

Cálculo do Escoamento Uniforme em Canais Retangulares Lisos a Partir da Formulação Universal de Perdas de Carga: Aplicação a Dados Experimentais

Tarciso Cabral da Silva*, Márcia Suzanna Dutra de Abreu*

tarcisocabral@gmail.com, marciasuzanna@hotmail.com

Recebido: 16/01/12 - revisado: 19/04/12 - aceito: 23/05/13

RESUMO

Com base em estudos experimentais e de análise da representação dos efeitos de forma do canal no escoamento uniforme livre, Kazemipour e Apelt (1979, 1980) desenvolveram um procedimento para cálculo do escoamento uniforme em canais retangulares lisos. Este método, denominado método de Kazemipour, possibilita por meio da adequação do fator de atrito para tubos lisos pressurizados, o cálculo do escoamento uniforme em canais retangulares lisos. Posteriormente, Goldfarb e Cabral da Silva (2007) modificaram o método para o formato explícito, e confrontaram-no com a equação de Manning para o cálculo do escoamento em canais circulares lisos, demonstrando-se a superioridade do método modificado. Neste trabalho mostra-se a aplicação feita com três conjuntos de dados experimentais advindos de diferentes laboratórios e autores. Os resultados demonstraram novamente a superioridade do método modificado quando comparado com a equação de Manning.

Palavras-chave: Canais hidráulicamente lisos. Resistência ao escoamento. Efeitos de forma no escoamento uniforme.

INTRODUÇÃO

Desde a época de Chézy, século XVIII, diversos pesquisadores têm discutido o problema de cálculo do escoamento uniforme em canais. No entanto, a busca por melhores equações para o cálculo do escoamento em canais foi intensificada principalmente a partir dos anos 1930, com base na teoria da camada limite e dedução das equações de resistência hidráulica para escoamento em tubos por von Karman e Prandtl (CABRAL DA SILVA, 1993). Assim, Keulegan (1938) foi um dos pioneiros a utilizar estas equações visando obter fórmulas para o cálculo de vazão em canais similares às utilizadas para o escoamento em tubos. Em seguida, outros pesquisadores trabalharam perseguindo este objetivo (CABRAL DA SILVA, 1993). Mesmo assim, as formulações para a determinação da influência da forma da seção transversal na resistência ao escoamento uniforme livre não têm se mostrado conclusivas e consideradas definitivas. A principal limitação destas, além da não consideração do efeito da temperatura da água na sua viscosidade, é a con-

sideração de que a tensão de cisalhamento na fronteira do escoamento seria constante, à semelhança do escoamento em tubos circulares sob pressão. Além disso, a representação da forma da seção transversal somente pelo raio hidráulico mostra-se insuficiente (SHIH; GRIGG, 1967).

Um método de cálculo bastante consistente foi desenvolvido por Kazemipour e Apelt (1979, 1980) a partir de considerações de análise dimensional, objetivando a adequação à formulação universal de perdas de carga. Neste método, a geometria do canal é representada pela razão de aspecto, igual a relação entre a largura de topo e a profundidade média do escoamento no canal e pela relação perímetro molhado/raio hidráulico. Um modelo matemático baseado na aplicação das equações de cisalhamento, ao longo da fronteira do escoamento, foi desenvolvido por Cabral da Silva (1993) e comparado com o método de Kazemipour e Apelt (1979, 1980), através do parâmetro de forma, com resultados bastante satisfatórios. Neste método, de Kazemipour, o fator de atrito para canais é obtido através da multiplicação do fator de atrito para tubulações pressurizadas, empregando-se a formulação universal de perdas de carga, por um parâmetro adimensional denominado fator de forma. A consideração do fator de forma, na verdade, busca a introdução dos efeitos das correntes de circulação e da distribuição não

*Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB

uniforme da tensão de cisalhamento ao longo da fronteira do escoamento à superfície livre, na formulação baseada na teoria da turbulência, para tubos circulares sob pressão. Evidentemente, no escoamento em tubos circulares à seção plena, estes fenômenos não aparecem (CABRAL da SILVA, 1993).

O fator de forma, por sua vez, é obtido através da combinação de dois parâmetros distintos, ditos primeiro e segundo parâmetros de forma. O primeiro parâmetro de forma utilizado pode ser calculado através de uma relação analítica de grandezas da geometria do escoamento. O segundo parâmetro do método de Kazemipour, obtido dos valores experimentais do escoamento, é fornecido na metodologia original apenas de forma gráfica.

