

Eixo Temático ET-02-017 - Saneamento Ambiental

NOVAS FORMULAÇÕES PARA CÁLCULO DO ESCOAMENTO UNIFORME EM CANAIS RUGOSOS CONSIDERANDO OS EFEITOS DE FORMA

Fábio Batista Pereira Maia, Tarciso Cabral da Silva

Universidade Federal da Paraíba, Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq).

RESUMO

Desde o século XVIII, época em que foi desenvolvida a primeira formulação para cálculo do escoamento em canais, até a atualidade, os pesquisadores dedicados à hidráulica e a engenharia sanitária tem discutido sobre a estrutura da formação do escoamento uniforme. Os temas efeitos da forma da seção transversal e da rugosidade das paredes no escoamento de água em canais à superfície livre têm sido os destaques nas pesquisas. No início do século XX, com o advento da teoria da turbulência e das equações de Von Kármán, as pesquisas relativas ao escoamento em canais têm sido direcionadas no sentido de gerar novas equações à luz dos novos conceitos advindos dessa teoria. Nesse trabalho são mostradas aplicações de uma nova expressão para o cálculo do escoamento em canais, apresentada em 2013. A expressão utilizada para a vazão do escoamento uniforme em canais foi deduzida a partir das fórmulas de Colebrook – White e de Darcy–Weisbach, e da introdução de um parâmetro de adaptação para a equação C-W visando contemplar os efeitos de aumento de resistência no escoamento principal, conforme o chamado método de Kazemipour. Nesta nova formulação, denominada AKCW-DW, considera-se que a relação entre o coeficiente de atrito para o escoamento uniforme em canais e nos tubos pressurizados, f_c/f , é constante e maior do que a unidade, devido aos efeitos derivados da assimetria da seção transversal dos canais. Essa relação, denominada fator de forma, foi introduzida na equação AKCW-DW para o cálculo da vazão, e tem sido investigada e apontada como invariável e independente da forma da seção transversal. Ela traduz os efeitos de aumento da resistência ao escoamento em canais abertos devido os efeitos turbulentos derivados da assimetria da seção transversal. Nesse trabalho, a equação AKCW-DW foi aplicada a dados experimentais de canais circulares hidraulicamente lisos e rugosos e os resultados foram comparados com os oriundos do uso da fórmula de Manning. Entre os dez conjuntos de dados testados para o cálculo da vazão, apenas dois foram favoráveis para a fórmula de Manning com uso dos coeficientes n otimizados.

Palavras-chave: Escoamento uniforme; Coeficiente de atrito; Cálculo da vazão; Engenharia hidráulica; Saneamento Ambiental.

INTRODUÇÃO

O uso cada vez mais intenso da água e a sua consequente valorização tem levado os pesquisadores da hidráulica e engenharia sanitária a buscarem métodos mais eficientes para avaliação da vazão em canais abertos.

Na verdade, essa busca não é recente. Desde a época de Chézy - Século XVIII, até os dias atuais, tem-se discutido muito sobre os efeitos da forma e da rugosidade da seção transversal no escoamento de água em canais à superfície livre (LIMA, 2013). Porém, o uso de metodologia para cálculo de escoamento em tubos sob pressão não produz, em canais abertos, resultados precisos, que possam ser considerados como adequados para aplicação na engenharia hidráulica e sanitária. Este fato é reconhecido desde o início do século XX, e, a partir dos anos 1930, quando foram realizados muitos estudos sobre a resistência ao escoamento em canais abertos das quais uma revisão completa seria uma tarefa desafiadora (CHENG et al., 2011).

As tentativas de elaboração de novas expressões, com base na teoria da camada limite e na dedução das equações de resistência hidráulica para escoamento em tubos por von Karman e Prandtl, foram intensificadas. Assim, Keulegan (1938) foi um dos pioneiros no uso dessas equações para obter melhores expressões para o cálculo do escoamento em canais abertos, semelhante aos utilizados para o fluxo em tubos (CABRAL DA SILVA et al., 2015).

