

Fazal Hussain Chaudrhy<sup>1</sup> & João Augusto de Oliveira Filho<sup>2</sup>

**Resumo** - Águas subterrâneas representam recursos naturais importantes com grandes potenciais de uso. Sua exploração acentua-se a cada dia com a realização de obras para seu emprego em diversos campos. A execução de tais obras requer conhecimento de teorias que tratam de fluxo subterrâneo, com o objetivo de se maximizar a produção e minimizar custos. A descrição matemática de fluxo subterrâneo é complexa e de difícil resolução, quando aplicada a poços tubulares profundos em bombeamento, devido as variações dos contornos existentes. A teoria empregada atualmente baseia-se na metodologia apresentada por Dupuit, que desconsidera um fenômeno que ocorre em poços sob bombeamento a Face de Percolação, que é a diferença entre o nível d'água dentro e fora do poço.

A proposta deste trabalho foi analisar a face de percolação, inicialmente através da metodologia proposta por Boulton (1954). Os resultados são comparados com um sistema físico experimental para se quantificar os parâmetros envolvidos na teoria analisada, bem como para verificar possíveis erros existente entre o exemplo físico e analítico.

**Palavras – chave** - águas subterrâneas; face de percolação; modelo experimental.

## 1. INTRODUÇÃO

O constante aumento populacional faz com que a demanda pela água de boa qualidade cresça a cada dia. Proporcional a este aumento, os resíduos produzidos, direta ou indiretamente, por esta população degrada a qualidade deste recurso fazendo com

---

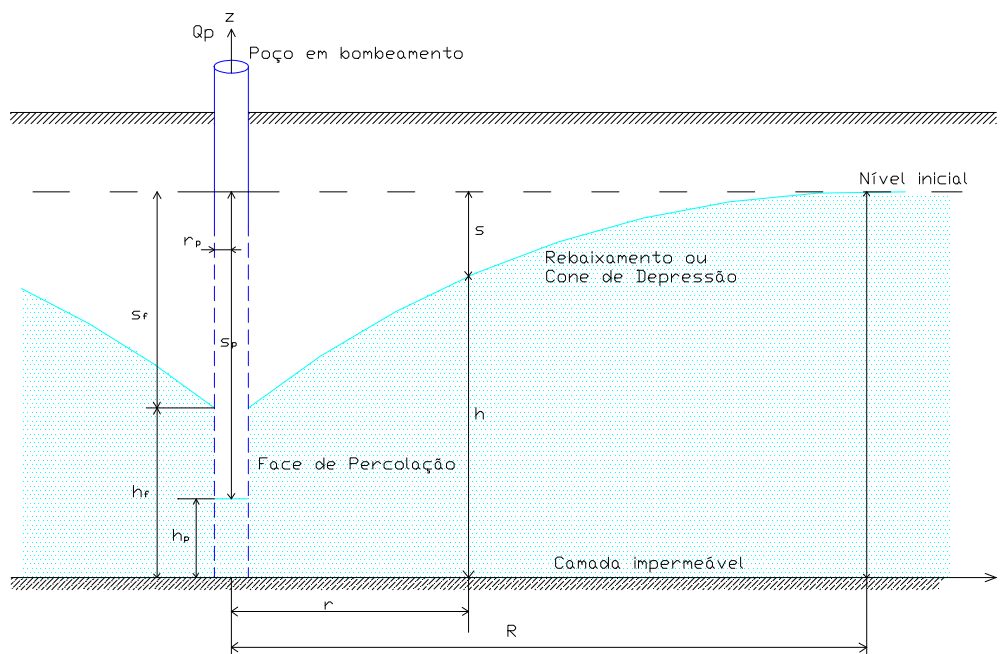
<sup>1</sup> Escola de Engenharia de São Carlos, Rua Carlos Botelho, 1465 - Vila Pureza; CEP 13560-250 – São Carlos – SP; Tel: (16) 273-9571 Fax: (16) 274-9212 E-mail fazal@sc.usp.br

<sup>2</sup> Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo, Rua Benedito Mendes Faria, 40-A-Vila Hípica, Marília – SP, CEP 17520-520; Tel.: (14) 427-1017 Fax.: (14) 427-1662; E-mail: joliveiu@uol.com.br

que o mesmo se torne cada vez mais escasso. Decorrente de diversos fatores, águas superficiais podem tornar-se impossibilitadas de atender às demandas de um local. Para suprir esta deficiência, pode se recorrer às águas subterrâneas. O uso deste recurso para abastecimento têm-se intensificado. Proporcionalmente, um grande número de obras são executadas sem qualquer embasamento técnico. As conseqüências desta cultura acarreta consideráveis custos devido a ineficiência de sistemas existentes. Este trabalho teve por objetivo tentar quantificar o fenômeno da Face de Percolação, sendo este um dos parâmetros que definem a produção ideal que um poço tubular pode fornecer, característica ligada diretamente a eficiência do mesmo.

### 1.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE UM POÇO NUM AQÜÍFERO FREÁTICO.

Um poço tubular profundo perfurado em aquífero freático, quando em operação, apresenta o seguinte comportamento, Figura 01.

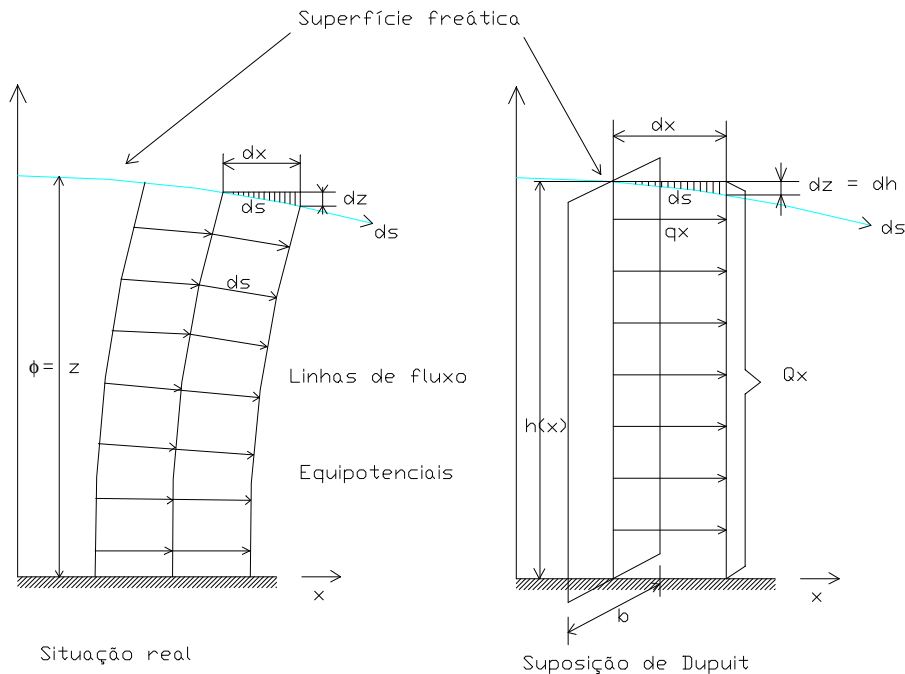


**FIGURA 01** - Fluxo radial para um poço em aquífero freático

A análise matemática desta situação é muito complexa, pois o contorno superior ( $h$ ) modifica-se ao longo do tempo e também é a solução procurada. O nível d'água no poço ( $h_p$ ) geralmente é abaixo do nível do lençol freático na sua face externa ( $h_r$ ), variando de forma diferenciada com o nível no interior do poço formando a Face de Percolação, o que torna o problema ainda mais complexo com solução teórica impossível, BEAR (1979).

## 2. EQUACIONAMENTO BÁSICO

Sendo a solução teórica para o problema de lençol freático impossível devido a variabilidade dos contornos, uma suposição apresentada no século XVIII, e aceita até hoje, foi a proposta por DUPUIT apud BEAR (1979), Figura 02.



