



## **RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO UNIFORME EM CANAIS CIRCULARES LISOS**

**Maurício Costa Goldfarb**

Universidade Federal da Paraíba, goldfarb@lrh.ct.ufpb.br

**Tarciso Cabral da Silva**

Universidade Federal da Paraíba, tarciso@lrh.ct.ufpb.br

**Resumo:** Um grande número de modelos matemáticos hidráulicos podem ser aplicados para representar o escoamento turbulento uniforme em canais. A equação de Manning, um dos mais utilizadas por projetistas, pode ocasionar um erro de até 30% em seus resultados, segundo o manual nº 9 da WPCF (1972). Assim como a equação de Manning, diversas outras metodologias não representam satisfatoriamente o efeito da forma da seção transversal do escoamento. Neste trabalho, é feito um estudo comparativo entre duas metodologias que buscam computar satisfatoriamente o efeito de forma. O modelo desenvolvida por Cabral da Silva (1992), baseado nas equações básicas do escoamento uniforme, e considerando uma distribuição não uniforme da tensão de cisalhamento no perímetro molhado, é aplicada em canais de seção circular. A metodologia desenvolvida por Apelt e Kazemipour (1980), a partir de considerações da análise dimensional, é ajustada de forma a tornar-se completamente equacionável sem a necessidade de recursos gráficos. Finalmente é apresentado um procedimento de cálculo utilizando o “método de Kazemipour” ajustado analiticamente.

**Palavras-chave:** canais abertos, escoamento uniforme, efeitos de forma.

### **1. INTRODUÇÃO**

O grande número de equações disponíveis para o cálculo do escoamento turbulento uniforme em canais demonstra não só o quanto já foi desenvolvido neste campo da hidráulica mas também revela o grau de incerteza ainda existente.

De acordo com Cabral da Silva (1992), as diversas formulações matemáticas apresentadas para o cálculo do escoamento uniforme em canais, a exemplo da própria equação de Manning, representam a geometria da seção transversal simplesmente pela área  $A$  e o raio hidráulico  $R$ . A suposição de que estes parâmetros sejam suficientes para representar a forma da seção transversal foi comprovada como não verdadeira por Shih e Grigg (1967). Estes pesquisadores ensaiaram dois canais de diferentes formas com o mesmo valor de raio hidráulico, mesma área, e com igual declividade e configuração do material das paredes, e comprovaram que estes apresentavam diferentes valores de velocidade média em escoamento uniforme. Entretanto, as fórmulas gerais existentes para o cálculo do fluxo uniforme turbulento computam indevidamente, neste caso, a mesma velocidade média para os dois canais.

O modelo desenvolvido por Cabral da Silva (1992), já aplicado em seções retangulares, pelo próprio, em canais trapezoidais, por Figueiredo (1993), em seções triangulares, por Oliveira (1994), é adequado neste trabalho para o caso de seções circulares. Esta metodologia, equacionada a partir das fórmulas básicas da mecânica dos fluidos, busca introduzir os efeitos da desuniformidade da tensão de cisalhamento na fronteira do escoamento. Para tanto, o parâmetro de forma utilizado para representar a geometria da seção é calculado por uma razão entre a integral da tensão de

cisalhamento no perímetro molhado e seu valor médio calculado globalmente a partir de um balanço de forças. Esta metodologia corrige o fator de atrito para canais  $f_c$  de modo a se poder equacionar o problema através de equações da hidráulica pressurizada. O grande mérito deste modelo consiste na possibilidade de representação analítica do efeito de forma.

Apelt e Kazemipour (1980), desenvolveram uma metodologia, de comprovada eficiência, denominada “Método de Kazemipour”. Esta, utiliza-se na representação do efeito de forma uma combinação de dois parâmetros distintos. Um deles, obtido dos valores experimentais do escoamento, é fornecido apenas de forma gráfica. As características do comportamento da curva que descreve este parâmetro impede a sua representação através das equações corriqueiramente utilizadas na engenharia. A representação algébrica do método de Kazemipour é feita neste trabalho através de um ajuste polinomial utilizando variáveis transformadas. Assim, esta metodologia pode ser utilizada sem a necessidade de procedimentos gráficos, o que possibilita sua solução através rotinas computacionais, e torna possível a comparação com outras metodologias.

