

ANÁLISE DO ESCOAMENTO EM CANAIS DE SECÇÃO COMPOSTA

Caracterização experimental e modelação 1D

João N. FERNANDES

Eng.º Civil, LNEC, Av. do Brasil 1700-066 Lisboa, +351 218443439, jnfernandes@lnec.pt

David PINTO

Aluno de mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Campus de Caparica, 2829-516 Caparica, Portugal

João B. LEAL

Professor Auxiliar, CEHIDRO & Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Campus de Caparica, 2829-516 Caparica, Portugal

António H. CARDOSO

Professor Catedrático, CEHIDRO & Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

RESUMO

Em geral, os rios apresentam uma secção transversal composta por um leito principal ladeado por leitos de cheia. Durante eventos de cheias, a capacidade de vazão do leito principal não é suficiente para escoar o caudal afluyente, sendo a configuração típica um canal de secção composta. A estimativa da capacidade de vazão de secções de rios com os métodos simples conduz a resultados muitas vezes erróneos, em especial nos leitos de cheia. Esse facto deve-se à diferença de velocidades entre o leito principal e os leitos de cheia que origina transferência de massa e de quantidade de movimento entre essas subsecções. O escoamento pode, assim, apresentar grande variabilidade tridimensional, que pode inviabilizar o recurso à modelação 1D.

Para o estudo destes efeitos realizaram-se ensaios num canal prismático de secção simétrica e trapezoidal composta, com 10 m de comprimento e 2 m de largura. A medição das velocidades foi obtida através de um tubo de Pitot acoplado a um transdutor diferencial de pressão.

Por último, utilizam-se sete métodos 1D disponíveis na literatura para estimar os caudais totais e os respectivos valores em cada subsecção para cada altura de água, permitindo comparar os respectivos desempenhos na avaliação da capacidade de vazão. Os resultados permitem concluir que os métodos 1D baseados na divisão em subsecções permitem obter boas estimativas daqueles caudais, desde que sejam implementadas correcções que indirectamente têm em conta a interacção entre o escoamento no leito principal e o escoamento nos leitos de cheia.

PALAVRAS-CHAVE

Canais de secção composta; curvas de vazão; modelação 1D

1 INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS

Nesta comunicação apresenta-se um estudo relativo ao escoamento em canais de secção composta. Esta configuração da secção transversal ganha pertinência nos casos em que a capacidade de vazão do leito principal dos rios não é suficiente para acomodar os caudais que afluem a uma determinada secção, nomeadamente em situações de cheias. Nesses casos, a água transborda o leito principal, inundando os campos adjacentes, denominados leitos de cheia. Desta forma, a configuração típica dos rios em situações de cheia é a de um leito com secção composta em que o escoamento no leito principal entra em interacção com o escoamento no leito de cheia.

A modelação 1D actualmente existente para este tipo de escoamentos só indirectamente considera essa interacção. Além disso, o método utilizado nos principais modelos comerciais de caracterização de cheias baseia-se numa metodologia simplificada que consiste na divisão do canal em subsecções, tipicamente uma divisão vertical entre o leito principal e o leito de cheia.

Esta comunicação pretende contribuir para o aprofundamento do conhecimento do escoamento em canais de secção composta. Para atingir esse objectivo conjugam-se os ensaios experimentais efectuados num canal de secção transversal composta com os resultados obtidos através dos principais métodos 1D disponíveis na literatura.

2 ENQUADRAMENTO TEÓRICO

O estudo de cheias em rios e, em particular, a geração de mapas de inundação envolve a necessidade de quantificar os níveis atingidos pela água, a distribuição de caudais e as velocidades em determinados locais. Na maioria dos casos é fundamental o cálculo da curva de vazão, i.e. da relação entre o caudal que se escoia em determinado troço do rio e a altura do escoamento.

Desde a fórmula desenvolvida por Antoine de Chézy, que foi depois melhorada, que o cálculo dos níveis atingidos pela água no escoamento em canais simples é feito de forma precisa (MYERS, 1978). Isto não acontece em canais de secção composta, em parte devido ao gradiente de velocidade que se verifica entre o escoamento no leito principal (mais rápido) e no(s) leito(s) de cheia, onde a altura de escoamento é mais baixa e, geralmente, a rugosidade é superior. Este gradiente de velocidade gera uma camada de mistura na interface entre os leitos provocando uma complexa estrutura turbulenta tridimensional, conforme se apresenta na Figura 1. Nesta figura destacam-se os vórtices de larga escala e de eixo vertical que provocam transferência de quantidade de movimento. Como resultado a capacidade de transporte do leito principal diminui e a dos leitos de cheia aumenta, provocando uma redução da capacidade de transporte global comparativamente à situação hipotética (1D) de não existir qualquer interacção entre os escoamentos nos leitos principal e de cheias.

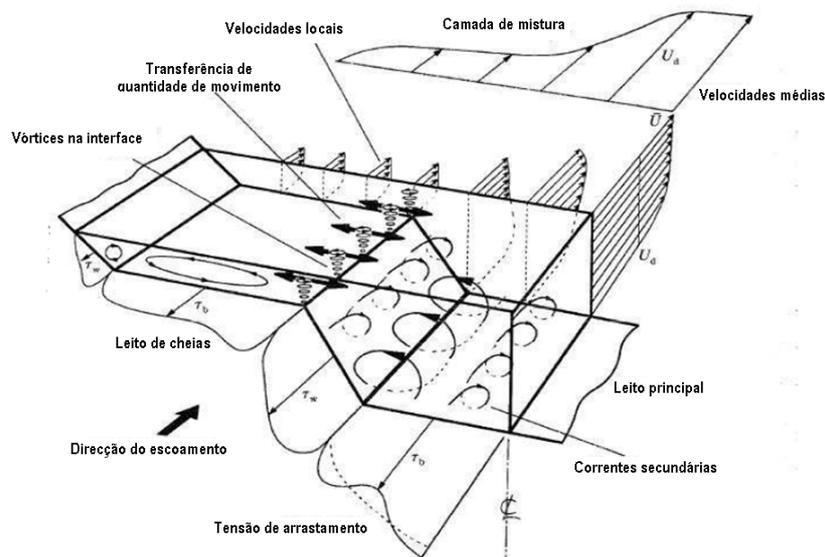


Figura 1 – Estrutura turbulenta do escoamento em canais de secção composta (adaptada de SHIONO e KNIGHT, 1991).

