

APLICAÇÃO DE SOLUÇÕES ANALÍTICAS EM CANAIS COM SECÇÃO COMPOSTA

Hélder A. PARREIRA

Estudante, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516, Caparica, +351 917672023, hparreira86@gmail.com

João N. FERNANDES

Eng.º Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351 218443439, jnfernandes@lnec.pt

João B. LEAL

Professor Auxiliar, CEHIDRO & Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Caparica, jleal@fct.unl.pt

Resumo

A presente comunicação apresenta uma contribuição para o estudo de escoamentos fluviais, em particular para a previsão de alturas de água e da distribuição lateral de velocidades. O principal desafio dá-se numa situação de cheia, que ocorre quando o leito principal é insuficiente para escoar o caudal e transborda, passando assim o escoamento a ocupar os seus leitos de cheia. Assim o escoamento processa-se numa secção composta, o que conduz ao aparecimento de vórtices de eixo vertical na interface dos leitos e de estruturas de escoamento secundárias.

Para ser capaz de entender melhor o escoamento do rio é necessário continuar a desenvolver modelos analíticos. De modo a que estes modelos se tornem mais precisos e permitam prever as influências das alterações no canal. Neste estudo aplica-se o Método de Shiono e Knight (SKM) a situações de canais de secção composta com rugosidade homogénea e com rugosidade heterogénea.

Foi realizado um estudo sobre a influência dos parâmetros de calibração do SKM e sobre a divisão lateral do canal que neste caso serve de guia para a calibração e aplicação do modelo. Para a validação do modelo e da calibração efectuada foram utilizados resultados experimentais. O SKM foi calibrado para diversas condições de escoamento e comparado com os parâmetros recomendados por outros autores de modo a garantir uma melhor compreensão do processo de calibração.

PALAVRAS-CHAVE

Canais de secção composta; distribuição de velocidades; turbulência; correntes secundárias; modelo SKM.

Introdução

Nesta comunicação apresenta-se um estudo relativo ao escoamento em canais de secção composta. Os escoamentos neste tipo de secções geralmente ocorrem quando a curva de vazão do leito principal (LP) não tem capacidade para os caudais que lá afluem, o que geralmente ocorre em situações de cheia. Nessas situações a água transborda do leito principal e ocupa áreas adjacentes, denominadas leitos de cheia (LC). Devido a alturas de águas diferentes cria-se um gradiente de velocidades de escoamento que leva a que ocorra interacção entre o escoamento dos vários leitos.

A modelação 1D actualmente existente para este tipo de escoamentos só indirectamente considera essa interacção. Modelos quase-2D como o Método de Shiono e Knight (SKM), que é um modelo de divisão lateral, oferecem a capacidade de introdução dessas interacções através dos seus parâmetros de calibração. No caso do SKM existem três parâmetros, λ , f e Γ , que representam, respectivamente, as contribuições da turbulência gerada na camada de mistura pelo gradiente lateral de velocidades, do atrito junto ao fundo e do escoamento secundário originado pela anisotropia da turbulência.

Esta comunicação pretende contribuir para demonstrar que o SKM é um método que oferece um bom compromisso de capacidade de modelação, oferecendo capacidade de modelar efeitos tridimensionais como as correntes secundárias, sem ser necessário a utilização de modelos totalmente 3D. Foi efectuado um estudo sobre a influência relativa de cada parâmetro de calibração de modo a servir de guia para a correcta calibração do SKM. Os parâmetros de calibração obtidos foram comparados aos obtidos por diversos autores numa tentativa de generalização dos mesmos.

Enquadramento teórico

No estudo de escoamentos fluviais, em particular para a situação de cheia, dados como a capacidade de vazão e a distribuição de velocidades médias em profundidade são de difícil obtenção. Para a situação de cheia o LP transborda e o escoamento passa a realizar-se também nos LC, estabelecendo-se um gradiente de velocidades entre os leitos. Devido a este gradiente de velocidades cria-se uma interacção entre os escoamentos em que ocorre transferência de quantidade de movimento. Esta interacção ocorre por meio de vórtices de eixo vertical, designados vórtices de interface e estruturas helicoidais, designadas correntes secundárias. Estas estruturas encontram-se apresentadas na Figura 1.

Os modelos 1D não consideram de forma directa os vórtices de interface e correntes secundárias sendo muitas vezes aglutinados num único coeficiente de resistência, desta maneira conduzindo a resultados errados. Ao longo das últimas décadas têm surgido inúmeros modelos quase 2D, que tentam manter a simplicidade de cálculo dos métodos 1D introduzindo de modo simplificado a contribuição da complexa estrutura de escoamento turbulento para a resistência no escoamento. Destes métodos destaca-se o modelo de Shiono e Knight, pela sua forte base teórica, que se baseia nas equações Navier-Stokes médias de Reynolds

$$\rho \left[\frac{\partial UV}{\partial y} + \frac{\partial UW}{\partial z} \right] = \rho g S_0 + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho \overline{u'v'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{u'w'}) \quad (1)$$

Onde, ρ é a massa volúmica da água (1000 kg/m^3), g é a aceleração gravítica ($9,8 \text{ m/s}^2$), U , V e W são as velocidade médias temporais no sentido do escoamento, x , na transversal ao sentido do escoamento, y , e no sentido normal ao leito, z , respectivamente, u' , v' e w' são as flutuações turbulentas da velocidade em relação à velocidade média temporal, e S_0 é a inclinação longitudinal do leito.