**FIGURA 02** - Suposição de DUPUIT para fluxo em aquíferos freáticos

Segundo Dupuit a inclinação do rebaixamento é muito pequena  $dx @ ds$ , ou seja, **sin q** pode ser substituído por **tg q**. Para tanto as equipotências devem ser verticais e as linhas de fluxo ( $q_x$ ) horizontais. A descarga segundo Dupuit passa a ser:

$q_x = -K \frac{dh}{dx} \Rightarrow q_x = -K \text{tg } q$ , e o valor da descarga total o para a direção x será

$Q_x = -Kbh \frac{dh}{dx}$ . Esta suposição,  $h_f = h_p$  (Figura 01), desconsidera a face de percolação.

Em uma situação real esta hipótese não é válida, pois quando  $h_p = 0$  implica que  $h_f = 0$ , ou seja, não há afluxo de água para o poço.

### 2.1. EQUAÇÕES DE FLUXO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

As equações básicas que regem o fluxo de águas subterrâneas, são combinações da equação da continuidade com a lei de Darcy. Sendo

$$\left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{que é a equação do fluxo}$$

subterrâneo num aquífero confinado. Considerando um meio homogêneo e isotrópico, ou

seja,  $K_x = K_y = K_z$ , teremos: 
$$K \left[ \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right] = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$
. O escoamento para um

poço é melhor descrito através de coordenadas cilíndricas axissimétricas, em que o

Laplaciano  $\nabla^2$  é dado por: 
$$\nabla^2 h = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2}$$
 e a equação de conservação de

massa para o caso confinado não permanente é escrita como:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t}$$

## 2.2. ANÁLISE DOS DADOS DE REBAIXAMENTO OBSERVADOS.

BOULTON (1951) quantifica a posição do lençol freático e da face de percolação, para um caso permanente em aquíferos freáticos. O problema é resolvido inicialmente através do método de Relaxação. A solução encontrada é relacionada com a formulação de Dupuit-Forchheimer, obtendo-se uma relação teórica do problema. Posteriormente os valores são comparados com modelos físicos de caixa de areia e elétrico – hidráulicos. Aplicados a um exemplo, os resultados apresentam-se satisfatórios quando comparados aos modelo físicos, introduzindo pequenas correções.

BOULTON (1954), foi o pioneiro em quantificar a armazenabilidade de aquíferos freáticos atribuindo para este fenômeno o termo “demora de resposta”. Tal fenômeno se deve a contribuição da camada não saturada acima do nível d’água no lençol freático, bem como da descompressão do aquífero quando do início do bombeamento. Apresenta uma solução analítica que descreve tal fenômeno. O autor afirma que, em um primeiro instante após o início do bombeamento, o fluxo de água para o poço é caracterizado como a drenagem da água associada a produção específica e liberada para o nível d’água como uma função exponencial do tempo. Para um período intermediário, a contribuição é caracterizada pela permeabilidade vertical do aquífero e, para longos períodos de tempo, o escoamento é ditado pelas condições normais do aquífero. A proposta do autor para o equacionamento do fluxo é dada por:

$$T \left( \frac{\partial^2 \mathbf{f}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial r} \right) = S \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial t} + \mathbf{a} S_y \int_0^t e^{-\mathbf{a}(t-t)} \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial t} dt$$

onde  $\mathbf{a}$  é uma constante determinada em testes de bombeamento. Esta constante não se relaciona com qualquer propriedade física do meio poroso ou do poço, sendo apenas um conceito empírico para os diferentes períodos de bombeamento, apresentando coeficientes de correção das alturas do lençol freático.

NEUMAN (1972) com trabalho que trata de fluxo não permanente para um aquífero freático, questiona a suposição apresentada por BOULTON (1954) de que para curtos períodos de tempo a drenagem seja uma função exponencial do tempo. O autor trata o aquífero freático como um sistema compressível e admite que a contribuição da camada não saturada para o nível d'água ocorre instantaneamente sem função do tempo. Segundo o autor esta contribuição ocorre como consequência da drenagem de água acima da camada saturada acompanhada por uma contribuição vertical e gradual da água na zona saturada. Isto se deve às características de anisotropia do aquífero, mesmo que este seja isotrópico. Valores de armazenabilidade e produção específica são constantes. A equação para o fluxo proposta por Neuman se resume a:

$$K_r \left( \frac{\partial^2 \mathbf{f}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial r} \right) + K_z \frac{\partial^2 \mathbf{f}}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial t}$$

NEUMAN (1972) citou que, para curtos períodos de tempo a curva de rebaixamento apresentada por um poço em bombeamento se assemelha à curva de Theis utilizando a armazenabilidade ( $S$ ). Para longos períodos de tempo a curva utiliza a produção específica ( $S_y$ ). Nos tempos intermediários apresenta uma série de curvas para diversas relações de permeabilidade expressa pelo fator:  $\mathbf{b} = \frac{r^2 K_v}{H_o^2 K_r}$  Mesmo em aquífero isotrópico ( $K_v = K_r$ ), segundo o autor, a contribuição inicial sofre influências do fluxo vertical.

NEUMAN (1975) mostra que sua metodologia NEUMAN (1972) pode ser aplicada para determinar os parâmetros de um aquífero anisotrópico, freático para o caso não permanente. Novamente questiona a suposição de Boulton sobre o termo “demora de resposta” afirmando que esta constante não é uma característica do aquífero pois o mesmo diminui linearmente com o logaritmo da distância radial do ponto de análise. Modelos físicos para análise e comparação com trabalhos analíticos são empregados por

diversos autores. KIMBLER (1970) emprega diversos tipos de modelo para simular o armazenamento de água doce em formações com água salgada na costa leste dos Estados Unidos. Modelos de forma radial, radial-tridimensional, linear, linear estratificado são utilizados para obter parâmetros de exploração, quantidade de água a ser injetada/retirada, miscibilidade, limites de operação, processos de exploração, dentre outras. O meio poroso destes modelos foi obtido usando-se areia e cola cozidas em forno. Tratando-se de dois líquidos de diferentes densidades e iguais viscosidade o modelamento permitiu obter dados que podem ser empregados nos cálculos necessários para prever o armazenamento. Conclui que este tipo de armazenamento é possível sob determinadas condições. Para pequenas quantidades a serem estocadas apresenta condições de exploração. Para um sistema com grande exigência de bombeamento o mesmo não é recomendado devido a custos, pois a exploração deve ser feita com restrições de volume. A técnica de armazenamento pode ser empregada para o uso de outros líquidos e não somente água doce.

Modelo de caixa de areia também é empregado por GEFELL et. al (1994) para verificar o máximo rebaixamento causado por um poço em bombeamento constante. O modelo é concebido como a meia seção de um aquífero onde um poço totalmente penetrante atua em um aquífero freático sob regime permanente. O objetivo do mesmo é quantificar a autenticidade da teoria de Kozeny. O modelo apresenta resultados correspondentes com os propostos pela teoria, confirmando assim o método para obtenção do máximo rebaixamento, bem como da Face de Percolação. Este trabalho é o que melhor se identifica com o estudo proposto, em termos de modelagem física.

A metodologia proposta por NEUMAN (1972, 1974) para aquíferos freáticos em caso permanente é analisada por MOENCH (1993) que resolve a teoria proposta segundo a transformação de Laplace, oferecendo maior agilidade no tempo de cálculo. Com base no algoritmo para a transformação, cria-se um programa computacional para resolução. Os valores finais são comparados com resultados da teoria original.