Os métodos 2D e 3D actualmente disponíveis entram em conta com algumas das características do escoamento em canais de secção composta. Apesar disso, na prática da engenharia, devido à elevada quantidade de dados necessários, muitas vezes não disponíveis, e da necessidade de utilizar malhas muito finas (o que aumenta o tempo de processamento da informação), os métodos 1D são, na maioria das vezes, preferidos. Ainda assim, a transferência de quantidade de movimento deve ser tida em consideração na modelação 1D (BOUSMAR e ZECH, 1999).

Desde que SELLIN (1964) apresentou as primeiras evidências sobre o escoamento em canais de secção composta que tem havido tentativas de proceder à sua modelação. Muitas dessas tentativas utilizam, no entanto, um conjunto reduzido de dados. KNIGHT e SHIONO (1996) referem a dificuldade das fórmulas até então desenvolvidas serem aplicadas generalizadamente.

Esta comunicação é dedicada ao estudo do escoamento em canais de secção composta, nomeadamente no que diz respeito à distribuição de caudais nas subsecções e à distribuição lateral de velocidades. Para o efeito são apresentados os resultados de ensaios realizados num canal de secção composta e é feita a apresentação de vários métodos 1D para a modelação deste tipo de escoamentos. Os métodos foram testados para os ensaios realizados.

Como se referiu, quando o escoamento se processa simultaneamente nos leitos principal e de cheias o seu comportamento é muito mais complexo que o escoamento num canal simples. O tratamento do canal de secção composta como um canal simples, aplicando uma fórmula de resistência ao escoamento, não entra em linha de conta com a não uniformidade da velocidade nos leitos principal e de cheias. CHOW (1959) alertou para este facto e sugeriu a divisão do canal nas subsecções em que a velocidade e a rugosidade do fundo se possam considerar uniformes. Este método é ainda hoje utilizado em modelos disponíveis comercialmente, por exemplo no HEC-RAS (BRUNNER, 2008), no ISIS (KNIGHT, 2001) e no SOBEK e Mike 11 (HUTHOFF *et al.*, 2008).

No entanto, a simples divisão do canal em subsecções e o cálculo independente da capacidade de transporte de cada uma, tal como sugerido por CHOW (1959), não é apropriada para a modelação do escoamento em canais de secção composta (KNIGHT, 2001).

Para fazer face às especificidades do escoamento em canais de secção composta, têm sido propostos métodos que, fazendo a divisão do canal, tentam modelar os processos de interacção que ocorrem neste tipo de escoamentos, nomeadamente a transferência de massa e de quantidade de movimento.

De acordo com KNIGHT (2001), esses métodos podem ser reunidos em 5 grupos:

- (i) métodos baseados na alteração das subáreas do escoamento, tipicamente excluindo as interfaces no cálculo do perímetro molhado de cada um dos leitos de cheia mas incluindo-o no perímetro molhado do leito principal;
- (ii) métodos semelhantes aos do grupo anterior, mas em que os caudais escoados são ajustados em cada leito recorrendo, por exemplo, a dados experimentais;
- (iii) métodos que procedem à inclusão das tensões tangenciais aparentes na interface das subsecções;
- (iv) métodos semelhantes aos do grupo anterior, mas em que a divisão dos leitos é efectuada através das linhas de tensão de corte nulas;
- (v) métodos que combinam divisões horizontais e verticais do canal.

No Anexo 1 são apresentados, detalhadamente, os sete métodos utilizados no presente trabalho:

- Método do Canal Único (MCU);
- Método da Divisão do Canal (MDC);
- Método da Coerência (MC);
- Método do Debord;
- Método da Troca de Caudal (MTC);
- Método da Interação do Canal Dividido (MICD);
- Método da Divisão Ponderada do Canal (MDPC).

3 COMPONENTE EXPERIMENTAL

3.1 Instalações experimentais e equipamentos de medição e controlo

A instalação utilizada no trabalho localiza-se no Pavilhão de Hidráulica Fluvial do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, tendo sido adaptada de um canal utilizado para o estudo de erosões localizadas.

O canal tem cerca de 10 m de comprimento e 2 de largura. A secção transversal é simétrica e é composta por um leito principal de 0,4 m de rasto e 0,1 m de altura, ladeado por dois leitos de cheia com 0,7 m de largura. A transição entre os leitos é feita por margens com inclinação igual a 45°. O declive do canal é $1,1 \times 10^{-3}$ m/m. Na Figura 2 apresenta-se uma fotografia do canal e um esquema da secção transversal.

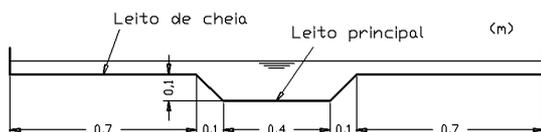


Figura 2 – Canal de secção composta.

A alimentação dos caudais aos leitos principal e de cheias é separada, permitindo reduzir a transferência de massa entre as subsecções à entrada do canal na linha das recomendações de BOUSMAR *et al.* (2005).

Imediatamente a jusante da secção de alimentação colocaram-se difusores em favo de abelha que induzem a distribuição uniforme dos caudais, transversalmente, em cada subsecção. Colocaram-se igualmente flutuadores com movimento vertical controlado (placas de poliestireno nos leitos de cheia e de contraplacado no leito principal) que permitem estabilizar a superfície livre e evitar a formação de ondas ao longo do canal.

