

# VARIAÇÕES DE FLUXO NA REGIÃO ENVOLTÓRIA DOS POÇOS TUBULARES EM MEIO POROSO – FATORES QUE INFLUENCIAM A PRODUTIVIDADE

Eugênio Pereira<sup>1</sup>

1. **Resumo** - É possível contribuir para a produtividade dos poços e exploração recomendável dos aquíferos subterrâneos disponíveis através da identificação dos fatores que influenciam o fluxo da água subterrânea. A região envoltória dos poços tubulares é fundamental na conservação da condutividade hidráulica do aquífero, otimizando o afluxo de água para o interior dos poços. A velocidade do fluxo nesta região, já naturalmente alto, pode resultar em prejuízos a produtividade e vida útil dos poços se os fatores que influenciam sua variação não forem identificados, dimensionados e enquadrados para que sejam minimizadas as perda de carga hidráulica no processo de extração da água subterrânea. Reduzindo-se a turbulência no envoltório do poço tubular, possivelmente a equação de Darcy será calculada até quando a água flui pelo pré-filtro.

2. **Palavras chaves** - Envoltório, fluxo, produtividade

### 3. INTRODUÇÃO

O caminho percorrido pelas águas meteóricas, que infiltram-se vencendo as armadilhas naturais do solo e seguem em direção dos reservatórios subterrâneos, é normalmente lento e duradouro. Águas que adentram as áreas de recargas dos aquíferos permanecem em média algumas centenas de anos até atingir a região de descarga. Quando o homem resolve seccionar o subsolo sedimentar, drenando-o para extrair a água subterrânea, estabelece uma condição especial. Ele intercepta o vagaroso caminho das águas em sua porção intermediária, succionando-as para a superfície e criando ali um

fluxo convergente vigoroso que aflui de todas as direções em seções cilíndricas até desaguar no que conhecemos como poço tubular. A trajetória antes tranqüila (velocidades de cm/h a cm/dia) agita-se em intensa turbulência ao se aproximar do poço. A lei do fluxo laminar em meios porosos, elaborada na segunda metade do século passado por Darcy, passa a não mais se aplicar, obtendo o fluxo turbulento características próprias que acabam por dificultar a entrada da água no poço.

Neste artigo queremos abordar os fatores que influenciam o aumento de velocidade do fluxo gerado pelo gradiente hidráulico imposto pelo bombeamento do poço, a ponto de torná-lo turbulento, discutir sobre as conseqüências em relação a sua produtividade e emitir alguns conselhos para minimizar o processo.

## **4. O MOVIMENTO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

### **4.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE FLUXO LAMINAR E TURBULENTO DA ÁGUA**

Á água pertence a classe mais simples dos fluidos chamada de newtoniana. Nesta, a tensão de cisalhamento (shear stress) é diretamente proporcional ao índice de cisalhamento ou velocidade de corte (shear rate). Isto significa que a água caminha em lâminas que podem escorregar uma sobre as outras gerando uma força que se opõe ao fluxo, uma espécie de força de fricção (tensão de cisalhamento), e um deslocamento progressivo de uma lâmina em relação a outra (índice de cisalhamento). O fato das duas características serem proporcionais, ou seja, os dois partem da origem, indica que a água flui a um mínimo esforço e sempre em lâminas, quer seja na superfície, em tubulações ou no subsolo poroso.

Se a velocidade do fluxo aumentar muito, acontece das moléculas de água acabarem fugindo de seus caminhos paralelos, atravessando uma as outras e prosseguindo desordenadamente em uma inércia caótica. Este estágio é denominado de fluxo turbulento (Drilling Fluids Engineering Manual, 1998)

### **4.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO MEIO POROSO: A LEI DE DARCY (FREEZE & CHERRY, 1979)**

Darcy mostrou que o escoamento da água através de um filtro de areia é proporcional a área (A) do cilindro, a diferença de cargas hidráulicas ( $h_1 - h_2$ ) nos

---

<sup>1</sup> geólogo, Diretor técnico da System Mud Produtos Químico Ltda., fone: (47) 346-5510, fax: (47) 346-5150, E-Mail: systemmud@melim.com.br

extremos da coluna e inversamente proporcional ao comprimento da coluna (L). É expressa matematicamente pela fórmula:

$$Q = KA \frac{(h_1 - h_2)}{L} \text{ ou } q = \frac{Q}{A}$$

Q = vazão constante que passa pelo cilindro (L<sup>3</sup>/T)

K = coeficiente de proporcionalidade, chamado de condutividade hidráulica (L/T)

q = vetor velocidade aparente

#### 4.3. VALIDADE DA LEI DE DARCY

A lei de Darcy é válida apenas para escoamento laminares. Neste tipo de escoamento a água percola suavemente pelos poros do aquífero. O escoamento é condicionado pela viscosidade do fluido e a perda de carga varia linearmente com a velocidade, fato que caracteriza os fluidos newtonianos, como vimos em 3.1.