MOENCH (1995) combina as metodologias propostas por Boulton (1954, 1963) e Neuman (1972,1974) para um aquífero freático em caso não permanente. Como visto as propostas de ambos autores divergem quanto ao comportamento da contribuição da camada não saturada para a camada saturada em um aquífero sujeito a um poço em bombeamento. Segundo Boulton esta contribuição atende uma função exponencial do tempo, Neuman afirma que a mesma ocorre instantaneamente e esta relacionada com propriedades da permeabilidade vertical do aquífero, mesmo este sendo isotrópico. Moench combina a equação de Boulton com a Lei de Darcy inserindo parâmetros de

ajuste de modo que a mesma se comporte como a solução de Neuman. Como resultado obtém uma equação mais sensível ao comportamento da camada não saturada. Consequentemente dados de piezômetros de diversas profundidades e distâncias do poço em análise fornecem melhores respostas na quantificação dos parâmetros do aquífero.

### **3. ENSAIOS EXPERIMENTAIS SOBRE REBAIXAMENTO**

Como citado, um modelo físico foi construído para a execução de ensaios com as seguintes características: Ensaio com vazão de bombeamento constante, em regime permanente; Ensaio com vazão de bombeamento constante em regime não permanente:

Para o trabalho proposto, foram admitidas as seguintes condições de ensaio: Meio poroso Homogêneo e Isotrópico com material granular, sem presença de finos; Contorno inferior impermeável; Contorno externo com carga constante ao longo dos ensaios; Poço totalmente penetrante; Piezômetros que fornecem a altura do lençol freático; Raio de influência finito; Não existência de recarga; Escoamentos permanente e não permanente;

#### **3.1. MODELO FÍSICO**

Foi confeccionada uma caixa metálica em chapa de aço de 3,0 mm de espessura de 1,2 x 0,7 x 0,5 m de comprimento largura e altura respectivamente, em uma das laterais e na parte superior não ocorreu o fechamento. Na lateral em que não ocorreu o fechamento foi fixada uma placa de acrílico de 1,5 cm de espessura, 1,2 m de comprimento e 0,5 m de altura permitindo a visualização no interior da caixa, foi devidamente selada nas junções para evitar vazamentos. No interior da caixa foi montada uma estrutura em metal na forma semicircular para receber um conjunto de telas. Foram montadas três telas de diferentes aberturas dispostas de forma seqüencial para impedir a passagem do material do meio poroso e permitir a passagem de água.

No interior do semicírculo delimitado pelas peneiras, na base da caixa, foram executados 06 furos para a fixação de piezômetros, foram dispostos em forma de espiral. A distância entre cada piezômetro e o poço de drenagem (centro a centro) foi proporcional a maior inclinação do cone de rebaixamento no interior do modelo quando do andamento de ensaios, os valores são:

No centro do semi círculo junto a placa de acrílico foi colocada a meia seção de um tubo de PVC de 2" de diâmetro, perfurado em toda a sua extensão, recoberto com tela de aço inoxidável com abertura de 0,07 mm formando o poço de drenagem. Esta meia

seção foi colada à placa de acrílico possibilitando a visualização do nível no interior do poço. Posteriormente testes foram efetuados para se quantificar as perdas de carga da tela colocada junto ao poço. Junto ao poço, no lado externo, foi colocada uma mangueira transparente de 5,0 mm de diâmetro perfurada em toda a sua extensão, recoberta com tela de aço inoxidável de abertura de 0,07 mm que atua como piezômetro e proporciona a visualização da altura do nível d'água do lado externo do poço. Na parte inferior do poço de drenagem foi montado um sistema para permitir o controle de vazão e do fluxo d'água que se constitui de um registro e uma válvula elétrica. O recipiente para obter medidas de vazão se constitui em um tubo de acrílico de 2" de diâmetro com capacidade de 01 litro devidamente calibrado.

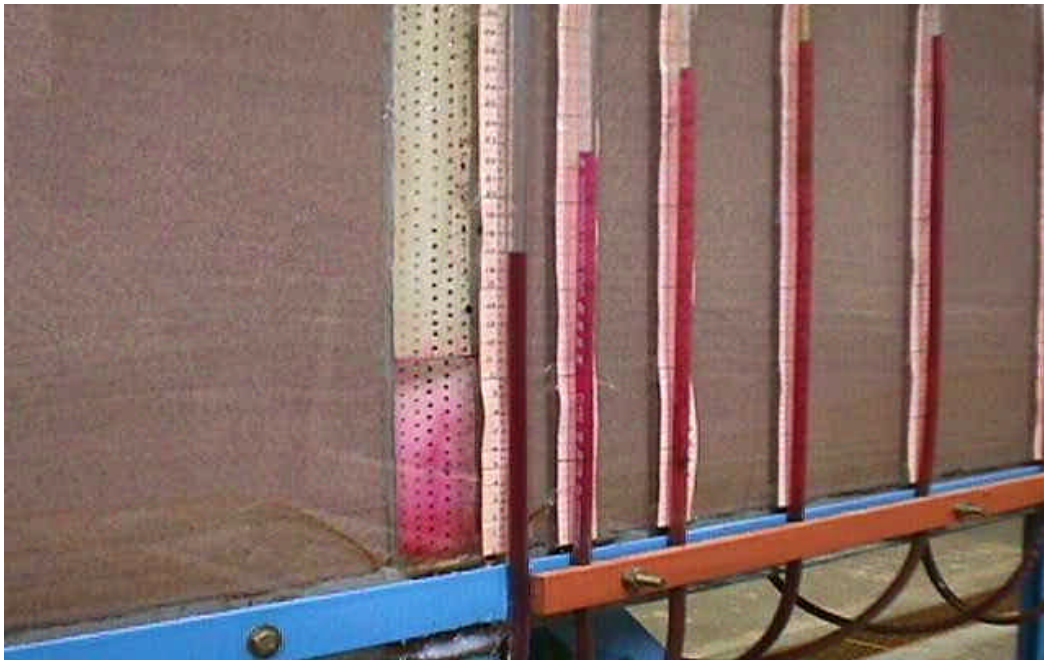


**FIGURA 03** – Vista geral do modelo físico com sistema de aquisição de dados

#### **4. AQUISIÇÃO DE DADOS**

Os dados para análise provinham da observação do nível do lençol freático, da vazão escoada, do nível do poço de drenagem e tempo de ensaio. A Figura 04 mostra a caracterização do cone rebaixamento e da face de percolação durante ensaios.

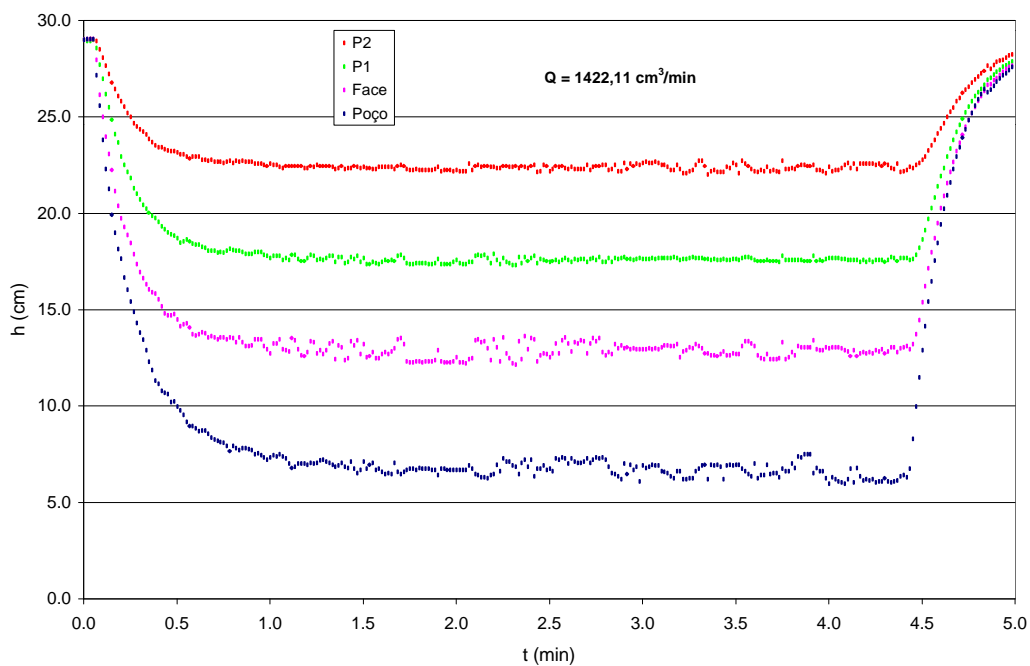




**FIGURA 04** – Caracterização da Face de Percolação durante ensaios

#### 4.1. TRATAMENTO DOS DADOS DE ENSAIO

Os dados obtidos são arquivados e trabalhados em planilhas eletrônicas. Os dados de altura são representados em gráficos onde se visualiza os rebaixamentos em cada ponto monitorado bem como a sua recuperação. A Figura 05, ilustra o gráfico de valores alcançados por um ensaio do caso não permanente onde a carga no contorno é de 29 centímetros.