Em 1965, Hunter Rouse estudou a resistência hidráulica em canais abertos com base na mecânica dos fluidos, ressaltando os efeitos da forma em seção transversal não uniforme (YEN, 2002).

Contudo, as formulações utilizadas para a determinação da influência da forma da seção transversal, na resistência ao escoamento uniforme livre, ainda não têm se mostrado como conclusivas e consideradas definitivas. A principal limitação destas é a consideração de que a tensão de cisalhamento na fronteira do escoamento seria constante, à semelhança do escoamento em tubos circulares pressurizados, o que realmente não ocorre (CABRAL DA SILVA et al., 2013).

Autores como Shih e Grigg (1967) afirmam que a representação da forma da seção transversal somente pelo raio hidráulico tem-se mostrado insuficiente. Outras equações, como a conhecida fórmula de Manning, não levam em conta os efeitos da viscosidade da água, que, como se sabe, é dependente da sua temperatura.

No trabalho desenvolvido por Kazemipour e Apelt (1979), é apresentado um método denominado método de Kazemipour, eficiente para corrigir o fator de atrito para tubos visando o uso para escoamento em canais. Trata-se de uma metodologia simples que considera o que eles chamam de efeitos de forma, dependentes da razão de aspecto do canal, quer sejam hidraulicamente lisos ou rugosos.

Goldfarb e Cabral da Silva (2007) foram uns dos vários autores que discutiram acerca do método de Kazemipour, e identificaram a eficiência do método para escoamento em canais circulares lisos, tendo concluído sobre a sua ótima eficiência nos cálculos do coeficiente de atrito e da velocidade média. Esses mesmos autores fizeram uma modificação do método para tornar explícito o cálculo do coeficiente de atrito para escoamento em canais, mostrando a sua superioridade em relação à fórmula de Chezy com coeficiente de Manning. Outros testes foram feitos para canais retangulares e triangulares lisos destacando-se devido a sua superioridade expressa nos melhores resultados frente a outros métodos (CABRAL DA SILVA et al., 2015).

Estes resultados estimularam a busca para o cálculo em canais hidraulicamente rugosos, de maneira semelhante aos lisos, utilizando-se da formulação universal de perda de carga e outras equações para estimar o efeito da forma sobre o fluxo uniforme, particularmente na velocidade média. Assim, Goldfarb e Cabral da Silva (2007) chegaram à conclusão que o parâmetro que representa o efeito da forma possui o valor constante.

Nos tempos atuais o tema continua sendo um desafio para a hidráulica, haja vista os trabalhos que vêm sendo publicados, a exemplo Cheng et al. (2011) e Nguyen & Cheng (2012) que se dedicaram ao escoamento uniforme em canais retangulares lisos, gerando dados experimentais e desenvolvendo modelos matemáticos, para apoiar esta afirmação (CABRAL DA SILVA et al, 2015).

Featherstone e Nalluri (1988) apresentaram a dedução de uma equação para canais a partir das equações de Colebrook-White e Darcy-Weisbach para tubos pressurizados sem, no entanto, haver consideração do efeito principal da forma assimétrica dos canais, o aumento da perda de carga devido às correntes de circulação.

Lima (2013) considerou conjuntamente as equações de Featherstone e Nalluri (1988) e de Kazemipour relativa ao aumento do coeficiente de atrito devido os efeitos da seção transversal assimétrica, e deduziu uma nova expressão denominada AKCW-DW (Expressão Adaptada de Kazemipour, Colebrook-White e Darcy-Weisbach), demonstrando a sua superioridade para escoamento uniforme em canais triangulares rugosos frente à equação de Manning.

Nessa equação se considera o fator de forma como sendo constante conforme conforme já aplicado nos trabalhos anteriores devido a Lima (2013) e Cabral da Silva et al. (2015).

Em seguida, Cabral da Silva et al. (2015) testou a equação AKCW-DW para canais retangulares lisos, também com melhores resultados do que os produzidos pela equação de Manning.

