

Resumo Teórico e Prático para Testes de Aquíferos na Zona Saturada e Não Saturada: Ensaios de Infiltração in situ, Slug Test e Testes de Bombeamento

Diretor Presidente

Paulo Sérgio Bretas de Almeida Salles

Diretor

Israel Pinheiro Torres

Diretor

Diógenes Mortari

Diretor

José Walter Vazquez Filho

Superintendência de Recursos Hídricos

Rafael Machado Mello

Texto

Giovanna Orletti Del Rey

Brasília, 2016

1. Ensaio de infiltração *in situ*

Testes para a zona não-saturada

1.1 A Lei de Darcy e a Condutividade Hidráulica

A propriedade a ser medida pelos ensaios de infiltração *in situ* é a **condutividade hidráulica** do solo. Esta propriedade está presente na Lei de Darcy, a qual visa calcular a magnitude da vazão de escoamento (volume por unidade de tempo) (CPRM, 2000):

○ Lei de Darcy

$$Q = k \frac{h}{L} A$$

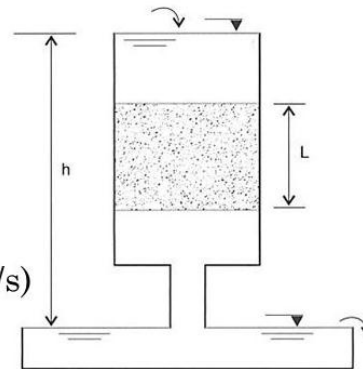
Q = vazão (m³/s)

K = coeficiente de permeabilidade (m/s)

h = carga hidráulica que dissipa na percolação (m)

L = distância a percorrer (m)

A = área (m²)



O coeficiente de permeabilidade **K** também pode ser chamado de **condutividade hidráulica**. A condutividade hidráulica considera as características do meio como porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas, e as características do fluido que está escoando (viscosidade e massa específica) (CPRM, 2000).

Em um meio isotrópico, a condutividade hidráulica tem igual valor em todas as direções dos eixos de coordenadas. Porém, a existência de um meio isotrópico no mundo real é ilusória. Consequentemente, os valores de condutividade hidráulica na vertical (K_v) e na horizontal (K_H) no meio são naturalmente diferentes.

O cálculo da condutividade hidráulica do solo é uma ferramenta essencial para qualquer estudo que envolva movimentação de água no perfil pedológico. Sua importância abrange tanto estudos da própria dinâmica da água e drenagem do solo, quanto estudos de potencial contaminação dos reservatórios subterrâneos.

1.2 Método dos Anéis Concêntricos

Os ensaios de Infiltração *in situ* visam estimar a condutividade hidráulica verticais (K_v) na superfície na zona não saturada do ambiente examinado. **O método dos anéis concêntricos** é utilizado para a determinação da condutividade hidráulica na superfície. Na execução deste método, utilizam-se dois cilindros os quais estão dispostos de forma concêntrica.

A sequência de procedimentos será descrita a seguir:

- Os cilindros concêntricos são cravados no solo de tal maneira que a dispersão lateral da água inserida seja evitada. Uma vez cravados no solo, é importante checar o nivelamento dos anéis. A profundidade na qual os anéis penetraram no solo é medida, resultando no valor de **I** (Figura 1).- Adiciona-se água é no anel externo até a estabilização do nível (saturação do solo). A

infiltração deste volume de água depositado no anel externo tende a fluir vertical e lateralmente. Desta forma, ocorre a criação de uma barreira hidráulica garantindo que a água infiltrada no solo a partir do compartimento interno infiltre majoritariamente na direção vertical (Figura 1).