Através da análise dos parâmetros de forma utilizados, é feita uma comparação entre as duas metodologias. Finalmente, é apresentado um algoritmo para aplicações do “método de Kazemipour” ajustado analiticamente.

## 2. O MÉTODO UTILIZADO

O modelo matemático, desenvolvido por Cabral da Silva (1992), baseia-se numa distribuição adequada, não uniforme, da tensão de cisalhamento na fronteira do escoamento. Introduce-se no equacionamento um parâmetro adimensional  $\psi_t$ , obtido da relação da tensão de cisalhamento calculada globalmente com a calculada integrando-se a tensão tangencial ao longo do perímetro molhado.

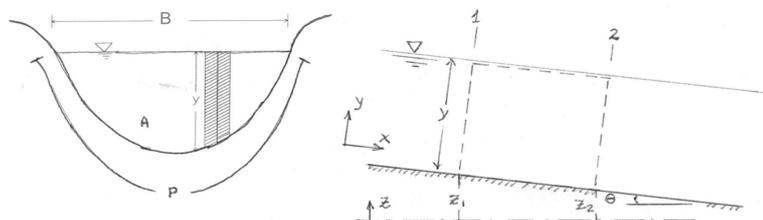


Figura 1 – Volume de controle

Para representar o efeito de forma da seção transversal na resistência ao escoamento uniforme em canais abertos, faz-se inicialmente a aplicação das equações integrais da continuidade e da quantidade de movimento em um canal de declividade  $S$ , raio hidráulico  $R$ , através de um volume de controle, entre duas seções transversais, de geometria qualquer do escoamento, conforme apresentado na Fig. (1). Deste procedimento, obtém-se a Eq. (1) que fornece o valor médio da tensão de cisalhamento no perímetro molhado.

$$\tau_o = \rho g R S \quad (1)$$

Considerando um volume de controle de comprimento  $\Delta x$ , a força tangencial global atuante nas paredes do perímetro molhado  $P$  pode ser calculada na Eq. (2).

$$F_o = \rho g R S \Delta x P \quad (2)$$

Buscando introduzir os efeitos da desuniformidade da tensão de cisalhamento na fronteira do escoamento, a força é calculada agora através da integral da Eq. (3).

$$F = \Delta x \int_P \tau dp \quad (3)$$

Obtém-se agora um fator dito de forma  $\psi_t$ , que relaciona a força tangencial calculada através da razão entre a Eq. (3) que contempla as variações da tensão de cisalhamento ao longo do perímetro molhado do escoamento, e a força tangencial calculada globalmente através da Eq. (2).

$$\psi_t = \frac{\Delta x \int_P \tau dl}{\rho g R S \Delta x P} \quad (4)$$

De posse do parâmetro adimensional  $\psi_t$  o fator de atrito modificado  $f_*$  é calculado a partir das equações da hidráulica pressurizada. Com fator de atrito modificado, o fator de atrito para canais em escoamento uniforme  $f_c$  pode ser obtido da Eq. (5).

$$f_c = \psi_t f_* \quad (5)$$

## 2.1 Aplicação aos Canais Circulares.

Com objetivo de se obter o parâmetro adimensional  $\psi_t$ , a Eq. (4) pode ser resolvida, relacionando-se a tensão de cisalhamento  $\tau$  não mais com o raio hidráulico  $R$ , como ocorre na Eq. (1) para  $\tau_0$ , mas com um parâmetro de forma substitutivo  $\mathfrak{R}$ . Sendo  $\mathfrak{R}$  uma função representativa da geometria da seção transversal. Este foi o procedimento realizado por Figueiredo (1993), em seções trapezoidais, e Oliveira (1994), em canais triangulares. Assim, a Eq. (4) toma a forma apresentada na Eq. (6).

$$\psi_t = \frac{\Delta x \int_P \rho g \mathfrak{R} S dp}{\rho g R S \Delta x P} = \frac{1}{P} \int_P \frac{\mathfrak{R}}{R} dp \quad (6)$$