Neste trabalho são apresentadas as aplicações da equação AKCW-DW a canais circulares hidraulicamente lisos e rugosos em escoamento uniforme, em regime turbulento, fluvial e rápido, para o cálculo da vazão e feitas comparações entre os resultados dessa equação e os da fórmula de Manning.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Aplicar a equação modificada com base nas expressões de Kazemipour, Colebrook-White e Darcy-Weisbach para canais circulares hidraulicamente lisos e rugosos em escoamento uniforme, comparando os resultados com os da fórmula de Manning.

Objetivos Específicos:

- Coletar dados de canais circulares hidraulicamente lisos e rugosos em escoamento uniforme da literatura especializada e de laboratórios de Hidráulica no Brasil e no exterior;
- Realizar análise de consistência dos dados coletados;
- Aplicar a formulação de Kazemipour Colebrook-White, combinada com a fórmula de Darcy-Weisbach modificada (AKCW-DW) para canais circulares lisos e rugosos em escoamento uniforme;
- Fazer comparações entre a formulação (AKCW-DW) e a equação de Manning por meio da análise dos resultados relativos ao menor erro absoluto relativo médio.

METODOLOGIA

Equações para as formulações AKCW – DW, Manning e MARE

Tomando como base as equações de Darcy & Weisbach, Equação (1), e de Colebrook & White, Equação (2), é possível obter a equação conjunta (3), válida para fluxos em condutos pressurizados (Featherstone; Nalluri, 1988).

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (1)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k_s}{3,7D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (2)$$

$$V = -2 \sqrt{2gDS_f} \log \left(\frac{k_s}{3,7D} + \frac{2,51v}{D \sqrt{2gDS_f}} \right) \quad (3)$$

Onde: L e D são o comprimento e o diâmetro do conduto, respectivamente; f é o fator de atrito, k_s representa a rugosidade absoluta do material do conduto; Re é o número de Reynolds ($Re = VD/v$); V é a velocidade média; v a viscosidade cinemática do fluido; e S_f a perda de carga, h_f , por unidade de comprimento ($S_f = h_f/L$), ou perda de carga unitária.

Substituindo essa última equação (3) na expressão obtida para a relação entre as velocidades médias em tubulações pressurizadas e em canais abertos, conforme mostrado em (Cabral da Silva e Abreu, 2013), a Equação (4)

$$V_c = \frac{1}{\sqrt{\psi}} V \quad (4)$$

além do diâmetro D pelo diâmetro equivalente $D_{equiv} = 4R_H$ e S_f por S_o , obtem-se a Equação (5):

$$V_c = \frac{1}{\sqrt{\psi}} \left\{ -\sqrt{32gR_H S_o} \log \left(\frac{k_s}{14,8R_H} + \frac{1,255v}{R_H \sqrt{32gR_H S_o}} \right) \right\} \quad (5)$$

Onde: R_H é o raio hidráulico ($R_H = A/P$), é o parâmetro de forma ($\psi = f_c/f$), e A , P , f_c e f são a área molhada, o perímetro molhado, o fator de atrito para canais e o fator de atrito para tubos pressurizados, respectivamente. O parâmetro de forma ψ é a relação base do conhecido método de Kazemipour (1979), para cálculo da vazão no escoamento uniforme de canais, já utilizado por diversos autores.

Por fim, multiplicando a Equação (5) pela área da seção transversal (A) obtemos uma expressão para o cálculo da vazão volumétrica escoada em canais, Q_c :

$$Q_C = \frac{A}{\sqrt{\psi}} \left\{ -\sqrt{32gR_H S_0} \log \left(\frac{k_s}{14,8R_H} + \frac{1,255\nu}{R_H \sqrt{32gR_H S_0}} \right) \right\} \quad (6)$$

É evidente que para canais hidraulicamente lisos, a Equação (6) passa a ter o formato simplificado, como na Equação (7):

$$Q_C = \frac{A}{\sqrt{\psi}} \left\{ -\sqrt{32gR_H S_0} \log \left(\frac{1,255\nu}{R_H \sqrt{32gR_H S_0}} \right) \right\} \quad (7)$$

Os resultados para o cálculo da vazão obtidos através das equações (6) e (7), no escoamento em canais retangulares hidraulicamente lisos (com $k_s = 0$) ou rugosos são comparados com aqueles advindos da equação de Manning, Equação (8):

$$Q_C = \frac{A}{n} R_H^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Onde: n é o coeficiente de rugosidade de Manning para as paredes do canal.