O controlo dos caudais à entrada do canal é efectuado por intermédio de duas válvulas e dois caudalímetros que asseguram a repartição pré-estabelecida.

Para os ensaios realizados, o regime de escoamento é lento, sendo o nível da superfície livre controlado por jusante por acção de uma comporta de eixo horizontal. Nesta comporta colocaram-se duas placas metálicas amovíveis que viabilizam a regulação fina dos níveis nos leitos de cheia.

As alturas de água foram medidas com três hidrómetros, dois deles fixos, um à entrada e outro à saída do canal, e outro móvel instalado no carro de equipamento.

As medições das velocidades foram efectuadas com recurso a um tubo de Pitot com diâmetro de 3,2 mm. A medição da diferença de pressões estática e dinâmica foi efectuada através de um transdutor diferencial de pressão. O sinal da tensão recebida do transdutor foi condicionado num *Spider 8* que foi ligado a um computador. A relação entre a tensão e o diferencial de pressão é uma recta que pode ser encontrada através de um equipamento de calibração disponível na instalação (Figura 3).



Figura 3 – Tubo de Pitot e equipamento de calibração.

3.2 Procedimento utilizado

Para a configuração do canal utilizado não era conhecida a distribuição de caudais, ou seja, a repartição de caudais entre os leitos principal e de cheias. O procedimento utilizado para se obter uma distribuição estável de caudais em sucessivas secções do canal (sem transferências de massa entre as subsecções) começa com a distribuição de caudais imposta a montante calculada pelo Método da Divisão Ponderada do Canal (LAMBERT e MYERS, 1998). Imposta essa distribuição foram verificados os níveis de água ao longo do canal, tendo-se procedido ao manuseamento das comportas até se atingir uma altura de água uniforme em todo o canal, simultaneamente para os leitos principal e de cheia. Atingido o regime uniforme, verificava-se a distribuição de caudais na secção que dista 7,5 m da secção de montante e comparava-se com a distribuição resultante com a distribuição imposta a montante. Se ambas as distribuições fossem

iguais considerava-se essa a situação de regime uniforme também em termos de repartição de caudais. Caso contrário impunha-se a distribuição medida a jusante na secção de montante e repetia-se o procedimento até ambas coincidirem a menos de um desvio de 0,1 L/s. Refira-se que apenas foram necessárias 2 ou 3 iterações para se obterem repartições de caudais uniformes ao longo do canal. A verificação de caudais foi feita com base em valores de velocidades medidos em 45 verticais e em 5 ou 6 pontos por vertical, nos leitos de cheia e no leito principal, respectivamente. A malha é a que se apresenta na Figura 4.

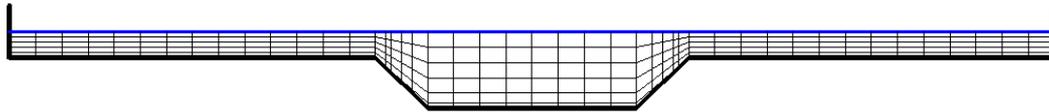


Figura 4 – Malha utilizada nas medições da velocidade.

A partir das velocidades medidas nos 5 ou 6 pontos em cada vertical calculou-se a velocidade média através das equações seguintes.

$$U_{lc}^{méd} = (7,5 \times U_{10\%} + 15 \times U_{20\%} + 20 \times U_{40\%} + 20 \times U_{60\%} + 30 \times U_{80\%}) / 100 \quad (1)$$

$$U_{lp}^{méd} = (2,5 \times U_{fundo} + 10 \times U_{10\%} + 15 \times U_{20\%} + 20 \times U_{40\%} + 20 \times U_{60\%} + 30 \times U_{80\%}) / 100 \quad (2)$$

em que:

- U_{fundo} – velocidade medida com o Pitot junto ao fundo (a uma altura de 1,6 mm);
- $U_{\# \%}$ – velocidade medida a uma altura correspondente a #% da altura de escoamento;
- $U_{lc}^{méd}$ – velocidade média no leito de cheia;
- $U_{lp}^{méd}$ – velocidade média no leito principal.

As Eqs. (1) e (2) foram obtidas recorrendo a medições de perfis verticais de velocidades com 18 pontos. Para esses perfis calculou-se a velocidade média e comparou-se com várias equações assumindo que apenas se conheciam os valores da velocidade em 5 ou 6 pontos, tendo-se atribuído diferentes “pesos” à velocidade a 10% da altura de escoamento ou à velocidade no fundo. Os melhores resultados foram os obtidos com as equações apresentadas. Considera-se que, com o número de pontos de medição, o erro que se obtém no cálculo da velocidade média é desprezável, pelo que as equações poderão ser generalizadas para todas as verticais.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E COMPARAÇÃO COM MODELAÇÃO 1D

4.1 Resultados obtidos

Realizaram-se três ensaios correspondentes a três alturas relativas, h_r (relação entre as alturas do escoamento no leito de cheia e no leito principal) aproximadamente iguais a 0,1; 0,15 e 0,2. Os caudais obtidos são os apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Resultados obtidos para a distribuição de caudais

Altura relativa, h_r (-)	Caudal nos leitos de cheia (L/s)	Caudal no leito principal (L/s)	Caudal total (L/s)
0,1	3,2	34,5	37,7
0,15	6,2	38,6	44,8
0,2	11,2	42,2	53,4

Os resultados da distribuição da velocidade média na secção transversal do canal, para os três ensaios são os apresentados na Figuras 3. Nessas figuras apresenta-se, como referência, a velocidade média para cada leito.

