

## CARGAS HIDRAULICAS NO AQUIFERO ABAIXO DOS RESERVATORIOS

\*

Dr. Sarma K V seemanapalli PhD

**Resumo:** O fluxo subterrâneo dos aquíferos regionais é analisado através do artifício da equação de Laplace, com as condições de contorno previamente conhecidas. O modelo matemático usado nesta tentativa utiliza as normas sugeridas por Ioth (1962) e Wang et al (1982). O problema se trata com as condições topográficas de uma barragem construída sob um meio poroso homogêneo e isotrópico, com rocha impermeável como base e analisa as cargas hidráulicas desenvolvidas na fundação pela construção da barragem e do reservatório.

As cargas assim obtidas serão úteis na determinação das perdas de água através fundações e as pressões neutras existentes no meio poroso. A rede do fluxo consistindo as curvas do fluxo e as equipotenciais foi desenvolvida pelo autor para facilitar uma interpretação exata das cargas internas e vazão/fluxo através da fundação.

### Introdução:

Um dos desafios dos engenheiros hidráulicos e de projetar estruturas seguras, econômicas e com senso estético, as quais possam proporcionar bem-estar a comunidade e ao ambiente, sendo a segurança e a estabilidade estrutural mais importantes na maioria dos casos, envolve uma questão de previsão e de performance da estrutura projetada.

A configuração do sistema do fluxo regional subterrâneo será de interesse dos planejadores e engenheiros de recursos hídricos para fins de tomar decisões sobre desenvolvimento regional das bacias hidrologicas dos rios/riachos. A detalhe da Tabela 01 representa uma seção transversal através de uma barragem. As margens representam as divisas da água subterrânea cujos contornos são as beiras impermeáveis, representando a condição de sem-fluxo. Embora na realidade não existem as barreiras físicas, as divisas tem mesmo efeito e se tornam como impermeáveis, A medida que não havendo fluxo através das seções mostradas na Tabela 01. Assim, a margem inferior também representa uma barreira impermeável, com linhas de fluxo ocorrendo na direção horizontal.

O aquífero abaixo da barragem e reservatório tem uma extensão de 120m, dividido em três partes, a barragem sendo colocada na parte central, com o reservatório occu

\*Professor, Area de Eng. de Recursos Hídricos, UFPB; C. Grande, Pb

pando outra parte, com 10m de água. No lado jusante, o reservatório tem zero metros de água. A espessura do aquífero é 40m. As cargas hidráulicas foram representadas em cada 10m de profundidade, em seções de 20m horizontais. Com os contornos da superfície definidos (Tabela 01), o domínio se reduz como um modelo retangular com fluxo saturado (Toth, 1962).

A carga ao longo da linha AB será de 110m, com 10 m de água no reservatório, +100,00 sendo o nível da referência do terreno. A variação da carga entre B e C será de 110m a 100m e ao longo da linha CD, a carga será de 100m.

Representação Matemática do Problema:

Neste trabalho, serão utilizadas algumas considerações a respeito do uso dos modelos matemáticos, com referência especial dos métodos de elementos finitos, para se obter as cargas hidráulicas transitórias ou estáveis e as correspondentes vazões e as perdas através percolação ocorridas durante fases de utilização das barragens com reservatórios. Mesmo que, teoricamente, os meios porosos se estendem até o infinito para se aplicar os métodos citados, os meios ocuparão espaços relativamente finitos e nesta tentativa, serão adotadas dimensões de barragem tal que as mesmas se comportam como finitas.

Em termos matemáticos, o problema se reduz como abaixo:

a  $h(x,y)=110$   $0 \leq x \leq 40$  no lado montante da barragem

$h(x,y)=110-(x-40)/4$  na parte central  $40 \leq x \leq 80$

$h(x,y)=0$  na parte jusante da barragem  $80 \leq x \leq 120$

b  $dh/dy = 0$  a  $y=0$   $0 \leq x \leq 120$  na base do aquífero

c  $dh/dx = 0$  a  $x=0$   $0 \leq y \leq 40$

e d  $dh/dx = 0$  a  $x=120$   $0 \leq y \leq 40$

A especificação da carga ao longo da margem superior é governado por condição de Dirichlet e a lei de Darcy se relaciona com os demais variáveis o fluxo e cargas hidráulicas. Ao longo da linha vertical,  $Q_x=0$  que implica que  $dh/dx=0$  e ao longo da linha horizontal  $Q_y=0$  que significa que  $dh/dy=0$ . Essa simplificação do fluxo através de três margens é governado pela condição de Neumann (1980).

