

POR

T.C. Silva¹ e S.K.V. Seemanapalli²

RESUMO - - Modelos eletroanalógicos dos tipos resistivo e resistivo-capacitivo foram usados para resolver alguns problemas encontrados em estruturas hidráulicas. Neste trabalho foram estudados três problemas ligados a percolação em barragens de terra com filtros horizontais, perdas d'água por percolação em canais não revestidos e influências de barreiras impermeáveis em aquíferos homogêneos no rendimento de um poço de bombeamento. No caso das barragens foi estabelecido um critério de comprimento de filtro efetivo para casos de isotropia e anisotropia em termos de espessura mínima da zona não saturada e menores perdas por percolação através do corpo da barragem. Para os canais trapezoidais em solos homogêneos isotrópicos foram comparados os resultados obtidos no modelo com as teorias de Dupuit-Forchheimer e Ernst, para verificação de concordância com estas teorias. No caso aquíferos homogêneos, a resposta hidráulica do aquífero ao bombeamento foi estudada no modelo para várias situações com e sem barreiras impermeáveis, para verificação do rendimento do poço em função da posição da barreira e sua orientação na área de influência.

Os modelos eletroanalógicos quer do tipo R (puramente resistivo) ou do tipo RC (resistivo-capacitivo) são instrumentos de grande valia nos estudos da Hidrologia Subterrânea. Servem para implantar as condições de campo ou estender e ampliar as condições adotadas, a fim de conhecer o comportamento dos aquíferos, percolação em barragens de terra ou outras estruturas hidráulicas. São modelos adequados para simular condições de armazenamento em aquíferos, bacias subterrâneas, poços, rebaixamentos ou recuperações naturais ou artificiais por contribuição de rios ou riachos para o aquífero e vice-versa.

Condições permanentes e variáveis, confinadas e não-confinadas, isotrópicas e não isotrópicas, homogêneas e estratificadas podem ser implantadas com uso de resistores e capacitores adequados aos correspondentes casos. Nesses modelos, o fluxo de eletricidade através dos resistores e o armazenamento de carga elétrica nos capacitores representam respectivamente o fluxo e o armazenamento de água nos meios porosos. As fontes de carga ou descargas são simuladas usando-se as correspondentes voltagens e correntes elétricas.

Neste trabalho, procuramos utilizar os modelos com finalidade de propor medidas para a melhoria de segurança e redução de perdas em barragens de terra com filtros horizontais, comparar e testar teorias de perdas por percolação de canais trapezoidais e sugerir condições de melhoramento com relação a produtividade de poços em aquíferos com barreiras impermeáveis e outras proposições.

OS MODELOS ELETROANALÓGICOS

A semelhança das equações diferenciais da hidráulica nos meios porosos e da eletrodinâmica nos condutores determina uma correspondência biunívoca entre as grandezas físicas intervenientes em ambos os processos. Assim, em modelos com contornos semelhantes ao de um sistema hidráulico, as grandezas físicas correspondentes podem ser relacionadas através de fatores de escala estabelecidos para potenciais (elétrico e carga hidráulica), resistências (condutividade elétrica e permeabilidade), fluxos (corrente elétrica e vazão) e tempos (no modelo e no protótipo).

Os modelos utilizados neste trabalho foram montados em um painel bidimensional de resistores e capacitores. O painel contém nós que (com exceção dos das bordas) podem ser conectados horizontalmente e verticalmente com os nós vizinhos, formando uma malha. As conexões entre os nós são feitas através de 4 contatos, simétricos.

¹ Professor Assistente, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa - Pb.

² Professor Adjunto, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande - Pb.

tricos em relação ao ponto nodal, por resistores acoplados em to-
madas de conexão simples, com valores previamente estabelecidos.
Cada ponto nodal fica a uma distância de 5 cm do vizinho e atra-
vés de um contato (que é o próprio nó) se conecta o elemento capa-
citivo se o modelo for do tipo RC, como mostrado na figura 1.

O problema de cada modelo consiste na determinação da corren-
te total passando através da malha de resistores e dos valores
dos potenciais (voltagens) nos pontos em que se tem interesse do
modelo geometricamente semelhante ao protótipo, que são medidos
sem dificuldades com amperímetros e voltímetros.