**FIGURA 05** – Alturas do nível d'água em função do tempo, para o caso não permanente monitorados nos pontos de maior interesse: Poço, Face P1 e P2

## 5. ANÁLISE DIMENSIONAL

Os resultados dos ensaios acarretaram um grande volume de dados a serem analisados. Os valores abrangem ampla margem de grandeza o que torna impossível a representação única. Para uma interpretação precisa é necessário representar os valores de grandezas extremas de uma forma universal, de modo a oferecer comparação ampla. O uso de Análise Dimensional torna-se necessário para melhor representar estes valores. Com esta ferramenta foram obtidos os seguintes grupos:

$$p_1 = \frac{h}{H_o}; \quad p_2 = \frac{r}{H_o}; \quad p_3 = \frac{Qt}{H_o^3}; \quad p_4 = \frac{h_p}{H_o}; \quad p_5 = \frac{R}{H_o}; \quad p_6 = \frac{r_p}{H_o}; \quad p_7 = \frac{KH_o^2}{Q};$$

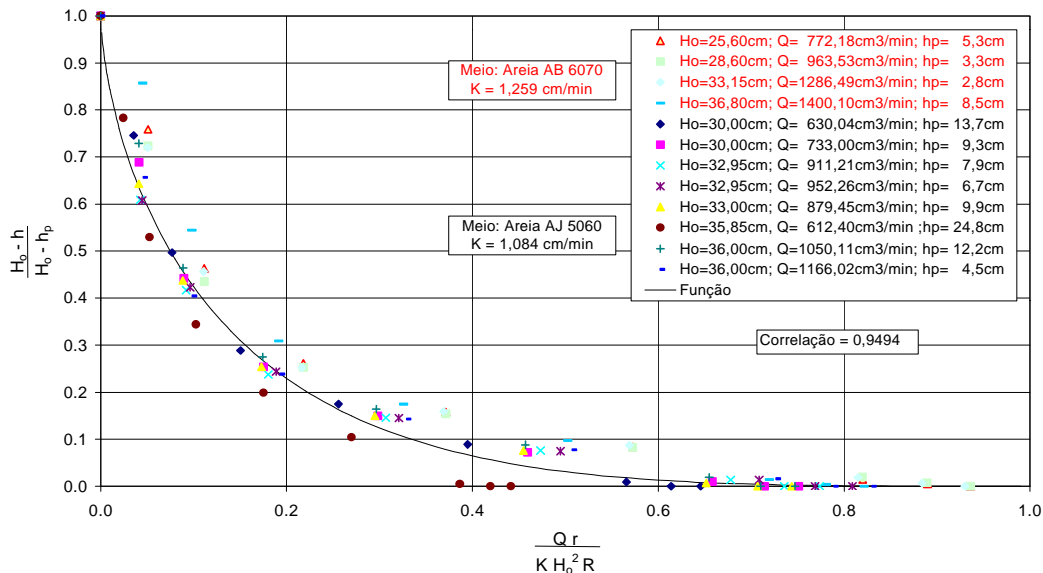
Tais grupos são utilizados para representações gráficas individualmente ou em conjunto.

## 6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Diversas tentativas foram efetuadas com o uso de grupos individuais ou em pares de grupos adimensionais. Entretanto, não tendo boa representação, são inseridos coeficientes que possibilitam ajustes adequados através de minimização da função para se obter melhores coeficientes de correlação. Para representação final de resultados observados em todos ensaios relativos aos estados permanente ou não permanente, os parâmetros ajustados em ensaios correspondentes a cada série de condições operacionais ( $H_o$ ,  $Q$ ) são analisados para se obter uma descrição universal através do ajuste de mais uma função. O processo de ajuste de função em dados observados se deu através de tentativas de plotagem de dados adimensionalizados em diversas condições, verificando-se os coeficientes de correlação obtidos escolhendo-se as melhores representações. O critério de ajuste foi a minimização da soma dos quadrados dos desvios entre valores observados e aqueles obtidos por funções de ajuste.

### 6.1. CASO PERMANENTE

Inicialmente os valores observados da altura do lençol freático foram plotados sem qualquer adimensionalização com dados de altura do nível d'água contra distância radial. Posteriormente foram efetuadas as adimensionalizações, Figura 06.



**FIGURA 06** – Altura do lençol freático adimensional,  $\frac{H_o - h}{H_o - h_p}$  em função da distância radial, adimensionalizada  $\frac{Q r}{K H_o^2 R}$

Esta tentativa obtém uma variação contínua dos dados, sendo adotada para representar os resultados de ensaios do caso permanente. A função ajustada segundo o critério de minimização é dada a seguir:

$$\frac{H_o - h}{H_o - h_p} = \left[ 1 - \left( \frac{Q r}{K H_o^2 R} \right)^{0,66} \right]^{3,47}$$

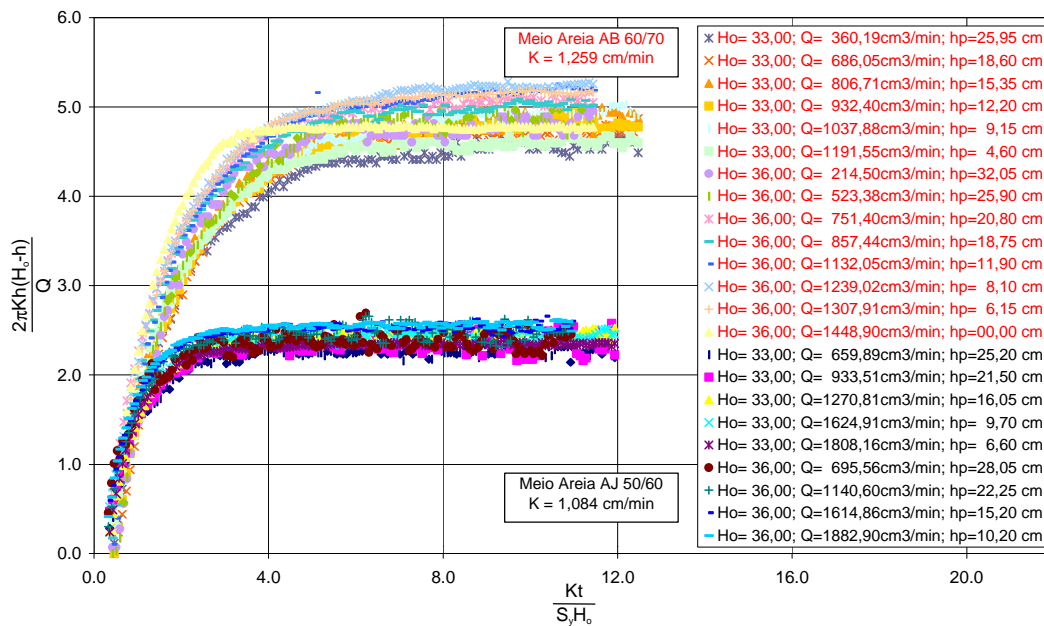
Com esta análise, é possível conhecer a altura da face de percolação correspondente as condições quaisquer de ensaio, visto que incorpora todos parâmetros nos grupos adimensionais.

