1,4 x 10 ⁻³
MA-144	0,25	-	5,8 x 10 ⁻⁴
MA-607	98,6	-	0,23
MA-632	5,2	-	1,2 x 10 ⁻²
MA-633	1,5	-	3,4 x 10 ⁻³
MA-069	2,6	2,4 x 10 ⁻⁴	6 x 10 ⁻³
MA-611	10,0	-	2,3 x 10 ⁻²
MA-145	1,8	-	4,2 x 10 ⁻³
MZ-200	0,17	-	3,9 x 10 ⁻⁴
IT-504	32,5	-	7,5 x 10 ⁻²
IT-519	4,1	1,8 x 10 ⁻⁴	1,4 x 10 ⁻³

Obs.: Gradiente piezométrico igual a 0,005.

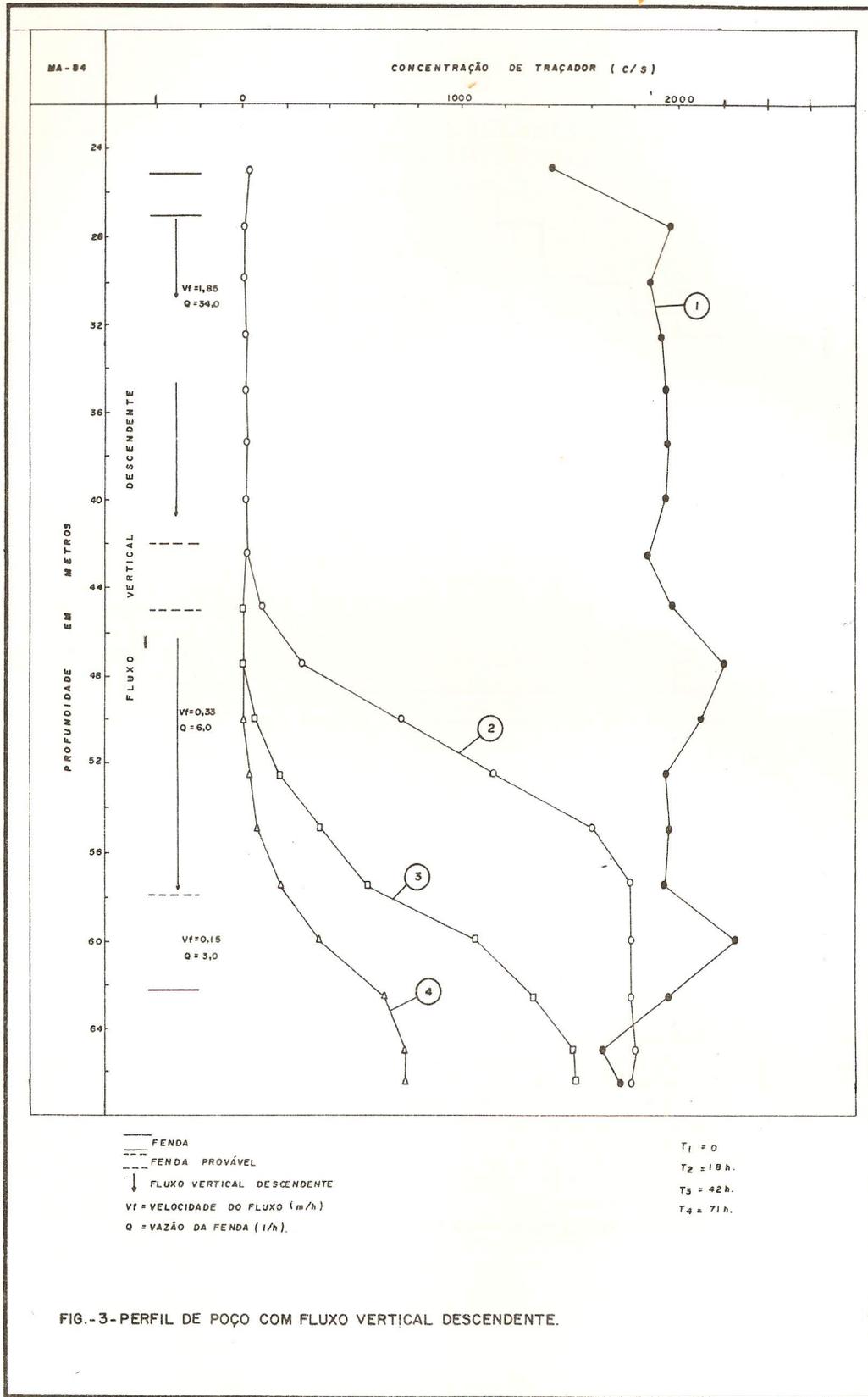


FIG.-3-PERFIL DE POÇO COM FLUXO VERTICAL DESCENDENTE.

