

Simulação numérica de escoamentos fluviais em canais de secção composta com leitos de cheia lisos e rugosos

Moisés Brito¹, João Fernandes², Luís Gil^{1,3}, João Bento Leal^{1,4}

¹ Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Caparica, Lisboa, Portugal

email: u110770@campus.fct.unl.pt, <http://www.fct.unl.pt>

² Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Ambiente, Av. Do Brasil 101, 1700-066, Lisboa, Portugal

³ MARETEC, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal

⁴ CEHIDRO, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal

Sumário

O objectivo principal deste trabalho consiste em simular numericamente escoamentos fluviais em canais de secção composta com leitos de cheia lisos e rugosos. Estas simulações são realizadas recorrendo ao programa ANSYS CFX que resolve numericamente as equações RANS e recorre ao método VoF para a modelação da superfície livre e ao modelo anisotrópico EARSM para a modelação da turbulência. Simulam-se diversos escoamentos (alturas) em regime uniforme com leitos de cheia lisos e rugosos, de modo a estabelecer com rigor a condição de fronteira de jusante. A modelação da rugosidade nos leitos de cheia é feita através de funções de parede. A análise é feita comparando os resultados numéricos com os dados experimentais. Conclui-se que o modelo simula adequadamente os escoamentos experimentais, embora apresente algumas diferenças na região da interface entre leitos (camada de mistura).

Palavras-chave: simulação numérica; canais de secção composta; camada de mistura; rugosidade; ANSYS CFX.

1 INTRODUÇÃO

O estudo e a compreensão dos fenómenos de cheias são bastante importantes para a segurança das populações e dos bens que se encontram em zonas inundáveis. As situações de cheias são, frequentemente, responsáveis por erosões dos leitos, destruição de construções e vias de comunicação e até de deposição indesejável de sedimentos de difícil remoção. Daí a extrema importância do estudo de escoamentos em canais de secção composta, para se delimitar as referidas zonas inundáveis, para se elaborarem planos de emergência e também para o suporte de decisões que envolvam ordenamento do território.

Em situações de cheias, a capacidade de vazão do leito principal dos rios não permite que o escoamento se faça apenas nesse leito passando a ocupar também as zonas adjacentes, denominadas leitos de cheia [1]. Este escoamento simultâneo nos leitos principal e de cheia conduz a uma configuração de secção transversal composta. O escoamento nesta configuração é caracterizado por uma estrutura turbulenta particular, devido à existência de diferentes velocidades entre o escoamento no leito principal e no leito de cheia, mais rápido e mais lento respectivamente. Devido a essa diferença de velocidades, gera-se uma camada de mistura na interface entre os leitos, provocando uma complexa estrutura tridimensional à qual está associada transferência de quantidade de movimento entre leitos [2 e 3]. O fenómeno de transferência da quantidade de movimento foi pela vez reconhecido por [1], que identificou a presença dos vórtices verticais na interface entre os leitos. Esta transferência pode ser vista como tensões tangenciais originadas pelo gradiente lateral da velocidade longitudinal médio no tempo que provocam perda de energia adicional à já originada pelas fronteiras sólidas do escoamento.

Na complexa estrutura turbulenta do escoamento em canal de secção composta para além dos vórtices de eixo vertical na zona de interface entre os leitos. Verifica-se também a existência de vários vórtices, com geometria helicoidal e eixo longitudinal, denominados por correntes secundárias [3 e 4]. Estas correntes são o resultado da anisotropia turbulenta gerada nas fronteiras sólidas e conferem uma enorme complexidade ao escoamento, dificultando a sua simulação numérica [5]. Quando o escoamento no leito principal interage com o escoamento nos leitos de cheia, as características do escoamento não se encontram suficientemente definidas, principalmente

devido ao atraso do fluxo no leito principal causado pela transferência da quantidade de movimento do escoamento entre os leitos. A camada de mistura que se desenvolve na interface dos leitos pelas diferenças de velocidade afecta as estruturas turbulentas, contribuindo para uma complexa estrutura turbulenta tridimensional e anisotrópica.

Os escoamentos turbulentos são caracterizados por flutuações do campo de velocidade que potenciam a capacidade de mistura do escoamento. Estas flutuações podem ser de pequena escala e de alta frequência, sendo assim necessária elevada capacidade computacional para a simulação numérica directa (DNS) destes escoamentos usando as equações de Navier-Stokes (simulações sem modelo de turbulência e malhas muito finas). A forma prática de reduzir o esforço computacional consiste na utilização de uma malha mais grosseira e na aplicação de modelos de turbulência para o fecho das equações RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) [6]. Dos muitos modelos de turbulência existentes, o modelo $k-\varepsilon$ tem sido um dos mais utilizados em simulação de problemas típicos de engenharia, devido a sua robustez, economia e precisão satisfatória na simulação de escoamentos turbulentos [7]. No entanto, o seu desempenho é reduzido nas zonas onde existe anisotropia turbulenta e consequentemente a hipótese da viscosidade turbulenta isotrópica do modelo $k-\varepsilon$ deixa de ser válida [8]. O modelo anisotrópico EARSM (Explicit Algebraic Reynolds Stress Model) permite obter com precisão os perfis verticais de velocidade na região da interface dos leitos [8]. Por sua vez, os outros modelos isotrópicos subestimam as velocidades nos leitos de cheia e sobrestimam as velocidades no leito principal, junto à interface. No leito principal os modelos isotrópicos apresentam melhor performance e nos leitos de cheia todos os modelos apresentam resultados similares. Os resultados numéricos das isolinhas de velocidade, dos vectores do escoamento secundário e da TKE (Turbulence Kinetic Energy) revelam a importância da modelação da anisotropia, dado que esta é responsável pelo escoamento secundário que, por sua vez, deforma as isolinhas de velocidade na região da interface. Os resultados do EARSM vão de encontro aos resultados obtidos por [4] na simulação dos escoamentos experimentais de [5] com um modelo ARSM (Algebraic Reynolds Stress Model) proposto por [9]. Assim, neste trabalho utiliza-se o modelo de turbulência EARSM para o fecho das equações RANS, pois apresenta melhor performance no estudo de escoamento em canais de secção composta. Este modelo apresenta claras vantagens do ponto de vista dos resultados numéricos, pois reproduz a anisotropia turbulenta verificada nos estudos experimentais [2, 3 e 4]. Porém, acarreta maior esforço computacional comparativamente aos modelos baseados na hipótese da viscosidade turbulenta proposta por Boussinesq, mas menor esforço quando comparado com modelos mais complexos, como é o caso dos modelos baseados na resolução das equações de transporte das tensões de Reynolds (RSM - Reynolds Stress Models).