Com o objetivo de se comparar os valores de vazão obtidos por meio das duas equações citadas, Equação (7) e Equação (8), foi calculado o erro absoluto relativo médio (MARE), conforme a Equação (9):

$$MARE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{|(Q_{cal\ i} - Q_{obs\ i})|}{Q_{obs\ i}} \quad (9)$$

Onde: Q_{calc} é a vazão calculada através das equações descritas, Q_{obs} a vazão observada correspondente, sendo i a ordem da realização e m o número total delas.

Dados utilizados

Os dados experimentais de canais circulares aqui utilizados foram extraídos da dissertação de Steven F. Mangin (MANGIN, 2010). Esse autor utilizou dados experimentais de diversos pesquisadores apresentados na Tabela 1, abrangendo três tipos de material, conseqüentemente várias faixas de rugosidade, vazões, diâmetros e declividades.

Também foram utilizados os dados oriundos da pesquisa efetuada por Kazemipour e Apelt (1980), referentes a canais circulares hidraulicamente lisos.

Tabela 1 – Pesquisadores e tipo de material do canal circular

Pesquisador	Material
Woodward & Yarnell (1920)	Concreto e Cerâmica
Wilcox (1924)	Concreto
Straub & Morris (1951)	Concreto
Neale & Price (1964)	PVC
Kazemipour e Apelt (1980)	Cimento Amianto

A Tabela 2 apresenta a descrição dos dados, mostrando o tipo de material do canal, declividade, diâmetro variação da profundidade média, número de Froude e Reynolds.

Tabela 2 - Descrição dos dados experimentais utilizados

Material	Declividade	Diâmetro (m)	y_n (m)	F_r	R_e
Concreto	0,001 - 0,040	0,100 ; 0,200 ; 0,300	0,038 - 0,249	0,166 - 1,899	17884 - 566039
Cerâmica	0,160 - 0,650	0,203 ; 0,101; 0,254 ; 0,305	0,049 - 0,198	0,187 - 1,608	20882 - 607138
PVC	0,003 - 0,011	0,203 - 0,305	0,052 - 0,200	0,701 - 1,754	99020 - 845127
Amianto	$5,15 \times 10^{-4}$ - $6,04 \times 10^{-3}$	0,38	0,036 - 0,161	0,370 - 1,560	69449 - 476789

Cálculos preliminares e análise de consistência

Com os dados obtidos, é iniciada uma série de cálculos para se obter os parâmetros necessários para a posterior análise de consistência. Esses conjuntos de dados foi objeto de análises de consistência, tendo sido descartadas diversas realizações do total de dados disponíveis.

Os critérios utilizados na análise de consistência foram baseados nos valores da relação f_c/f se menores do que a unidade ou muito maiores do que os previstos pelos modelos matemáticos para as seções circulares.

Desta forma, foram descartados os dados com relação f_c/f menor que 1 pois é sabido que o fator de atrito para canais, f_c , é obrigatoriamente maior do que o fator de atrito f para tubulações pressurizadas, pois nos canais há a influência das correntes de circulação com dissipação adicional de energia.

Também foram descartados os dados cuja relação f_c/f era maior que 1,4, haja vista a análise realizada por Goldfarb e Cabral da Silva (2007), onde todos os valores de f_c/f eram inferiores a 1,4.