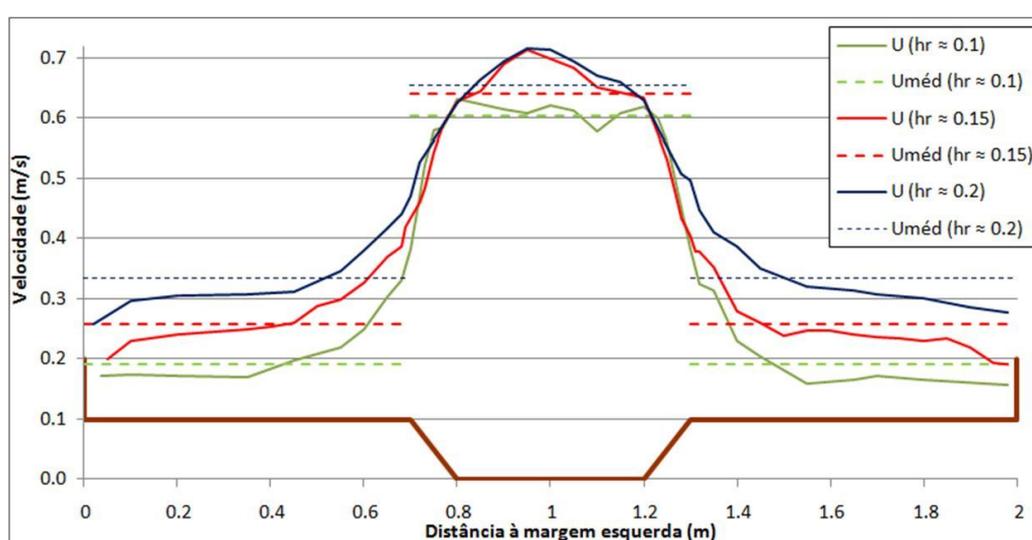


Figura 3 – Distribuição de velocidades para as três alturas relativas ($U_{méd}$ corresponde à velocidade média em cada leito).

Os resultados apresentados na figura anterior permitem verificar que o aumento da altura relativa, h_r , provoca o aumento das velocidades em todos os leitos. Consta-se, ainda, que para a menor altura relativa a distribuição de velocidades em cada uma das subsecções aproxima-se mais do correspondente valor médio. Na Figura anterior a assimetria deve-se a eventuais problemas na alimentação a montante ou pequenos erros de medição. Considera-se que não afectam a presente análise.

4.2 Comparação experimentação / Modelação

Tendo em conta os ensaios realizados, nomeadamente os resultados contidos no Quadro 1, compararam-se esses resultados com os dos métodos 1D apresentados no Anexo 1. A comparação incidiu no caudal total e nos caudais obtidos em cada subsecção. Com efeito, conforme referido em KNIGHT (2001), é imperativo efectuar a análise para cada leito, uma vez que pode ocorrer a compensação dos caudais por subsecção, resultando uma aparente boa estimativa do caudal para a totalidade do canal. Procedeu-se à avaliação da precisão dos resultados obtidos por cada método com base no cálculo dos erros cometidos na obtenção dos caudais dos leitos principal e de cheias e do caudal total, $Erro_{lp}$, $Erro_{lc}$ e $Erro_{Total}$, respectivamente. Esses erros foram calculados pelas Eqs. (3) a (5).

$$\text{Erro}_{lp} (\%) = \frac{Q_{lp}^{\text{Medido}} - Q_{lp}^{\text{Calculado}}}{Q_{lp}^{\text{Medido}}} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{Erro}_{lc} (\%) = \frac{Q_{lc}^{\text{Medido}} - Q_{lc}^{\text{Calculado}}}{Q_{lc}^{\text{Medido}}} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{Erro}_{\text{Total}} (\%) = \frac{Q_{\text{Total}}^{\text{Medido}} - Q_{\text{Total}}^{\text{Calculado}}}{Q_{\text{Total}}^{\text{Medido}}} \times 100 \quad (5)$$

em que:

- Q^{medido} – Caudal medido;
- $Q^{\text{calculado}}$ – Caudal calculado por um dos métodos;
- Q_{lc} – Caudal dos leitos de cheia;
- Q_{lp} – Caudal do leito principal.

De acordo com as equações apresentadas, erros com sinal positivo significam que o respectivo método calcula um caudal por defeito, acontecendo o inverso no caso de erros com sinal negativo.

No Quadro 2 apresentam-se os resultados para o canal principal, para os leitos de cheia e para a totalidade da secção e para as alturas relativas 0,1; 0,15 e 0,2.

Quadro 2 – Erros cometidos por cada método no cálculo dos caudais totais e por leito.

Método	Erro _{lp} (%)			Erro _{lc} (%)			Erro _{Total} (%)		
	hr=0,1	hr=0,15	hr=0,2	hr=0,1	hr=0,15	hr=0,2	hr=0,1	hr=0,15	hr=0,2
MCU	38,1	36,3	31,6	-94,6	-58,2	-34,4	26,8	23,2	17,8
MDC	-10,6	-8,2	-10,4	6,3	11,1	14,8	-9,2	-5,5	-5,1
MC	-2,9	1,1	0,7	-1,2	5,2	10,1	-2,8	1,6	2,7
Debord	0,4	2,6	0,7	-20,4	-7,1	1,6	-1,3	1,3	0,8
MTC	13,2	15,8	13,9	-42,7	-25,4	-12,8	8,5	10,1	8,3
MIDC	-3,1	1,5	1,8	-12,9	-6,2	-0,8	-3,9	0,4	1,2
MDPC	-2,0	2,4	2,5	-6,3	-0,8	3,4	-2,3	2,0	2,6

Os resultados do Quadro 2 são apresentados graficamente nas Figuras 4 a 6.

