

MODELAGENS EXPERIMENTAL, TEÓRICA E COMPUTACIONAL DE ESCOAMENTO GRADUALMENTE VARIADO EM CANAL RETANGULAR

Osmar Luiz Moreira Pereira Fonseca de Menezes^{1}; Otacilio Correia Lima Neto¹ & Paulo Roberto Lacerda Tavares²*

Resumo – O escoamento gradualmente variado ocorre quando há modificações progressivas no fluxo d'água que se propagam por grandes distâncias. A alteração do regime d'água ocorre com a implantação de uma singularidade. O remanso é a elevação da linha d'água a montante de uma barragem. As modelagens hidráulicas foram aplicadas para simular o escoamento que ocorre antes da estrutura em um canal retangular. A comparação dos resultados dos modelos experimental, teórico e computacional permite a escolha da opção mais simples com redução de tempo e custo. Determina-se a extensão do escoamento a montante da singularidade nos três casos ao desconsiderar a pequena dimensão do canal do laboratório. O pequeno comprimento do canal afetou a configuração do perfil d'água no modelo experimental. Há simplificações do modelo teórico na definição das alturas d'água imediatamente a montante da estrutura hidráulica. Na modelagem computacional, os dados geométricos e de escoamento obtidos no canal do laboratório são os requisitos básicos para as simulações do escoamento no *HEC-RAS*. A pequena divergência entre os resultados destaca a escolha de um modelo mais eficaz. A modelagem computacional se mostrou menos onerosa, mais simplificada e visualmente mais atrativa.

Palavras-Chave – Modelagem hidráulica, Remanso.

EXPERIMENTAL, THEORETICAL AND COMPUTATIONAL MODELLINGS OF GRADUALLY VARIED FLOW IN RECTANGULAR CHANNEL

Abstract – Gradually varied flow occurs when progressive modifications propagates in the current for long distances. The flow changes with implantation of a hydraulic structure. Backwater is an elevation of water profile upstream of a dam. Hydraulic modellings were applied to simulate the flow which occurs before a structure in a rectangular channel. Results analysis of the experimental, theoretical and computational models allow to choose the simpler option with lower cost and time. The upstream flow length from a hydraulic structure is calculated in the three cases without considering the small dimension of the laboratory channel. The small channel length has affected the profile of water in the experimental model. There are simplifications in the theoretical modelling in the water profiles definition immediatelly upstream of the hydraulic structure. In the computational modelling, geometric and flow data obtained in the laboratory channel are the basic requirements for *HEC-RAS* flow simulations. The small difference between the results excels a choice for a more effective model. Computational modelling has been less onerous, more simplified and visually more attractive.

Keywords – Hydraulic modeling, Backwater.

¹Discentes do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará – *Campus* Cariri. Bolsistas CNPq e FUNCAP. E-mails: osmarluizmpfm@hotmail.com, ocln13@hotmail.com.

²Professor Adjunto do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará – *Campus* Cariri. E-mail: prltavares@ufc.br.

INTRODUÇÃO

No escoamento em canais, em longos trechos retilíneos costuma-se admitir que a energia decresce linearmente seção a seção. Entretanto, essa hipótese não é válida nas proximidades de uma singularidade. Nessas regiões, o perfil d'água sofre alterações que podem ser bruscas, ocorrendo em distâncias curtas, ou mais suaves, propagando-se por longos trechos do canal. As alterações dependem não só da singularidade implantada, mas também das características do escoamento e da geometria do canal.

A variabilidade das características hidráulicas do fluxo d'água em canais entre seções distinguem os escoamentos em permanentes ou transientes e em uniformes ou variados. Se os parâmetros hidráulicos são constantes no tempo, o escoamento é permanente. Caso contrário, transiente. A variação no espaço define o escoamento como variado e o oposto como uniforme (CHOW, 1994).

A alteração brusca da altura d'água em uma curta distância, como nos ressaltos hidráulicos e nas quedas bruscas, caracteriza o escoamento como rapidamente variado. Já no escoamento gradualmente variado ocorre uma mudança progressiva ao longo da corrente, percebida a grandes distâncias da singularidade que deu origem ao mesmo (PORTO, 2006).

Ainda segundo Porto (2006), a classificação dos perfis d'água de escoamentos permanentes gradualmente variados através da inclinação do canal e das alturas normal e crítica definem doze tipos de curvas. O aparecimento dessas curvas pode se dar pela construção de uma barragem, comporta ou vertedor em um canal que cause interferências no fluxo d'água. Essa modificação da linha d'água a montante das estruturas é uma sobrelevação denominada remanso.