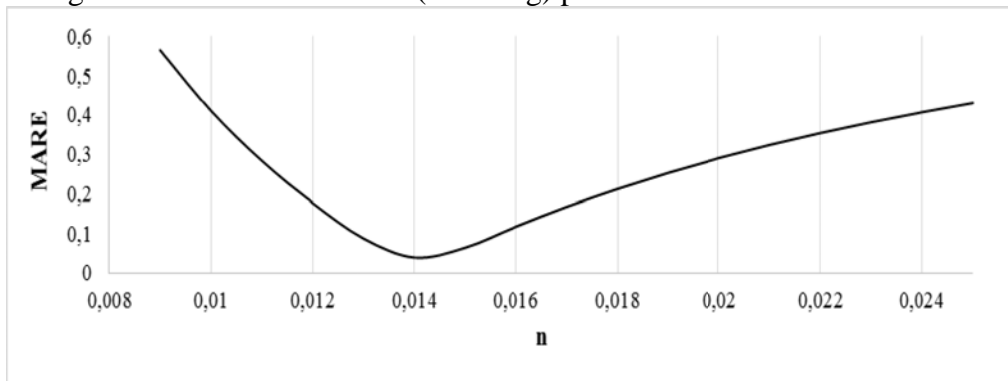
Otimização do n de Manning para canais circulares

Para alcançar melhores resultados na vazão para a equação de Manning, foram feitas buscas do valor otimizado do coeficiente de Manning n. Esta otimização foi feita de modo que o n escolhido fosse aquela que produzisse o menor MARE, calculado através da Equação [9], quando utilizada na Equação [8].

Os gráficos das calibrações para cada número de Manning médio estão apresentados nas figuras a seguir.

A Figura 1 ilustra esse procedimento de obtenção de menor valor do MARE para o canal do tipo concreto. Nele observa-se que o valor ótimo para o coeficiente de Manning é 0,014, quando o proposto pelos pesquisadores era de 0,011.

Figura 1 – Curva MARE x n (Manning) para canal circular de concreto



Os valores tabelados do n de Manning e otimizados para os demais dados de escoamento dos canais analisados constam na Tabela 3.

Tabela 3. Valores otimizados de n para os canais analisados

MATERIAL	n de Manning	
	Tabelado	Otimizado
Concreto	0,011	0,014
Cerâmica	0,011	0,010
	0,013	0,011
PVC	0,012	0,009
Amianto	0,011	0,010

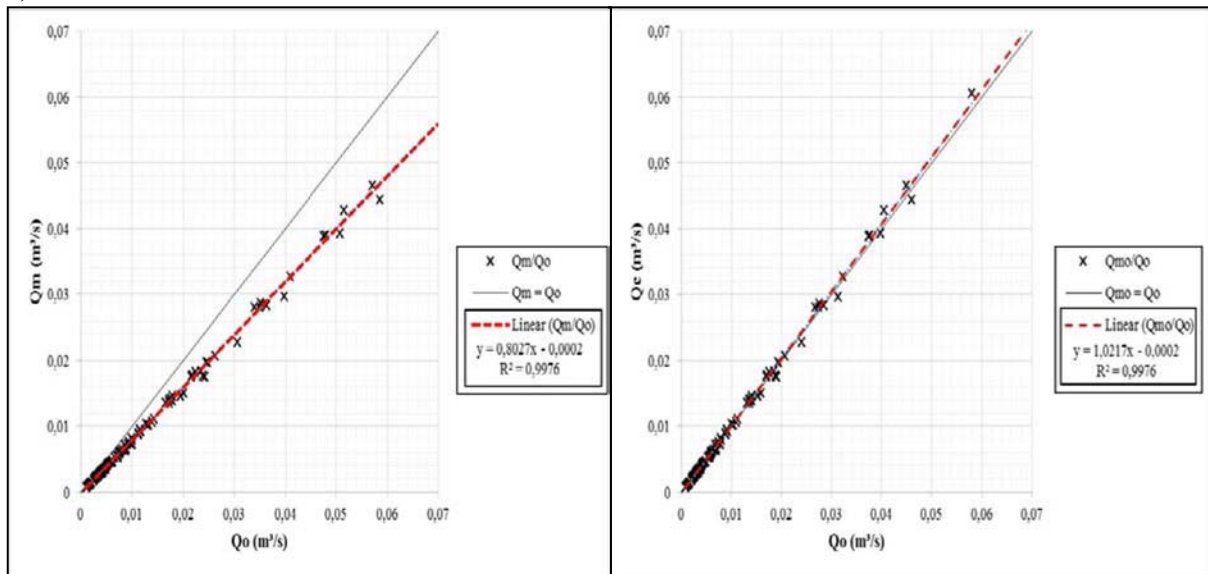
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aplicações das equações AKCW-DW e de Manning