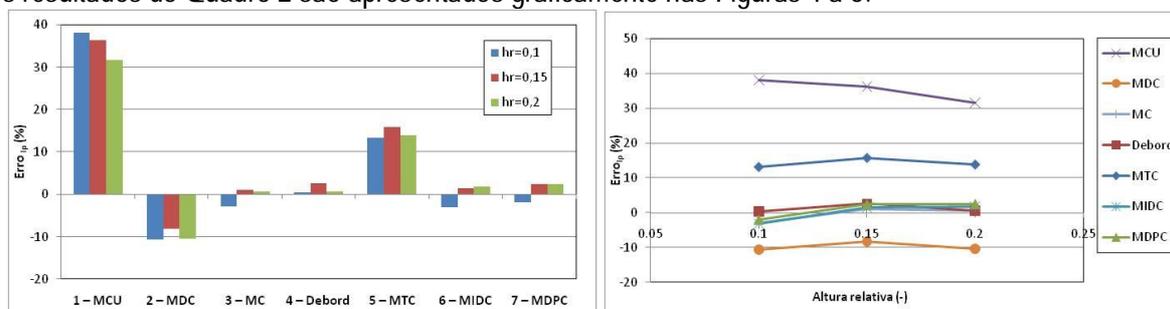


Figura 4 – Erros no cálculo dos caudais no leito principal.

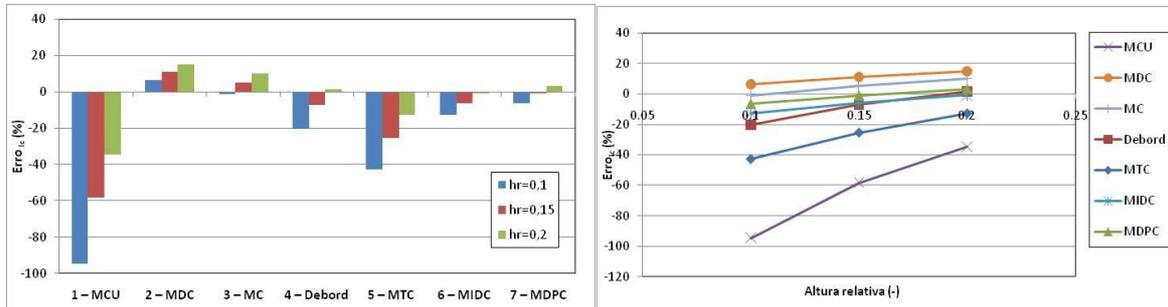


Figura 5 – Erros no cálculo dos caudais nos leitos de cheia.

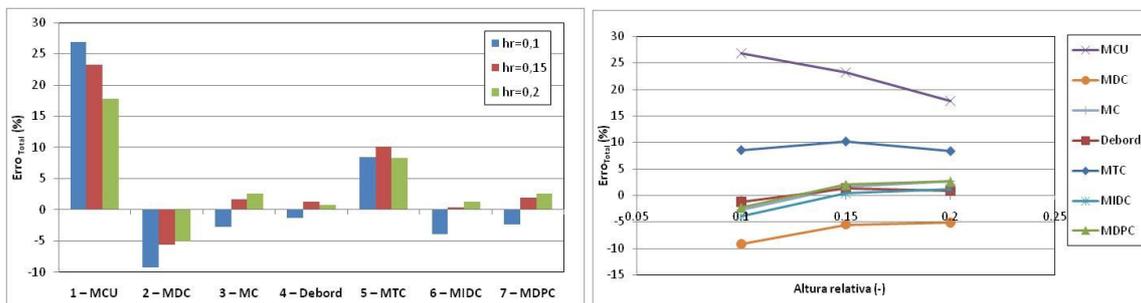


Figura 6 – Erros no cálculo dos caudais em todo o canal.

Do exposto nos gráficos anteriores, verifica-se que o MCU, não fazendo a divisão do canal e assumindo uma velocidade uniforme em toda a secção transversal subestima o caudal para toda a secção.

O caso contrário sucede com os resultados obtidos com o MDC. A simples divisão do canal, sem considerar a interacção entre as subsecções, leva a uma estimativa por excesso do caudal total, até cerca de 10%. Essa tendência verifica-se, igualmente, no cálculo do caudal do leito principal, sucedendo o contrário no cálculo do caudal dos leitos de cheia. Este resultado deve-se ao facto de o MDC considerar os leitos principal e de cheias como leitos independentes, não entrando em linha de conta com a desaceleração que o escoamento do leito de cheia provoca no escoamento no leito principal e vice-versa.

De uma forma geral, com excepção do MTC, todos os métodos propostos melhoram os resultados obtidos pelo MDC, tanto no cálculo dos caudais no leito principal como no dos leitos de cheia. Na avaliação do caudal total, o método com uma melhor performance é o Debord, com erros inferiores a 2%. O seu desempenho piora significativamente, no entanto, na avaliação dos caudais nas subsecções.

Verifica-se que os resultados de quase todos os métodos melhoram à medida que a altura de escoamento é maior. Esta melhoria de desempenho com o aumento da altura relativa revela uma progressiva redução da interacção entre os escoamentos nos leitos, ou seja uma redução do efeito dos vórtices de larga escala na transferência de quantidade de movimento. De forma a serem mais perceptíveis os resultados obtidos pelos vários métodos apresenta-se, na Figura 7, a curva de vazão para as três alturas de água ensaiadas.