Henderson (1966) afirma que traçar com razoável precisão a variação do perfil d'água em escoamentos não uniformes é fundamental em vários problemas práticos de Engenharia Hidráulica. Um deles é determinar até que distância a montante de uma barragem a profundidade é diferente da uniforme. Outro é estimar as áreas a serem inundadas pela elevação do nível d'água no remanso.

A curva de remanso é determinada graficamente através de todas as alturas d'água no trecho em que a mesma ocorre (BAPTISTA; LARA, 2003). O traçado do perfil pode ser obtido por modelagem experimental, teórica ou computacional. Na determinação experimental, utilizam-se as medidas das alturas d'água feitas em laboratório. O modelo teórico consiste no cálculo da curva através dos parâmetros conhecidos, como vazão, coeficiente de rugosidade, largura da base e declividade de fundo do canal. Já a obtenção do perfil d'água por meios computacionais se dá através da simulação do escoamento em programas de modelagem hidráulica, como o *software HEC-RAS*. Este programa oferece interface gráfica, análises hidráulicas, armazenamento de dados, relatórios e resultados gráficos (SALIMI *et al.*, 2008).

Tradicionalmente, a modelagem experimental é utilizada para simular os escoamentos, porém requer ajustes devido à escala, calibração de alguns parâmetros e um grande número de experimentos. Por tais razões, o trabalho de Mynett, Sadarjoen e Hin (1995), sugere que a modelagem computacional oferece simplificação e redução de tempo e custo consideráveis.

O objetivo do presente trabalho foi modelar uma curva de remanso pelos métodos experimental, teórico e computacional. Ao final, compararam-se os perfis traçados a fim de se verificar a eficiência das medidas no laboratório frente aos resultados teóricos e computacionais. Também foram obtidos os comprimentos totais das curvas sem considerar a curta dimensão do canal.

METODOLOGIA

Os equipamentos usados em laboratório para reprodução da curva de remanso foram:

- a) canal retangular com 5 m de comprimento, largura de 64 mm e ajuste de inclinação;
- b) bomba com flutuador medidor de vazão em l/h;
- c) vertedor retangular de parede espessa;
- d) ponta linimétrica com vernier e precisão de décimos de milímetro; e
- e) paquímetro com precisão de centésimos de milímetros.

A criação da curva de remanso consistiu na implantação de um vertedor de parede espessa, reproduzindo-se o escoamento fluvial em todos os casos.

Pela curva da energia específica, em escoamentos fluviais, a altura d'água sofre rebaixamento sobre uma elevação de fundo (BAPTISTA; LARA, 2003). A energia específica na seção sobre o vertedor (E_v) depende da energia a montante (E_m) e da altura deste (ΔZ). A equação 1 expressa essa relação.

$$E_v = E_m - \Delta Z \quad (1)$$

Como está demonstrado na literatura, como em Baptista e Lara (2003), Chow (1994), Porto (2006) e Henderson (1966), caso ΔZ seja suficientemente grande para que, pela equação 1, E_v se torne menor que a energia crítica, a altura d'água a montante se elevará. Isto provocará um aumento de E_m e o escoamento será crítico sobre a singularidade. A elevação da linha d'água a montante é a curva de remanso. Portanto, para que exista remanso, o escoamento sobre a estrutura hidráulica deve ser crítico. A condição é necessária, mas não suficiente, pois ΔZ pode assumir um valor que torne E_v igual à energia crítica sem que haja, no entanto, aumento de E_m .

O escoamento permanente gradualmente variado foi simulado no canal retangular para as vazões de 1000, 2000, 3000 e 4000 l/h. Para tais vazões, a modelagem se deu de maneira experimental, teórica e computacional. Ao final, foi feita uma avaliação através dos erros quadráticos médios entre as alturas d'água ao longo dos perfis dos modelos.

Modelagem experimental

No modelo experimental, para cada valor de vazão, a altura normal foi obtida pela média de duas medições realizadas na parte central do canal, a 1,5 e 2,5 m da singularidade, antes da instalação desta. A altura crítica foi verificada na parte central do vertedor.

Para o traçado do perfil, mediram-se onze alturas d'água com a ponta linimétrica em um trecho de 4,3 m a montante do vertedor. O traçado da curva para cada vazão foi realizado em planilha eletrônica com as coordenadas obtidas no laboratório.