Para canais de seção transversal circular, a função  $\mathfrak{R}$ , pode ser escrita na forma da equação (7), onde  $D$  é o diâmetro interno do canal, e  $y$  a altura hidráulica do escoamento.

$$\mathfrak{R} = \frac{1/4D^2 \left\{ \cos^{-1}(1 - 2y/D) - (1 - 2y/D)[2y/D(2 - 2y/D)]^{1/2} \right\}}{\cos^{-1}(1 - 2y/D).D} \quad (7)$$

A substituição da Eq. (7) na Eq. (6) produz uma terceira equação que constitui o princípio da metodologia desenvolvida por Cabral da Silva (op. cit). No entanto, neste trabalho é obtido um valor numérico, de forma facilitada, para o parâmetro de forma  $\psi_t$  a partir dos valores experimentais de Replogle e Chow (1966). Este procedimento de simplificação é justificado na necessidade de ajuste dos parâmetros encontrados pelos autores já citados, quando buscaram uma solução analítica.

Replogle e Chow (1966), realizaram experimentos utilizando tubo de Pitot para obtenção da velocidade em canais abertos de seções circulares. Estes pesquisadores utilizaram seus próprios dados para obter algumas constantes de uma simplificação semi-analítica que reduz a fase inicial do problema a solução de equações do escoamento tipo laminar. Posteriormente, essa solução simplificada foi modificada para calcular a distribuição da tensão de cisalhamento no escoamento uniforme livre. As curvas obtidas através desse procedimento que relacionam a razão entre a tensão de cisalhamento e o valor médio da tensão de cisalhamento com o perímetro molhado para três diferentes valores da altura do escoamento sobre o diâmetro interno da estrutura do canal foram apresentadas pelos pesquisadores.

Para adequar a Eq. (4) nas características dos dados de Replogle e Chow (op. cit), esta pode ser reescrita na forma seguinte:

$$\psi_t = \frac{\rho g S \Delta x \int_P \mathcal{R} dp}{\rho g R S \Delta x P} = \frac{\frac{1}{P} \int_P \tau dp}{\tau_0} = \frac{1}{P} \int_P \frac{\tau}{\tau_0} dp \quad (8)$$

Estas curvas foram inseridas no programa EXCEL e em cada caso foram obtidas através do programa as equações que melhor as representassem. Nos três casos, a substituição destas funções na Eq. (8) forneceu valor numérico médio de  $\psi_t = 1,018$  para o parâmetro adimensional procurado.

### 3. O MÉTODO DE KAZEMIPOUR

Trabalhando com canais circulares, Kazemipour e Apelt (1979) revisaram e analisaram os principais métodos de cálculo da resistência hidráulica ao escoamento uniforme que consideravam em suas formulações o efeito da forma da seção e concluíram que os mesmos, considerando o escoamento em canais como se fosse de um tubo equivalente de comprimento igual a quatro vezes o raio hidráulico eram insatisfatórios. Concluíram também que o uso do raio hidráulico poderia ser adequado se acoplado a outros parâmetros relevantes que computassem o efeito de forma da seção transversal do canal. Constatando serem os métodos analisados incompletos ou falhos, empreenderam então uma investigação teórica apoiada nos dados experimentais de outros autores e nos resultados obtidos experimentalmente por eles mesmos. O modelo desenvolvido denominado “método de Kazemipour”, utiliza a equação para tubos pressurizados de von Karmam – Prandtl (Eq. 9), e considera dois parâmetros adimensionais para representar o feito de forma e permite o cálculo do fator de atrito para canais em escoamento turbulento uniforme, bem como a velocidade média a partir da fórmula universal de perdas de carga e diagramas tradicionais para fluxo em tubulações circulares sob pressão.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \text{Re} \sqrt{f} - 0,8 \quad (9)$$

O Método de Kazemipour leva em conta os efeitos de forma da seção transversal através de dois parâmetros adimensionais,  $\psi_1 = (P/D)^{1/2}$  e  $\psi_2$  uma função do diâmetro e da altura  $y_D$  ( $\psi_2 = f(D/y_D)$ ), que representam a forma da geometria característica da seção transversal. Onde  $y_D$  é a altura hidráulica relacionada ao diâmetro do canal.