Para que seja possível utilizar a equação AKCW-DW, é preciso determinar que valor de ψ . No caso de escoamento de tubos à seção plena, ter-se-ia ψ igual à unidade. O trabalho de Goldfarb e Cabral da Silva (2007) indicou que o valor de ψ pode ser assumido como constante igual a 1,096 o qual foi adotado neste trabalho para a representação desse parâmetro.

Aplicando as equações AKCW-DW e de Manning, com seu coeficiente tabelado e otimizado, para canais circulares em concreto, aos dados obtidos por Yarnell & Woodward (1920), Wilcox (1924) e Straub & Morris (1951, *apud* MANGIN, 2010), e comparados ao de AKCW-DW, tem-se as Figuras 2a e 2b, onde se compara os resultados das vazões calculas e observadas.

Figura 2 – Vazões observadas e calculados usando a fórmula de Manning. a) Q_{obs} versus Q_{cal} com n do fabricante igual a 0,011; b) Q_{obs} versus Q_{cal} com n otimizado igual a 0,014.

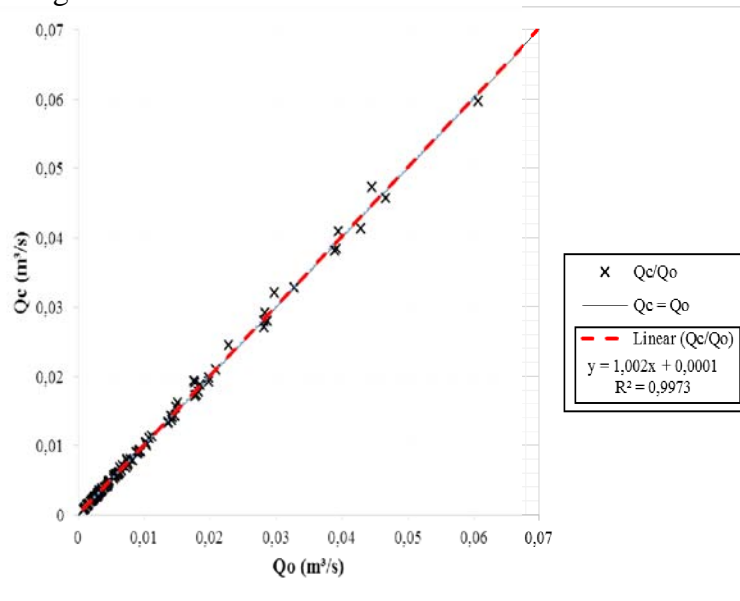


A análise da Figura 2a demonstra a inadequação da fórmula de Manning com o coeficiente recomendado pelos fabricantes de tubos para a representação da vazão. No entanto os valores produzidos para vazão calculada praticamente se coadunam com a linha de tendência de coeficiente angular igual a 0,8027.

Já na Figura 2b pode ser observado um ajuste considerado de boa qualidade para a equação de Manning, haja vista a quase coincidência dos valores em cima da reta $Q_{obs} = Q_{cal}$. Nesse ajuste o coeficiente angular da reta observada no gráfico é 1,0217.

A Figura 3 ilustra o gráfico das vazões calculada pela AKCW-DW versus as vazões observadas, para os canais circulares do tipo concreto.

