

VELOCIDADE E TURBULÊNCIA EM CANAIS EM CURVA

Fernanda Hiromi Scheffer Yamakawa¹, José Junji Ota² e Fernando Ribas Terabe¹

¹ Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza (CEHPAR/Institutos Lactec), Curitiba, Brasil.

² Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA/ UFPR), Curitiba, Brasil.
E-mail: fernanda.hiromi@lactec.org.br, ota.dhs@ufpr.br, fernando.terabe@lactec.org.br

Introdução

O escoamento em curvas de rios e canais é assimétrico, havendo interação entre as correntes secundárias e o fluxo principal, o que afeta processos como transporte de sedimentos, dissipação de poluentes e estabilidade das margens. (Anwar, 1986)

Quando o escoamento é constrito a uma porção mais estreita da seção transversal, comum em escoamentos em curvas, ocorrem regiões de maior tensão tangencial do que seria esperado e também zonas onde o escoamento é praticamente negligenciável. (Dutta et al., 2013)

Portanto, o estudo das características do escoamento e de suas influências no ecossistema auxilia no projeto, construção, controle e restauração de rios e canais.

O objetivo deste trabalho é investigar a distribuição temporal (velocidade média e flutuação de velocidade) e espacial (em profundidades diferentes, próximo à margem, a montante da curva, etc.) dos parâmetros de velocidade nas três direções do escoamento em um canal em curva.

Para o estudo, foram realizadas medições com velocímetro acústico Doppler (ADV) a fim de determinar o campo de velocidades e da turbulência (analisada através das tensões de Reynolds e da energia cinética turbulenta) ao longo de um canal experimental.

Escoamento em curvas de canais

Rozovskii (1957) listou as seguintes propriedades básicas de um escoamento em curva: superelevação da superfície de água; presença de circulações transversais; alteração na estrutura da velocidade do escoamento; separação do escoamento e formação de zonas de vórtices; perda adicional de energia; e deformação do leito do rio.

A superelevação do nível de água, causada pela ação da força centrífuga, em escoamentos em curva é inevitável. A inclinação da superfície de água fornece o mecanismo principal para a ocorrência de correntes secundárias transversais e influencia a estrutura de velocidades do escoamento. (Ippen et al., 1962)

Estudo experimental

Para a realização do estudo foi construído um canal experimental no laboratório do Cehpar (Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza). O canal de seção transversal trapezoidal, ilustrado na Figura 1, é constituído por trechos retos e em curva. Salienta-se a concavidade reversa da sequência de curvas 1 e 2.

As medições foram feitas para o escoamento com vazão de 340 l/s e nível de água de jusante igual a 28,17 cm, imposto próximo à extremidade de jusante do canal (estaca 35). As condições hidráulicas do escoamento estão apresentadas na Tabela 1.

O número de Reynolds indica que o escoamento é turbulento de transição e o número de Froude mostra que o escoamento é subcrítico.

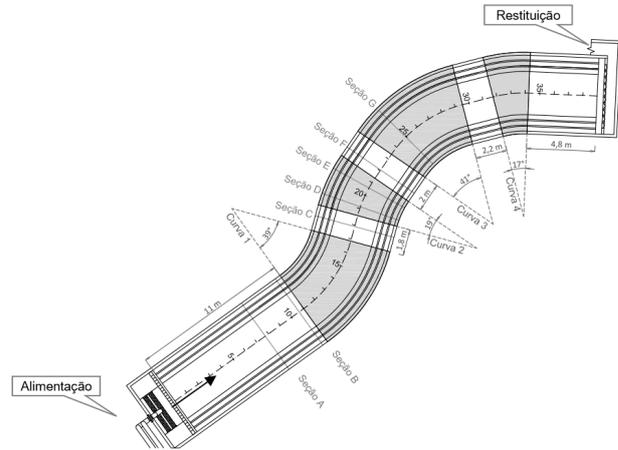


Figura 1.- Canal experimental.

Tabela 1.- Características hidráulicas do escoamento.

Vazão	$Q = 0,340 \text{ m}^3/\text{s}$
Profundidade do escoamento	$H = 0,28 \text{ m}$
Área da seção transversal	$A = 1,08 \text{ m}^2$
Perímetro molhado	$P = 4,87 \text{ m}$
Raio hidráulico	$R_h = 0,22 \text{ m}$
Velocidade média	$U = \frac{Q}{A} = 0,31 \text{ m/s}$
Número de Reynolds	$Re = \frac{UR_h}{\nu} = 279.654$
Número de Froude	$Fr = \sqrt{\frac{Q^2 B}{gA^3}} = 0,21$

Para medição de velocidades foi utilizado um velocímetro acústico Doppler (Acoustic Doppler Velocimeter - ADV), da marca SonTek, capaz de obter dados de velocidade instantâneas em três dimensões. O princípio de funcionamento do ADV está baseado na medição da velocidade do movimento das partículas presentes na água através do efeito Doppler.

As velocidades foram medidas em seções transversais do canal, ao longo de diversas verticais, conforme indicado na Figura 2.

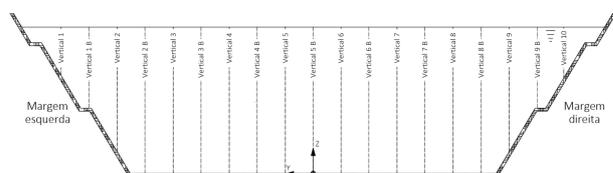


Figura 2.- Verticais de medição em cada seção transversal.

Resultados experimentais

A partir das velocidades instantâneas medidas pelo ADV foram determinados parâmetros de turbulência e velocidade média.