Para velocidades maiores, o escoamento passa ser uma inércia caótica, deixando de ser laminar e passando a turbulento (item 3.1). Ocorre a formação de turbilhonamentos, as moléculas de água movem-se de maneira irregular, a perda de carga não varia mais linearmente com a velocidade e a lei de Darcy não pode mais ser aplicada. (CPRM, 1997)

Para determinar se o fluxo em tubulações é laminar ou turbulento pode-se utilizar o Índice de Reynolds. Um índice de Reynolds < 2000 indica fluxo laminar e > 4000, fluxo turbulento. Índices situados entre 2000 e 4000 indicam que o fluxo está em transição, de laminar para turbulento. A fórmula utilizada para calcular é a seguinte:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

$\rho$  = densidade (M/L<sup>3</sup>)

v = velocidade (L/T)

D = diâmetro do tubo

$\mu$  = viscosidade (M/LT)

Re = índice de Reynolds (adimensional)

Por analogia com a equação de Darcy (item 3.2) define-se para os meios porosos um índice de Reynolds dado por:

$$Re = \frac{q d_{50}}{v}$$

$q$  = velocidade de Darcy ou velocidade aparente do fluxo (L/T)

$d_{50}$  = diâmetro médio dos grãos (L)

$\nu = \mu/\rho$  = viscosidade ( $L^2/T$ )

Diversos pesquisadores verificaram que a Lei de Darcy é válida para índice de Reynolds menor que 10. Em geral a velocidade da água subterrânea é pequena e o índice de Reynolds fica abaixo do limite indicado. A principal exceção acontece na região envoltória dos poços, vizinhança dos filtros, objeto deste artigo (além, é claro, das exceções clássicas dos aquíferos fraturados e cársticos) (CPRM, 1997).

## **5. POÇOS TUBULARES**

### **5.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS POÇOS TUBULARES**

Os poços tubulares são construídos através de perfurações do solo e subsolo em diâmetros variáveis, objetivando atravessar toda a espessura aquífero e que depois recebem no seu interior uma tubulação de aço ou PVC para dar a formação sedimentar seccionada um revestimento seguro, de forma que o furo não feche. A frente dos trechos correspondentes ao aquífero são instalados tubos especiais vazados (ranhurados) chamados de filtros que permitem a passagem da água. O espaço anular resultante entre o revestimento / filtros e o furo executado é preenchido com pré-filtro, uma areia grossa / pedregulho peneirados em tamanhos mínimos e máximos de grãos para que não passem as ranhuras dos filtros e sirvam para reter as frações arenosas provenientes da formação.

Estando o poço pronto, tendo na seqüência (de fora para dentro) furo, pré-filtro e revestimento/filtro, é instalado, em geral, um conjunto moto-bomba submersa no interior do revestimento para criar o gradiente hidráulico ( $\Delta h$ ) necessário, a fim de que o poço drene o aquífero por gravidade.

### **5.2. NATUREZA DO FLUXO CONVERGENTE**

Quando o bombeamento começa, o nível de água desce (a partir do Nível Estático – NE) dentro do poço e nas imediações. O maior rebaixamento ( $s$ ) se dá no interior do poço e decresce a medida que se afasta deste. Torna-se nulo a uma grande distância, variando para cada poço, dependendo da vazão, tempo de bombeamento e características do aquífero.

O gradiente hidráulico que conduz a água em direção ao poço é representado pela diferença dos níveis no interior do poço (Nível Dinâmico – ND) e de NE, isto é, o ponto distante do poço onde o nível de água não é rebaixado e que corresponde ao nível inicial com o poço em repouso. A superfície de água subterrânea (superfície potenciométrica) na região do poço em operação é um imenso cone de depressão.