- Adiciona-se água no anel interno tomando sempre o cuidado de manter o nível d'água no anel externo mais elevado que no anel interno. É necessário aguardar alguns minutos para que haja a umidificação inicial do solo antes de se iniciar as medições.
- Adiciona-se novamente água até o topo do anel interno.
- Mede-se a altura do topo até a coluna d'água com o auxílio de uma trena, sendo este o valor de **Mi**. Após essa medição, inicia-se o cronômetro (tempo inicial **T₀**).
- Após um certo tempo, espera-se que a água infiltre no solo para que então se realize uma nova medida da altura do nível d'água em relação ao topo (**Mf**). Paralisa-se o cronômetro e anota-se o tempo final (**T_f**).
- O cálculo da Condutividade Hidráulica do meio é feito através da fórmula (Fiore, 2010):

$$Kv = u \times \left(\frac{I}{\Delta t}\right) \times \ln\left(\frac{h_0}{h}\right)$$

Kv = condutividade hidráulica vertical (m/s)

I = profundidade cravada no solo (mm)

Δt = tempo de duração do ensaio (min)

u = $\frac{1}{60000}$ = fator de conversão de mm/min para m/s

h₀ = $H - I - Mi$ = carga hidráulica inicial (mm)

h = $H - I - Mf$ = carga hidráulica final (mm)

Mi = medida inicial

Mf = medida final

H = altura total do cilindro (normalmente 250 mm)

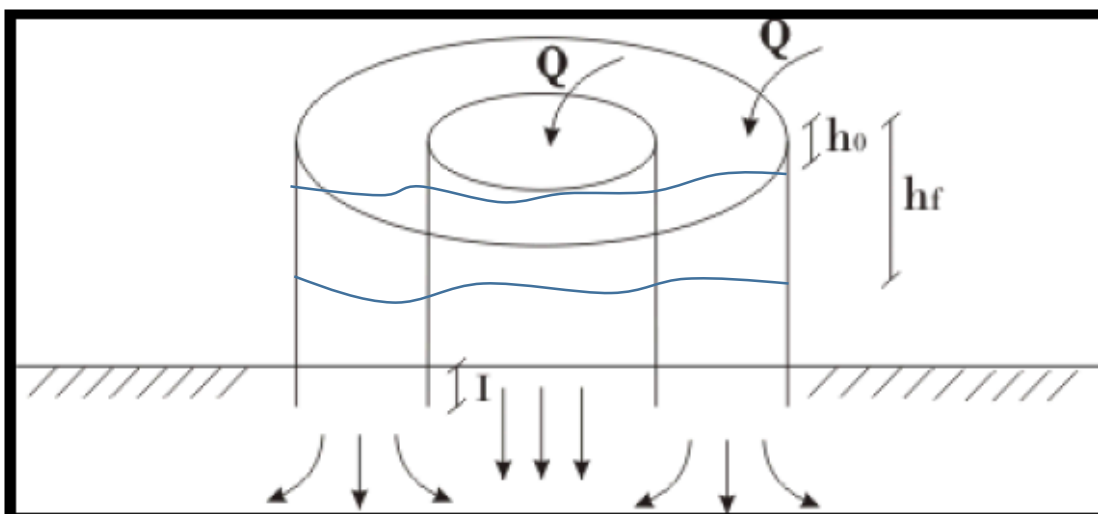


Figura 1 - Esquema do método dos anéis concêntricos para ensaios de infiltração. (Fiore, 2010)



Figura 2 - Foto anéis concêntricos em campo.

O **tempo de execução** deste método é variável. Pode durar desde 5 minutos à quase 1 hora dependendo da composição do solo testado.

Exemplo de valores obtidos na execução do método dos anéis concêntricos para um solo argilo-arenoso bastante compactado:

l (mm)	Mi (cm)	Mf (cm)	T₀ (min)	T_f (min)
55	5,3	17,5	0	48,2

Tabela 1 - Exemplo de valores no método dos anéis concêntricos.

1.3 Método “Open end hole”

Esse método é utilizado na determinação da condutividade hidráulica vertical em diferentes profundidades. Na execução deste método, são utilizados quatro (4) tubos de PVC de 50mm de diâmetro e 50, 100, 150 e 200 centímetros de comprimento. Estes tubos são cravados em furos com profundidades aproximadas do comprimento de cada cano, os quais são realizados com o auxílio de um trado manual e escavadeira boca de lobo. A cravação desses tubos é feita utilizando-se uma marreta, com o objetivo de que não ocorra vazamento lateral da água que será introduzida (Figura 3)