O trabalho inicia-se pela apresentação dos modelos numéricos. Posteriormente apresenta-se a geometria e a malha do domínio computacional, constituído por água e ar, finalmente aplica-se o modelo aos diferentes casos de estudo. A análise dos resultados é feita comparando os resultados numéricos com dados experimentais obtidos no DHA (Departamento de Hidráulica e Ambiente) do LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil). São simulados escoamentos uniformes com leitos de cheia lisos e rugosos para diversas alturas, dado que estas afectam a intensidade e o comportamento da estrutura turbulenta. A influência da condição de fronteira de jusante é avaliada com o objectivo de, para cada altura estudada, permitir o estabelecimento rigoroso do regime uniforme. As simulações dos escoamentos uniformes com leitos de cheia rugosos são realizadas através da utilização e calibração de funções de parede.

2 MODELO NUMÉRICO

A modelação numérica é feita utilizando o programa ANSYS CFX (12.0.1) que aplica uma técnica de volumes finitos. Este programa permite definir a malha, as condições de fronteira, as propriedades dos fluidos, os esquemas e os respectivos parâmetros numéricos para resolver numericamente as equações RANS [10].

A modelação da turbulência é feita usando o modelo EARSM na sua versão standard, pois permite simular os efeitos das correntes secundárias garantindo assim a autenticidade física do problema [10]. Este modelo representa uma extensão do modelo de duas equações, onde o tensor das tensões de Reynolds é definido da seguinte forma:

$$\overline{u_i u_j} = k \left(a_{ij} + \frac{2}{3} \delta_{ij} \right) \quad (1)$$

onde k é a energia cinética turbulenta, δ_{ij} é o tensor de Kronecker e a_{ij} representa o tensor anisotrópico adimensional obtido a partir do tensor polinomial não linear em função da taxa de deformação (S_{ij}) e do tensor de vorticidade (Ω_{ij}) [11]:

$$a_{ij} = \beta_1 S_{ij} + \beta_3 \left(\Omega_{ij}^2 - \frac{1}{3} \Omega_{ij}^2 \delta_{ij} \right) + \beta_4 (S_{ij} \Omega_{ij} - \Omega_{ij} S_{ij}) + \beta_6 \left(S_{ij} \Omega_{ij}^2 + \Omega_{ij}^2 S_{ij} - \frac{2}{3} S_{ij} \Omega_{ij}^2 \delta_{ij} \right) + \beta_9 (\Omega_{ij} S_{ij} \Omega_{ij}^2 - \Omega_{ij}^2 S_{ij} \Omega_{ij}) \quad (2)$$

onde $\beta_1 = -N(2N^2 - 7\Omega_{ij}^2)/Q$, $\beta_2 = -12S_{ij} \Omega_{ij}^2 / (NQ)$, $\beta_4 = -2(N^2 - 2\Omega_{ij}^2)/Q$, $\beta_6 = -6N/Q$ e $\beta_9 = 6/Q$, sendo $Q = -5(N^2 - 2\Omega_{ij}^2)(2N^2 - \Omega_{ij}^2)/6$ e a função N é resolvida por uma equação cúbica [10, 11 e 16].

A modelação da superfície livre é realizada usando o método VoF (Volume of Fluid), desenvolvida inicialmente por [12] onde a fracção de volume (um escalar), C , é transportada por uma equação de transporte. Este método consiste em capturar a posição da superfície livre a partir da evolução da fracção de volume, que toma o valor de 0 na zona onde existe unicamente ar e 1 onde existe unicamente água. A posição da superfície livre é assim definida pelo valor médio 0.5. Os valores intermédios, entre 0 e 1, indicam a presença de uma mistura entre água e ar. As propriedades físicas na zona de transição entre os dois fluidos são calculadas como médias ponderadas com base nesta fracção.

3 DOMÍNIO COMPUTACIONAL

A geometria tridimensional simulada neste estudo (Fig. 1) é construída a partir do plano de simetria longitudinal ao escoamento no canal. A simetria longitudinal do escoamento permite simular apenas metade do domínio físico de modo a reduzir o número de elementos e consequentemente o tempo de cálculo. As dimensões relevantes do domínio computacional são 1 m de largura, 10 m de comprimento e declive longitudinal médio de 0.0011. A geometria do leito principal é trapezoidal, com 0.2 m de largura de rasto e 0.10 m de altura; o leito de cheia tem 0.7 m de largura. A margem do leito principal apresenta um ângulo de 45°.