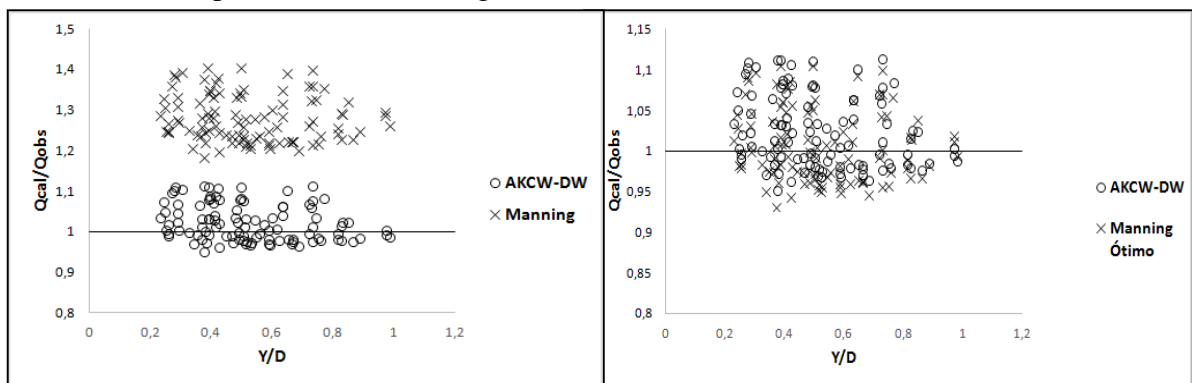
Figura 3 – Vazões observadas e calculados usando AKCW-DW



Analisando a Figura 3 pode ser observado um ajuste também considerado de boa qualidade obtido por meio da equação AKCW-DW, apresentando quase coincidência dos valores em cima da reta $Q_{obs} = Q_{cal}$, com coeficiente angular igual a 1,002.

Também foram plotados os valores de vazão adimensionalizados em função da profundidade relativa do escoamento y/D , (Figura 4a e Figura 4b).

Figura 4 - Vazões adimensionalizadas calculadas pela AKCW-DW e equação de Manning versus y/D . a) y/D versus Q_{cal}/Q_{obs} para n do fabricante igual a 0,011; b) y/D versus Q_{cal}/Q_{obs} para n do calibrado igual a 0,014.



Ficam evidentes da Figura 4a os valores inadequados de vazão calculados pela fórmula de Manning para todas as profundidades relativas investigadas, de 0,23 a 0,98 metros, porem sem indícios de tendências positivas ou negativas. Já na Figura 4b há um comportamento quase similar entre os valores de Q_{cal}/Q_{obs} para as duas expressões, não sendo possível pela análise visual dessa figura, ter-se uma conclusão sobre qual seria a que produziu os melhores resultados. No entanto também se percebe que não há indicação de tendências negativas ou positivas.

Os mesmo gráficos foram gerados para todos os tipos de canais estudados.

Os valores de erro absoluto relativo médio, MARE estão apresentados na Tabela 4 para os testes com as fórmulas de Manning com n recomendados pelo fabricante, otimizados e AKCW-DW com valores de k_s informados no trabalho de Mangin (2010).

Tabela 4 – Erro absoluto relativo médio MARE para canais circulares

MATERIAL	n de Manning		MARE	
	Fabricante	Otimizado	Manning	AKCW-DW
Concreto	0,011	-	0,2773	0,0381
	-	0,014	0,0389	
Cerâmica	0,011	-	0,0675	0,0407
	-	0,010	0,0449	
	0,013	-	0,1609	0,0626
	-	0,011	0,0353	
PVC	0,012	-	0,2549	0,0302
	-	0,009	0,0230	
Amianto	0,011	-	0,1013	0,0640
	-	0,010	0,1013	

Da análise da Tabela 4, é possível observar que para os coeficientes de Manning sugeridos pelo fabricante todos os valores do MARE foram maiores do que os obtidos com a expressão AKCW-DW. No entanto, o uso da fórmula de Manning com valores de n otimizados produziu menores valores de MARE para os canais de PVC e Cerâmica com n igual a 0,009 e 0,011 (para diâmetro igual a 0,203 metros).

Deve ficar claro que ao contrário do feito com o n de Manning, não houve otimização para o k_s utilizado na expressão AKCW-DW.

CONCLUSÕES

Foram feitos testes entre as formulações AKCW-DW e de Manning para o conjunto de dados experimentais de canais circulares hidraulicamente lisos e rugosos, relativos a escoamento turbulento em regime fluvial e rápido.

Nos testes efetuados, o critério de melhor desempenho da equação era a que apresentasse o menor erro absoluto relativo médio.