A partir deste modelo, Cabral da Silva (1995) simplificou o cálculo do fator de forma, utilizado neste trabalho, que consiste basicamente na aproximação da curva do polinômio que descreve o parâmetro de forma por dois segmentos de reta, que torna a determinação dos efeitos de forma mais concisa e rápida, podendo ser empregada no dimensionamento de canais retangulares lisos, em substituição às fórmulas empíricas tradicionais da Engenharia Hidráulica.

Goldfarb e Cabral da Silva (2007) modificaram o método de Kazemipour para canais lisos, introduzindo o coeficiente de atrito do escoamento em canais na formulação para tubos circulares lisos devido a von Karman, resultando em uma formulação monômica bastante eficiente. Esses autores testaram o modelo com os dados para canais circulares lisos demonstrando sê-lo mais eficiente do que a formulação de Chezy com coeficiente de Manning.

Neste trabalho é mostrada uma nova aplicação deste método, desta feita utilizando-se os dados de Tracy e Lester (1961), Rajaratnam e Muralidhar (1969) e Pimenta (1966) para canais retangulares hidraulicamente lisos. Mais uma vez foi alcançado sucesso relativamente a fórmula de Manning para os três conjuntos de dados.

METODOLOGIA

O Método de Kazemipour

O método de Kazemipour, desenvolvido por Kazemipour e Apelt (1979), permite o cálculo do escoamento turbulento uniforme em canais retangulares lisos a partir das equações de perda de carga para tubos pressurizados. Para tanto, o fator de atrito das equações para tubos pressurizados é

substituído pelo fator de atrito para canais abertos, calculado conforme a Equação 1 abaixo,

$$f_c = \psi f \quad (1)$$

onde f_c é o fator de atrito para canais abertos, ψ é o parâmetro dito de forma do método de Kazemipour e f é o fator de atrito para tubos pressurizados.

O parâmetro de forma ψ do método de Kazemipour é calculado através da razão entre dois outros parâmetros denominados primeiro e segundo parâmetros de forma do método de Kazemipour. No caso de escoamento de tubos à seção plena, ter-se-ia ψ igual à unidade.

O primeiro parâmetro adimensional utilizado no método de Kazemipour, para o cálculo do escoamento turbulento uniforme em canais circulares, é calculado usando-se a seguinte equação.

$$\psi_1 = (P/B)^{1/2} \quad (2)$$

onde: P é o perímetro molhado da seção transversal do escoamento igual a $B + 2.y_{av}$, e B a largura interna do canal.

A Figura 1 sintetiza a simbologia das grandezas utilizadas neste trabalho, enquanto a profundidade efetiva do escoamento é y_{av} e a área da seção transversal é A , igual a $B.y_{av}$.

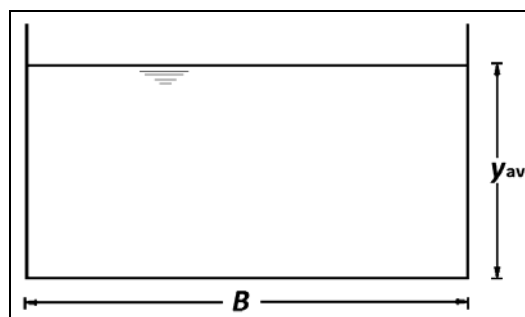


Figura 1- Grandezas geométricas utilizadas

O segundo parâmetro do método de Kazemipour, ψ_2 , é o outro parâmetro de forma, apresentado em por meio de gráfico (Figura 2), função da razão de aspecto B/y_{av} .

O segundo parâmetro foi escolhido de maneira que a combinação desses dois parâmetros ψ_1 e ψ_2 possibilitasse o ajuste dos valores do fator de atrito para canais abertos, tornando-os iguais aos valores dos fatores de atrito para tubulações pressurizadas, para um mesmo número de Reynolds.