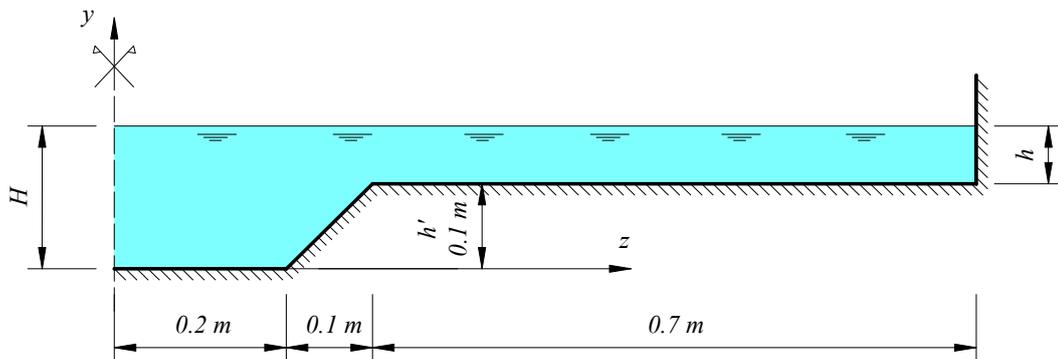


Fig. 1. Secção transversal do canal

Na Fig. 1 identificam-se os parâmetros utilizados para definição da altura relativa, onde H é a altura do escoamento no leito principal, h é a altura do escoamento no leito de cheia e h' é a altura do canal no leito principal. A altura relativa, h_r , é definida como sendo uma relação entre h e H .

Para simular numericamente o escoamento na geometria apresentada (Fig. 1) é necessário definir as condições de fronteira para o problema (Fig. 2). Na entrada dos leitos impôs-se uma condição de velocidade média (velocity inlet), assumindo o perfil de velocidade uniforme, obtido a partir dos dados experimentais (Quadro 1). Na zona de entrada é importante também introduzir a altura inicial da água. Esta condição inicial garante o nível de água e a variação do VoF no domínio computacional.

Quadro 1. Caudais impostos

Leitos de Cheia	h_r	Caudal leitos de cheia [l/s]	Caudal leito principal [l/s]
Lisos	0.15	6.6	38.2
	0.30	26.4	54.2
Rugosos	0.15	3.7	35.1
	0.30	16.6	42.3

Na saída do domínio computacional impôs-se uma condição de pressão hidrostática (pressure outlet). A especificação da pressão hidrostática como condição de fronteira é uma importante técnica para simular escoamentos com superfície livre, principalmente quando o domínio computacional não abrange todo o domínio físico do escoamento através do corte numa secção transversal do canal, pois permite reduzir a dimensão do domínio computacional e consequentemente o número de elementos da malha e o tempo de cálculo.

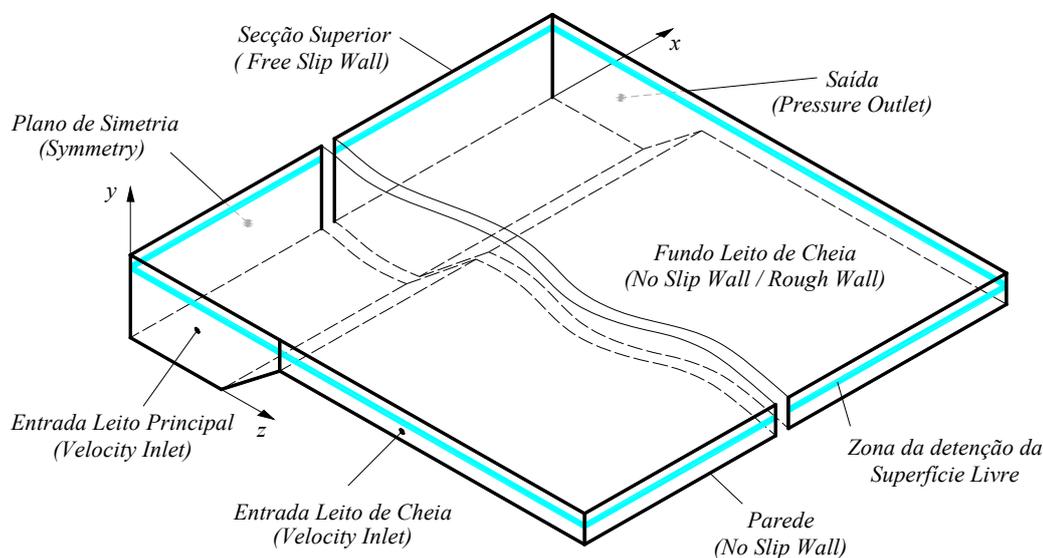


Fig. 2. Domínio computacional e condições de fronteira

Nas fronteiras das superfícies sólidas escolheu-se a condição de parede (wall). Na superfície do domínio computacional onde existe unicamente ar, de modo a delimitar o domínio, aplica-se uma condição de parede sem aderência (free slip wall) onde as componentes da tensão de corte são nulas e a velocidade normal é nula. Nas superfícies lisas impôs-se a condição de parede com aderência standard (no slip wall) correspondente a velocidades tangenciais e normais nulas. Em termos físicos, a diferença entre as leis de parede para superfícies lisas e rugosas, é que a subcamada viscosa, com escala geométrica ν/u_* , não existe e a escala geométrica relevante passa a ser a dimensão característica da rugosidade. Esta modificação é fácil de ser entendida, uma vez que o efeito que a superfície rugosa exerce na distribuição de quantidade de movimento do escoamento é muito maior do que no caso da superfície lisa, tornando o efeito viscoso comparativamente irrelevante. Para leitos de cheia rugosos escolheu-se a condição de parede rugosa (rough wall) onde se introduz o valor de rugosidade média $k_s = 0.00617$ m, determinada experimentalmente através da colocação de relva sintética no leito principal e de ensaios com escoamento apenas nesse leito. Junto à parede rugosa as propriedades do escoamento variam rapidamente da condição de não deslizamento para as de camada limite criando assim elevados gradientes dos parâmetros do escoamento. Nesta zona o número de Reynolds é baixo pois as forças viscosas são preponderantes face as forças inerciais. Neste sentido seria necessária uma malha extremamente refinada tornando o modelo computacionalmente dispendioso. Assim o modelo de turbulência EARSM permite aplicar as leis de parede, considerando que as tensões de corte são constantes perto da parede, resultando num perfil de velocidade logarítmico. A imposição desta lei pelo modelo EARSM depende muito do parâmetro adimensional $y^+ = u_* y / \nu$,

em que u_* é a velocidade de atrito e ν é a viscosidade cinemática. A obtenção de bons resultados com leis de parede depende essencialmente da escolha da altura do primeiro elemento da malha, junto à parede. O modelo EARSM aplica a lei de parede apenas para $30 < y^+ < 300$ [10], onde o perfil de velocidades adimensional u^+ é descrito, por uma lei logarítmica geral da seguinte forma:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y^+}{1 + 0.3k_s^+} \right) + 5.2 \quad (3)$$

sendo κ a constante empírica universal de von Kármán ($\kappa = 0.41$) e $k_s^+ = u_* k_s / \nu$.