Foi possível constatar a superioridade da Equação AKCW-DW em relação ao desempenho da equação de Manning no cálculo do escoamento nos escoamentos dos canais circulares lisos de amianto, e rugosos de concreto e de cerâmica relativamente ao cálculo da vazão, com os dados do coeficiente de Manning tabelados na literatura específica.

Entre os dez conjuntos de dados testados para o cálculo da vazão, apenas dois foram favoráveis para a fórmula de Manning, esta com uso dos coeficientes n otimizados.

O comportamento das vazões calculadas por ambas as equações utilizadas não apresentou indicação de tendências positivas ou negativas em relação à profundidade relativa do escoamento.

AGRADECIMENTOS dos autores ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão das bolsas de pesquisa para o desenvolvimento deste trabalho, parte da pesquisa sobre novas formulações para a resistência ao escoamento em canais, em andamento no Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

REFERÊNCIAS

CABRAL DA SILVA, T.; LIMA, E. G. F. S.; FIGUEIREDO, S. A. A new equation for calculating the uniform flow in hydraulically smooth and rough channels. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress The Hague, the Netherlands 28 June - 3 July, 2015.

CABRAL DA SILVA, T.; ABREU, M. S. D. Cálculo do escoamento uniforme em canais retangulares lisos a partir da formulação universal de perdas de carga: aplicação a dados experimentais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, p. 117-125, 2013.

CABRAL DA SILVA, T.; MELO, I. C.; COSTA, S. G. F. Cálculo do escoamento uniforme a partir do coeficiente de atrito modificado: novas aplicações a dados experimentais de canais triangulares lisos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, nº 1, p. 215-222, 2013.

CHENG, N.; NGUYEN, H., ZHAO, K.; TANG, X. Evaluation of Flow Resistance in Smooth Rectangular Open Channels with Modified Prandtl Friction Law. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 137, n. 4, p. 441-450, 2011.

FEATHERSTONE, R. E., NALLURI, C. **Civil Engineering Hydraulics**. 2. ed. Oxford, England: BSP Professional Books, 1988.

GOLDFARB, M. C.; CABRAL DA SILVA, T. Formulação Unificada para Cálculo da Resistência ao Escoamento em Canais e em Tubos Pressurizados Lisos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, p. 133-138, 2007.

KAZEMIPOUR A. K. **Cross-Sectional Shape Effects on Resistance to Uniform Flow in Non-Circular Closed Conduits**. Universidade de Queensland, Austrália, Tese de Doutorado. 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.

LIMA, E. G. F. S. **Novas formulações para dimensionamento de canais considerando os efeitos de forma na resistência ao escoamento uniforme: seções triangulares hidraulicamente rugosas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental). Universidade Federal da Paraíba. 73p. João Pessoa, 2013.

MANGIN, S. F. **Development of an Equation Independent of Manning's Coefficient n for Depth Prediction in Partially-Filled Circular Culverts.** Master of Science (Civil and Environmental Engineering Program). YOUNGSTOWN STATE UNIVERSITY – US. 159p. 2010.

NGUYEN, B. T. CHENG, N. S. Flow resistance in smooth rectangular open-channels with low aspect ratios. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 138, n. 9, p. 817-821, 2012.

SHIH, C. C.; GRIGG, N. S. A reconsideration of the hydraulic radius as a Geometric Quantity in Open Channel Hydraulics. Proc. 12th Congres, IARH. Vol. 1, (Paper A36), Sept., pp 288-296, 1967.

WILCOX, E. R. A Comparative Test of the Flow of Water in 8-Inch Concrete and Vitrified Clay Sewer Pipe. Engineering Experiment Station Series, University of Washington, Seattle, WA. 1924.

YARNELL, D. L.; WOODWARD, S. M., B. **The Flow of Water in Drain Tile.** Washington, D.C.: U.S. Department. of Agriculture, 1920.

YEN, B. C. Open channel flow resistance. **J. Hydraul. Eng.**, v. 128, n. 1, p. 20-39, 2002.