Os tubos são preenchidos com água e a distância entre a borda do tubo e o nível d’água são aferidos (**Mi** e **Mf**) em um tempo inicial (**T₀**) e novamente aferidos em um tempo final (**T_f**), que determina a quantidade de água infiltrada nesse intervalo de tempo. Um importante detalhe a se ressaltar é que o tempo inicial e final de cada tubo varia. Uma vez que o cronômetro é iniciado, as medidas são feitas em sequência e, conseqüentemente, em tempos diferentes. As medidas feitas durante esse procedimento são utilizadas para determinar as variáveis presentes na equação para o cálculo da condutividade hidráulica vertical (**Kv**):

$$Kv = 2,303 \times \left(\frac{R}{4\Delta t}\right) \times \log\left(\frac{h_0}{h}\right)$$

Kv = condutividade hidráulica vertical (m/s)

R = raio do tubo (m) = 0,025 m

Δt = intervalo de tempo para o rebaixamento da água (s)

$h_0 = H - M_i =$ carga hidráulica inicial (cm)

$h = H - M_f =$ carga hidráulica final (cm)

$H =$ altura da boca do cano até o fundo do buraco (cm)

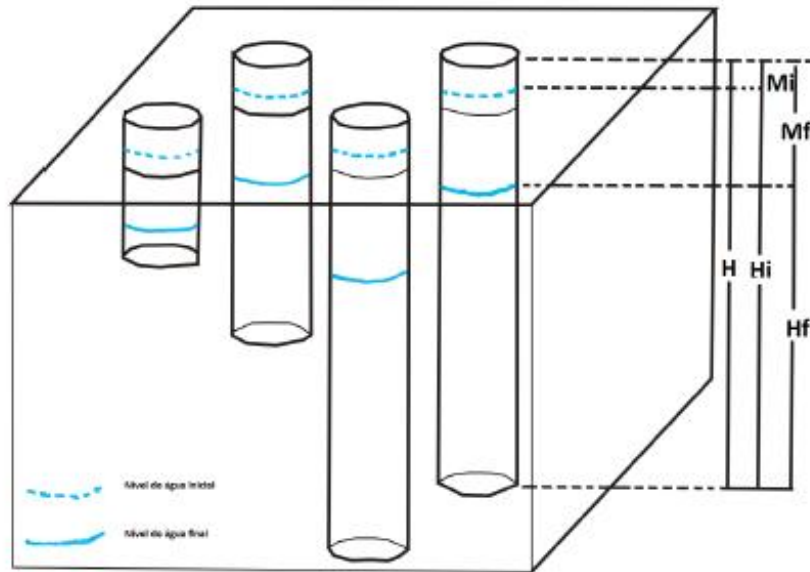


Figura 3 - Esquema do método "Open end hole" para ensaios de infiltração.



Figura 4 – Foto "Open end hole" em campo.

O **tempo de execução** deste método é variável. Pode durar desde 20 minutos à quase 1 hora dependendo da composição do solo testado.

Exemplo de valores obtidos na execução do método dos anéis concêntricos para um solo argilo-arenoso bastante compactado:

Furo (cm)	H (cm)	M _i (cm)	M _f (cm)	T ₀ (s)	T _f (s)
50	55	4,5	9,6	0	3000
100	96	6	11	40	3010
150	150	5	7,5	52	3020
200	200	4	11,5	70	3040

Tabela 2 - Exemplo de valores no método "Open end hole"

1. Testes para a zona saturada

2.1 Slug Test

O *Slug Test* é um método de avaliar a condutividade hidráulica (**K**) de um aquífero. Realizado na zona saturada, consiste no lançamento de um volume conhecido de água, no poço em estudo e a observação das condições para recuperação do nível estático inicial (**Ne**).

Em cada poço são realizadas as seguintes etapas:

- Medição do nível estático da água (**Ne**) com um medidor de nível
- Inserção de volume d'água pré-determinado, medição do rebaixamento do nível em diferentes tempos, utilizando o medidor de nível d'água e cronômetro (*Slug test*)
- Utilização de um Bailer para amostragem da água
- Utilização de um aparelho multiparâmetros para medir o pH, temperatura e condutividade elétrica da água.



Figura 5 – Poço de monitoramento poço.



Figura 6 - Volume de água sendo inserido no



Figura 7 - Aparelho multiparâmetro



Figura 8 - Medidor de nível

Para interpretação dos ensaios e cálculo das condutividades hidráulicas (**K**), pode-se utilizar o método da vazão e o método teórico desenvolvido por Bouwer & Rice.