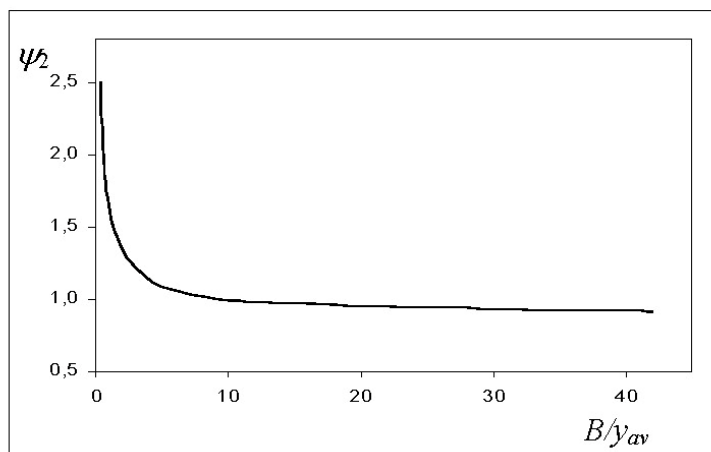


Figura 2 - Curva do segundo parâmetro ψ_2 do método de Kazemipour em função da razão de aspecto B/y_{av} . (Kazemipour e Apelt, 1979)

Uma vez obtidos os dois parâmetros de forma, a razão entre essas grandezas fornece o parâmetro ψ que representa a geometria da seção transversal do escoamento. A Equação 3 apresenta a expressão para cálculo deste parâmetro,

$$\psi = \psi_1 / \psi_2 \quad (3)$$

onde: ψ é o parâmetro adimensional de forma, já definido no método de Kazemipour.

Simplificação do parâmetro de forma ψ de Kazemipour

Na simplificação proposta por Cabral da Silva (1995), a partir dos dados de Tracy e Lester (1961) e de Shih e Grigg (1967), para a representação do fator de forma ψ devido a Kazemipour, procurou-se ajustar a curva mais simplificada possível que representasse o fator de forma, de maneira que expressões simples descrevam melhor a variação do parâmetro ψ com a razão de aspecto B/y_{av} . Desta maneira, ψ pode ser escrito como:

- Para razão de aspecto $B/y_{av} \leq 8$ tem-se:

$$\psi = 1,03 + 0,00875(B/y_{av}) \quad (4)$$

- Para razão de aspecto $B/y_{av} > 8$ tem-se:

$$\psi = 1,10 \quad (5)$$

A Figura 3 mostra os segmentos de reta que substituem a curva do parâmetro de forma ψ em função da razão de aspecto B/y_{av} .

Validação analítica do método de Kazemipour

A partir das equações para cálculo da resistência ao escoamento uniforme em canais livres, e associando os efeitos de forma à distribuição não uniforme da tensão de cisalhamento no perímetro molhado, Cabral da Silva (1993), desenvolveu uma metodologia para determinação analítica do parâmetro de forma, denominado ψ_t . Considerando as curvas da distribuição da tensão de cisalhamento ao longo do perímetro molhado a formulação para este parâmetro pode ser apresentada como na Equação (6):

$$\psi_t = \frac{1}{P} \int_0^P \frac{\tau(p)}{\tau_0} dp \quad (6)$$

onde: ψ_t é o parâmetro de forma apresentado por Cabral da Silva (2003); $\tau(p)$ é a função que representa a distribuição da tensão de cisalhamento ao longo do perímetro molhado P para uma seção definida do escoamento uniforme, sendo p uma variável independente de posição ou distância ($P \geq p \geq 0$), e τ_0 é a tensão de cisalhamento média, calculada através da Equação (7).