A medida que a equação de Laplace simula o fluxo subterrâneo de um aquífero isotrópico e homogêneo, onde não terão acumulações nem perdas de água dentro do sistema, Toth (1962) propôs que num aquífero não-desenvolvido completamente, as flutuações dos níveis freáticos serão pequenas na base anual. Assim, sob condições realizadas, a equação de Laplace

$$d^2h/dx^2 + d^2y/dy^2 = 0 \quad \text{---- (1)}$$

é a equação governante, com as condições já definidas anteriormente.

### Distribuição das Cargas na Fundação

Tabela 01 com detalhe na forma da figura representa as cargas desenvolvidas devido a presença da barragem e do reservatório e a distribuição das cargas na superfície (N.R. +100.00) serão como mostrados na figura.

As cargas dentro da fundação ou do aquífero serão como demonstradas na Tabela. 01. O modelo matemático usado segue as instruções dadas por Wang e Anderson (1982). Uma análise das cargas desenvolvidas dentro da fundação indica o fato de que há reversão do quadro da seção 0m a seção 120m. Enquanto as cargas diminuíram na seção 120m de 110m a 108.69m, há um aumento nas cargas na seção de 100m para 101.29m. As reduções na seção 0m foram mais do que os aumentos registrados na seção 120m, sendo respectivamente (-1.32m) e (+1.29m). Abaixo da seção 60m, as cargas permaneceram mesmas, sendo o valor igual a 104.99m

A Tabela.2 representa as cargas desenvolvidas num aquífero (ou numa fundação), com as características de anisotropia. A anisotropia significa que o aquífero exibe valores diferentes de permeabilidade nas duas direções horizontais, x e y, sendo "z" a direção vertical. Os valores correspondem com permeabilidade na direção x de  $K_x=1$  e a permeabilidade na direção y de  $K_y=0,9$  e estes valores são relativos, sendo adimensionais. Assim, os valores absolutos não tem nenhum significado e são válidos para qualquer situação, com mesmas condições de contorno definidas inicialmente. A análise do quadro mostra o fato que as cargas são muito diferentes das quais encontradas na Tabela 02. A 10m e 40m de profundidades, houve reduções  $(109,48-71,35)/109,48=34,8\%$  e  $(108,69-32,99)/108,69=69,6\%$  na seção 0m e  $(100,51-65,01)/100,51=35,5\%$  e  $(101,29-30,24)/101,29=70,1\%$  na seção 120m respectivamente. Enquanto no caso de  $K_x=K_y=1$ , não houve nenhuma redução da carga na seção 60m, no caso de anisotropia, com  $K_x=1$  e  $K_y=0,9$ , as reduções foram  $(104,99-68,19)/104,99=35,1\%$  e  $(104,99-31,66)/104,99=69,8\%$  na mesma seção.

Enquanto no caso isotrópico, ocorrerem diminuições e aumentos respectivamente nas seções 0 e 120m, no caso anisotrópico ocorrerem somente diminuições na ordem de  $(71,35-32,99)/71,35=53,8\%$  e  $(65,01-30,34)/65,01=53,3\%$ , a percentagem de diferença sendo insignificativa.

O gradiente hidráulico ao longo da base no caso isotrópico é mais alto do que aquilo do caso anisotrópico. Enquanto o gradiente era de  $(8,69-1,29)/120=6,2\%$  no caso isotrópico, o mesmo é de  $(32,99-30,34)/120=2,2\%$  para o caso anisotrópico citado acima. Enquanto não existe nenhum gradiente na seção central de 60m, na direção vertical, o mesmo no caso anisotrópico foi  $(105,00-31,66)/40=183\%$ . Assim, no caso anisotrópico, em comparação com o caso isotrópico, as cargas diminuíram mais accentuadamente na direção vertical do que na direção horizontal, sendo os gradientes menores no caso anisotrópico do que isotrópico.