Método da vazão

A condutividade hidráulica em função da vazão é obtida segundo a fórmula descrita a seguir:

$$K = \frac{Q}{5,5 \times \Delta h \times r}$$

K = condutividade hidráulica (m/s)

Q = vazão medida a partir do volume de água lançado e tempo de ensaio (m³/s)

5,5 = constante empírica obtida para normalizar a equação e adequação das unidades

Δh = variação da carga hidráulica inicial e final do teste

r = raio de revestimento do poço (m)

Método de Bouwer & Rice

$$K = \frac{r^2 \times \ln\left(\frac{Re}{R}\right)}{2 \times L} \times \frac{1}{t} \times \ln\left(\frac{h}{ho}\right)$$

K = condutividade hidráulica (m/s)

r = raio do revestimento (m)

L = comprimento da seção filtro (m)

Re = raio efetivo de dissipação da carga hidráulica (m)

R = raio de perfuração do poço (m).

ho = elevação no tempo t = 0 (m)

h = elevação no tempo t = t (m)

t = tempo (s)

O método elaborado por Bouwer e Rice foi originalmente desenvolvido para aquíferos livres,

mas pode ser utilizado para aquíferos confinados.

2.2 Testes de Bombeamento

Os testes de bombeamento permitem avaliar os parâmetros hidrodinâmicos dos sistemas aquíferos, além de promoverem uma circulação das águas e, conseqüentemente uma limpeza dos poços de monitoramento. A interpretação dos resultados dos testes de bombeamento permite a determinação da **vazão, transmissividade, condutividade hidráulica** e do **coeficiente de armazenamento** dos aquíferos (CPRM, 2000).

Vazão (Q): Volume de fluido que atravessa determinada seção transversal por unidade de tempo.

$$Q = \frac{V}{t} \text{ m}^3/\text{s}$$

Transmissividade (T): Quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero. Pode-se conceituá-la como a taxa de escoamento de água através de uma faixa vertical do aquífero com largura unitária submetida a um gradiente hidráulico unitário.

Condutividade hidráulica (K): Parâmetro que mede a facilidade com a qual o solo transmite água. Quanto maior a condutividade hidráulica, maior será a facilidade da água se movimentar no solo.

Coeficiente de armazenamento (S): Parâmetro adimensional que descreve a capacidade do sistema aquífero de armazenar água.

Os testes de bombeamento podem ser divididos em **testes de aquífero** e **testes de produção**:

Testes de Aquífero - Este tipo de teste de bombeamento tem como finalidade a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do meio poroso (K, T e S). O poço é bombeado com uma vazão constante Q e a evolução dos rebaixamentos decorrentes do bombeamento em um (ou mais de um) poço ou piezômetro é monitorada (CPRM, 2000).

Testes de Produção - Bombeamento que tem por finalidade a determinação das perdas de cargas totais que ocorrem num poço. Na execução desses testes, a realização do bombeamento e o registro da evolução dos rebaixamentos é feito no próprio poço bombeado. Esses tipos de testes podem ser realizados através de duas metodologias: testes sucessivos e testes escalonados. Nos **testes sucessivos**, ao término de cada etapa, o bombeamento é pausado e aguarda-se a recuperação do nível antes do início da etapa subsequente. Nos **testes escalonados**, realiza-se um bombeamento contínuo passando-se de uma etapa para outra através de um aumento brusco da vazão (CPRM, 2000).

2.1 1 Procedimentos básicos

Antes do início do teste, deve-se manter o poço a ser bombeado e, quando possível, os poços vizinhos em repouso por pelo menos 36 horas consecutivas. É aconselhável que, independentemente do tipo de teste (Produção ou de Aquífero), deve haver o monitoramento do maior número de poços possível durante a execução do teste (Lima & Filho, 2003).

O poço a ser bombeado deverá estar limpo, totalmente desenvolvido e ausente de substâncias usadas na desinfecção, pois estas podem provocar interferência no sinal emitido pelo eletrodo nas medições dos níveis d'água (Lima & Filho, 2003).