Na secção média do canal impôs-se uma condição de fronteira de simetria (symmetry) de modo a reduzir a dimensão do domínio e o tempo de cálculo. Esta condição garante que não existe fluxo através do plano de simetria, isto é, a velocidade normal ao plano é nula e os gradientes dos outros parâmetros do escoamento nesta direcção são pequenos. Ainda no domínio computacional (Fig. 2) identifica-se uma região onde a superfície livre pode evoluir, justifica-se identificar esta região pois é onde se pretende adaptar a malha de modo a obter maior precisão, isto é, reduzir a difusão numérica da fracção de volume na superfície livre provocada pelo método VoF.

A obtenção da malha no domínio computacional em estudo foi efectuada respeitando alguns critérios, de modo a reduzir o tempo de cálculo. Por esta razão a escolha do número de elementos é importante pois permite otimizar a malha, isto é, gerar a malha apenas com o número de elementos suficiente. A optimização da malha é efectuada com base nos critérios de correlação entre a intensidade dos gradientes e a densidade da malha. Neste contexto, a optimização da malha é feita reduzindo o número de elementos no domínio computacional, onde se prevê que os gradientes de velocidade, pressão e fracção de volume sejam pouco significativos. A redução de elementos na discretização da malha optimizada segue os seguintes critérios pré-definidos: na zona de detecção da superfície livre a malha é refinada na direcção vertical em todo o domínio. Esta condição é indispensável, pois assegura uma transição entre o ar e a água mais precisa (pequena difusividade) para o estudo da forma da superfície livre. Os elementos são estirados na direcção horizontal, pois a variação do escalar que descreve o VoF dá-se na vertical; na zona de interface entre os escoamentos (entenda-se zona de troca de massa e de quantidade de movimento entre os leitos principal e de cheia) é necessário que a malha seja suficiente fina, de modo a garantir bons resultados e a convergência dos resíduos, pois é uma zona de maiores gradientes; no interior do domínio computacional pode-se usar uma malha mais grosseira mas deve haver uma continuidade na variação das dimensões dos elementos. A não verificação deste critério pode provocar choque numérico e instabilidade na simulação numérica e consequentemente não haverá convergência dos resíduos; na vizinhança das paredes (zona de gradientes elevados) é importante ter uma malha fina para ter-se uma melhor representação do campo de velocidade, no entanto para leitos de cheia rugosos, a dimensão dos elementos junto à parede depende do parâmetro y^+ . Na Fig. 3 apresenta-se a discretização da malha na secção transversal e os respectivos números de elementos (n). É de realçar que segundo a direcção x (direcção principal do escoamento) a discretização é $400n$. O número total de elementos no domínio computacional é 1792000 e $1960000n$ para a $h_r = 0.15$ e 0.30 , respectivamente. A discretização vertical é ajustável de acordo com a dimensão do domínio computacional, para a $h_r = 0.15$ e 0.30 é 30 e $35n$, respectivamente.

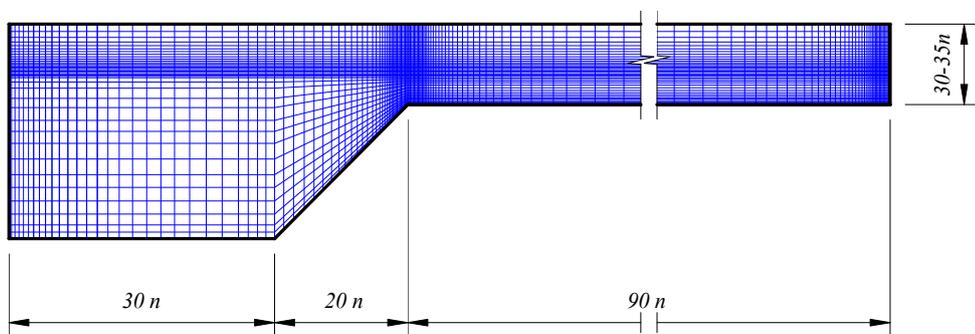


Fig. 3. Discretização transversal do domínio computacional

4 RESULTADOS

4.1 Estabelecimento do regime uniforme

A caracterização do escoamento em canais de secção composta é feita normalmente em regime uniforme. O escoamento em regime uniforme é um escoamento permanente em que a altura, o caudal e velocidade se mantêm praticamente constantes ao longo do canal. Este escoamento permite caracterizar importantes parâmetros de escoamento como por exemplo o campo de velocidade, o desenvolvimento da camada de mistura, a tensão de arrastamento e os perfis verticais de velocidade. Existe uma quantidade considerável de trabalhos relativos à interacção entre escoamentos nos leitos principal e de cheia para regime uniforme, onde mostram que as estruturas turbulentas estarão fortemente ligadas aos parâmetros geométricos e hidráulicos do canal [13].

A metodologia adoptada neste estudo para o estabelecimento do regime uniforme baseia-se num processo iterativo de tentativa e erro, onde se define inicialmente a geometria do domínio computacional, a condição de entrada e a rugosidade dos leitos. Posteriormente ajusta-se a condição de fronteira de saída, neste caso a altura de jusante (H_j), que permite estabelecer o escoamento em regime uniforme. O escoamento é considerado em regime uniforme quando a diferença entre as alturas a montante e a jusante está dentro de uma percentagem da altura média inferior a 0.1%. Na Fig. 4 comparam-se as formas da superfície livre para os diferentes casos de estudo. Os dados experimentais utilizados ao longo desta secção foram obtidos no DHA do LNEC [17].