A Figura 3 apresenta a distribuição da velocidade média. A concentração do escoamento ocorreu junto à margem interna das curvas 2 e 3.

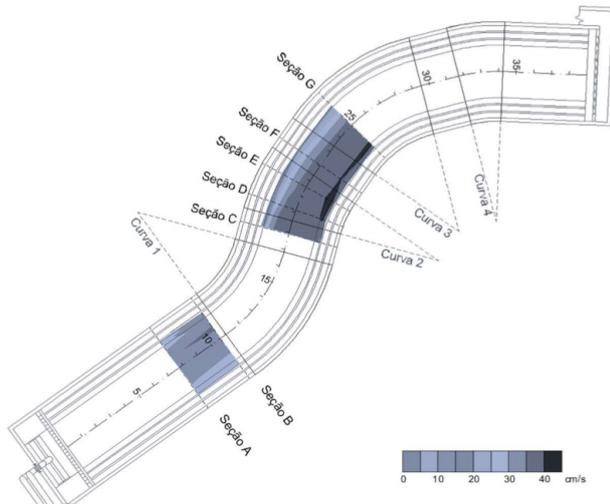


Figura 3.- Distribuição de velocidades ao longo do canal.

As condições gerais do escoamento em curvas, tais como superelevação, zonas de separação e formação de vórtices, observadas em trabalhos anteriores (Rozovskii, 1957; Ippen et al, 1962), também ocorreram no escoamento no canal experimental. Tais características do escoamento são causadas pelo efeito da força centrífuga e, portanto, são dadas em função das curvaturas. A superelevação foi observada junto à margem externa das curvas, onde o escoamento teve velocidade reduzida e ocorreram zonas de separação do escoamento.

A presença de correntes secundárias foi diagnosticada a partir da variação do sentido das velocidades transversais ao longo do canal no fundo e na superfície, conforme pode ser observado na Figura 4.



Figura 4.- Distribuição da componente de velocidades transversal v na seção D (próximo à superfície, com sentido para a margem direita, e, junto ao fundo, com sentido para a margem esquerda).

Outro indício da presença de correntes secundárias é o padrão das isolinhas de velocidade, com convexidade em direção aos cantos da seção transversal (Figura 5). Tominaga et al. (1989) consideraram que devido ao desenvolvimento das correntes secundárias, o escoamento na região do canto é acelerado pelo transporte de quantidade de movimento da região superfície. Pelo mesmo motivo, o escoamento na região central do canal possui isolinhas com convexidade em direção à superfície.

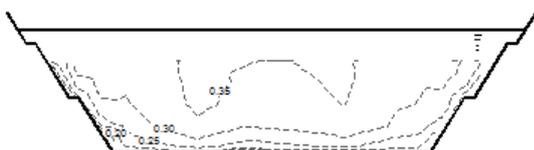


Figura 5.- Distribuição da velocidade média na seção A.

Os dados de flutuação de velocidade obtidos forneceram parâmetros de turbulência do escoamento. Os padrões de $u'w'$ (tensões de Reynolds) foram usados como indicativos da interação do escoamento com o fundo do canal. Os valores negativos são referentes à reversão da direção da quantidade de movimento do fluxo turbulento, coerente com a localização das zonas de separação do escoamento junto à margem esquerda do canal (Figura 6)

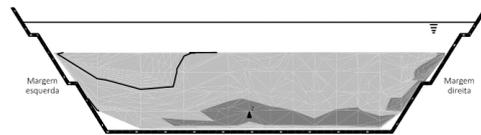


Figura 6.- Distribuição do tensor de Reynolds $u'w'$ na seção E.

Conclusões

As medições de velocidade realizadas com equipamento ADV, em diversas posições ao longo do canal, permitiram avaliar a distribuição de velocidades e parâmetros turbulentos.

Os campos de velocidades indicam que a componente de velocidade u (medida na direção do alinhamento do canal) é predominante, embora as componentes transversais e verticais tenham influência no escoamento. A presença de correntes secundárias foi observada através das velocidades transversais em sentidos opostos junto ao fundo e próximo à superfície.

As distribuições das tensões de Reynolds e da energia cinética turbulenta forneceram informações relevantes sobre a interação do escoamento, como a presença de correntes secundárias, aumento da tensão turbulenta ao longo da curva e aumento da energia cinética na região de separação do escoamento.

O banco de dados gerado tem valor considerável para estudos quantitativos e qualitativos sobre a estrutura do escoamento em escoamentos em canais em curva e pode auxiliar na modelagem numérica, considerando o problema do fechamento de modelos de turbulência.

Referências bibliográficas

- Anwar, H. O. (1986). "Turbulent structure in a river bend". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 8, p. 657-699.
- Blanckaert, K. and De Vriend, H.J. (2004). "Secondary flow in sharp open-channel bends". *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 498, p. 353-380.
- Dutta, S; Fytanidis, D. K; Santacruz, S. S.Waratuke, A. (2013). Identification of potential high shear stress zones in the 16 km-long diversion channel of Belo Monte Hydroelectric Project using multiple 3-Dimensional numerical models. *Technical Report*. Ven Te Chow Hydrosystems Laboratory, 66 p.
- Ippen, A. T.; Drinker, P. A.; Jobin, W. R.; Shemdin, O. H. (1962). Stream dynamics and boundary shear distributions for curved trapezoidal channels. *Report*. National Agricultural Library, 81 p.
- Tominaga, A.; Nezu, I; Ezaki, K.; Nakagawa, H. (1989). "Three-dimensional turbulent structure in straight open channel flows". *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 27, p. 149-173
- Rozovskii, I. L. (1957). *Flow water in bends of open channels*. Kiev: Academy of Sciences of the Ukrainian SSR