

## **[I-052] PRÁTICAS LABORATORIAIS E DE CALIBRAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DO EQUIPAMENTO AQUALIBRIUM**

**Alessandro de Araújo Bezerra<sup>(1)</sup>**

Professor Adjunto da UFPI, Doutor em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará (UFC), Mestre em Recursos Hídricos pela UFC e Bacharel em Engenharia Civil pela UFC.

**Rafael Lima de Carvalho<sup>(2)</sup>**

Discente de graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Piauí (UFPI).

**Renata Shirley de Andrade Araújo<sup>(3)</sup>**

Professora Adjunta da UFPI, Doutora em Recursos Hídricos pela UFC, Mestre em Recursos Hídricos pela UFC e Bacharel em Engenharia Civil pela UFC.

**Amanda Letiere de Sousa Araújo Carvalho<sup>(4)</sup>**

Discente de graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Piauí (UFPI).

**Jordana Madeira Alaggio Ribeiro<sup>(5)</sup>**

Discente de graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Piauí (UFPI).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Departamento de Recursos Hídricos, Geotecnia e Saneamento Ambiental – Centro de Tecnologia – Universidade Federal do Piauí. Campus Universitário Ministro Petrônio Portella – Ininga – Teresina – Piauí - CEP: 64049-550 - Brasil - e-mail: alessandrobezerra@ufpi.edu.br.

### **RESUMO**

As redes de distribuição de água são sistemas complexos que requerem um grande cuidado durante toda a elaboração das mesmas, exigindo muito conhecimento do profissional da engenharia civil. A fim de dimensionar essas redes, são utilizados simuladores hidráulicos. Observa-se, no entanto, que há inconstâncias nos parâmetros reais quando comparados com aqueles calculados nos simuladores pois os dados iniciais de uma rede de distribuição nunca são perfeitos, surgindo a necessidade de procedimentos de calibração nos coeficientes das redes.

Tendo isso em vista, além da grande necessidade de práticas experimentais durante a formação do engenheiro civil, o equipamento Aqualibrium surge como uma ferramenta que torna possível realizar o estudo da eficiência dos métodos de calibração em um âmbito acadêmico, já que se trata de uma forma de observar o comportamento de redes de distribuição através de modelagens com tubulações e conexões em escala laboratorial.

Dessa maneira, o presente trabalho visa aliar o Aqualibrium ao Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA) para calibrar o fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach, confirmando a aplicabilidade desse método.

**PALAVRAS-CHAVE:** Calibração, Fator de atrito, Aqualibrium.

### **INTRODUÇÃO**

Para realizar o dimensionamento de redes de distribuição de água, utilizam-se simuladores hidráulicos, que facilitam todos os processos para os projetistas. Entretanto, ocorre que os resultados obtidos nesses simuladores diferem dos resultados reais. Um dos motivos que explica essa diferença fundamenta-se no fato de que uma rede de distribuição de água pode ser feita com base em vários materiais e esses materiais possuem rugosidades diferentes que não se mantêm constante ao longo das tubulações e muito menos ao longo do tempo. Outra explicação é a variação do consumo pela população que se altera ao longo dos anos.

Independente do motivo, esses fatores mostram que a utilização de um método de calibração em redes de distribuição de água é fundamental para que haja uma boa estimativa dos seus parâmetros com base em dados reais.

O presente trabalho utiliza o equipamento Aqualibrium para fazer o estudo de calibrações. Com esse equipamento é possível montar redes em laboratório, sendo um instrumento eficiente para a realização de práticas laboratoriais.

Assim, partindo-se da montagem de uma rede malhada simples, dentre as mais diversas possíveis que o equipamento permite, aplicou-se o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA) para fazer a calibração. O parâmetro escolhido foi o fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach, a partir do qual é possível estimar a rugosidade absoluta das tubulações. Esse parâmetro é fundamental em qualquer rede, visto que qualquer mudança nele afetará as perdas de carga, que podem gerar grandes problemas.

## OBJETIVOS

Devido à grande carga teórica vista pelo estudante de engenharia civil, práticas laboratoriais são de extrema importância para a observação prática daquilo que se estuda em sala de aula. Portanto, ao fazer uso do equipamento Aqualibrium para estudar o funcionamento de redes de distribuição de água, um dos objetivos desse trabalho tem relação com a ampliação de atividades práticas no curso de graduação em engenharia civil.

Outro objetivo é utilizar uma rede montada com o Aqualibrium para aplicar o processo de calibração do fator de atrito na equação de Darcy-Weisbach através do Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA). Com isso, espera-se alcançar parâmetros ideais na rede montada que confirmem a validade do método.