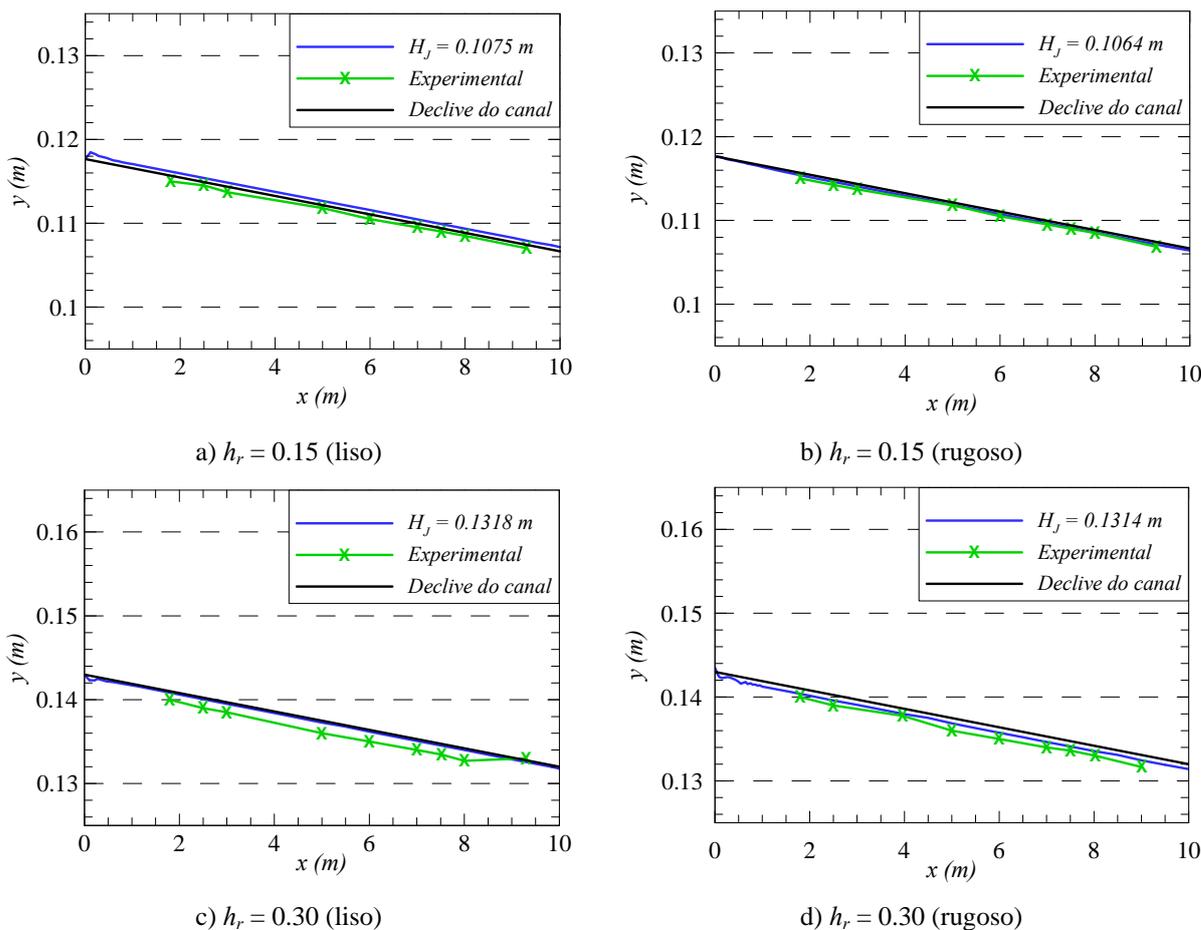


Fig. 4. Comparação da forma da superfície livre numérica, experimental e declive do canal

Da análise da Fig. 4 constata-se que existe uma pequena diferença entre os resultados numéricos e os dados experimentais. Verifica-se que, as alturas dos regimes uniformes obtidas numericamente são ligeiramente superiores às obtidas experimentalmente. Estas pequenas diferenças podem ter diferentes causas: erros nas medições experimentais dos caudais e das alturas de água e dissipação de energia excessiva do modelo numérico. Conclui-se então que a metodologia adoptada para o estabelecimento do regime uniforme, baseada na alteração da altura (pressão hidrostática) na condição de fronteira de jusante, revela-se uma boa alternativa à metodologia tradicional de calibração artificial da rugosidade das fronteiras sólidas. É de realçar que devido à imposição da condição de velocidade de entrada uniforme a superfície livre, logo a jusante desta secção, sofre uma pequena deformação. Estabelecidas as condições de regime uniforme procede-se à análise dos principais parâmetros do escoamento.

4.2 Simulação com leitos de cheia lisos e rugosos

A análise dos resultados das simulações numéricas é feita através da comparação da velocidade média em profundidade e da tensão de arrastamento em três secções transversais do canal, $x = 3, 5$ e 7.5 m. Desta forma pode-se avaliar a capacidade do modelo numérico definido em simular este tipo de escoamento. Na parte final apresentam-se as correntes secundárias no canal. Na Fig. 5 apresentam-se os perfis de velocidade média em profundidade (U) nas três secções transversais.