Tabela 03 mostra os valores das cargas desenvolvidas no caso anisotrópico com  $K_x=0,9$  e  $K_y=1,0$ , sendo permeabilidades nas direções horizontal e vertical. Neste caso também, há um gradiente na direção vertical, bem como na direção horizontal, com o gradiente mas mais accentuado na direção vertical do que horizontal, em todas as seções.

Enquanto ocorrerem reduções nas seções 0 e 120m respectivamente de  $(110-39,12)/110=63,3\%$  e  $(100-33,13)/100=66,9\%$ , entre seções horizontais a 0 e 40m, as reduções foram  $(110-100/100)=10\%$  e  $(39,12-33,13)/39,12=15,3\%$  respectivamente. Na seção 60m, na direção vertical, o gradiente foi  $(105-34,63)/105=67\%$ .

Todos estes valores da Tabela 3 com anisotropia, com menor valor de permeabilidade na direção horizontal do que vertical ( $K_x=0,9$  e  $K_y=1$ ) foram correspondente menores dos do caso de anisotropia com menor valor de permeabilidade ( $K_x=1$  e  $K_y=0,9$ ) na direção vertical.

Rede do Fluxo (traçados de Linhas Equipotencias e Linhas do Fluxo)

O objetivo de modelação é de prever os efeitos de variável incognita sobre os outros parâmetros do sistema. O modelo matemático consiste de ser de equações diferenciais que controlam o fluxo subterrâneo. A confiança de uso de uma equação ou outra na maioria dos casos depende de maneira de adoção da mesma para as condições existentes no campo. Para fins de realizar situações realísticas, é necessário adotar técnicas adequadas através de uso dos modelos matemáticos.

A rede do fluxo é um dispositivo que junta as trajetórias das partículas do líquido e as linhas de igual carga piezométrica. Assim, um canal do fluxo ou um tubo de fluxo representa uma porção da vazão expressa em percentagem ou proporção da vazão total de água que se infiltra ou se percola. O escoamento bi-dimensional da água em meios porosos é isotrópico em relação à permeabilidade e teoricamente regido pela equação de Darcy que foi dada no início deste trabalho.

Enquanto existem vários métodos para traçar redes do fluxo, o método que foi proposto pelo físico alemão, Forchheimer foi usado nesta tentativa para interpretar a rede em termos do fluxo subterrâneo. Embora consista no traçado à mão livre de diversas possíveis linhas de escoamento e equipotenciais, respeitando-se a condição de que elas se cruzam ou interceptam ortogonalmente e que formem figuras "quadradas", o método atualmente adotado segue as normas sugeridas por Forchheimer e Kinzelbach, como foi dito anteriormente.

Figura 01 mostra a rede do fluxo, sendo os traçados das linhas equipotenciais e linhas do fluxo, para o caso de anisotropia da Tabela 02. A técnica adotada para obter essas curvas foi desenvolvida pelo autor (Dr. Sarma, S.V.K.) e Sastry, S.V.S. Krishna, aluno de Engenharia Elétrica da UFPB, o procedimento envolve o uso dos métodos sugeridos por Kinzelbach, W com modificações necessárias para obter um duplo traçado das curvas na mesma figura, representando ambas as curvas (linhas equipotenciais e linhas do fluxo). Este procedimento pode ser estendido para qualquer situação, seja o caso de barragens com reservatórios, barragens de terra, para as situações de homogeneidade, heterogeneidade, com núcleos, com filtros horizontais ou inclinados, com tapetes e até os casos de anisotropia e/ou estratificação. O artifício de Forchheimer foi usado para obtenção dessa família das curvas.