Os dois pesquisadores interpretaram os parâmetros adimensionais da seguinte maneira:

$\psi_1$  – variável que reflete os efeitos da desuniformidade da tensão de cisalhamento na fronteira do escoamento, como um afastamento em relação à seção transversal de um canal retangular infinitamente largo.

$\psi_2$  – razão de aspecto que reflete os efeitos da desuniformidade da tensão de cisalhamento ao longo do perímetro molhado.

Os valores de  $\psi_2$  em função do parâmetro de forma  $D/y_D$  obtidos de acordo com o Método de Kazemipour, foram apresentados por estes autores apenas de forma gráfica. Com este gráfico obtém-se o valor de  $\psi_2$ .

Uma vez obtidos os dois parâmetros de forma, a relação entre essas grandezas pode fornecer um único parâmetro  $\psi$  que representa a geometria da seção transversal do escoamento.

$$\psi = \psi_1 / \psi_2 \quad (10)$$

A relação entre o fator de atrito para canais  $f_c$  e o parâmetro  $\psi$ , fornece o fator de atrito modificado  $f_*$  através da seguinte relação:

$$f_* = f_c / \psi \quad (11)$$

Os valores do fator de atrito modificado  $f_*$ , obtidos desse procedimento, satisfazem bem a Eq. (9) para o fator de atrito em tubos, isto é,  $f_*$  tem o mesmo valor que  $f$  para um mesmo número de Reynolds.

O Método de Kazemipour tem sido considerado por diversos autores a exemplo de Nalluri & Adepoju (1985), Cabral da Silva (op. cit.), entre outros, como um método racional que pode ser aplicado com sucesso a uma série de casos. A seguir, busca-se um ajuste analítico da curva apresentada por Apelt e Kazemipour, de forma a tornar o Método de Kazemipour independente de recursos gráficos.

### 3.1. Ajuste Polinomial do Método de Kazemipour.

O Método de Kazemipour considera dois parâmetros adimensionais para representar o feito de forma no escoamento turbulento uniforme em canais circulares. O primeiro,  $\psi_1$ , é obtido diretamente com o valor do perímetro molhado e o diâmetro do tubo. No entanto, o segundo parâmetro é uma função do diâmetro  $D$  e da altura  $y_D$ , que representam a forma da geometria característica da seção transversal. Pela sua feição, o segundo parâmetro, obtido dos dados de laboratório, é fornecido apenas de forma gráfica. Neste caso, existe a impossibilidade da utilização de um programa computacional na solução do problema quando da utilização do método de Kazemipour, e também da comparação deste com outros métodos existentes.

Para se adaptar o método de Kazemipour à formulação puramente matemática, necessita-se da equação da curva que relaciona o parâmetro  $\psi_2$  versus  $D/y_D$ , não fornecida apesar de ser o melhor ajuste aos pontos plotados no gráfico, segundo Kazemipour e Apelt (op. cit.).

A substituição da curva por uma equação que melhor a aproxime foi feita ajustando-se aos dados  $(D/y_D, \psi_2)$  tirados diretamente da curva e fazendo-se a seguinte mudança de variáveis proposta por Cabral da Silva e Figueiredo (1993):

$$X = C_1 + \ln(D/y_D) \quad (12)$$

$$Y = C_2 + \ln \psi_2 \quad (13)$$

sendo  $X$  e  $Y$  variáveis independente e dependente auxiliares. A introdução das constantes  $C_1$  e  $C_2$  tem por finalidade evitar valores negativos de  $X$  e  $Y$ . Nesse caso,  $C_1 = C_2 = 1$ .

Feito o ajuste,  $\psi_2$  pode ser então obtido na Eq. (14) proposta por estes pesquisadores.

$$\psi_2 = \exp \left\{ \sum_{i=0}^n a(i) (C_1 + \ln(D/y_D))^i \right\} - C_2 \quad (14)$$

onde  $a(i)$  são os coeficientes e  $n$  o grau do polinômio ajustado que relaciona as variáveis  $X$  e  $Y$ .

Os dados extraídos da curva de Kazemipour e Apelt (op. cit.) foram então lançados nas Eqs. (12) e (13). Os valores obtidos fornecem o gráfico da Fig. (2) e com ele o polinômio que ajusta satisfatoriamente as variáveis.