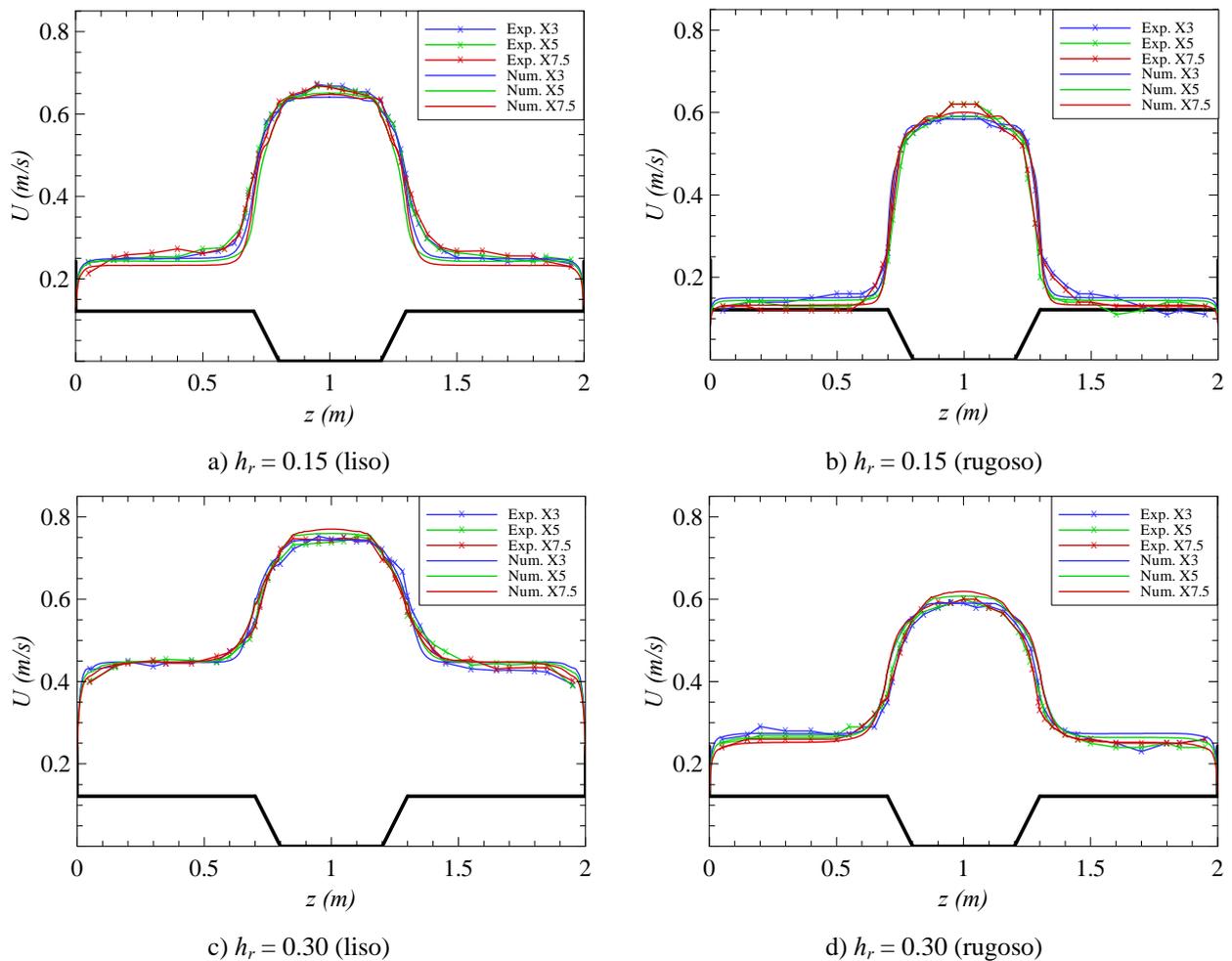


Fig. 5. Comparação da velocidade média em profundidade experimental (Exp.) e numérica (Num.) nas secções transversais $x = 3, 5$ e 7.5 m

O modelo numérico utilizado reproduz razoavelmente a distribuição transversal da velocidade média em profundidade, isto é, prevê uma velocidade maior no leito principal e uma velocidade menor nos leitos de cheia, unidas por uma transição que coincide com a transição do fundo entre aqueles dois leitos. Como representado na Fig. 5, existe um padrão semelhante, tanto para os resultados experimentais, como para os resultados numéricos, com valores dentro da mesma ordem de grandeza para as diferentes secções ao longo do canal, comprovando a situação de regime uniforme em relação às velocidades. Pode ainda observar-se que ao longo do canal as velocidades aumentam nos leitos de cheia, devido ao desenvolvimento da camada de mistura, diminuindo no leito principal. No entanto, os resultados numéricos na região da interface coincidem melhor com os experimentais para $h_r = 0.3$, porque para esta altura relativa os efeitos da rugosidade e a turbulência na camada de mistura têm menos relevância no escoamento.

Verifica-se uma diminuição de todas as velocidades com a passagem dos leitos de cheia lisos para rugosos, diminuindo mais nos leitos de cheia do que no leito principal, pois neste último a influência da rugosidade é menor sendo as suas velocidades apenas afectadas pelas velocidades dos leitos de cheia. Assim, torna-se evidente que existe uma diminuição da capacidade de vazão do canal após a colocação da rugosidade no leito de cheia. Constata-se ainda que a diferença de velocidades entre os leitos diminui para a maior altura relativa, o que se deve traduzir numa diminuição das tensões tangenciais na interface, dado que são proporcionais à variação lateral da velocidade. Na Fig. 6 apresentam-se as tensões de arrastamento (τ_A) nas secções transversais $x = 3, 5$ e 7.5 m.