Estas curvas são úteis no cálculo das perdas da vazão através percolação ou das cargas dentro da matriz. Por exemplo, a perda da vazão no caso citado de anisotropia com  $K_x=1$  e  $K_y=0,9$  será  $7,3 \times 10^{-5}$  cm<sup>3</sup>/s, sendo a permeabilidade do meio poroso,  $K=1 \times 10^{-5}$  cm/s,  $N \psi$  = número das linhas do fluxo (tubos de fluxo) = 7,3,  $n \phi$  = número das degraus equipotenciais = 10, e  $h$  = carga hidráulica total = 10 m, usando a fórmula de Darcy para obtenção da vazão,  $Q = K \times H \times (N \psi / N \phi)$

Com uma base permeável, a vazão perdida na direção vertical também pode ser avaliada correspondentemente com mesma nomenclatura usando a mesma lei de Darcy.

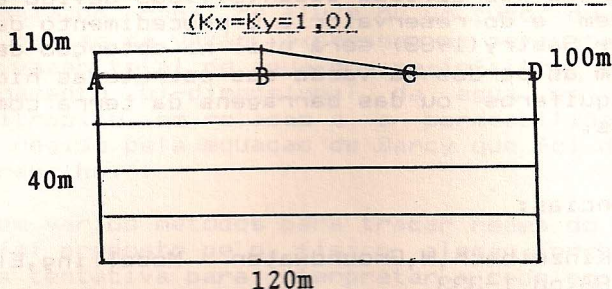
Conclusões:

O método de Wang e Anderson (1982) serviu bem na obtenção das cargas hidráulicas desenvolvidas devido a existência da barragem e do reservatório. O procedimento desenvolvido por Sarma e Sastry (1988) será útil na obtenção de Rede do Fluxo assim as perdas da vazão das estruturas hidráulicas, sejam dos aquíferos ou das barragens da terra com núcleo e/ou filtros.

Referências:

1. Kinzelbach, W, Groundwater Modelling, Elsevier, Amsterdam, 1986, pp 1-333
2. Wang H F e Anderson, M P, "Introduction to Groundwater Modelling", 1982, pp 1-233
3. Toth, J A Theoretical Analysis of Groundwater Flow in Small Drainage Basins, J Geo-Physical Res. 1963, 68(16) pp.4795-4812
4. Neumann, S.P. A Statistical Approach to the Inverse Problem of Aquifer Hydrology, Water Resources Research 1980, 3, 16(2), pp 331-346
5. Sarma, S.V.K .Vazoes e Velocidades Espaciais a Partir de Cargas Hidraulicas, VIII Congr. Latino Americano e Iberico sobre Metodos Computacionais para Engenharia, Rio de Janeiro, 3 a 5 de nov. de 1987, PUC, RJ (publicado nas Anais do Congresso)
6. Homero Pinto Caputo, Mecânica dos Solos, Vol. 2, 3ª Edic. 3ª, 1983, Livros Técnicos e Científicos, Editora, Sao Paulo

Table 01 Cargas Hidraulicas no Aquifero Isotropico



<u>Distancia</u> <u>horizon-</u> <u>tal,m/</u> <u>Profundi-</u> <u>dade,m</u>	<u>0</u>	<u>20</u>	<u>40</u>	<u>60</u>	<u>80</u>	<u>100</u>	<u>120</u>
<u>0</u>	<u>110,00</u>	<u>110,00</u>	<u>110,00</u>	<u>105,00</u>	<u>100,00</u>	<u>100,00</u>	<u>100,00</u>
<u>10</u>	<u>109,48</u>	<u>109,29</u>	<u>108,33</u>	<u>104,99</u>	<u>101,66</u>	<u>100,70</u>	<u>100,51</u>
<u>20</u>	<u>109,06</u>	<u>108,75</u>	<u>107,54</u>	<u>104,99</u>	<u>102,44</u>	<u>101,24</u>	<u>100,93</u>
<u>30</u>	<u>108,78</u>	<u>108,42</u>	<u>107,16</u>	<u>104,99</u>	<u>102,81</u>	<u>101,56</u>	<u>101,19</u>
<u>40</u>	<u>108,69</u>	<u>108,31</u>	<u>107,05</u>	<u>104,99</u>	<u>102,92</u>	<u>101,67</u>	<u>101,29</u>