OS PROBLEMAS ESTUDADOS

Entre os problemas estudados nos modelos eletroanalógicos des-
tacamos três, descritos a seguir:

Efetividade de filtros horizontais em barragens de terra

Um dos mais econômicos tipos de drenos para barragens de ter-
ra é o do tipo horizontal. Localizados na parte inferior do lado
de jusante das barragens, eles têm a finalidade de rebaixar a li-
nha freática, diminuindo a camada de solo saturado, como na figu-
ra 2, o que aumenta a resistência ao cisalhamento do material do
corpo da barragem e conseqüentemente sua estabilidade. O problema
de projeto, entretanto, é a predição do mínimo comprimento do fil-
tro que resguarde uma desejada espessura de zona não saturada na
parte de jusante. No modelo foi estudado o comprimento do filtro
efetivo numa barragem de terra assente sobre uma fundação im-
permeável para casos de isotropia e anisotropia. Avaliou-se tam-
bém os aumentos das perdas d'água por percolação através da bar-
ragem, decorrentes dos acréscimos nos comprimentos dos filtros.

Avaliação de perdas d'água de canais

Estudou-se as perdas d'água que ocorrem por percolação atra-
vés do perímetro molhado dos canais não revestidos. Considerou-se
canais trapezoidais em solos uniformes isotrópicos com camadas ho-
rizontais impermeáveis a profundidades D_i do fundo do canal, para
diversos valores de D_w a distância L do centro do canal, suficien-
temente distante para atingir o fluxo caracterizado por Dupuit, co-
mo mostrado na figura 3.

Influência de barreiras impermeáveis na produtividade de poços

O caso discutido neste item refere-se a condição de regime per-
manente de aquíferos confinados com formações impermeáveis as

quais tendem a reduzir a produção líquida comparada com a do aquí-
fero homogêneo. A eficácia do sistema foi mostrada comparando-se
casos com barreiras impermeáveis de formas regulares no aquífero
contribuinte e outros casos, incluindo o de uma barreira radial
com uma extremidade tangente ao círculo de influência, conforme
mostrado na figura 4.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos modelos das barragens de terra, foram implantados filtros
de diferentes comprimentos c/L variando de 5/21 a 20/21 para o ca-
so isotrópico e anisotrópico, com coeficiente de anisotropia igual
a 4,8. Para o caso isotrópico, observou-se que com o aumento do
comprimento do filtro, a linha freática fica mais afastada do ta-
lude de jusante e termina a pouca distância do começo do filtro
enquanto no caso anisotrópico verificou-se o mesmo exceto para
 $c/L = 5/21$. Um indicador da estabilidade pode ser expresso em
termos de t/H , sendo t a espessura mínima da camada seca, e defi-
nida como a mínima distância na perpendicular do talude de jusan-
te até a linha freática. As vazões em ambos os casos aumentaram
com o comprimento do filtro devido os aumentos nos gradientes hi-
dráulicos. Esses valores praticamente coincidem com os teóricos e
as vazões no caso isotrópico foram sempre maiores do que no outro
caso. A faixa mais eficaz para o comprimento é para c/L entre 0,7
e 0,8 para o caso isotrópico e 0,8 a 0,9 para o caso anisotrópico
considerado por serem estas faixas de maiores valores de t/H com-
patíveis com valores de $q/K_h H$ não muito grandes.

Para o caso dos canais, a taxa de perdas por percolação I_s ,
foi expressa em termos de vazão por unidade de comprimento do ca-
nal dividida pela largura da superfície do canal W_s , como na fi-
gura 3. O gráfico adimensional $I_s/K \times D_i/W_b$ para D_w/W_b igual a
0,25; 0,5; 1 e 2, para um canal com $\alpha = 45^\circ$ e $H_w/W_b = 1$ mostra
curvas segundo a teoria Dupuit-Forchheimer, Ernst e os resultados
do modelo. Observou-se que as três curvas fornecem valores que
concordam razoavelmente até um certo limite, depois do que as di-
vergências são significativas, principalmente com a curva da te-
oria $D - F$, devido às simplificações desta. Observa-se que um re-
baixamento geral da linha freática resulta em significativos au-
mentos em perdas por percolação quando o nível freático inicial
situar-se consideravelmente abaixo da superfície livre do canal.