A água flui através do aquífero e dirige-se ao poço vindo de todas as direções num fluxo convergente. Quando se aproxima do poço, deve mover-se através de sucessivas seções cilíndricas que apresentam áreas cada vez menores. Em conseqüência, a velocidade aumenta gradativamente. Se inferirmos uma superfície cilíndrica com raio de 10 m até o poço, com área  $A_1$ , e outra, a 5 m do poço, com área  $A_2$ , concluiremos que  $A_1 = 2A_2$ . Como a mesma quantidade de água flui pelas seções  $A_1$  e  $A_2$ , conclui-se que  $V_2 = 2V_1$ .

A lei de Darcy estabelece que o gradiente hidráulico varia diretamente com a velocidade. Com o aumento da velocidade, devido a convergência da água para o poço, o gradiente hidráulico cresce, com a superfície potenciométrica apresentando inclinação crescente do cone quanto mais próximo ao furo (CETESB, 1978).

### **5.3. A VELOCIDADE DO FLUXO NO ENVOLTÓRIO DO POÇO**

Ao se aproximar das paredes do furo e início do envoltório de pré-filtro, a velocidade da água supera o valor necessário para o Índice de Reynolds ultrapassar os 4000. Calcula-se que uma velocidade maior de 3 cm/seg já produza fluxo turbulento. Este valor deve se aplicar para a maioria dos poços, excetuando aqueles com gradientes muito reduzidos (quase não rebaixam).

Ao adentrar o envoltório de pré-filtro, a velocidade ainda é impulsionada pela alta condutividade hidráulica (coeficiente que leva em conta as características do meio poroso, isto é, porosidade, tamanho e distribuição das partículas, forma, arranjo das partículas, além da viscosidade e massa específica do fluido) da areia grossa ou pedregulho selecionados (peneirados) que compõe o pré-filtro.

## **6. FATORES DECORRENTES DO FLUXO TURBULENTO NO ENVOLTÓRIO**

As conseqüências da alta velocidade da água no envoltório do poço são diversas. Tentaremos reunir as mais importantes, a seguir:

- 6.1. As perdas de carga hidráulica aumentam muito no envoltório do poço pelo fluxo turbulento. Isto resulta em redução da capacidade específica (vazão por metro rebaixado, ou,  $L^3/T/L$ ) do poço e conseqüente queda de produtividade.
- 6.2. O aumento exagerado do rebaixamento (s) pode provocar descobrimento de filtros que ficam em posição superior ao ND e provocam a entrada de água no poço em forma de queda livre, aumentando de sobremaneira a turbulência, a perda de carga ( $\downarrow Q$ ) e o desgaste físico e químico (oxidação intensa) do material constituinte do filtro, entre outros.
- 6.3. As mudanças das condições de fluxo no envoltório do poço provocam a deposição de alguns sais presentes na água subterrânea, incrustando formação e pré-filtro, diminuindo a condutividade hidráulica.
- 6.4. A inclinação exagerada do cone de rebaixamento próximo ao poço faz com que a oscilação alternada do nível em períodos de produção e repouso, provoque a entrada de ar em região considerável drenada pela descida da superfície potenciométrica. Este ar provocará a oxidação dos metais solúveis presentes e sua precipitação, contribuindo na redução de permeabilidade.
- 6.5. As perdas de carga também contribuirão para que a variação brusca de pressão sofrida pela água que adentra ao poço deposite, pela redução do grau de solubilidade, parte dos mesmos sais, carbonatos principalmente, na região dos filtros, obstruindo a entrada de água. O grau de solubilidade (S) é diretamente proporcional, até determinado limite, ao produto dos fatores Pressão x Temperatura. Como na entrada de água no poço o que varia é a pressão (a temperatura varia muito pouco), o grau de solubilidade estará sujeito a variações (negativas, neste caso) enquanto o gradiente hidráulico existir (Gouvea, 1998).
- 6.6. Parte dos sais precipitados, e também os que permaneceram solúveis, são arrastados pelo bombeamento e vão se acumular/depositar em zonas de remanso hidráulico como redes de abastecimento, reservatórios, etc.. Quando o poço pára de produzir, os sais vão precipitar dentro do poço até o nível voltar a NE, quando as condições  $S = P \times T$  retorna (Gouvea, 1998)
- 6.7. Durante a perfuração do poços se não forem utilizadas técnicas construtivas adequadas para permitir o mínimo dano a região envoltória, como diâmetros finais do furo compatíveis, fluidos de perfuração de baixo teor de sólidos, balanceados e monitorados, escolha dos materiais tecnicamente corretos e completação rápida e eficiente, os danos a permeabilidade do envoltório do poço podem tornar-se

definitivos, com conseqüente aumento do fluxo turbulento pela redução da condutividade hidráulica (K).