Tabela 02 Cargas Hidraulicas no Aquifero Anisotropico

( $K_x=1,0;K_y=0,9$ )

<u>Distancia</u> <u>horizon-</u> <u>tal,m/</u> <u>Profundi-</u> <u>dade,m</u>	<u>0</u>	<u>20</u>	<u>40</u>	<u>60</u>	<u>80</u>	<u>100</u>	<u>120</u>
<u>0</u>	<u>110,00</u>	<u>110,00</u>	<u>110,00</u>	<u>105,00</u>	<u>100,00</u>	<u>100,00</u>	<u>100,00</u>
<u>10</u>	<u>71,35</u>	<u>71,26</u>	<u>70,69</u>	<u>68,19</u>	<u>65,67</u>	<u>65,03</u>	<u>65,01</u>
<u>20</u>	<u>48,59</u>	<u>48,47</u>	<u>47,92</u>	<u>46,51</u>	<u>45,10</u>	<u>44,46</u>	<u>44,44</u>
<u>30</u>	<u>36,68</u>	<u>36,56</u>	<u>36,09</u>	<u>35,19</u>	<u>34,26</u>	<u>33,71</u>	<u>33,68</u>
<u>40</u>	<u>32,99</u>	<u>32,87</u>	<u>32,44</u>	<u>31,66</u>	<u>30,88</u>	<u>30,37</u>	<u>30,34</u>

Tabela 03 Cargas Hidraulicas no Aquifero Anisotropico

( $K_x=0,9, K_y=1,0$ )

<u>Distancia</u> <u>Horizon-</u> <u>tal/</u> <u>Profundi-</u> <u>dade, m</u>	<u>0</u>	<u>20</u>	<u>40</u>	<u>60</u>	<u>80</u>	<u>90</u>	<u>120</u>
<u>0</u>	110,00	110,00	110,00	105,00	100,00	100,00	100,00
<u>10</u>	73,35	73,27	72,72	70,08	67,43	66,88	66,80
<u>20</u>	51,39	51,28	50,71	49,17	47,62	47,05	46,94
<u>30</u>	39,76	39,64	39,14	38,09	37,04	36,54	36,42
<u>40</u>	39,12	35,99	35,53	34,63	33,72	33,25	33,13

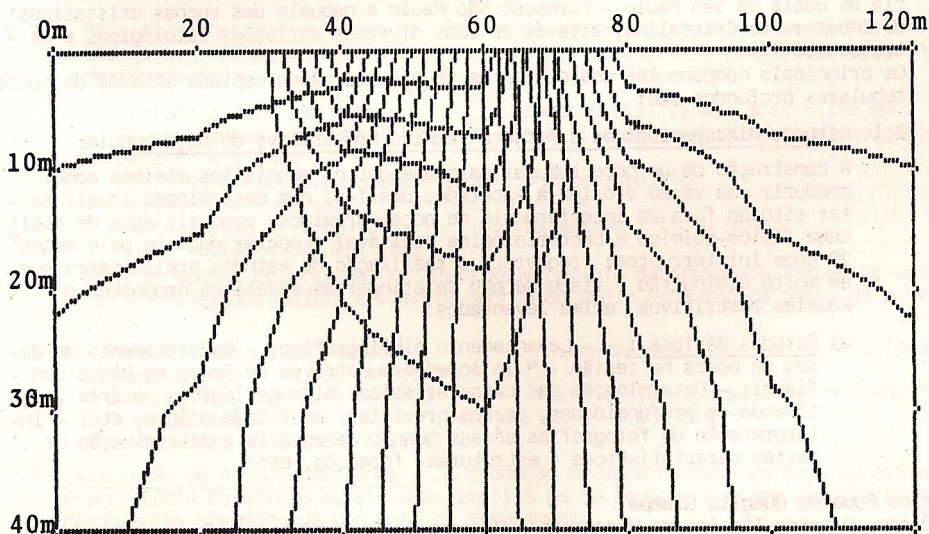


Fig.01 Rede do Fluxo para o caso Homogêneo  
( $K_x=K_y=1,0$ )