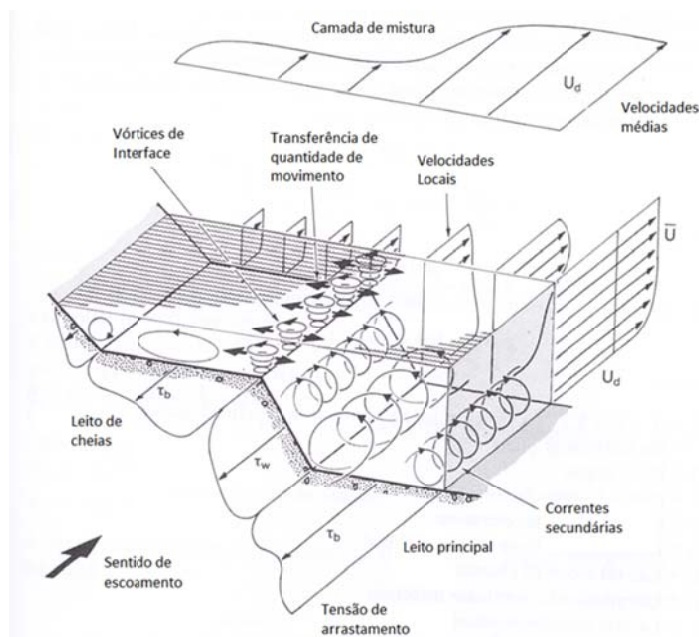


Figura 1 – Estrutura turbulenta num escoamento com secção composta (Adaptada de SHIONO e KNIGHT, 1991).

Considerando nula a velocidade vertical junto ao leito e à superfície livre, $W(0) = W(H) = 0$, SHIONO e KNIGHT (1991) integraram (1) em profundidade, obtendo:

$$\frac{\partial H(\rho UV)_d}{\partial y} = \rho g H S_0 + \frac{\partial H(\tau_{yx})_d}{\partial y} - \tau_0 \sqrt{1 + \frac{1}{s^2}} \quad (2)$$

Em que τ_0 é a tensão de arrastamento, s é a inclinação transversal do leito ($1/s$; vertical/horizontal) e H é a altura de água. Os valores médios em profundidade definem-se de acordo com:

$$(\rho UV)_d = \frac{1}{H} \int_0^H (\rho UV) dz ; (\tau_{yx})_d = \frac{1}{H} \int_0^H (-\rho \overline{u'v'}) dz ; U_d = \frac{1}{H} \int_0^H (U) dz \quad (3)$$

Para este modelo a tensão de Reynolds média, $(\tau_{yx})_d$, é expressa como um gradiente da velocidade média. A viscosidade turbulenta, $(\varepsilon_{yx})_d$, relaciona-se com a velocidade de atrito junto ao fundo, u_* , com a altura de água, H , e com a viscosidade turbulenta adimensional, λ . A tensão de arrastamento local, τ_0 , pode então ser utilizada, em conjunto com o factor de resistência Darcy-Weisbach, $f = 8\tau_0/(\rho U_d^2)$, para relacionar a velocidade média em profundidade, U_d , com a velocidade de atrito junto ao fundo, u_* .

$$(\tau_{yx})_d = \rho (\varepsilon_{yx})_d \frac{\partial U_d}{\partial y} ; (\varepsilon_{yx})_d = \lambda u_* H ; u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{\frac{f}{8}} U_d \quad (4)$$

Substituindo então (4) em (2) obtém-se:

$$\rho g H S_0 - \frac{1}{8} \rho f U_d^2 \sqrt{1 + \frac{1}{s^2}} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho \lambda H^2 \sqrt{\frac{f}{8}} U_d \frac{\partial U_d}{\partial y} \right] = \frac{\partial}{\partial y} [H (\rho U V)_d] = \Gamma \quad (5)$$

Em que Γ é o termo das correntes secundárias que representa o gradiente lateral da força devida ao escoamento secundário por unidade de comprimento. SHIONO e KNIGHT (1991) obtiveram a solução analítica de (5) para os casos em que a secção transversal tem profundidade constante e profundidade linearmente variável. A solução obtida para profundidades constantes é dada por

$$U_d = \sqrt{C_1 e^{\gamma y} + C_2 e^{-\gamma y} + k} \quad (6)$$

Onde C_1 e C_2 são constantes, que se podem obter com a aplicação das condições de fronteira correctas, γ e k são parâmetros dados por

$$\gamma = \sqrt{\frac{2}{\lambda}} \left(\frac{f}{8} \right)^{\frac{1}{4}} \frac{1}{H} \quad ; \quad k = \frac{g S_0 H - \frac{\Gamma}{\rho}}{\frac{f}{8}} \quad (7)$$