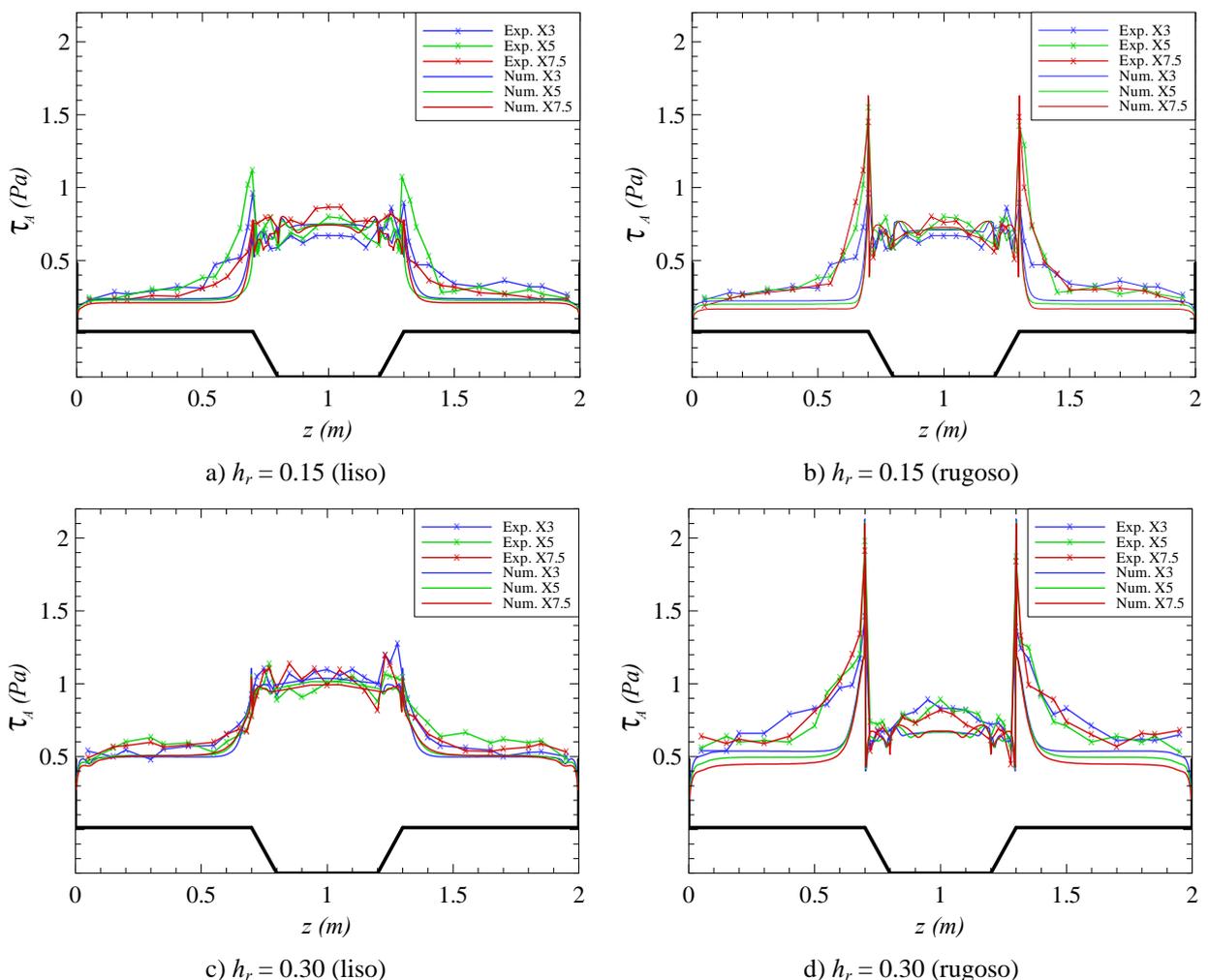


Fig. 6. Comparação da tensão de arrastamento experimental (Exp.) e numérica (Num.) nas secções transversais $x = 3, 5$ e 7.5 m

Observa-se na Fig. 6 uma semelhança no padrão dos perfis das tensões de arrastamento nas três secções estudadas, nomeadamente com o aumento das referidas tensões, a partir das paredes laterais até à zona das interfaces, havendo um aumento brusco para posições mais próximas do leito principal. No entanto, de um modo geral, o modelo numérico subestima as tensões nos leitos de cheia e na camada de mistura do escoamento. Na zona das interfaces entre os leitos há um acréscimo acentuado da tensão que atinge os valores máximos, começando a descer novamente até ao meio do leito principal. Genericamente, os resultados numéricos são inferiores aos experimentais indicando que provavelmente a rugosidade utilizada no modelo de turbulência, que foi calibrada experimentalmente num canal de secção simples, foi subestimada.

A comparação entre leitos de cheia lisos e rugosos permite ainda concluir que existe uma interacção maior entre os leitos rugosos do que no caso dos leitos de cheia lisos, evidenciando a presença de correntes secundárias mais intensas para os leitos de cheia rugosos. Na Fig. 7 verifica-se que as células secundárias (vórtices longitudinais) são mais fortes para escoamentos com leitos de cheia rugosos e que aumentam com o aumento da altura relativa. No entanto, para as alturas relativas estudadas a camada de mistura é pouco influente na segunda célula secundária identificada em [5].