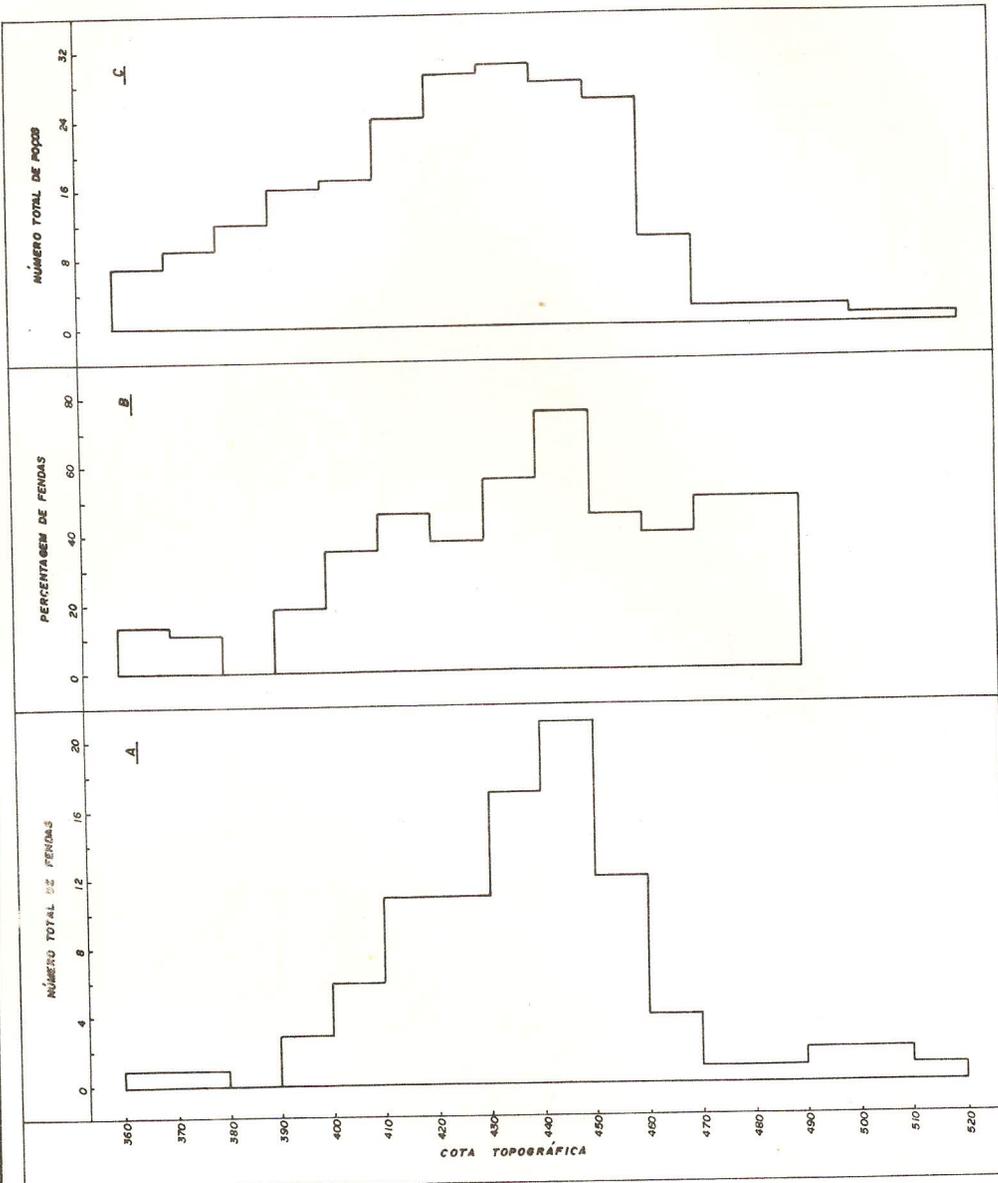


FIG.- 4 - DISTRIBUIÇÃO DOS TRECHOS FENDILHADOS EM FUNÇÃO DAS COTAS TOPOGRÁFICAS.