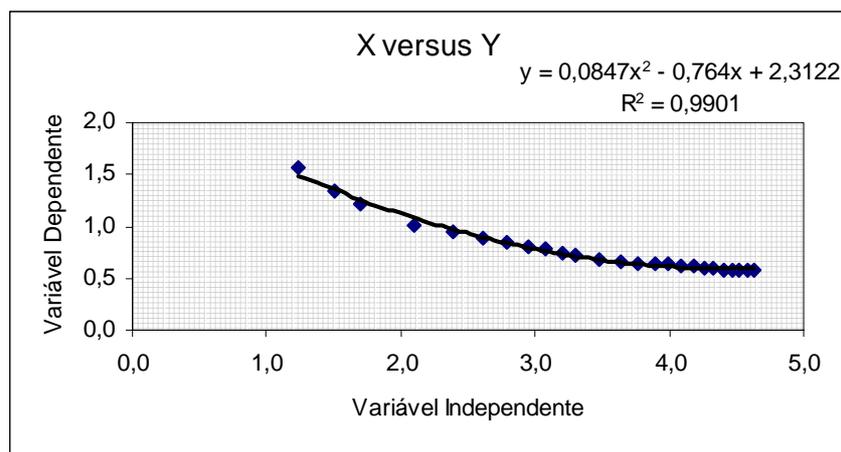


Figura 2 – Relação entre as variáveis X e Y.

O polinômio da Eq. (15), que relaciona as variáveis X e Y, é considerado satisfatório devido ao elevado valor do parâmetro estatístico  $r^2 = 0,9901$ .

$$Y = 0,0847X^2 - 0,764X + 2,312 \quad (15)$$

Aplicando a Eq. (15) na (14), temos finalmente uma função que represente analiticamente o segundo parâmetro do método de Kazemipour.

$$\psi_2 = \exp\{[0,0847(1+\ln D/y_D)^2 - 0,764(1+\ln D/y_D) + 2,312] - 1\}$$

ou

$$\psi_2 = 1,864 \exp[0,084(\ln D/y_D)^2 - 0,589(\ln D/y_D)] \quad (16)$$

O gráfico da Fig. (3) apresenta os pontos do experimento de Kazemipour utilizados para traçar a curva de  $\psi_2$  (sequencia 1), e os valores deste parâmetro calculados da Eq. (16) (sequencia 2). Os valores de  $\psi_2$  calculados com a Eq. (16) mostraram-se bastante próximos aos da curva experimental de Kazemipour, o que justifica a adoção desta equação. Ademais, no método gráfico de obtenção de  $\psi_2$ , pequenos erros de leitura não são raros o que reforça o motivo da utilização da Eq. (16) para o cálculo de  $\psi_2$  no método de Kazemipour.

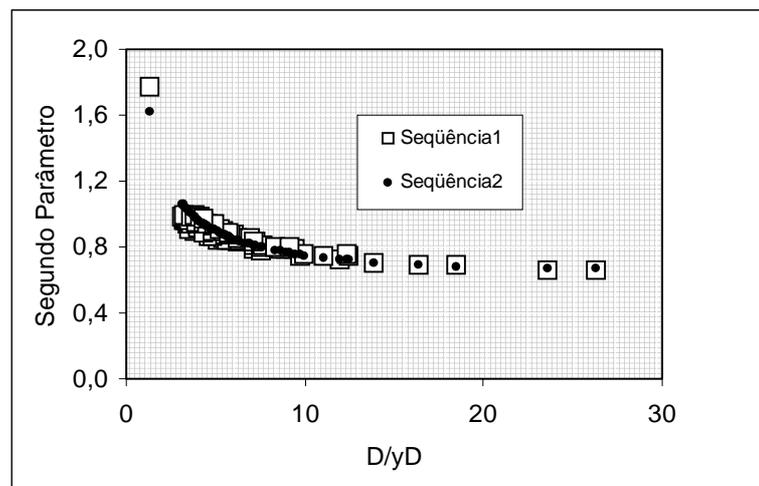


Figura 3 – Dados de Kazemipour e Apelt (sequência 1) e Eq. (16) (sequência 2).