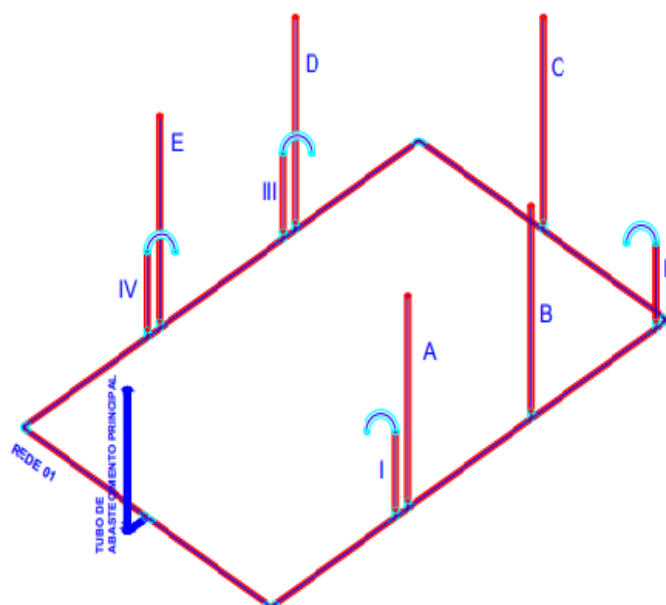
## METODOLOGIA UTILIZADA

Para a modelagem da rede de abastecimento de água, utilizou-se o mecanismo fornecido pelo Aqualibrium, que se trata de um sistema que utiliza tubos e conexões em escala reduzida, simulando uma rede de distribuição real.

Com esse aparelho, obteve-se uma rede malhada simples, da qual foram selecionados alguns pontos para a retirada de dados de vazão e pressão. A vazão foi calculada medindo-se o volume de água que saía desses pontos em um dado instante de tempo, enquanto que a pressão foi medida verificando a altura de água que subia ao colocar-se um tubo reto nos mesmos pontos, simulando piezômetros, como mostram a figura 1 e a figura 2.

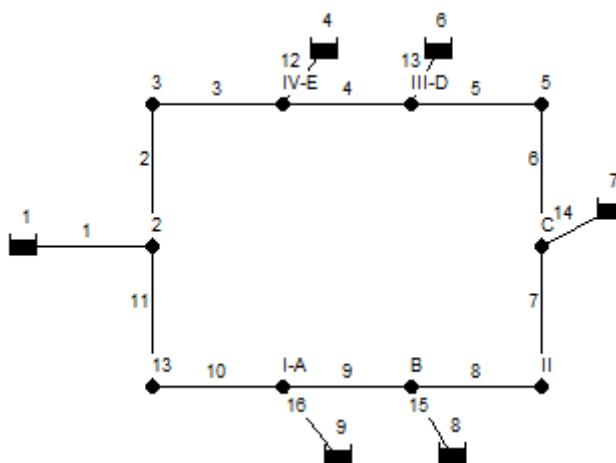


**Figura 1: Rede montada em laboratório com o Aqualibrium**



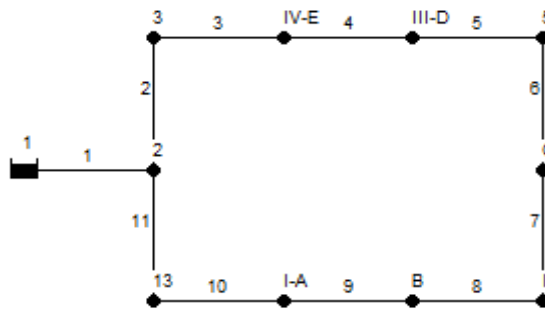
**Figura 2: Representação da rede**

De posse desses dados, além dos níveis de água no reservatório e nas tubulações, foi possível realizar uma simulação utilizando o software Epanet, a qual foi denominada de rede observada, pois as informações inseridas foram as mesmas das obtidas na prática. Nesse caso, as pressões foram configuradas inserindo no programa reservatórios próximos aos pontos de interesse, com os níveis de água igualados às pressões desses pontos, e fazendo a ligação entre eles utilizando trechos de comprimentos insignificantes e diâmetros exagerados, como exposto na figura 3.



**Figura 3: Rede observada montada no Epanet**

Foi simulada também, no mesmo software, uma rede cujas pressões não foram previamente definidas, mas com os mesmos dados de níveis d'água, diâmetros e comprimentos da rede real, sendo chamada, portanto, de rede calculada, representada na figura 4.