Devem-se providenciar calhas e tubulações para que a água retirada durante o teste seja

lançada o mais longe possível dos poços para não mascarar o resultado (pelo menos 150 metros ou no sistema de esgoto) (Lima & Filho, 2003).

O tempo de realização dos testes não deverá ser inferior a 12 horas e nem ultrapassar 24 horas, entre bombeamento e recuperação, podendo ser realizado com 16 horas de bombeamento e 8 horas de recuperação, por exemplo (Giustina, 2015).

A frequência de leituras do nível d'água (nível dinâmico) deverá ser:

0 – 10 min	intervalo de 1 min
10 – 20 min	intervalo de 2 min
20 – 60 min	intervalo de 5 min
60 – 100 min	intervalo de 10 min
100 – 180 min	intervalo de 20 min
A partir de 180 min	intervalo de 30 min

Tabela 3 - Frequência de leituras do ND (Lima & Filho, 2003).

Deve-se parar o teste de bombeamento apenas quando o nível dinâmico estiver constante por um intervalo de tempo.

Quanto ao monitoramento da recuperação, após o bombeamento, as leituras do nível d'água deverão ter uma duração de um terço (1/3) do tempo do bombeamento ou, no mínimo, que a recuperação atinja 97% do rebaixamento total. A frequência de leitura é semelhante à descrita no quadro acima (Lima & Filho, 2003).

O equipamento utilizado na realização do teste deve ser apto a manter a vazão rigorosamente constante durante todo o teste e o erro máximo admitido é de até 5% (Adasa, 2015).

2.1.2 Testes de Produção

Teste Escalonado com estabilização final

Este teste pode ser realizado em três a quatro etapas com vazões distintas sendo $Q_1 < Q_2 < Q_3 (< Q_4)$, com duração de 3 a 7 horas cada etapa. É importante anotar o nível estático do poço antes de se iniciar o bombeamento. Com o bombeamento, há uma variação no nível dinâmico (ND) o qual é medido segundo tempos pré-estabelecidos (Lima & Filho, 2003). Durante cada etapa do ensaio, tomar o cuidado para que a vazão se mantenha constante. Para cada vazão, se aguarda a estabilização do ND antes de se passar para a próxima etapa (Figura 9c).

Teste Escalonado sem estabilização final

Este teste pode ser realizado com no mínimo três vazões em etapa única sendo que a vazão $Q_1 < Q_2 < Q_3$. Não há estabilização do ND antes de se iniciar a próxima etapa com um novo valor de vazão. Como não há espera entre as etapas, tem-se um menor tempo total comparado com outros tipos de teste (Figura 9d).