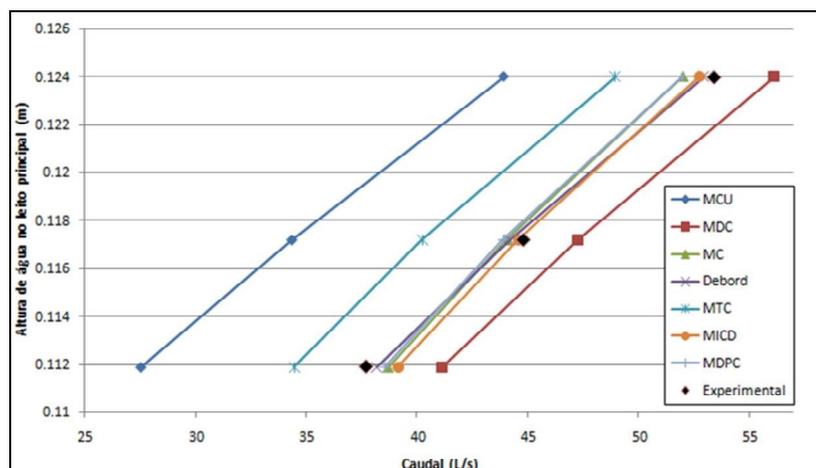


Figura 7 – Curva de vazão

No futuro pretende-se aumentar a altura relativa até obter resultados aceitáveis com o MCU, ou seja, até o canal poder ser tratado como único, não reflectindo os efeitos da secção composta.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Na presente comunicação apresentou-se um estudo experimental e de modelação 1D do escoamento em canais de secção composta. Começou-se por efectuar um enquadramento teórico do tema em estudo, tendo-se apresentado as principais características do escoamento neste tipo de canais.

Quanto à componente experimental, foram descritas as instalações e os equipamentos de medição e controlo. O procedimento para a obtenção do regime uniforme foi pensado e executado de forma a não haver transferências de massa relevantes ao longo do canal.

Adicionalmente, foi efectuada a modelação do escoamento em regime uniforme através de vários métodos 1D disponíveis na literatura e foram realizadas comparações entre os resultados experimentais e os caudais obtidos pelos métodos para todo o canal bem como a respectiva repartição de caudais entre as subsecções.

Os resultados apresentados alertam para o facto de, em situações de cheias, quando o escoamento transborda o leito principal e inunda os leitos adjacentes, os efeitos da interacção entre o leito principal e os leitos de cheia deverem ser tidos em consideração. Os erros que se obtiveram quando é feita uma simples divisão do canal são até cerca de 10%. No entanto, com uma maior gama de dados, SEÇKIN (2004) aponta para erros médios de cerca de 20%. Os erros na repartição dos caudais são superiores e evidenciam a necessidade de analisar individualmente o escoamento por leito uma vez que pode ocorrer uma compensação entre esses leitos que resulte numa boa estimativa do caudal total.

Um aspecto relevante é o facto do MDC, método mais utilizado nos modelos comerciais, sobrestimar os caudais para uma dada altura de água, o que vai em sentido contrário à segurança.

Os erros dos vários métodos vão sendo inferiores à medida que a altura de água vai aumentando devido a uma menor influência da interacção entre os escoamentos nos leitos principal e de cheias.

Os métodos alternativos ao MDC entram, indirectamente, em linha de conta a transferência da quantidade de movimento e permitem melhorar os resultados tanto do cálculo do caudal total como da repartição de caudais. Por este motivo e por serem simples de implementar considera-se que a sua utilização em casos práticos de engenharia deve ser equacionada quando a secção transversal do canal ou rio apresenta leitos compostos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia através do projecto PTDC/ECM/70652/2006. O primeiro autor expressa o seu agradecimento à Fundação para a Ciência e Tecnologia pela bolsa de doutoramento com a referência SFRH/BC/37839/2007.

BIBLIOGRAFIA

- ACKERS, P. – “Flow formulae for straight two-stage channels”. *Journal of Hydraulic Research - IAHR* 31(4), 1993, pp. 509-531.
- ATABAY, S.; KNIGHT, D.W. e SEÇKIN, G. – “Effects of overbank flow on fluvial sediment transport rates”. *Water Management*, 2005, Proceedings of the Instn. of Civil Engineers
- BOUSMAR, D.; RIVIERE, N.; PROUST, S.; PAQUIER, A.; MOREL, R. e ZECH, Y. – “Upstream Discharge Distribution in Compound-Channel Flumes”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(5), 2005, pp. 408-412.
- BOUSMAR, D. e ZECH, Y. – “Momentum transfer for practical flow computation in compound channels.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(7), 1999, pp. 696–706.
- BRUNNER, G.W. – “HECRAS – River Analysis System, Hydraulic Reference Manual, version 4.0” U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, Califórnia, 2008, 411 p.
- CHOW, V. T. – “Open Channel Hydraulics”, MacGraw-Hill, New-York, 1959, 680 p.
- HUTHOFF, F.; ROOS, P.C.; AUGUSTIJN, D.C.M. E HULSCHER, S.J. – “Interacting Divided Channel Method for Compound Channel Flow” *Journal of Hydraulic Engineering*.134(8), 2008, pp. 1158-1165
- LAMBERT, M. F. e MYERS, W. R. C. – “Estimating the discharge capacity in compound channels”. *Proc. Inst. Civ. Eng., Waters. Maritime Eng.*, 130, 1998, pp. 84–94.
- KNIGHT, D.W. e SHIONO, K. – “River channel and floodplain hydraulics”. In *Floodplain processes*. Editado por M.G. Anderson, D.E. Walling e P.D. Bates. Wiley, Chichester, Reino Unido, 1996, pp. 139–181.
- KNIGHT, D.W. – “Conveyance in 1-D River Models-Scoping Study on Reducing Uncertainty in River Flood Conveyance”. Relatório da Universidade de Birmingham, 2001.
- MYERS, W.R.C. – “Momentum transfer in a compound channel”. *Journal of Hydraulic Research*. 16(2), 1978, pp. 139-150.
- NICOLLET, G. e UAN, M. – “Ecoulements permanents à surface libre en lit composés.” *La Houille Blanche*(1), 1979, pp. 21-30.
- SEÇKIN, G. – “A comparison of one-dimensional methods for estimating discharge capacity of straight compound channels.” *Can. J. Civ. Eng.*, 31(4), 2004, pp. 619–631.
- SELLIN, R. H. J. – “A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood plain.” *Houille Blanche*, 20(7), 1964, pp. 793–801.
- SHIONO, K., e KNIGHT, D.W. – “Turbulent open channel flows with variable depth across the channel. *Journal of Fluid Mechanics*, 222, 1991, pp. 617–646.
- SMART, G.M. – “Stage-Discharge Discontinuity in Composite Flood Channels”. *Journal of Hydraulic Research*, 30(6), 1992, pp. 817-833.
- VAN PROOIJEN, B. C., BATTJES, J. A. e UIJTTEWAAL, W. S. J. – “Momentum exchange in straight uniform compound channel flow.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(3), 2005, pp. 175–183.
- WARK, J.B, JAMES, C.S. e ACKERS, P. – “Design of straight and meandering compound channels – Interim guidelines on hand calculation methodology” National Rivers Authority, HR Wallingford, R&D Report 13, 1994