**Figura 4: Rede calculada montada no Epanet**

A partir desses modelos, é possível dar início ao processo de calibração. Neste trabalho, foi utilizado o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA) para o fator de atrito na equação de Darcy-Weisbach, baseando-se na relação de proporcionalidade entre este e o gradiente hidráulico de acordo com a equação 1, sendo  $\nabla H_o$  o gradiente hidráulico da rede calculada e  $\nabla H_c$  o gradiente hidráulico da rede observada.

$$f_j^{i+1} = f_j^i \left( \frac{|\nabla H_{c_j}|}{|\nabla H_{o_j}|} \right)^{-1} \quad \text{equação (1)}$$

A partir dos fatores de atrito calculados, encontram-se novas rugosidades absolutas  $\epsilon$  para cada trecho da rede, isolando-a na fórmula de Swamee-Jain, como mostra a equação 2:

$$\epsilon = \frac{3,7D \times \left( \text{Rey}^{0,9} - 5,74 \times 10^{\frac{0,5}{\sqrt{f}}} \right)}{\text{Rey}^{0,9} \times 10^{\frac{0,5}{\sqrt{f}}}} \quad \text{equação (2)}$$

Com relação aos valores de rugosidade, foram aceitos aqueles que se apresentaram entre 0 e 12mm. Os resultados fora desses limites foram substituídos pelos últimos valores válidos.

O processo iterativo ocorre da seguinte maneira: utilizando uma rugosidade absoluta inicialmente definida, obtêm-se, através do software Epanet, os gradientes hidráulicos das redes calculadas e observadas, com os quais é possível achar novos fatores de atritos que, por sua vez, são usados para encontrar novas rugosidades.

Em virtude desse trabalho, as iterações foram limitadas a um máximo de vinte ou até que equação 3 fosse satisfeita (função objetivo):

$$\sum_{Nt} (\nabla H_o - \nabla H_c)^2 < 10^{-9} \quad \text{equação (3)}$$

Em que  $Nt$  é o número total de trechos.

## RESULTADOS OBTIDOS

A partir da modelagem feita com o Aqualibrium, obteve-se os resultados da tabela 1:

**Tabela 1: Resultados coletados experimentalmente**

RESERVATÓRIO		PRESSÕES		VAZÕES			
ALTURA (cm)	VOLUME DE ÁGUA (ml)	TUBO	ALTURA (cm)	SAÍDA	TEMPO (s)	VOLUME (ml)	VAZÃO (ml/s)
104,00	4000,00	A	15,50	I	1,54	37,00	24,0260
		B	13,50	II	2,44	39,00	15,9836
		C	13,00	III	2,14	41,00	19,1589
		D	12,00	IV	1,58	36,00	22,7848
		E	14,00	-	-	-	-

Com esses dados obtidos e um valor de rugosidade inicial  $\varepsilon = 0,06$  mm, foram feitas as primeiras simulações no software Epanet, configurando-o para aplicar a equação de Darcy-Weisbach. Tem-se então todos os parâmetros necessários para dar início às iterações de acordo com a metodologia apresentada.

Na rede analisada, repetiu-se as iterações até a vigésima, da qual se obteve a tabela 2:

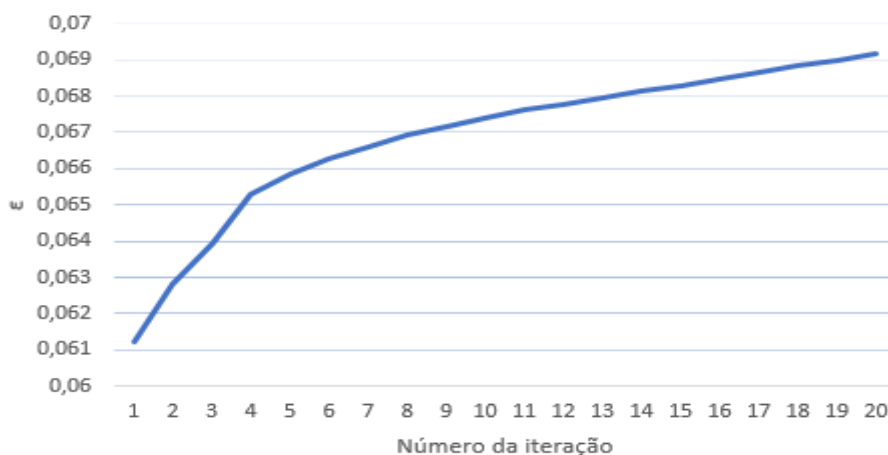
**Tabela 2: Resultados obtidos na iteração de número 20**