#### 4. COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS

A comparação entre o método de Apelt e Kazemipour (1980) e o desenvolvido por Cabral da Silva (1992), adaptado neste trabalho para o caso de seções circulares, é feita através dos parâmetros adimensionais utilizados para representar o efeito de forma nestes modelos.

O modelo de Cabral da Silva utiliza-se de apenas um único parâmetro de forma  $\psi_t$  de comportamento constante em relação ao fator  $y/D$ , sendo seu valor calculado em  $\psi_t = 1,018$ . Observa-se que se este parâmetro não varia em função de  $y/D$ , logicamente, permanecerá constante e com o mesmo valor em função da variável  $D/y_D$  ( $y/D$  e  $D/y_D$  são calculados em função da área e do diâmetro).

O método de Kazemipour utiliza-se um parâmetro  $\psi$  composto por outros dois,  $\psi_1$  e  $\psi_2$  relacionados conforme a Eq. (10). Por analogia com  $\psi_2$  de Kazemipour, um segundo parâmetro de forma  $\psi_{2t}$  é sugerido no método de Cabral da Silva para que se possibilite a comparação entre estes.

$$\psi_{2t} = \psi_1 / \psi_t \quad (17)$$

ou

$$\psi_{2t} = (P/D)^{1/2} / 1,018 \quad (18)$$

A Fig. (4) apresenta as curvas do parâmetro de forma  $\psi_{2t}$  calculados na Eq. (18), seqüência 1, e o segundo parâmetro de forma  $\psi_2$  de Kazemipour (seqüência 2).

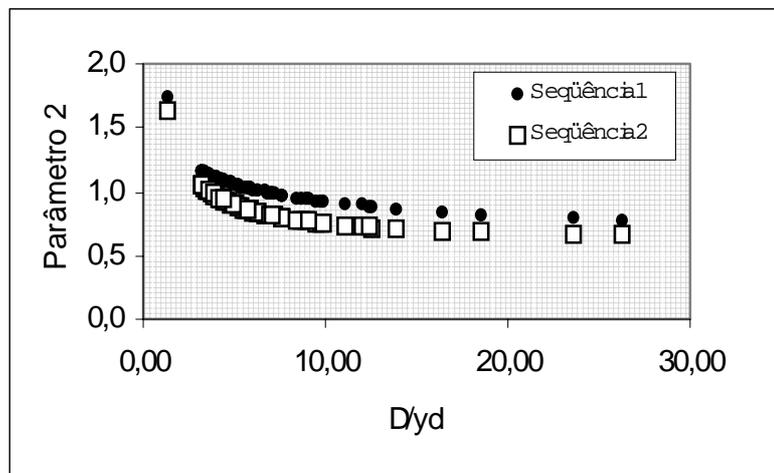


Figura 4 – Segundo parâmetro  $\psi_{2t}$  de Silva (seqüência 1), e  $\psi_2$  de Kazemipour (seqüência 2).

O parâmetro de  $\psi$  de Kazemipour pode ser obtido com a substituição da Eq. (16) na Eq. (10).

$$\psi = \frac{(P/D)^{1/2}}{1,864 \exp[0,084(\ln D/y_D)^2 - 0,589(\ln D/y_D)]} \quad (19)$$

A Fig. (5) apresenta as curvas do parâmetro de forma  $\psi_t$  proposto por Cabral da Silva (op. cit.) em função da variável  $D/y_D$  (seqüência 1), e o parâmetro de forma  $\psi$  de Kazemipour (seqüência 2), calculado através da Eq. (19).