- 6.8. A medição das pressões no envoltório do poço não deveria ser feita somente na unidade de medida (L). A cinética envolvida, e que é desprezada em condições normais de fluxo laminar pela velocidade ser pequena – cm/h a cm/dia – passa a cm/seg, o que é perfeitamente considerável.

## **7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

O hidrogeólogo tem as ferramentas necessárias para minimizar os eventuais danos ao envoltório do poço obedecendo a critérios científicos tanto na elaboração dos projetos como nos procedimentos técnicos de campo. Alguns destes procedimentos podem ser tomados antes, durante e após a perfuração, reduzindo a velocidade de entrada da água no poço e o gradiente hidráulico, isto é, a única variável possível de alterar considerando K constante:

- 7.1. A utilização de toda largura (b) do aquífero para incrementar a transmissividade (quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda espessura saturada – b – do aquífero).
- 7.2. O maior uso de área de filtro por poço para aumentar a componente A da equação de Darcy (item 3.2) e tentar evitar o fluxo turbulento (onde Darcy não se aplica).
- 7.3. Construir maior número de poços para conseguir a mesma vazão.
- 7.4. Diminuição do tempo de bombeamento.
- 7.5. Diminuição de vazões extraídas e conseqüente rebaixamento (Gouvea, 1998)
- 7.6. Utilização de procedimentos adequados a reduzir ao máximos os danos a região envoltória do poço durante a perfuração e completação do poço, entre eles:
  - 7.6.1. Bomba de lama com vazão adequada às necessidades de limpeza prevista em projeto construtivo.
  - 7.6.2. Preparação do canteiro de obras para perfeita extração de sólidos do fluido de perfuração, com volume de tanques e comprimento de canaletas, além de desareidores e dessiltadores que propiciem a decantação dos recortes de sondagem.
  - 7.6.3. Fluido de Perfuração a base de polímeros, de baixo teor de sólidos, com monitoramento da reologia, extração de sólidos e de exigências

hidráulicas requeridas (vazão da bomba de lama) para limpeza durante a perfuração.

- 7.6.4. Fluido de Completação ou Colchão Lavador para descer pré-filtros, composto do próprio fluido de perfuração diluído com água limpa, com adição de dispersante, umectante (tenso-ativos) e hipoclorito de sódio (cloro ativo: 2.000 ppm).
- 7.7. Instalação de revestimentos e filtros resistentes ao desgaste físico e ataques químicos da água subterrânea.
- 7.8. Procedimentos de manutenção preventiva durante a operação do poço, com registros periódicos de níveis e vazões; intervenções providenciais para limpeza, com adição de produtos químicos dispersantes e desincrustantes, utilizando a própria bomba submersa em manutenções corriqueiras e, além dos produtos, de processos mecânicos como ar comprimido, jateamento, pistoneamento e outros, em períodos mais espaçados.

## **8. BIBLIOGRAFIA**

- 8.1. FREZE, R. A., CHERRY, J.A. 1979 Groundwater. New Jersey: Prentice-Hall. 604p
- 8.2. CETESB, 1978. Manual de operação e manutenção de poços. São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente. Gov. Estado de São Paulo.
- 8.3. CUSTÓDIO, LLAMAS, M. R. 1983. hidrogeologia Subterrânea. 2ed. Barcelona: Ediciones Omega, 2 v. 2350 p.
- 8.4. HIDROGEOLOGIA: Conceitos e Aplicações/ Coordenadores: Fernando Antônio Carneiro Feitosa, João Manuel Filho. Fortaleza : CPRM, LABHID-UFPE, 1997. 412 p: il
- 8.5. DRILLING FLUIDS ENGINEERING MANUAL. M-I Drilling Fluids. Houston, USA. Revision 03-31-1998. 1025 p.
- 8.6. Gouvea, F.A.T., Informativo ABAS – Núcleo Sul – Artigo pg. 08, Ano II, nº 7, nov-dez, 1998