## 6.2. CASO NÃO PERMANENTE

Como valores de altura de nível d'água contra tempo não permitem comparações entre ensaios, um primeiro passo foi adimensionalizar empregando-se a relação de permeabilidade e tempo pela altura de carga no contorno, inseriu-se a produção específica (adimensional) para se obter o fator tempo proposto por BOULTON (1954),

sendo:  $t = \frac{K t}{S_y H_o}$ . A ordenada foi adimensionalizada com o primeiro termo da equação

de rebaixamento proposto por JACOB apud BEAR (1979):  $s' = (H_o - h) = \frac{Q}{2p K h}$  onde  $h = h_f$ , Figura 07.



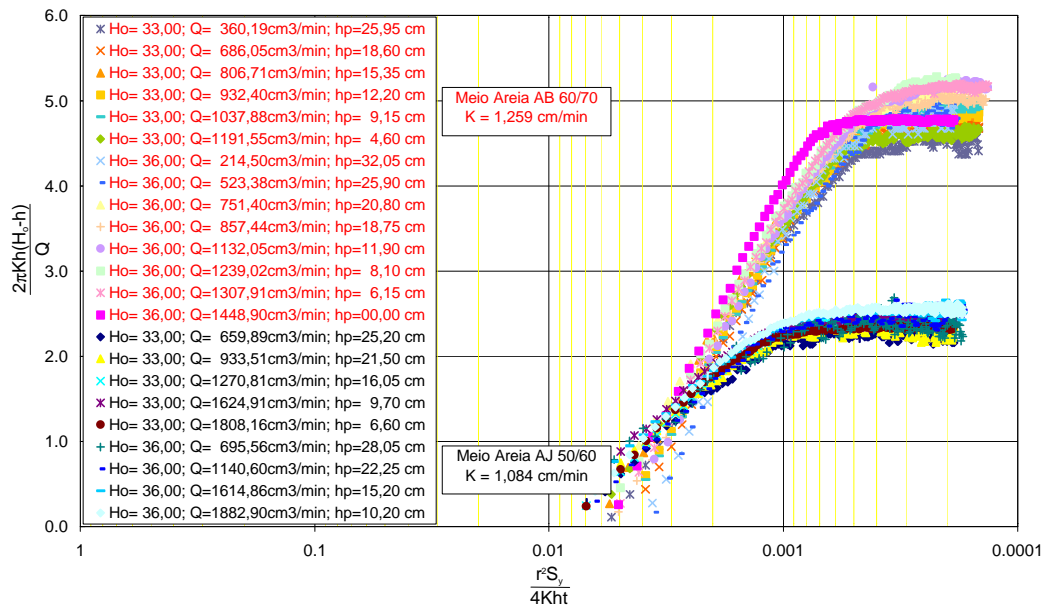
**FIGURA 07** – Alturas adimensionalizadas  $\frac{2\pi K b (H_o - h)}{Q}$  observadas na face de percolação em função do tempo adimensionalizado,  $\frac{K t}{S_y H_o}$ .

Os resultados mostram uma clara diferença para o meio poroso utilizado, a concentração de dados na parte inferior do gráfico representa o meio poroso de menor permeabilidade, areia AJ 50/60, e na parte a areia de maior permeabilidade, AB 60/70.

A grande dispersão mostra que esta adimensionalização não é suficientemente geral para se comparar os resultados observados levando em conta a diversidade de condições experimentais. Numa segunda tentativa, o fator tempo  $t$  foi substituído pelo fator  $u$  da função poço para um aquífero confinado  $W(u)$ , onde:

$$u = \frac{S r^2}{4 T t} = \frac{r^2}{K h t} \frac{S}{4} \text{ fazendo-se } S = S_y \text{ e } h = h_f.$$

Os dados foram plotados em gráfico monolog demonstrado na Figura 08.



**FIGURA 08** – Alturas adimensionalizadas  $\frac{2\pi K h(H_o - h)}{Q}$  observadas na face de percolação em função do parâmetro da função poço  $\frac{r^2 S_y}{K h t}$  em papel monolog.

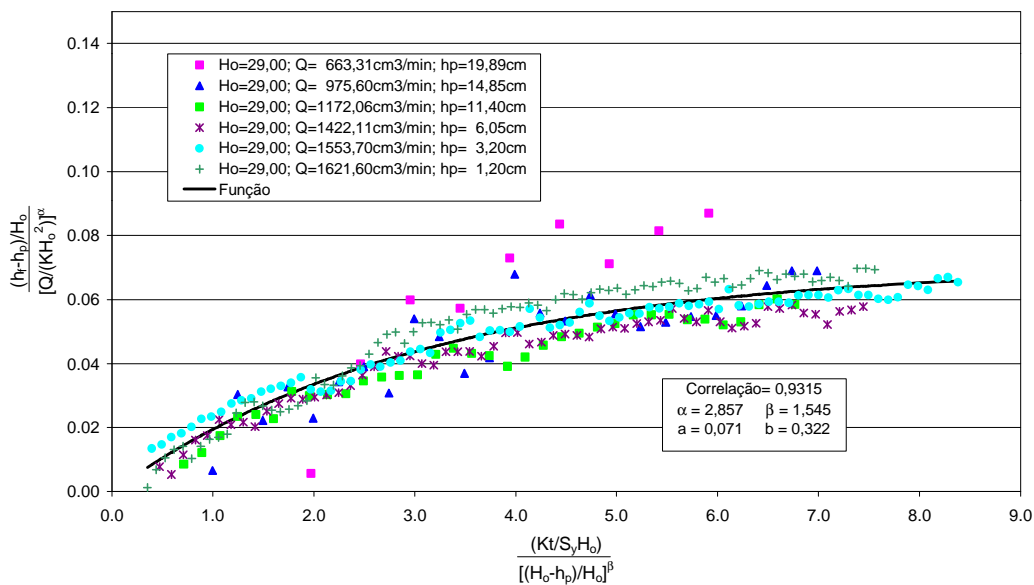
Nota-se que a dispersão praticamente não se altera, concentrando os valores na abscissa e dispersando-os na ordenada, persistindo ainda a divisão entre os meios porosos. Esta divisão teoricamente não se explica, analisando os dados comprova-se que algo interfere nos resultados, tal fato se relaciona com a condição do meio poroso. Para os ensaios realizados com a areia AB 60/70, o modelo físico sofreu interferências externas que alteraram as condições inicialmente quantificadas e posteriormente empregadas nos ensaios.

Vê-se dessas tentativas de representação que os modelos para aquíferos infinitos são incapazes de descrever os resultados observados nos ensaios sobre aquífero em modelos de dimensões finitas, com ênfase em dados da face de percolação.

### 6.2.1. Interpretação de dados experimentais via Análise Dimensional

Optou-se então por tratar apenas da evolução da face de percolação ao longo do tempo. Um primeiro passo foi plotar a evolução da diferença entre alturas do nível d'água no poço e na face de percolação. A representação consta de ensaios com carga no contorno única e diversas vazões. Isto possibilitou tratar apenas os dados de evolução temporal da face de percolação. A adimensionalização foi aplicada de modo a se obter uma máxima representatividade. Para o caso não permanente, no eixo das abscissas a

relação entre grupos adimensionais fazendo-se  $\frac{(p_3/S_y)p_7}{1-p_4} = \frac{Kt/(S_y H_o)}{(H_o - h_p)/H_o}$  mostrou ser a melhor opção. Na ordenada a relação  $\frac{p_1-p_4}{1/p_7} = \frac{(h-h_p)/H_o}{Q/(KH_o^2)}$  proporcionou juntamente com  $\frac{(p_3/S_y)p_7}{1-p_4}$  melhores respostas de interpretação atribuindo  $h = h_f$ . A Figura 09 mostra o resultado para a série de ensaios com carga ( $H_o$ ) de 29 cm, com uma função de ajuste, sendo a correlação entre dados de ensaio e a função de 93,15 %.