$$\tau_0 = \rho \cdot g \cdot R \cdot S \quad (7)$$

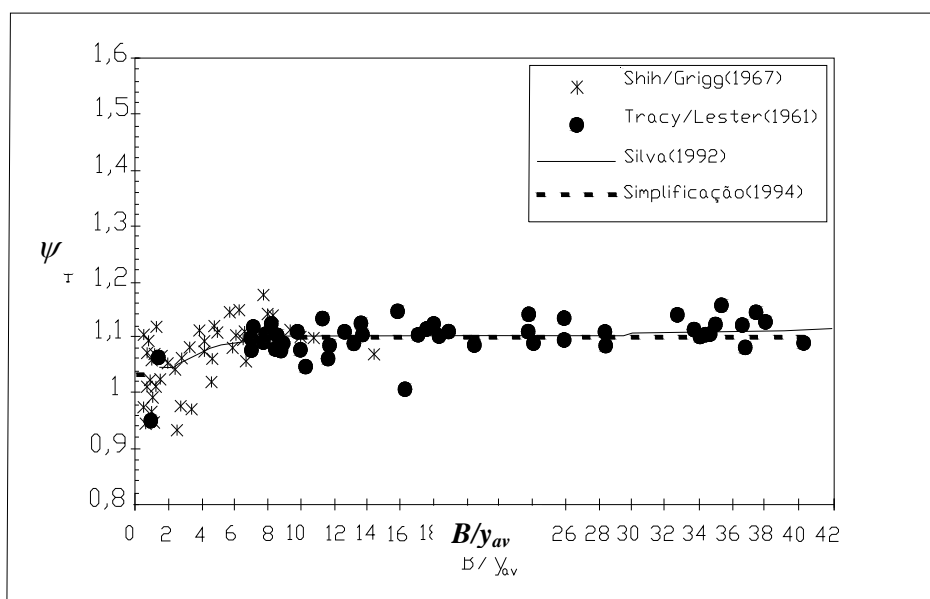


Figura 3 – Parâmetro de forma segundo a simplificação proposta, modelo original e calculados para os dados experimentais referidos (Cabral da Silva, 2003)

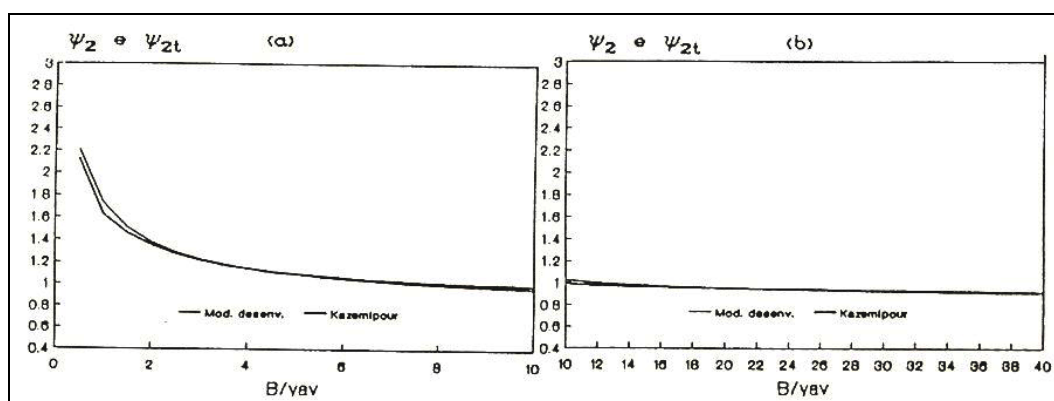


Figura 4 – Segundo parâmetro de forma do método de Kazemipour (Cabral da Silva, 1993)

onde: ρ é a massa específica da água; g a aceleração da gravidade, R o raio hidráulico da seção transversal, e S a declividade longitudinal do fundo do canal.

A Figura 4 apresenta valores do segundo parâmetro de forma do método de Kazemipour, ψ_2 , obtidos experimentalmente por Kazemipour e Apelt (1979), e ajustados numericamente (ajuste polinomial), além dos resultados obtidos a partir do modelo analítico descrito para ψ_{2t} (Cabral da Silva, 1993). Ficou evidenciado que a curva demonstra a validade do método de Kazemipour, já que os

pontos calculados de acordo com o modelo analítico descrito de maneira resumida apresentam uma boa coincidência com os pontos obtidos dos dados experimentais. O modelo é de concepção ainda não completa, uma vez que considera apenas as variações da tensão de cisalhamento, ao longo do perímetro molhado. Mesmo assim, a quase coincidência entre ψ_2 e ψ_{2t} para os valores maiores de B/y_{av} e o crescimento dos valores com tendência semelhante nos pontos experimentais e do modelo para os valores menores de B/y_{av} permitem a inferência da validade do método.

A aplicação explícita do método modificado

Goldfarb e Cabral da Silva (2007) desenvolveram uma formulação, descrita sucintamente a seguir, de caráter genérico quanto à forma do canal. A equação universal para cálculo da perda de carga por unidade de comprimento, para tubulações pressurizadas, quando aplicada para dutos de seção circular, onde o diâmetro é igual a quatro vezes o raio hidráulico, pode ser apresentada conforme as expressões seguintes,

$$f = \frac{8 \cdot g \cdot J \cdot R}{V^2} \quad (8)$$

$$V = \sqrt{\frac{8 \cdot g \cdot J \cdot R}{f}} \quad (9)$$

onde: J é a perda de carga por unidade de comprimento e V a velocidade média do escoamento na tubulação.