Modelagem teórica

A altura normal (y_o) e a altura crítica (y_c) são parâmetros necessários para análise do escoamento gradualmente variado. Neste contexto, a fórmula de Manning (equação 2) fornece a altura d'água (y) em função das características do escoamento, entre elas a declividade da linha de energia (PORTO, 2006).

$$\frac{nQ}{\sqrt{I_f}} = AR_h^{2/3} \quad (2)$$

Em que:

n : é o coeficiente de rugosidade de Manning;

Q : vazão;

I_f : declividade da linha de energia

A : área molhada; e

R_h : raio hidráulico, razão entre área e perímetro molhados.

Em escoamentos permanentes e uniformes, nos quais a vazão circula com altura y_o , o fundo do canal é paralelo à linha de energia. Dessa forma, I_o (declividade de fundo) é igual a I_f e a obtenção de y_o se dá pela equação 3.

Em canais retangulares, a equação 3 fornece a altura crítica e a equação 4, a energia no regime crítico (E_c). Ambas são dadas em função da aceleração gravitacional (g) e da vazão unitária (q) que é a vazão por unidade de comprimento da base (BAPTISTA; LARA, 2003).

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (3)$$

$$E_c = \frac{3}{2} y_c \quad (4)$$

O número de Froude, caracterizador do tipo de escoamento, pode ser calculado pela equação 5, desenvolvida para canais retangulares.

$$Fr = \frac{q}{\sqrt{gy^3}} \quad (5)$$

Segundo Porto (2006), a equação diferencial que define o perfil do escoamento gradualmente variado está na equação 6, em que dy/dx é a declividade da superfície livre da água em relação ao fundo do canal.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{I_o - I_f}{1 - Fr^2} \quad (6)$$

Como definido por Chow (1994), o remanso é uma curva do tipo M_1 , própria de canais de declividade moderada. Isto indica que I_0 é inferior a I_c (declividade crítica), assim o escoamento é fluvial e y_0 é maior que y_c , já que altura e declividade são inversamente proporcionais. O número de Froude para escoamento fluvial é menor que a unidade, portanto o denominador da equação 6 será sempre positivo para o remanso analisado. Esta curva ocorrerá com $y > y_0 > y_c$ e, também segundo Porto (2006), seu comportamento pode ser definido por:

- a) quando $y \rightarrow y_0$, $I_0 \rightarrow I_f$ e $dy/dx \rightarrow 0$, a linha d'água é assíntota ao nível normal a montante; e
- b) quando $y \rightarrow \infty$, $Fr \rightarrow 0$ e $dy/dx \rightarrow I_0$, a linha d'água é assíntota a uma linha paralela a linha de fundo do canal a jusante.

A fim de se obter a variação da altura d'água ao longo do canal no escoamento gradualmente variado, Chow (1994) define o que Porto (2006) denomina de *Step Method*. É um método de aproximação em que os cálculos se dão entre várias seções do escoamento. A equação 7 é a base do método.

$$\Delta x = (x_2 - x_1) = \frac{E_2 - E_1}{I_0 - I_f} \quad (7)$$

Em que:

x_1 : coordenada x da seção 1, referenciada paralelo ao fundo do canal;

x_2 : coordenada x da seção 2;

E_1 : energia específica na seção 1; e

E_2 : energia específica na seção 2.

As seções são determinadas a partir de um valor conhecido da altura d'água, com incrementos negativos, no caso do remanso, somados a y . Cada altura define uma seção em que a energia é calculada. A inclinação da linha de energia I_f varia ao longo do escoamento, por isso foram utilizadas a média aritmética das declividades das seções subsequentes. Com estes dados, obtém-se Δx . Como se trata de uma aproximação, a proximidade entre as seções aumentou a precisão do traçado das curvas.

Modelagem computacional

Seguindo-se os procedimentos descritos em USACE (2010), o *software HEC-RAS* foi usado para a simulação da curva de remanso no canal retangular. Os dados geométricos do canal e os parâmetros do escoamento foram necessários nas modelagens computacionais. A base, a declividade, a vazão e os coeficientes de Manning das seções transversais do canal são os requisitos básicos necessários para as simulações. (SALIMI et al, 2008). As quatro simulações utilizaram as vazões corrigidas e definiram-se dezesseis seções transversais, de acordo com os pontos de medição do modelo experimental. Foram necessárias algumas adicionais, afastadas o mínimo possível, para representar a singularidade.