**FIGURA 09** – Valores da evolução da diferença entre altura do nível d’água na face de percolação e no poço em bombeamento minimizados, com uma função de ajuste, para a série de ensaios com carga no contorno de 29 cm para a areia AJ 50/60.

Para cada série de ensaios foram obtidos coeficientes de ajuste dos pontos e das funções inseridas. Os valores obtidos para o ajuste dos pontos dos dados foram denominados de  $\alpha$  e  $\beta$  sendo empregados nos pares de adimensionais  $\frac{(p_3/S_y)p_7}{(1-p_4)^b}$  e  $\frac{p_1-p_4}{(1/p_7)^a}$ . Valores da evolução da diferença tenderam à uma forma única, de modo que a função inserida para cada série foi idêntica, com diferenças apenas nos coeficientes de ajuste. A função é do tipo exponencial dada por:

$$\frac{h_f - h_p}{H_o} = a \left[ \frac{Q}{K H_o^2} \right]^a \left[ 1 - \exp \left[ -b \frac{\frac{K t}{S_y H_o}}{\left( \frac{H_o - h_p}{H_o} \right)^b} \right] \right] \text{ onde } a \text{ e } b \text{ são os coeficientes de ajuste.}$$

As Tabelas 01 e 02 mostram valores dos coeficientes dos pontos e das funções obtidas nas resoluções dos ensaios para o caso não permanente com as areias AB 60/70 e AJ 50/60 respectivamente. A correlação entre valores da função e o modelo físico experimental também é apresentada.

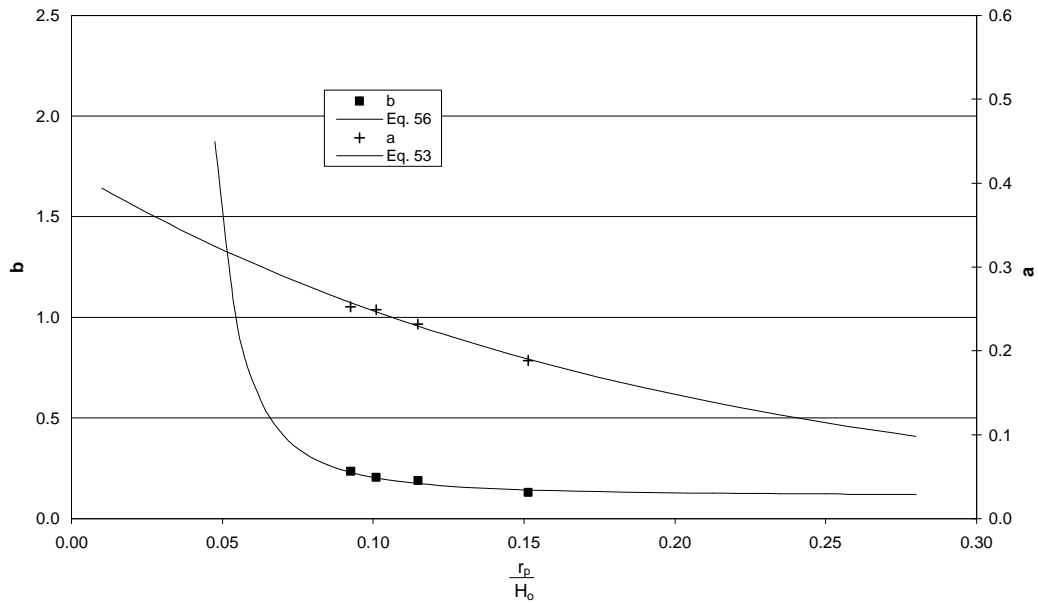
**TABELA 01** – Coeficientes de ajuste da função  $a$ ,  $b$ , e dos pontos  $a$  e  $b$  obtidos para as séries de ensaios realizados com a areia AB 60/70

Séries de Ensaio ( $H_o$ )	A	B	a	b	Correlação (%)
36	0,253	0,236	1,955	0,735	92,51
33	0,249	0,205	1,999	0,853	85,37
29	0,232	0,190	1,521	0,857	65,13
22	0,189	0,131	1,2E-5	0,530	89,23

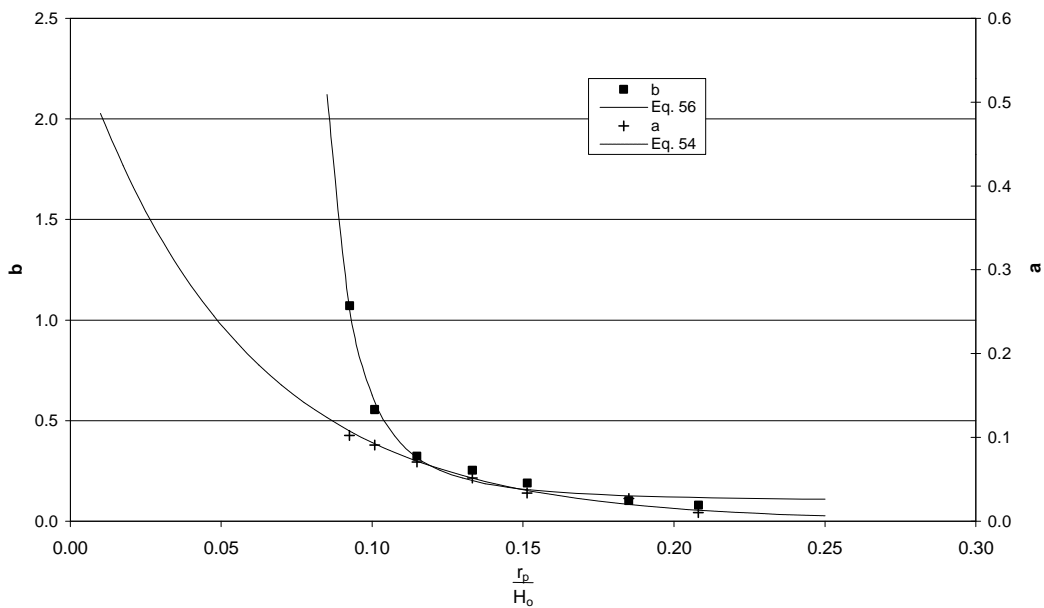
**TABELA 02** – Coeficientes de ajuste da função  $a$ ,  $b$ , e dos pontos  $a$  e  $b$  obtidos para as séries de ensaios realizados com a areia AJ 50/60

Séries de Ensaio ( $H_o$ )	A	B	a	b	Correlação (%)
36	0,110	1,380	1,012	0,010	93,01
33	0,091	0,554	1,931	0,994	91,03
29	0,071	0,322	2,857	1,545	93,15
25	0,051	0,252	3,334	1,599	91,26
22	0,034	0,190	3,890	1,856	89,86
18	0,027	0,101	4,068	2,348	83,00
16	0,010	0,080	5,678	2,388	97,32

Estes coeficientes foram plotados em função da relação entre distância radial e altura no contorno,  $\frac{r_p}{H_o} = \pi_6$ , as Figuras 10 e 11 demonstram coeficientes  $a$  e  $b$  para ambas areias. Observe-se que tendo em vista os valores fixos de  $r = 3,33 \text{ cm}$  e  $R = 60,5 \text{ cm}$  os grupos  $\pi_5 = \frac{R}{H_o} \approx 18,14$  e  $\pi_6 = 18,14 \frac{r_p}{H_o}$  e portanto não foi incluído simultaneamente na relação.



**FIGURA 10** – Coeficientes  $a$  e  $b$  obtidos das funções minimizadas em ensaios para o caso não permanente com a areia AB 60/70



**FIGURA 11** – Coeficientes  $a$  e  $b$  obtidos das funções minimizados em ensaios para o caso não permanente com a areia AJ 50/60

Nos valores destes coeficientes foi inserida uma função de modo a representa-los possibilitando projetar casos não realizados no modelo físico.