Para se aplicar as equações anteriores no cálculo do escoamento em canais abertos, conforme a metodologia de Kazemipour substitui-se na expressão (8) o fator de atrito para canais apresentado na Equação (1). Neste procedimento, considerando canais com pequenas declividades, a perda de carga por unidade de comprimento J pode ser substituída pela declividade do fundo do canal S , obtendo-se as expressões (10) e (11).

$$f_c = \frac{8 \cdot g \cdot S \cdot R}{V_c^2} \quad (10)$$

$$V_c = \sqrt{\frac{8 \cdot g \cdot S \cdot R}{f_c}} \quad (11)$$

onde: V_c é a velocidade média do escoamento no canal.

Aplicando a Equação (1) na Equação (11) e comparando o resultado com a Equação (9), obtém-se a seguinte relação entre as velocidades médias para tubulações pressurizadas e canais abertos:

$$V_c = \frac{1}{\sqrt{\psi}} \cdot V \quad (12)$$

A relação entre as velocidades apresentada na Equação (12) revela que, para um mesmo número de Reynolds, a velocidade média do escoamento no canal é menor do que na tubulação

pressurizada, visto que o parâmetro de forma do método de Kazemipour é sempre numericamente superior à unidade. Nesse caso a Equação (1) vem a confirmar esta análise quando demonstra, nas mesmas condições, o fator de atrito para canais f_c maior do que o fator de atrito f para tubulações pressurizadas.

A equação seguinte é a de Von Karman-Prandtl para cálculo do escoamento em tubulações pressurizadas de paredes lisas.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left[\frac{\text{Re} \sqrt{f}}{2,51} \right] \quad (13)$$

onde: $\text{Re} = V \cdot D / \nu$ é o número de Reynolds do escoamento, D o diâmetro hidráulico (igual a $4R$), e ν a viscosidade cinemática da água.

Para possibilitar a aplicação da Equação (11) no cálculo do escoamento uniforme em canais, substituem-se na Equação (13), as Equações (1), (10) e (12). Nesse caso pode-se explicitar a velocidade média do escoamento no canal V_c que multiplicada pela área da seção transversal fornece uma expressão para o cálculo da vazão volumétrica escoada:

$$Q_c = \frac{4A}{\sqrt{\psi}} \sqrt{2gRS} \log \left(4,51R \frac{\sqrt{gRS}}{\nu} \right) \quad (14)$$

onde: Q_c é a vazão volumétrica escoada no canal.

Os resultados obtidos da Equação (14) no cálculo da vazão para o escoamento em canais retangulares lisos são comparados com os resultados advindos da equação de Manning, na forma seguinte:

$$Q_c = \frac{A}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (15)$$

onde: R o raio hidráulico, S a declividade do fundo do canal ou da superfície, e n o coeficiente de rugosidade de Manning que representa a rugosidade das paredes do canal.

A fim de se ter comparações entre os valores da vazão através dos métodos descritos pelas Equações (14) e (15), calcula-se o Erro Absoluto Relativo Médio – MARE, definido conforme a Equação (16).

$$\text{MARE} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |(Q_{\text{cali}} - Q_{\text{oobsi}})| / Q_{\text{oobsi}} \quad (16)$$

Tabela 1 – Faixas de variação dos valores de razão de aspecto, números de Froude e Reynolds dos dados experimentais utilizados

Dados	B/y_{av}	Froude	Reynolds ($\times 10^4$)
Tracy e Lester (1961)	6,96 - 40,40	0,14 – 3,94	3,58 – 72,46
Rajaratnam e Muralidhar (1969)	3,32 – 11,95	1,25 – 2,13	6,65 – 69,86
Pimenta (1966)	1,67 - 11,11	0,35 e 3,13	1,81 - 66,80

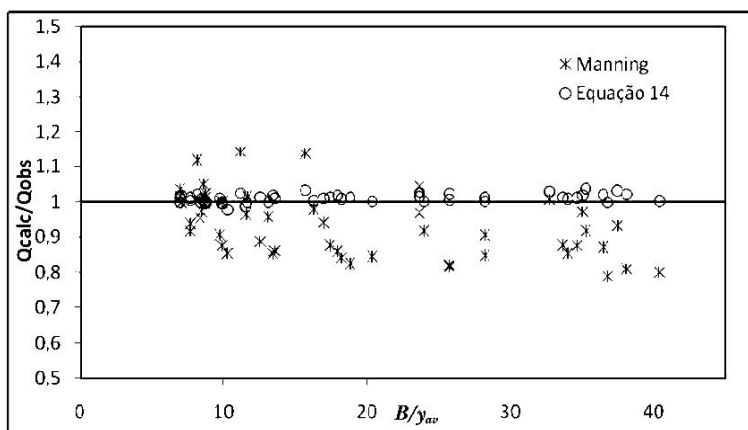


Figura 5 – Vazões adimensionalizadas Q_{calc}/Q_{obs} em função de B/y_{av} para os dados de Tracy e Lester (1961)