ITERAÇÃO 20									
TRECHO	D (mm)	V(m/s)	REY	$\varepsilon_{19}$ (mm)	$\nabla H_c$ (m/m)	$\nabla H_o$ (m/m)	f20	$\varepsilon_{20}$ (mm)	FUNÇÃO OBJETIVO
1	12	0,7246	8609,370	2,952	0,40959	0,40922	0,184	2,94952	1,3579E-07
2	6	1,4792	8787,368	0,056	0,81871	0,81796	0,044	0,05597	5,625E-07
3	6	1,4792	8787,368	0,056	0,81871	0,81796	0,044	0,06	5,628E-08
4	6	0,6734	4000,182	0,06	0,19509	0,06667	0,017	0,06	0,01649
5	6	0,0042	25,182	0,06	0,00039	0,01667	109,206	0,06	0,00026
6	6	0,0042	25,182	0,06	0,00039	0,06667	109,213	0,06	0,00026
7	6	0,0042	25,182	0,06	0,00039	0,01818	119,126	0,06	0,00032
8	6	0,5695	3383,411	0,06	0,12209	0,03485	0,013	0,06	0,00761
9	6	0,5695	3383,411	0,06	0,12209	0,06667	0,024	0,06	0,00307
10	6	1,4193	8431,378	0,067	0,79149	0,79089	0,046	0,06768	3,576E-07
11	6	1,4193	8431,378	0,069	0,79568	0,79506	0,046	0,06916	3,8639E-07
									0,028026

Com esses últimos valores de rugosidade encontrados, foi feita uma última simulação no Epanet, a partir da qual foi possível extrair resultados de pressões e rugosidades, comparando-os a outras iterações, obtendo-se a tabela 3 e a figura 5:

**Tabela 3: Comparação dos níveis de pressão entre a rede real e a primeira e última iteração da rede calculada**

REDE OBSERVADA		REDE CALCULADA			
		ITERAÇÃO 1		ITERAÇÃO 20	
TUBO	ALTURA (cm)	TUBO	ALTURA (cm)	TUBO	ALTURA (cm)
A	15,50	A	15,43	A	15,43
B	13,50	B	11,51	B	11,76
C	13,00	C	7,55	C	8,09
D	12,00	D	7,47	D	8,07
E	14,00	E	13,12	E	13,92



**Figura 5: Variação da rugosidade no trecho 11 ao longo das iterações**

## ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para que se comece o processo de calibração, é necessário ter um valor de rugosidade inicial, que nesse caso foi 0,06 mm para todas as tubulações. Porém esse não é o valor real e muito menos será uniforme ao longo da rede. Ao adotá-lo para a primeira iteração, percebe-se uma certa distância no nível de pressão da água com relação ao que foi observado. Quando se chega à vigésima iteração, entretanto, é notável que esse nível está mais próximo do real. Isso ocorre devido ao processo iterativo, que busca a correção no valor da rugosidade enquanto que a função objetivo vai diminuindo e se aproximando cada vez mais do valor limite estabelecido, o que confirma a validade do método.

## CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

O equipamento Aqualibrium é uma excelente forma de se estudar redes de distribuição de água em nível laboratorial;

O Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA) é eficiente para achar os parâmetros reais das tubulações, embora seja necessário um grande número de iterações para se obter uma maior precisão.

Com base no trabalho realizado, recomenda-se:

Utilizar o equipamento Aqualibrium para fazer montagens mais complexas de redes;

Utilizar o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA) para calibrar outros parâmetros, como o coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams, verificando sua eficácia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AZEVEDO NETTO, J. M. Manual de Hidráulica. 8. Ed., São Paulo: Blucher, 1998.
2. BEZERRA, A.A. Modelagem numérica computacional aplicada à calibração através de novas equações para o uso do método iterativo do gradiente hidráulico/ concentração alternativo (MIGHA) em redes de distribuição de água. 2018. 974 f. Tese (doutorado), Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2018.
3. GUO, X; ZHANG, C. M. *Hydraulic gradient comparison method to estimate aquifer hydraulic parameters under steady-state conditions*. *Ground Water*. v. 38, n. 6, p.815-826, 2000.
4. PORTO, R. M. Hidráulica básica. 4. Ed. São Carlos: EESC-USP, 2006. 540 p.
5. SCHUSTER, H. D. M.; ARAÚJO, H. D. B. Uma Formulação Alternativa do Método Iterativo de Gradiente Hidráulico no Procedimento de Calibração dos Parâmetros Hidrodinâmicos do Sistema Aquífero. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. V.9, n 2, p. 31-37, 2004.
6. WALSKI, T.M. *Technique for Calibrating Network Models*. *Journal of Water Resources Planning and Management*. v. 109, n. 4, p. 360-372, 1983.
7. WOLKMER, M. F. S.; PIMMEL, N.F. Política Nacional de Recursos Hídricos: governança da água e cidadania ambiental. *Sequência: Estudos Jurídicos e Políticos*. v. 34, n. 67, p. 165-198, 2013.