Para o coeficiente  $a$  a função obtida foi:

$$a = 0,42 e^{\left(-5,15 \frac{r_p}{H_o}\right)} \quad \text{Areia AB 60/70}$$

$$a = 0,58 e^{\left(-18,3 \frac{r_p}{H_o}\right)} \quad \text{Areia AJ 50/60}$$

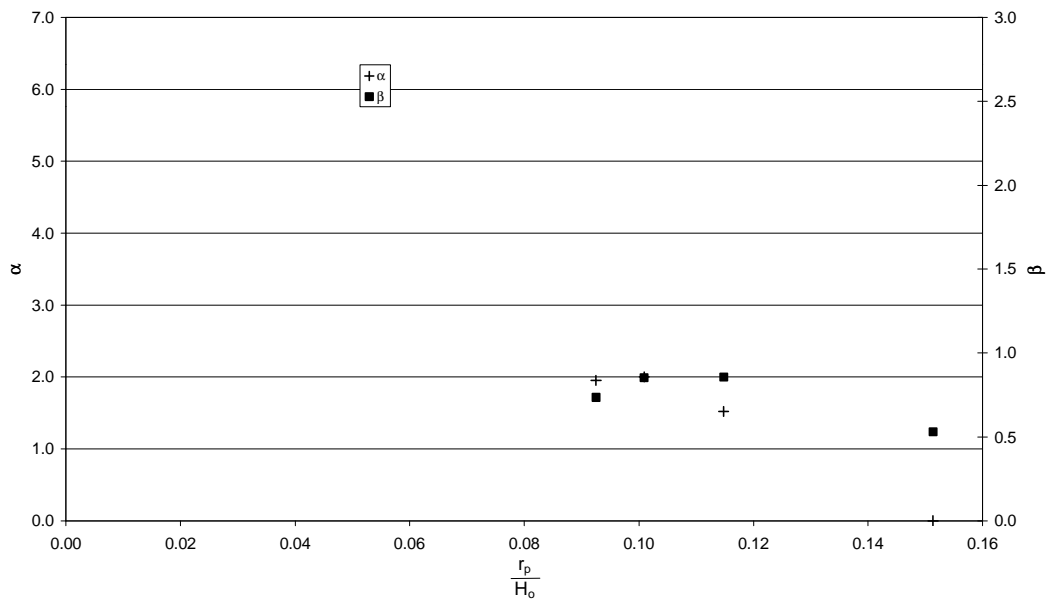


Para valores de  $b$  obteve-se:

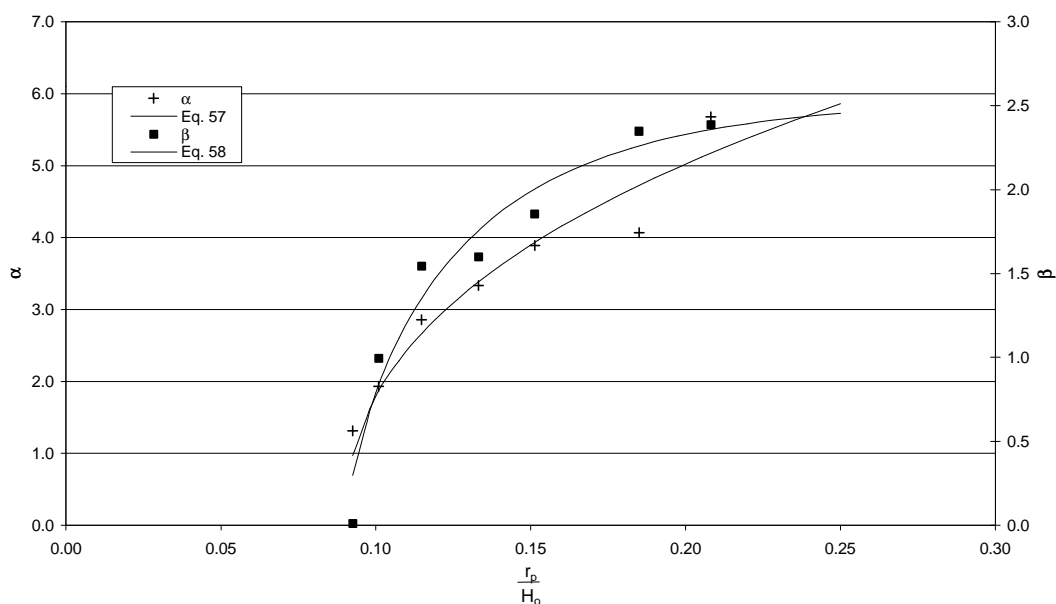
$$b = \left\{ ABS \left[ 0,0004 \left( \frac{r_p}{H_o} \right)^{-2,4} \right] + 0,55 \right\}^{4,02} + 0,02 \quad \text{Areia AB 60/70}$$

$$b = \left\{ ABS \left[ 0,0004 \left( \frac{r_p}{H_o} \right)^{-2,7} \right] + 0,80 \right\}^{14,93} + 0,06 \quad \text{Areia AJ 50/60}$$

O mesmo procedimento foi realizado para os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  Figuras 12 e 13.



**FIGURA 12** – Coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  dos pontos minimizados obtidos de ensaios para o caso não permanente com a areia AB 60/70



**FIGURA 13** – Coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  dos pontos minimizados obtidos de ensaios para o caso não permanente com a areia AJ 50/60

A expressão obtida para  $\alpha$  foi:

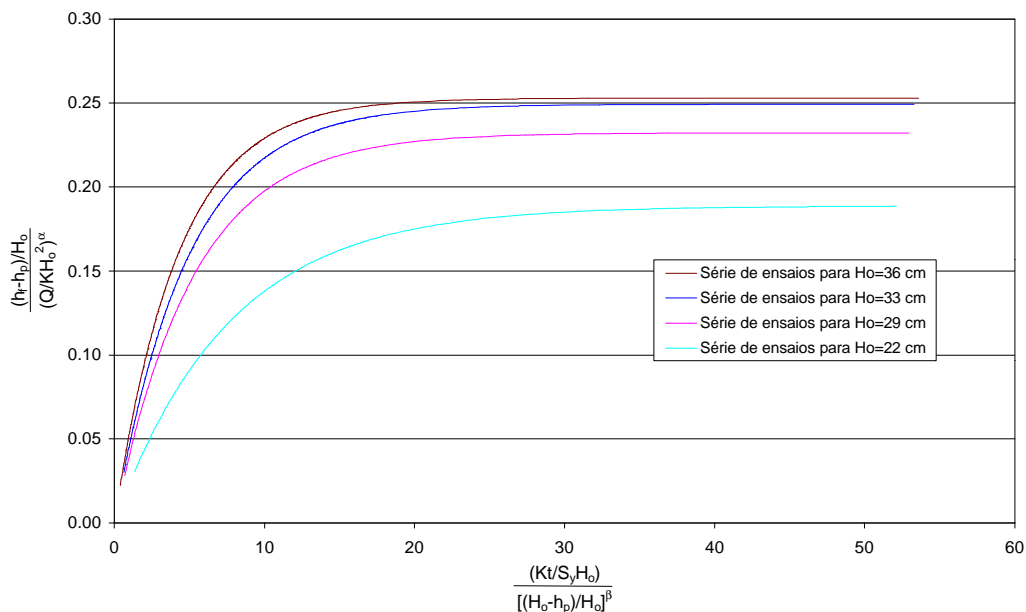
$$a = 30 \left[ 1 - e^{-0,5 \left( \frac{r_p}{H_o} - 0,09 \right)^{0,45}} \right] \quad \text{Areia AJ 50/60}$$

para  $\beta$ :