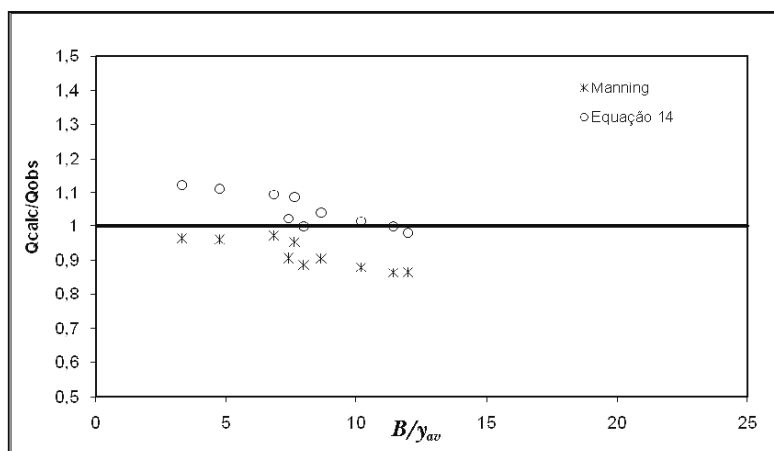


Figura 6 – Vazões adimensionalizadas Q_{calc}/Q_{obs} em função de B/y_{av} para os dados de Rajaratnam e Muralidhar (1969)

onde: MARE é o erro absoluto relativo médio, Q_{calc} a vazão calculada através das equações descritas, Q_{obs} a vazão observada referente, sendo i a ordem da realização e m o número total delas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados experimentais aqui utilizados foram obtidos por Tracy e Lester (1961),

Rajaratnam e Muralidhar (1969), e Pimenta (1966). Os dois últimos conjuntos de dados foram objeto de análise de consistência, tendo sido descartadas 6 realizações do total de 16 no segundo conjunto, e 74 realizações do total de 133 do terceiro. Os valores considerados inconsistentes tiveram como motivo principal o fator de forma menor do que a unidade o que significaria, se considerados, fator de atrito no escoamento no canal menor do que o similar em

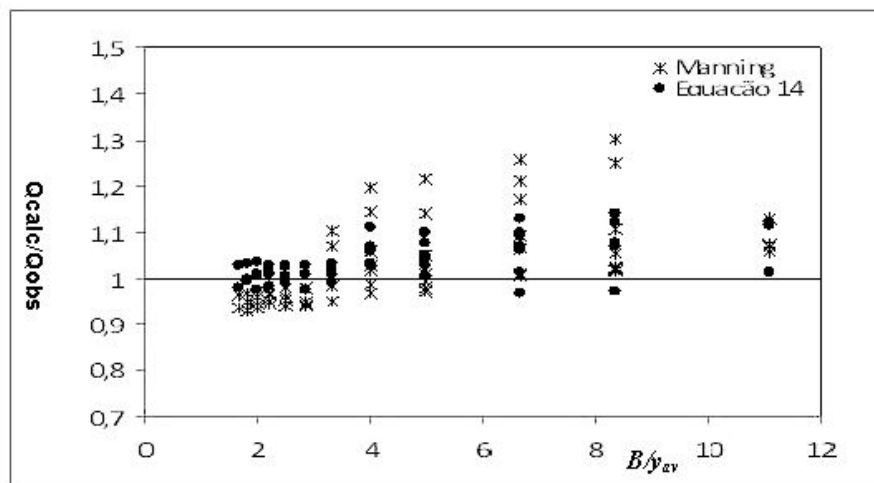


Figura 7 – Vazões adimensionalizadas Q_{calc}/Q_{obs} em função de B/y_{av} para os dados de Pimenta (1966)

tubo pressurizado liso, ou seja, as correntes de circulação, presentes no escoamento à superfície livre não dissipariam parte da energia do escoamento.