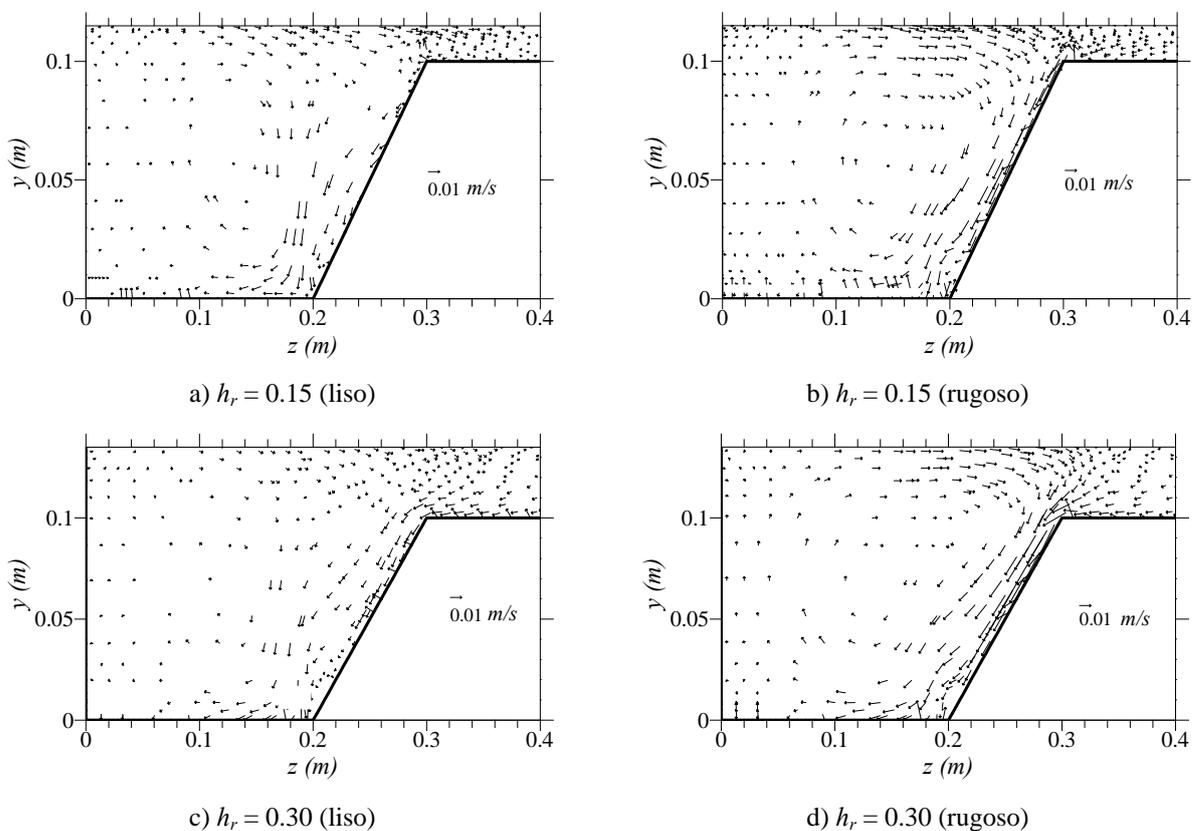


Fig. 7. Correntes secundárias na secção transversal $x = 7.5 \text{ m}$

5 CONCLUSÕES

A metodologia adoptada para o estabelecimento do regime uniforme, baseada na alteração da altura (pressão hidrostática) na condição de fronteira de jusante, revelou-se uma boa alternativa à metodologia tradicional de calibração artificial da rugosidade das fronteiras sólidas. Verifica-se que, as alturas dos regimes uniformes obtidas numericamente são ligeiramente superiores às obtidas experimentalmente. Estas pequenas diferenças podem ter diferentes causas: erros nas medições experimentais dos caudais e das alturas de água e dissipação de energia excessiva do modelo numérico.

Os resultados mostram que o modelo anisotrópico EARSM simula o escoamento secundário mais intenso para alturas de água maiores. Porém, como acontece com a generalidade dos modelos baseados nas tensões de Reynolds, o modelo prevê células secundárias menos intensas do que as observadas experimentalmente. Conclui-se ainda que o modelo subestima a largura da camada de mistura, conduzindo a maiores gradientes laterais de velocidade (Fig. 5) e, conseqüentemente, a maiores tensões de Reynolds na zona da interface para leitos de cheia rugosos. Assim, os resultados numéricos aproximam-se mais dos experimentais para alturas de escoamento maiores, pois a estas correspondem gradientes de velocidade menores. Por último, a adopção de leis de parede para modelar a rugosidade permite obter resultados precisos, desde que a altura do primeiro elemento do domínio computacional seja bem definida.

REFERÊNCIAS

1. R. H. J. Sellin, A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its floodplain, *La Houille Blanche*, 7, pp. 793-802, 1964.
2. I. Nezu, H. Nakagawa, *Turbulence in Open-Channel Flows*, Balkema, 1993.
3. K. Shiono, D. W. Knight, Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 222, pp. 617-646, 1991.
4. I. Nezu, *Compound Open-Channel Turbulence and its Role in River Environment*, Department of Civil and Global Environment Engineering, Kyoto University, Japan, 1994.
5. A. Tominaga, I. Nezu, Turbulent structure in compound open-channel Flows, *Journal of Hydraulic Research*, pp. 21-41, 1991.
6. H. K. Versteeg, W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, Longman Scientific and Technical, England, 1995.
7. D. Cokljat, C. Kralj, On the Choice of Turbulence Model for Prediction of Flown Over River Bed Forms, *Journal of Hydraulic Engineering*, 31, n°3, pp. 355-361, 1997.
8. M. Filonovich, R. Azevedo, L. R. Rojas-Solorzano, J. B. Leal, Simulation of the velocity field in compound channel flow using different closure models, *Proceedings 1st European IAHR Congress*, Edinburgh, 6-4 May 2010.
9. D. Naot, W. Rodi, Calculation of secondary currents in channel flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 108(8), pp. 948-968, 1982.
10. ANSYS CFX 12.01, User's Theory Guide, Ansys Incorporated, 2009.
11. S. Wallin, Engineering turbulence modelling for CFD with a focus on explicit algebraic Reynolds stress models, Royal Institute of Technology, Department of Mechanics, Stockholm, Sweden, 2000.
12. C. Hirt, B. Nichols, Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of free Boundaries, *Journal of Computational Physics* 39, 201-225, Los Alamos, New Mexico, 1981.
13. S. Proust, D. Bousmar, N. Riviere, A. Paquier, Y. Zech, Energy losses in compound open channels, *Advances in Water Resources*, Elsevier, 33 1-16, 2010.
14. S. Girimaji, Fully explicit and self-consistent algebraic Reynolds stress model, *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 8 (6) 387-402, 1996.
15. T. B. Gatski, C. G. Speziale, On explicit algebraic stress models for complex turbulent flows, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 254, 1993.
16. V. Hämäläinen, Implementing an explicit algebraic Reynolds stress model into the three-dimensional finflo flow solver, Espoo, Finland, 2001.
17. P. M. G. C. Massa, Influência da rugosidade dos leitos de cheia em escoamentos em canais de secção composta, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2011.