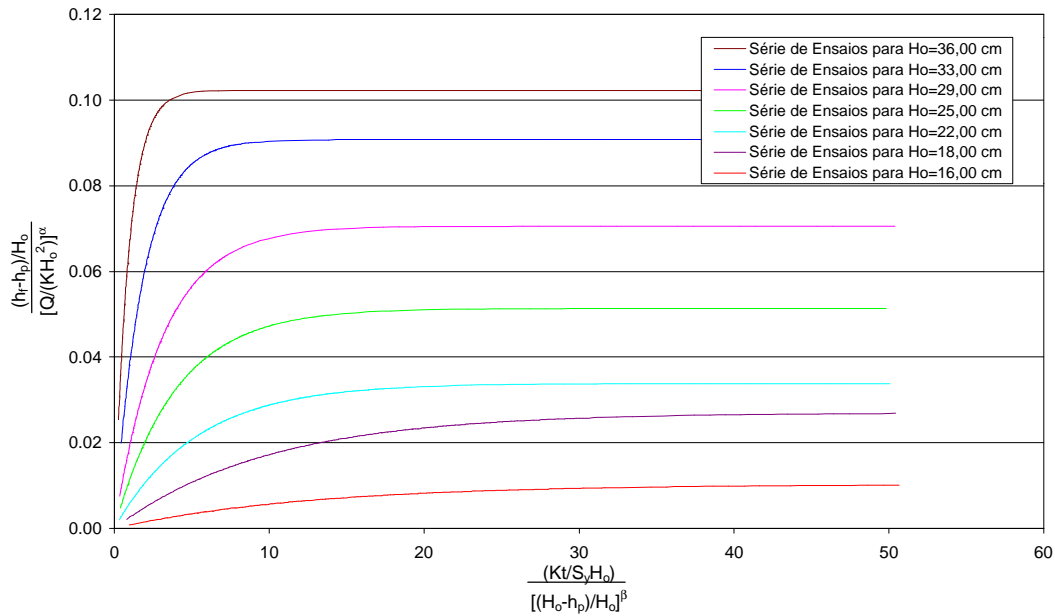
$$b = 2,55 \left[ 1 - e^{-13,77 \left( \frac{r_p}{H_o} - 0,09 \right)^{0,78}} \right] \quad \text{Areia AJ 50/60}$$

Verifica-se através da Figura 12 que  $\alpha$  e  $\beta$  obtidos da areia AB 60/70, apresentam uma certa discrepância não seguindo a tendência observada na AJ 50/60, Figura 13. Tal ocorrência possivelmente se deve as interferências que o modelo experimental sofreu antecedendo aos ensaios do caso não permanente, como mencionado. Para tanto, estes valores são descartados na análise final, permanecendo apenas da areia AJ 50/60.

Como citado para cada série de ensaio uma função foi inserida para representar os pontos plotados, as Figuras 14 e 15 apresentam as funções encontradas para todas séries de ensaios do caso não permanente para as areias AB 60/70 e AJ 50/60.



**FIGURA 14** – Funções representativas obtidas em cada série de ensaio para o caso não permanente com a areia AB 60/70



**FIGURA 15** – Funções representativas obtidas em cada série de ensaio para o caso não permanente com a areia AJ 50/60.

## 7. CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou quantificar o desenvolvimento da superfície freática em torno de um poço em bombeamento num aquífero não confinado. Particularmente, estudou-se experimentalmente a posição da face de percolação em condições permanentes e não permanentes tendo em vista a sua importância na determinação da eficiência de um poço quanto às perdas do meio poroso.

Empregando a análise dimensional conseguiu-se padronizar dados provenientes do modelo experimental, possibilitando quantificar a face de percolação sob diversas condições de contorno e diferentes parâmetros operacionais. Os resultados se dividem para duas condições.

Da análise dimensional para o problema de escoamento permanente para o poço identificaram-se cinco parâmetros nos grupos adimensionais,  $p_1 = \frac{h}{H_o}$ ;  $p_2 = \frac{r}{H_o}$ ;

$p_4 = \frac{h_p}{H_o}$ ;  $p_5 = \frac{R}{H_o}$ ;  $p_7 = \frac{K H_o^2}{Q}$ , que por sua vez foram dispostos em duas combinações

para fins de ajuste mais representativo (com correlação de 94,94 %) quais sejam:

$\frac{H_o - h}{H_o - h_p} = \frac{1 - p_1}{1 - p_4}$ . em função de  $\frac{Q}{K H_o^2} \frac{r}{R} = \frac{p_2}{p_5 p_7}$ . A relação ajustada permite calcular

alturas do lençol freático a qualquer distância do poço para dadas condições operacionais. A descrição do lençol freático para o caso não permanente limitou-se a três

distâncias do poço das quais apenas a variação temporal da face de percolação foi analisada para fins de ajuste. Neste caso tem-se sete variáveis ( $h_f$ ,  $t$ ,  $h_p$ ,  $r_p$ ,  $K$ ,  $Q$ ,  $H_o$ ) que conduziram a cinco grupos adimensionais, a saber:  $p_1 = \frac{h}{H_o}$ ;  $p_3 = \frac{Qt}{H_o^3}$ ;  $p_4 = \frac{h_p}{H_o}$ ;

$p_6 = \frac{r_p}{H_o}$ ;  $p_7 = \frac{KH_o^2}{Q}$ . A equação descreve a relação empírica obtida através do processo

de melhor ajuste, agrupa a influências destas e, portanto das envolvidas. Enquanto que a relação  $\frac{(h_f - h_p)/H_o}{Q/(KH_o^2)} = \frac{p_1 - p_4}{1/p_7}$  em função de  $\frac{Kt/(S_y H_o)}{(H_o - h_p)/H_o} = \frac{(p_3/S_y)p_7}{1 - p_4}$ , a eq. 53 para

o caso não permanente possibilita obter a evolução da face de percolação ao longo do tempo. Observa-se que com estes resultados atenderam-se os objetivos inicialmente propostos com exceção do fato de o estudo ter-se limitado aos ensaios com modelo físico de dimensão ( $R$ ) constante.

Desta forma destaca-se que os resultados obtidos permitem quantificar alturas do lençol freático para diferentes condições, mas para uma única relação de distância radial ( $r/R$ ), pois este valor foi constante para todos os ensaios.

## REFERÊNCIAS

- BEAR, J. (1979). *Hydraulics of Groundwater*. McGraw-Hill, Haifa, Israel.
- BOULTON, N. S. (1951). *The Flow Pattern Near a Gravity Well in a Uniform Water-Bearing Medium*. Proc. Instn. Civ. Engrs. v.03, p.534-549.
- BOULTON, N. S. (1954). *The Drawdown of the Water-Table Under Non-Steady Conditions Near a Pumped Well in an Unconfined Formation*. Proc. Instn. Civ. Engrs. v.03, p.564-579.
- GEFFEL, M. J.; THOMAS, G. M.; ROSSELLO, S. J. (1994). *Maximum Water-Table Drawdown at a Fully Penetrating Pumping Well*. Ground Water, v.32, n.03, p. 411-419.
- KIMBLER, O. K.; (1970). *Fluid Model Studies of the Storage of Freshwater in Saline Aquifers*. Water Resour. Res., v.06, n.05, p.1522-1527.
- MOENCH, A. F. (1993). *Computation of type curves for flow to partially penetrating wells in water – table aquifers*. Ground Water, v.31, n.06, p. 966-971.
- MOENCH, A. F. (1995). *Combining, the Neuman and Boulton Models for flow to a well in an Unconfined Aquifer*. Ground Water, v.33, n 03, p. 378-384.
- NEUMAN, S. P. (1972). *Theory of Flow in Unconfined Aquifers Considering Delayed Response of the Water Table*. Water Resour. Res. v.08, n.04, p.1031-1045.

NEUMAN, S. P. (1975). *Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifer considering delayed gravity response*. Water Resour. Res. v.11, n.02, p.329-342.