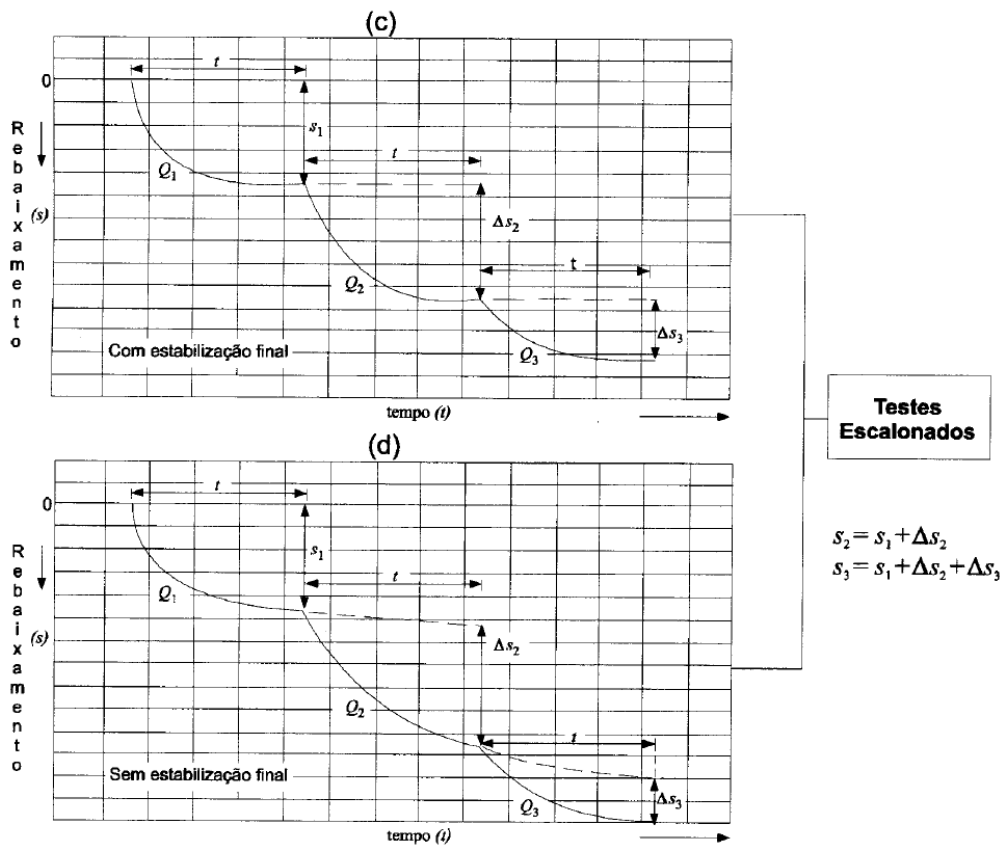


Figura 9 - Exemplo de gráficos de rebaixamento para Testes de Produção Escalonados (CPRM, 2000).

Teste Sucessivo com recuperação do NE

Nos testes sucessivos há uma pausa na mudança de cada etapa. Sugere-se que o testes sucessivos com recuperação do nível estático sejam realizados com quatro etapas com duração mínima de 1 hora cada. A espera entre cada etapa é necessária para que ocorra a recuperação total ou quase total do NE. As vazões de cada etapa podem ser de iguais ou diferentes valores (Figura 10a).

Teste Sucessivo sem recuperação do NE

Neste caso, não há uma recuperação do nível estático inicial. Na espera entre cada etapa não é necessário aguardar para que ocorra a recuperação total ou quase total do NE. As vazões de cada etapa podem ser de iguais ou diferentes valores (Figura 10b).

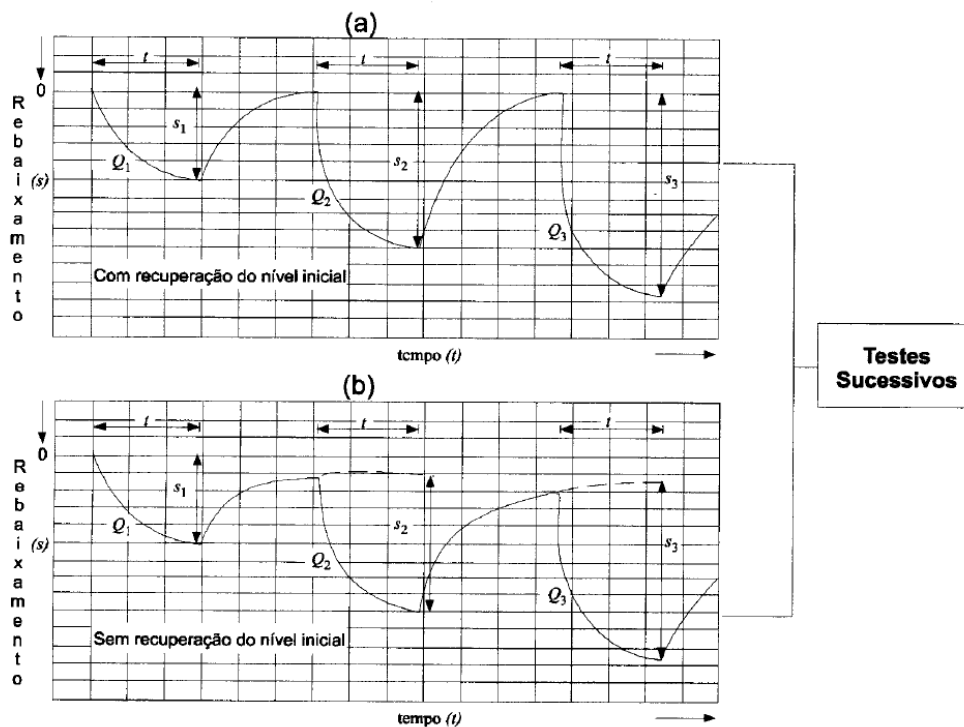


Figura 10 - Exemplo de gráficos de rebaixamento para Testes de Produção Sucessivos (CPRM, 2000).