Foi empregada a Equação (14) com os valores do fator de forma conforme simplificados nas Equações (4) e (5) devido a Cabral da Silva (1995). Nas vazões calculadas através da equação de Manning, o valor utilizado para o coeficiente n , que representa a rugosidade das paredes do canal, foi escolhido de forma que proporcionasse os melhores resultados para os valores calculados através desta equação. Desta forma, o valor $n = 0,0085$, foi calculado como o valor que otimiza os resultados e é caracterizado como de um canal hidráulicamente liso.

Os números de Froude dos dados utilizados variaram entre 0,14 e 3,94, enquanto que os números de Reynolds variaram de $1,81 \times 10^4$ e $72,46 \times 10^4$. A razão de aspecto B/y_{av} variou entre 1,67 e 11,11 (Tabela 1).

O gráfico da figura 5, vazões adimensionalizadas Q_{calc}/Q_{obs} em função de B/y_{av} , mostra a aplicação da Equação (14) bem como os devidos à formulação de Manning, para os dados de Tracy e Lester (1961).

Já a Figura 6 apresenta as vazões adimensionalizadas em função da razão de aspecto, calculadas através da Equação (14) e da equação de Manning, para os dados de Rajaratnam e Muralidhar (1969).

No gráfico da Figura 7 são mostrados os resultados da aplicação da Equação (14) na forma de vazões adimensionalizadas em função da razão de

aspecto, bem como os devidos à formulação de Manning para os dados de Pimenta (1966).

Fica evidente, a partir da leitura da Figura 5, serem melhores os resultados advindos da Equação (14), com os fatores de forma simplificados, em detrimento dos produzidos pela aplicação da equação de Manning, para qualquer valor de B/y_{av} considerado.

De maneira semelhante, na Figura 6, a aplicação da Equação (14) para os dados de Rajaratnam e Muralidhar (1969) produziu resultados visivelmente melhores do que a equação de Manning para valores maiores da razão de aspecto, que coincidentemente são os de maiores números de Reynolds.

De forma semelhante aos gráficos das Figuras 5 e 6, a leitura da Figura 7 indica que os resultados advindos da Equação (14) para Q_{calc}/Q_{obs} aparentam estar mais próximos da linha horizontal ($Q_{calc}/Q_{obs} = 1$) no seu conjunto, e, portanto de melhor ajuste em detrimento dos produzidos pela aplicação da equação de Manning, para qualquer valor de B/y_{av} considerado.

Os valores dos erros absolutos relativos médios, MARE, das vazões calculadas através da Equação (14) e de Manning estão mostrados na Tabela 2.

Como pode ser observado da Tabela 2, com todos os valores menores do MARE mostrados da aplicação da Equação (14), revela-se claramente a sua superioridade em relação à fórmula de Manning, o que é concordante com a análise visual feita a partir das Figuras 5, 6 e 7.

Tabela 2 - Valores do MARE (%) obtidos das aplicações aos dados experimentais

Dados	Equação (14)	Manning - Equação (15)
Tracy e Lester (1961)	1,18	9,23
Rajaratnam e Muralidhar (1969)	5,21	8,51
Pimenta (1966)	3,09	5,32

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Equação (14) mostrou-se com desempenho superior à equação de Manning no cálculo do escoamento uniforme em canais retangulares lisos para os dados utilizados. De fato, os valores dos erros absolutos relativos médios das vazões calculadas referentes às observadas, MARE demonstram claramente a superioridade da Equação (14) frente à fórmula de Manning na forma da Equação (15).

A Equação (14) é do tipo explícito, embora deduzida com consideração da expressão de caráter implícito de von Karman-Prandtl para cálculo do escoamento em tubulações pressurizadas de paredes hidraulicamente lisas, revelando uma vantagem considerável em relação à aplicação do método de Kazemipour original apresentado por Kazemipour; Apelt (1979).

A Equação (14) foi pioneiramente deduzida por Goldfarb e Cabral da Silva (2007), e é apropriada à aplicação ao escoamento uniforme, à superfície livre, ou pressurizada em tubos hidraulicamente lisos se considerada a seção circular, segundo o parâmetro de forma, para regime turbulento, crítico ou subcrítico, sendo independente da relação B/γ_{av} . Portanto é genérica quanto à forma ou à razão de aspecto, inclusive nos intervalos não testados. As validações feitas e mostradas nesse trabalho na fase livre abrangem faixas amplas de valores da razão de aspecto entre, 1,67 e 40,40.