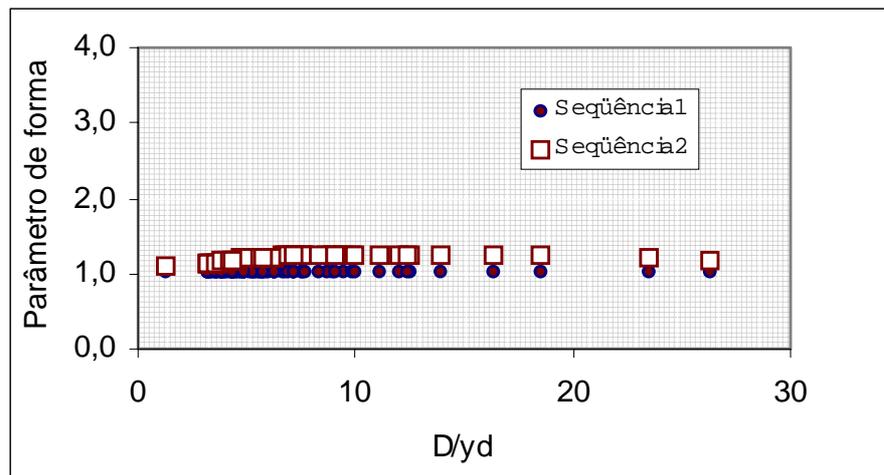


Figura 5–Parâmetro  $\psi_t$  de Silva (sequência 1), e  $\psi$  de Kazemipour (sequência 2).

As curvas apresentadas nas Figs. (4) e (5) revelam um comportamento semelhante entre os parâmetros adimensionais de forma propostos por Cabral da Silva (1992) e Kazemipour (1980). Apesar da similaridade observada, a análise das curvas revela que os parâmetros de forma diferem entre si por uma constante.

## 5. APLICAÇÃO

**Aplicação 1:** Dimensionamento – Em um canal circular liso com diâmetro igual a 39,03 cm e declividade de 0,0050 m/m, escoava uma vazão uniforme de 61,80 l/s a uma temperatura de 24,0°C ( $\nu=9,11 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ ). Calcular a profundidade hidráulica do escoamento.

- i) Adota-se um valor inicial para a altura hidráulica  $y$ ;
- ii) Calcula-se o parâmetro de forma  $\psi$  através da equação 5.38;
- iii) Determina-se o raio hidráulico  $R$ ;
- iv) Calcula-se  $U$ ,  $U = Q/A$ ;
- v) Obtém-se  $f$  da equação 1;
- vi) Através da equação  $A = Q[(f\psi) / (8RgS)]^{1/2}$ , calcula-se o novo valor de  $y$ ;
- vii) Repete-se o procedimento a partir do item (ii) até que o valor de  $y$  encontrado seja satisfatoriamente igual ao anterior.

Seguindo o algoritmo acima, o valor encontrado é  $y = 14,9 \text{ cm}$ .

**Aplicação 2:** Cálculo de vazão – Calcular a vazão em um canal circular liso com diâmetro interno de 29,34 cm e altura hidráulica  $y = 7,34 \text{ cm}$ , que transporta água em escoamento uniforme a uma temperatura de 24,5°C ( $\nu=9,00 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ ).

- i) Calcula-se o parâmetro de forma  $\psi$  através da equação 5.38;
- ii) Calcula-se a parcela  $Re\sqrt{f}$  da “fórmula universal” de Darcy-Weisbach escrita para canais na seguinte forma:  $Re\sqrt{f} = [128R^3gS / \nu^2\psi]^{1/2}$ ;
- iii) Obtém-se  $f$  da equação 1;
- iv) Calcula-se  $fc = f\psi$ ;
- v) Calcula-se a velocidade  $U$  através da equação  $U = (8gRS / fc)^{1/2}$ ;
- vi) Finalmente,  $Q = A.U$

Nesse caso,  $Q = 35,2 \text{ l/s}$ .

## 6. CONCLUSÕES

O procedimento desenvolvido por Cabral da Silva (1992) para representar a forma da seção transversal no escoamento uniforme livre apresentou resultados de grande importância, quando aplicado para o caso de geometria circular, visto que os parâmetros de forma utilizados neste método,  $\psi_t$  e  $\psi_{2t}$ , apresentaram-se com comportamento semelhante aos utilizados por Apelt e Kazemipour,  $\psi$  e  $\psi_2$ , como é observado na Fig. (4) e Fig. (5). No entanto, as características das curvas apresentadas nestas figuras sugerem um ajuste no modelo em questão.