Com referências aos poços, o caso discutivo refere-se a regi-
me permanente de aquífero homogêneo isotrópico, onde a presença
de fronteiras impermeáveis no aquífero invalida a aplicação da
equação de Thiem. A vazão máxima, conseguida foi Q_H , para um re-

baixamento fixo de $6,00 - 2,40 = 3,60$ m. Nos demais casos a vazão foi diminuída com a colocação de barreiras na área de influência do poço. Com a barreira a R/6 do centro a redução foi de 33,3% em quanto a R/2 e 5/6 R foi de 9,3% e 8,3% respectivamente. A barreira radial com a mesma geometria não provocou praticamente redução no rendimento do poço, diminuindo somente 4,4% do valor original Q_H . Portanto, as barreiras transversais mais próximas do poço provocam grandes reduções no rendimento, o que deve ser evitado com o conhecimento geológico da região em estudo.

CONCLUSÕES

Os modelos eletroanalógicos serviram bem como um instrumento de análise de sistemas bidimensionais como as barragens de terra e sistemas tridimensionais como o bombeamento em aquíferos. Podem ser usados também para prever mudanças de níveis freáticos em aquíferos reais, barragens de terra e outras estruturas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a área de Engenharia de Recursos Hídricos/CCT, ao Departamento de Tecnologia da Construção Civil da Universidade Federal da Paraíba e ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio recebido.

REFERÊNCIAS

FRANCISS, F.O. - Hidráulica de meios permeáveis, São Paulo, Ed. 1980. 169p.

PALACIOS, O.V. - Uso de la analogia electrica para el estudio del movimiento de aguas subterranas, Chapingo, México, Escola Nacional de Agricultura, 1973. 46p.

SILVA, T.C. - Estudo de problemas de percolação e drenagem em estruturas hidráulicas utilizando modelos eletroanalógicos dos tipos R e RC, Tese de Mestrado, Campina Grande-Pb, UFPb-CCT, 1986. 68p.

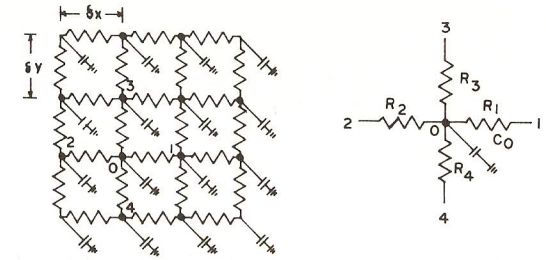


Figura 1. Circuito Bidimensional Resistivo - Capacitivo

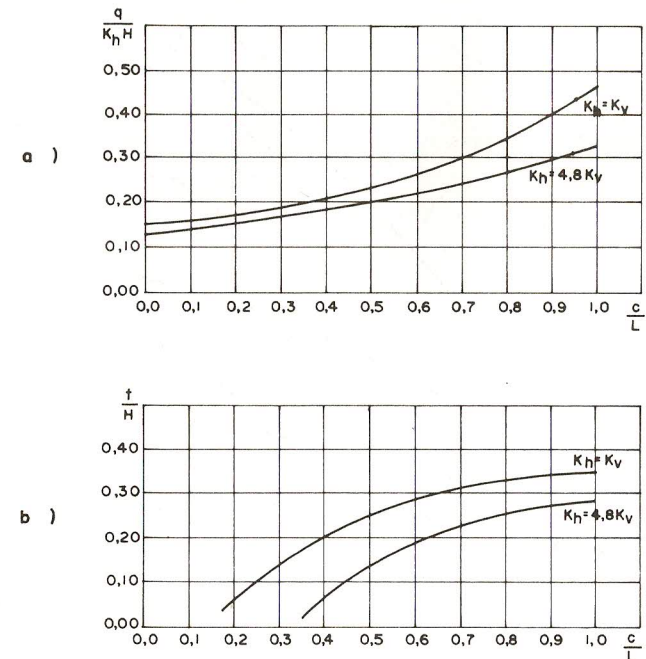
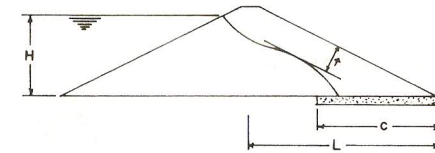
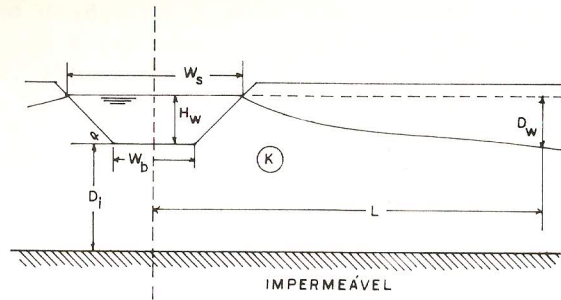