ANEXO 1. MÉTODOS UTILIZADOS

Método do Canal Único, MCU

O Método do Canal Único, MCU (*Single Channel Method* na designação inglesa) consiste em não considerar as secções compostas e assumir uma velocidade uniforme em toda a secção transversal. Utilizando um coeficiente de rugosidade global, este método calcula o caudal total através de uma equação de resistência ao fundo (e.g. equação de Manning-Strickler).

$$Q = K R^{2/3} A S_0^{1/2} \quad (6)$$

em que:

- Q – caudal;
- K – coeficiente de rugosidade;
- R – raio hidráulico;
- A – área de escoamento;
- S_0 – declive do canal.

Método da Divisão do Canal, MDC

O Método da Divisão do Canal, MDC (*Divided Channel Method* na designação inglesa) propõe a divisão do canal em três sub-secções, nomeadamente, o leito principal e os leitos de cheia. A divisão típica do canal é através de linhas verticais, sendo o caudal total dado pela soma dos caudais de cada leito (cf. Eq. 7).

$$Q = \sum_i Q_i = \sum_i K_i R_i^{2/3} A_i S_0^{1/2} \quad (7)$$

em que o índice i indica cada subsecção i .

Método da Coerência, MC

O Método da Coerência (*Coherence Method* na designação inglesa) foi desenvolvido por ACKERS (1993). O autor melhora os resultados do MDC, tornando-o mais apropriado ao escoamento em canais de secção composta. Este método utiliza dois coeficientes para o ajustamento dos caudais das subsecções. Um dos coeficientes, denominado coeficiente de Coerência, COH, consiste na relação entre o caudal dado pelo MCU e pelo MDC (cf. Eq. 8).

$$COH = \frac{Q^{MCU}}{Q^{MDC}} \quad (8)$$

Quanto mais próximo de 1 for esse coeficiente mais apropriado é tratar o canal como único. Quando este coeficiente é significativamente inferior a 1 é necessário aplicar mais um coeficiente, de forma a corrigir os caudais de cada subsecção. Uma análise a resultados experimentais permitiu dividir o escoamento em 4 regiões conforme a altura relativa. Na Figura 8 apresenta-se a relação entre a altura relativa e o coeficiente de ajustamento do caudal (DISADF).

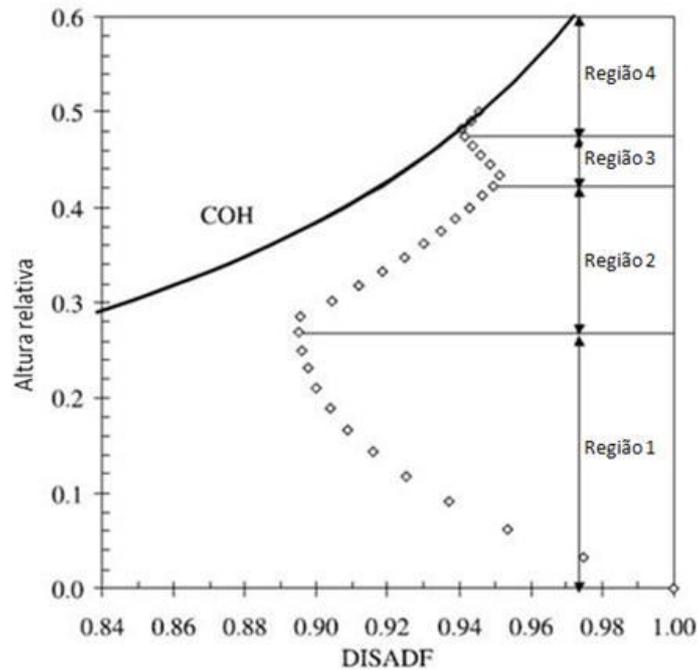


Figura 8 – Regiões de escoamento (adaptada de ACKERS, 1993).

Em ACKERS (1993) são apresentadas fórmulas para obter o DISADF em cada uma das regiões. O caudal é, então, obtido através das seguintes equações.

$$Q = Q^{MDC} - DISDEF \quad \text{para a Região 1} \quad (9)$$

$$Q = Q^{MDC} \times DISADF \quad \text{para as Regiões 2 a 4} \quad (10)$$

em que DISDEF é um factor denominado de deficit de caudal calculado a partir dos caudais e velocidades médias dos leitos dados pelo MDC e pelas alturas de escoamento e do leito principal. O procedimento de cálculo pode ser encontrado, por exemplo, em WARK *et al.* (1994).