A metodologia desenvolvida por Apelt e Kazemipour (1980), denominada método de Kazemipour, mostrou-se bastante eficiente para o cálculo de escoamento uniforme livre em canais lisos de geometria circular. Os parâmetros geométricos ( $P$ ,  $D$ ,  $y_D$ ) utilizados por estes pesquisadores mostraram-se suficientes para representar a forma da geometria da seção transversal nos procedimentos de cálculo.

A semelhança entre os parâmetros  $\psi_t$  utilizado por Silva, e  $\psi$ , no método de Kazemipour, indicam a possibilidade de se obter um procedimento puramente analítico, que contemple os efeitos de forma, para o cálculo de escoamento uniforme em canais de geometria circular através da solução das Equações (6) e (7).

A matematização do método de Kazemipour, feita através da Eq. (19), torna possível a utilização deste para o cálculo do escoamento uniforme livre em canais abertos de seção circular sem que seja necessário o uso de procedimentos gráficos, e sem a perda de qualidade nos resultados obtidos.

## 6. REFERÊNCIAS

- Nalluri, C. and Adepoju, B., 1985, "Shape Effects on Resistance to Flow in Smooth Channels of Circular Cross-Section", *Journal of Hydraulic Research*, vol. 23, n° 1, pp. 37-46.
- Kazemipour A. K. and Apelt C. J., 1980, "Shape Effects on Resistance to Smooth Semi-Circular Channels", *Research Report n° CE 18*, Department of Civil Engineering, University of Queensland, 27 p.
- Kazemipour A. K., 1979 "Cross-Sectional Shape Effects on Resistance to Uniform Flow in Non-Circular Closed Conduits", Tese de doutorado submetida a Universidade de Queensland, Austrália, para obtenção do título de Doctor of Philosophy, 169p.
- Oliveira, J. M. S., 1994, "Resistência ao Escoamento Uniforme em Canais Triangulares Lisos", dissertação de mestrado apresentado ao curso de pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFPB. João Pessoa / PB, 66p.
- Replogle, J. A. and Chow, V. T., 1966, "Tractive-force Distribution in Open Channels", *Journal of the Hydraulics Division, Proc. ASCE*, vol. 92, n° HY2, pp. 169-191.
- Shih C. C. and Grigg, N. S., 1966, "A Reconsideration of the Hydraulic Radius as a Geometric Quantity in Open Channel Hydraulics", *Proc. 12th Congress, I.A.R.H.*, vol. 1, (Paper A36), pp. 288-296.
- Cabral da Silva, T. e Figueiredo, P. H. S., 1993, "Efeitos de Forma na Resistência ao Escoamento Uniforme em Canais Trapezoidais", X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Gramado/RS, Brasil, pp. 93-98.
- Cabral da Silva, T., 1992, "Efeitos de Forma na Resistência ao Escoamento Uniforme em Canais", Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia Hidráulica, São Paulo / SP, 85p.
- Cabral da Silva, T. e Figueiredo, P. H., 1993 "Ajuste Polinomial: Três Estudos da Casos Utilizando Variáveis Transformadas", XIV Congresso Ibero Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia, São Paulo / SP, pp. 1212-1219.
- WPCF, 1972, "Design and Construction of Sanitary and Storm Sewers", *Manual of Practice n° 9*, 2ª edition, Water Pollution Control Federation, Washington, D.C., 122p.

## **RESISTANCE TO UNIFORM FLOW IN SMOOTH CHANNELS CIRCULAR**

**Abstract.** A great number of hydraulic models can be applied to represent the uniform turbulent flow in channels. The Manning equation, one of the most used by **designers**, can result in a 30% error in the results, according the guide n° 9 of the WPCF (1972). As well as the equation of Manning, diverse others methodologies do not represent satisfactorily the effect of the form of the transversal section of the flow. In this work, a study comparative of the application of two methodologies that search to compute the form effect satisfactorily. The model developed by Silva (1992), based in the basic equations of the uniform flow, and considering a distribution not uniform of the tension of shear in the wet perimeter, is applied in channels of circular section. The methodology developed by Apelt and Kazemipour (1980), from the dimensional analysis of the phenomenon, is adjusted to become fully equationable without the necessity of graphical features. Finally is presented a calculation procedure using the Method Kazemipour adjusted analytically.

**Keywords:** open channels, uniform flow, shape effects.