Figura 2. Gráficos Para Estimativa do Comportamento do Fluxo Através do Corpo da Barragem. (a) $\frac{q}{K_h H} \times \frac{c}{L}$. (b) $\frac{f}{H} \times \frac{c}{L}$



PARÂMETRO DA CURVA: D_w / W_b

--- TEORIA D-F
 - - - ERNST
 ——— MODELO ELETRONALÓGICO

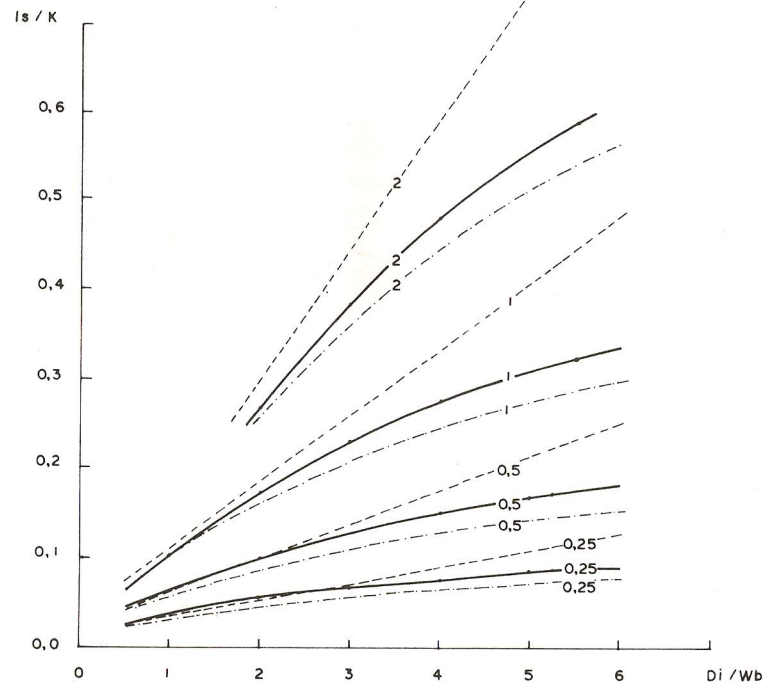
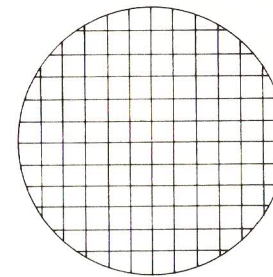


FIGURA 3. COMPARAÇÃO DAS SOLUÇÕES DE ERNST, D-F E DO MODELO ELETRONALÓGICO PARA O CANAL TRAPEZOIDAL ESTUDADO - ($\alpha = 45^\circ$; $H_w / W_b = 1$)

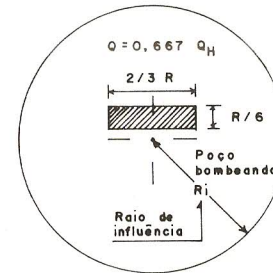
a) POÇO EM AQUÍFERO HOMOGÊNEO



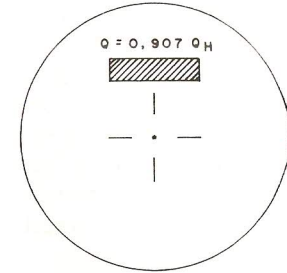
Vazão

$$Q_H = Q_{\text{HOMOGÊNEO}}$$

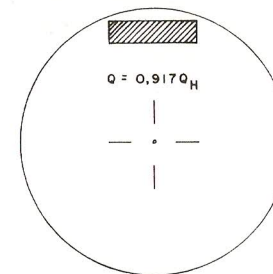
b) BARREIRA A $R/6$



c) BARREIRA A $R/2$



d) BARREIRA A $5/6 R$



e) BARREIRA NA DIREÇÃO RADIAL

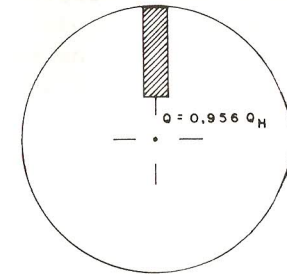


FIGURA 4. ESQUEMA PARA ESTUDO DA VARIAÇÃO DA VAZÃO COM DIVERSAS POSIÇÕES DA BARREIRA IMPERMEÁVEL.