RESULTADOS

Os dados de entrada dos modelos teórico e computacional estão indicados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros hidráulicos e geométricos do escoamento e da singularidade

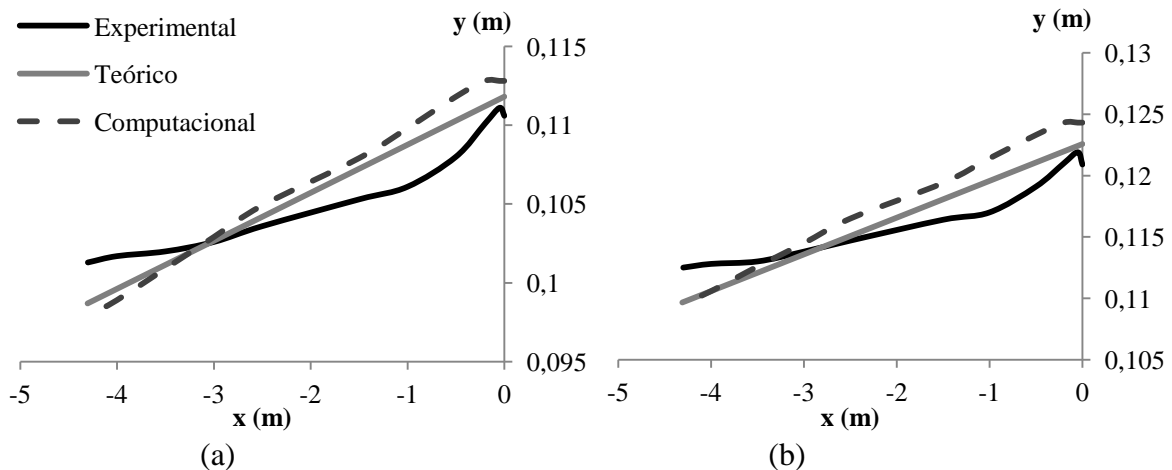
Dados de entrada	Valor
Q_1 (m ³ /s)	$3,184 \cdot 10^{-4}$
Q_2 (m ³ /s)	$6,607 \cdot 10^{-4}$
Q_3 (m ³ /s)	$8,951 \cdot 10^{-4}$
Q_4 (m ³ /s)	$1,183 \cdot 10^{-3}$
n	0,010
b (mm)	64
I_0 (m/m)	0,003067
ΔZ (mm)	91,48

As ocorrências das curvas de remanso no canal após a implantação do vertedor podem ser justificadas pelos seguintes valores:

- Com a vazão Q_1 : $E_m - \Delta Z = - 0,0698 \text{ m} < E_c = 0,0242 \text{ m}$;
- Com a vazão Q_2 : $E_m - \Delta Z = - 0,0575 \text{ m} < E_c = 0,0314 \text{ m}$;
- Com a vazão Q_3 : $E_m - \Delta Z = - 0,0467 \text{ m} < E_c = 0,0407 \text{ m}$; e
- Com a vazão Q_4 : $E_m - \Delta Z = - 0,0367 \text{ m} < E_c = 0,0490 \text{ m}$.

Assim, nas quatro vazões consideradas, a diferença entre a energia específica de montante no escoamento uniforme e a altura da singularidade foi inferior à energia crítica, sendo inclusive um valor negativo. Dessa forma, como já citado anteriormente, a altura d'água a montante se elevou, provocando o remanso.

A Figura 1 mostra os resultados das modelagens dos escoamentos pelos três métodos. É notável que o formato das curvas encontradas pelos mesmos métodos assemelham-se muito para as vazões distintas.



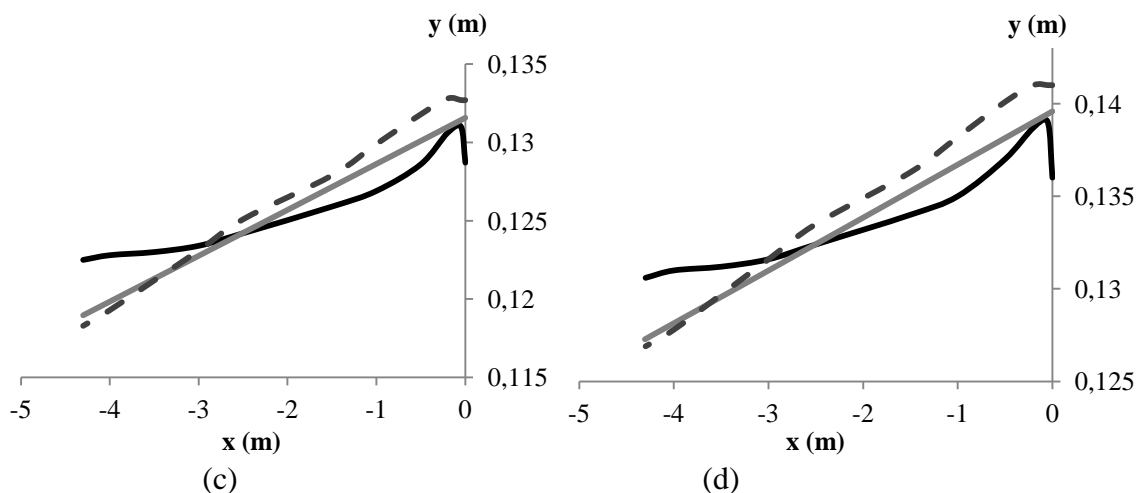


Figura 1 - Perfis de escoamento nas diferentes modelagens para Q_1 (a), Q_2 (b), Q_3 (c) e Q_4 (d).