A simplicidade das equações apresentadas para o cálculo do escoamento à superfície livre em canais retangulares lisos pode possibilitar a construção de novos modelos matemáticos de maior eficiência para a avaliação de sistemas que se utilizam desse tipo de canal.

Deve ser ressaltado que a Equação (14) considera também a viscosidade cinemática e, portanto, a influência da temperatura da água, o que vem a ser uma variável de importância no cálculo da velocidade média ou vazão, principalmente para escoamentos em países de

clima temperado onde temperaturas da água abaixo de 20°C ocorrem frequentemente.

Finalmente, deve ser recomendada a continuidade das pesquisas relativas à aplicação deste método para escoamento uniforme em outras seções transversais, incluindo canais rugosos, haja vista os resultados animadores obtidos e mostrados neste trabalho em canais retangulares e os anteriores em canais circulares lisos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão das bolsas de pesquisa para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- KAZEMIPOUR, A. K., APELT, C. J. (1979) *Shape effects on resistance to uniform flow in open channels. Journal of Hydraulics Research, Delft, v. 17, n. 2, p. 129-147, 1979.*
- KAZEMIPOUR, A. K.; APELT, C. J. *Shape Effects on Resistance to Smooth Semi-Circular Channels.* Department of Civil Engineering, University of Queensland, Research Report nº CE18. 1980.
- KEULEGAN, G. H. *Laws of Turbulent Flow in Open Channels.* Journal of Research, National Bureau of Standards, Washington D. C., Research Paper 1151, v. 21, n. 6, Dec., p. 707-741, 1938.
- GOLDFARB M. C. (2002). *Resistência ao Escoamento Uniforme em Canais Circulares Lisos.* 2002. 68f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba - UFPB. Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande – PB., 2002.

CABRAL DA SILVA, T. *Efeitos de Forma na Resistência ao Escoamento Uniforme em Canais*. 1993. 85f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

CABRAL DA SILVA, T. *Cálculo do escoamento uniforme em canais retangulares lisos*. In: XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. Recife - Pe, 1995. v. 4. p. 93-98.

CABRAL DA SILVA, T. *Simplificação na Metodologia de Uso do Método de Kazemipour para Cálculo da Vazão em Canais Circulares Lisos*. XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS - ABRH. Anais em CD-ROM. Curitiba, PA. 2003.

GOLDFARB M. C.; CABRAL DA SILVA, T. *Formulação Unificada para Cálculo da Resistência ao Escoamento em Canais e em Tubos Pressurizados Lisos*. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 12. n. 1. p. 133-140, 2007.

PIMENTA, C. F. *Contribuição para o Cálculo da Perda de Carga nos Canais em Regime Uniforme*. 1966. 147f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1966.

RAJARATNAM, N.; MURALIDHAR, D. *Boundary Shear Stress Distribution in Rectangular Open Channels*. *La Houille Blanch*. v. 24, n. 6, p. 603-609, 1969.
TRACY, H. J.; LESTER, C. M. *Resistance Coefficients and Velocity Distribution in Smooth Rectangular Channel*. Geological Survey Water-Supply Paper, Washington, paper 1952-A, 18 p., 1961.

SHIH C. C.; N. S. GRIGG. *A Reconsideration of the Hydraulic Radius as a Geometric Quantity in Open Channel Hydraulics*. Proc. 12th Congres, IARH. v. 1, (Paper A36), Sept., pp 288-296, 1967.

Calculation Of Uniform Flow In Smooth Rectangular Channels Using The Head Loss Universal Formula: Application To Experimental Data

ABSTRACT

Based on experimental studies and analysis of the representation of the shape effect of the channel in the uniform flow calculation,

Kazemipour and Apelt (1979, 1980) developed a procedure named Kazemipour method. This method by adapting the friction factor, enables the calculation of the uniform flow in smooth rectangular channels by the use of the equations for pressurized tubes. Later, Goldfarb and Cabral da Silva (2007) modified this method to the explicit format. This new modified method was confronted by these authors with the use of Manning's equation for the calculation of the flow in smooth circular channels and it proved more efficient. This paper shows the application made with three sets of experimental data from different laboratories and authors. The results once again showed the superiority of the modified method when compared with the Manning equation.

Keywords: hydraulically smooth channels, shape effects on uniform flow, resistance to flow.