2.1.3 Testes de Aquífero

É aconselhável que, na execução deste tipo de testes, haja pelo menos dois poços piezômetros. Desta forma, tem-se mais opções na escolha de métodos que definem os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero e mais fidelidade nos resultados. Estes dois poços não poderão ser destruídos após a execução do teste, pois servirão como poços de monitoramento do nível e qualidade d'água (Lima & Filho, 2003). Para a execução desses testes podem-se utilizar diferentes metodologias: (1) Teste Escalonado com Estabilização seguido de um Teste Contínuo com Vazão Única; (2) Teste Sucessivo com recuperação do NE seguido de um Teste Contínuo com Vazão Única com duração de 27 horas ou (3) Teste Contínuo com Vazão Única com duração de 30 horas.

No caso de não existir a opção de se medir o rebaixamento em um poço distinto do poço de bombeamento, deve-se utilizar a distância de um metro para estabelecer a distância entre o poço de bombeamento e o poço de observação (ou piezômetro). Esta prática é comumente aplicada e é baseada na teoria do "Poço Imagem" em que se simula a existência de um poço de observação próximo ao poço de bombeamento.

2.1.4 Teste de Recuperação

Após o fim do teste de bombeamento deve-se proceder ao teste de recuperação, em que o nível dinâmico é monitorado até que se estabeleça o nível estático do início do bombeamento. Os resultados deste teste são importantes para entender a circulação no aquífero, determinar sua rede de alimentação e para a definição do tempo diário máximo de bombeamento (para fins de outorga de direito de uso).

Anexo 1 – Modelo de Tabela para registro dos dados de testes de bombeamento. Ex. Teste Escalonado com Recuperação.

POÇO BOMB.:	PROF.:	Q (m ³ /h):
POÇO OBSERV.:	R (m):	AQUÍFERO:
LOCAL:	MUNIC./EST.:	EXECUTOR:
TEMPO BOMB.:	NE (m):	ND (m):
CRIVO BOMBA (m):	INÍCIO:	TÉRMINO:

REBAIXAMENTO						RECUPERAÇÃO			
HORA	t (min)	ND (m)	s_w (m)	Q (m ³ /h)	Q/s_w (m ³ /h/m)	t' (min)	ND (m)	s_w (m)	$tb/t' + 1$
	0			Q_1					
	1			Q_1					
	2			Q_1					
	3			Q_1					
	4			Q_1					
	5			Q_1					
	6			Q_1					
	7			Q_1					
	8			Q_1					
	9			Q_1					
	10			Q_1					
	12			Q_1					
	14			Q_1					
	16			Q_1					
	18			Q_1					
	20			Q_1					
	25			Q_1					
	30 até 60min			Q_1					
	60			Q_1					
	70			Q_1					
	80 até 100min			Q_1					
	100			Q_1					
	120			Q_1					
	140 até 180min			Q_1					
	180			Q_1					
	210			Q_1					
	240			Q_1					
3 horas	270			Q_2					
	271			Q_2					
	272			Q_2					

OBS:

Referências

Adasa. (2015). *Termo de Referência*. Brasília: Adasa - Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do DF.

CPRM. (2000). *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações 2ª Edição*. CPRM - Serviço Geológico do Brasil.

Feitosa, F. A., & Filho, W. D. (1998). *Execução de Testes de Bombeamento em Poços Tubulares: Manual Prático de Orientação*. CPRM - Serviço Geológico do Brasil.

Fiore, J. P. (2010). *Avaliação de Métodos de Campo para a Determinação de Condutividade Hidráulica em Meios Saturados e Não Saturados*. Dissertação de Mestrado, Brasília.

Giustina, C. C. (2015). *Produto 2: Proposta para a Operação e Manutenção da Rede de Monitoramento de Águas Subterrâneas do Distrito Federal*. Brasília.

Lima, A. A., & Filho, J. V. (2003). *Procedimentos para a Realização de Testes de Bombeamento em Poços Tubulares Utilizados no Aproveitamento de Águas Minerais*. DNPM Pernambuco.