As diferenças entre as modelagens podem ser quantificadas pelo erro quadrático médio. A tabela 2 mostra os valores dos erros para cada vazão, comparando as alturas d'água medidas em laboratório com as obtidas pelos modelos teórico e computacional.

Tabela 2 - RMSH para alturas d'água observadas experimentalmente em relação às obtidas teórico e computacionalmente

Vazão	Teórico relativo ao experimental (m)	Computacional relativo ao experimental (m)	Computacional relativo ao teórico (m)
Q_1	0,00169	0,00256	0,00097
Q_2	0,00168	0,00288	0,00153
Q_3	0,00191	0,00271	0,00107
Q_4	0,00193	0,00281	0,00125

A divergência relativa ao modelo computacional foi maior que à do modelo teórico. A dimensão reduzida do canal pode ter afetado os resultados dos dados experimentais.

Através do modelo teórico, é possível obter o comprimento da curva de remanso caso o canal fosse suficientemente longo para que o escoamento retornasse a uniforme em uma dada seção a montante do vertedor. Isso significa desprezar o curto comprimento do canal. Esses comprimentos variaram de um valor de 41,30 m para a vazão Q_1 , a mais baixa, até 59,57 para Q_4 , a mais elevada. Observa-se que o comprimento do remanso até que o escoamento voltasse a ser uniforme é muito superior à distância disponível no canal para o desenvolvimento do fenômeno. Isso explica a interferência no perfil d'água causada pela pequena dimensão do canal, principalmente na seção de entrada do fluido.

CONCLUSÃO

A ocorrência do remanso para as quatro vazões estudadas é claramente justificada pela análise das energias específicas disponíveis sobre o vertedor e a montante deste. Como o canal é de pequena dimensão, a entrada do fluido causa uma certa interferência no perfil d'água nas seções mais distantes do vertedor. Isso afasta as medições experimentais dos resultados teóricos e computacionais nestes pontos.

A maior discrepância relativa aos valores observados experimentalmente se dá com os obtidos através do método computacional. Nesta análise, há de se considerar as imprecisões e simplificações relativas a cada método. Por exemplo, no modelo teórico, considera-se que o rebaixamento da linha d'água ocorre na primeira seção sobre a singularidade, sendo o nível d'água imediatamente a montante muito superior. Nas outras modelagens, observa-se o rebaixamento da linha d'água em um ponto um pouco anterior ao início da elevação de fundo. No entanto, os erros observados foram mínimos. As três modelagens forneceram eficientemente o comportamento geral do perfil d'água em um escoamento gradualmente variado.

A opção por uma das três modelagens é tecnicamente viável devido à pequena diferença de resultados entre elas, o que ficou claramente validado nos experimentos. Entretanto, a modelagem computacional se destaca pela facilidade na execução das simulações e pela redução do tempo e custo cotejada com as modelagens experimental e teórica. Além disso, os resultados são dados sem imprecisões de medição ou simplificações no método de cálculo e tem-se disponível a visualização de todo o trecho em que a curva de remanso ocorre.

REFERÊNCIAS

- BAPTISTA, M.; LARA, M. (2003). *Fundamentos de Engenharia Hidráulica*. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 440 p.
- CHOW, V. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. McGraw-Hill Interamericana S.A. Santafé de Bogotá, 667 p.
- HENDERSON, F. M. (1966). *Open Channel Flow*. Collier Macmillan Canada Ltd. New York, 522 p.
- PORTO, R. M. (2006). *Hidráulica Básica*. 4. ed. EESC/ USP São Carlos-SP, 529 p.
- MYNETT, A. E., SADARJOEN, I. A., HIN A. J. S. (1995). "Turbulent Flow Visualization in Computational and Experimental Hydraulics". 6th IEEE Conference, pp. 388-391.
- SALIMI, S. et al. (2008). "Floodplain mapping using hydraulic simulation model in GIS". Journal Of Applied Sciences, pp. 660-665.
- USACE. (2010). *HEC-RAS: River Analysis System User's Manual*. Version 4.1. Davis, Calif.: U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.