Método de Debord (Debord)

O Método *Debord* (*Formulation simplifiée Debord* na designação original francesa) propõe a correcção dos resultados obtidos pelo MDC, baseando-se em ensaios experimentais realizados em canais prismáticos e em regime uniforme, incluindo diferentes inclinações, rugosidades dos leitos e alturas de água. No total, foram analisadas 16 configurações distintas. Para essas configurações foram comparados os caudais escoados com e sem a interacção do leito de cheia (neste último caso eram colocadas divisões verticais que impediam o caudal de se escoar nos leitos de cheia). NICOLLET e UAN (1979) concluíram que a relação entre esses caudais depende fundamentalmente da relação entre as rugosidades no leito principal e no leito de cheia, representadas pelo coeficiente de rugosidade de Strickler. Com efeito, os autores consideram negligenciável o efeito das outras variáveis.

Este método faz a modelação do caudal em cada leito através das Eqs. (11) e (12).

$$Q_{lp} = \phi K_{lp} R_{lp}^{2/3} A_{lp} S_0^{1/2} \quad (11)$$

$$Q_{lc} = \sqrt{1 + \frac{A_{lp}}{A_{lc}} (1 - \varphi^2)} K_{lc} R_{lc}^{2/3} A_{lc} S_0^{1/2} \quad (12)$$

em que:

"lp" – leito principal;

"lc" – leito de cheia.

φ – coeficiente obtido experimentalmente e dado por:

$$\varphi = \varphi_0 = 0,9 \left(\frac{K_{lp}}{K_{lc}} \right)^{1/6} \quad \text{para } R_{lc}/R_{lp} > 0,3 \quad (13)$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \left[(1 - \varphi_0) \cos \left(\frac{\pi R_{lc}/R_{lp}}{0,3} \right) + (1 + \varphi_0) \right] \quad \text{para } 0 < R_{lc}/R_{lp} \leq 0,3 \quad (14)$$

Método da Troca de Caudal (MTC)

O Método da Troca de Caudal (*Exchange Discharge Model* na denominação inglesa) desenvolvido em BOUSMAR e ZECH (1999) é um método baseado no conceito de tensão tangencial aparente. Na base deste método está a integração na área de escoamento da equação da conservação da quantidade de movimento que, após simplificações e operações matemáticas, pode ser dada pelas seguintes equações.

$$\rho \cdot g \cdot A_{lp} \cdot S_o + \{h_{int,dir} \cdot \tau_{int,dir} + h_{int,esq} \cdot \tau_{int,esq}\} - \tau_o \cdot P_{lp} = 0 \quad \text{para o leito principal} \quad (15)$$

$$\rho \cdot g \cdot A_{lc} \cdot S_o - h_{int} \cdot \tau_{int} - \tau_o \cdot P_{lc} = 0 \quad \text{para o leito de cheia} \quad (16)$$

em que:

ρ – massa volúmica da água;

g – aceleração da gravidade;

h_{int} – altura da interface;

τ_{int} – tensão tangencial aparente na interface;

τ_o – tensão de arrastamento;

P – perímetro molhado da subsecção;

"dir" – direita;

"esq" – esquerda.

Conhecendo-se a tensão de arrastamento basta estabelecer uma formulação para a tensão aparente para se conseguir calcular a curva de vazão para um dado canal.

O MTC modela a chamada "transferência da quantidade de movimento associada à turbulência" através de um modelo análogo ao modelo da camada de mistura (SMART, 1992), obtendo a Eq. (17) para a tensão tangencial aparente.

$$\tau_{int} = \frac{1}{2} \psi \rho (U_{lp} - U_{lc})^2 \quad (17)$$

em que:

ψ – parâmetro experimental;

U – velocidade média do escoamento num dado leito.

O MTC apresenta a modelação da transferência da quantidade de movimento associada não só à diferença de velocidade entre as secções como também provocadas pela geometria, nomeadamente a alargamentos ou estreitamentos do leito principal. Não se apresenta as fórmulas dessa modelação devido estarem fora do âmbito do presente trabalho.

Método da Interação do Canal Dividido (MICD)

O Método da Interação do Canal Dividido (*Interacting Divided Channel Method*, na denominação inglesa) desenvolvido por HUTHOFF *et al.* (2008) é outro método que se baseia no conceito da tensão tangencial aparente (equações 15 e 16). Este método recorre à formulação de VAN PROOIJEN *et al.* (2005) para modelar a transferência da quantidade de movimento na interface, nomeadamente através da modelação das componentes de flutuação das velocidades longitudinal e transversal, obtendo a Eq. (18) para a tensão aparente gerada na interface.

$$\tau_{int} = \frac{1}{2} \gamma \rho (U_{lp}^2 - U_{lc}^2) \quad (18)$$

em que γ corresponde a um coeficiente, tendo sido obtido a partir de ensaios experimentais recolhidos na literatura (HUTHOFF *et al.*, 2008 sugerem o valor de 0,02).

Método da Divisão Ponderada do Canal, MDPC

O Método da Divisão Ponderada do Canal (*Weighted Divided Channel Method* na designação em língua inglesa) foi desenvolvido por LAMBERT e MYERS (1998) partindo da observação dos campos de velocidades nos leitos principal e de cheias. O método consiste numa correcção do MDC de forma a integrar os efeitos causados pela transferência da quantidade de movimento através de uma ponderação dos resultados das velocidades obtidas com divisões verticais e horizontais entre as subsecções. No cálculo do perímetro molhado, as interfaces são sempre excluídas. As equações para as velocidades no leito principal e nos leitos de cheia são as apresentadas de seguida.

$$U_{lp} = \xi U_{lp}^{MDC-V} + (1 - \xi) U_{lp}^{MDC-H} \quad (19)$$

$$U_{lc} = \xi U_{lc}^{MDC-V} + (1 - \xi) U_{lc}^{MDC-H} \quad (20)$$

em que:

“MDC-V” – Método da Divisão do Canal com divisões Verticais;

“MDC-H” – Método da Divisão do Canal com divisão Horizontal;

ξ – Factor de ponderação obtido experimentalmente (para leitos principal e de cheias de igual rugosidade os autores propõem 0,5).