Para profundidades linearmente variáveis, a solução analítica de (5) é dada por

$$U_d = \sqrt{C_3 \xi^\alpha + C_4 \xi^{-(\alpha+1)} + \omega \xi + \eta} \quad (8)$$

Onde C_3 e C_4 são constantes, que se podem obter com a aplicação das condições de fronteira correctas, α , ω , η e ξ são parâmetros dados por

$$\alpha = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{1 + \frac{s\sqrt{1+s^2}}{\lambda}} \sqrt{8f}}{2} \quad ; \quad \xi = H \pm \frac{y \pm b}{s} \quad (9)$$

$$\omega = \frac{g S_0}{\sqrt{1+s^2} \left(\frac{f}{8} \right) - \frac{\lambda}{s^2} \sqrt{\frac{f}{8}}} \quad ; \quad \eta = \frac{-\Gamma}{\rho \left(\frac{f}{8} \right) \sqrt{1 + \frac{1}{s^2}}} \quad (10)$$

Estudo de influência dos parâmetros de calibração

Os resultados experimentais utilizados no presente estudo foram obtidos por PINTO (2010), MASSA (2011), TEIXEIRA (2011) e FERNANDES *et al.* (2011) no Canal Veiga da Cunha do LNEC. Esta instalação experimental tem a capacidade de injectar caudais separadamente para o LP e os LC permitindo obter um regime uniforme sem necessidade de um canal de grande comprimento (BOUSMAR *et al.*, 2005, FERNANDES *et al.*, 2011).

Um dos principais desafios na aplicação do SKM com o intuito de prever a distribuição transversal de velocidades é a calibração do modelo. Para calibrar o SKM eficientemente e correctamente é importante que seja conhecida a influência relativa de cada parâmetro (λ , f e Γ), e a sua variação expectável ao longo do canal. O termo das correntes secundárias, Γ , e a viscosidade turbulenta adimensional, λ , são os termos que apresentam maior dificuldade na calibração. Neste estudo foi considerada a simetria do

canal e utilizado o SKM com a divisão de canais apresentada na Figura 2(b). Para a aplicação do SKM é necessário considerar várias condições de fronteira para obter as constantes C_i para cada painel. Com isto em consideração no eixo de simetria do canal aplicou-se a condição $\partial U_d / \partial y = 0$. No limite do canal considerou-se $U_d = 0$ e na ligações entre painéis foram consideradas as condições de continuidade que tomam o seguinte aspecto $(\partial U_d / \partial y)_{\text{painel } i} = (\partial U_d / \partial y)_{\text{painel } j}$ e $(U_d)_{\text{painel } i} = (U_d)_{\text{painel } j}$.

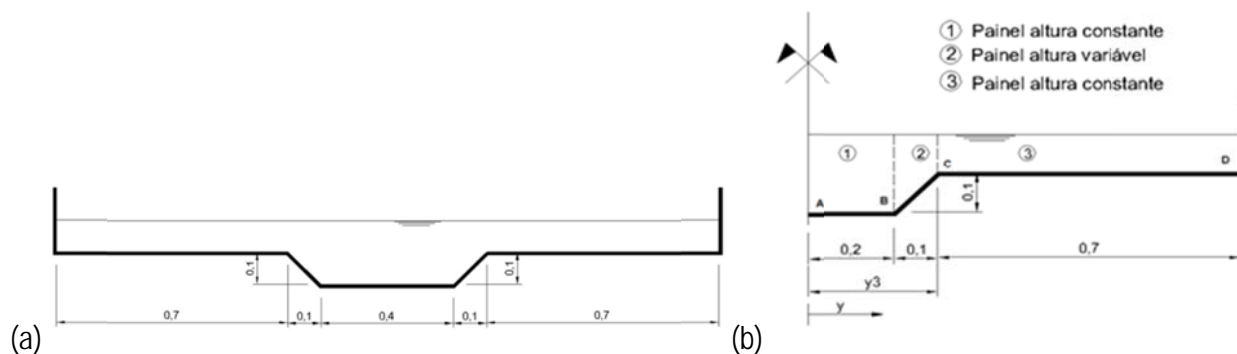


Figura 2 – (a) Secção transversal LNEC-CVC; (b) Subdivisão em painéis. (valores em m)

Foram estudados diversos valores para os três parâmetros de calibração para cada um dos três painéis do modelo analítico. Foram tomados como referência os valores recomendados por KNIGHT (1999) e ABRIL e KNIGHT (2004), apresentados na Tabela 1. O valor do factor de resistência, f , foi calculado através da equação de Colebrook-White aplicada aos dados experimentais. Para possibilitar o isolamento do efeito de cada parâmetro em cada um dos painéis, cada parâmetro foi alterado individualmente enquanto os restantes se mantinham constantes nos valores de referência.

Na Figura 3 apresentam-se os resultados das variações do valor da viscosidade turbulenta adimensional, λ , nos três painéis considerados. O parâmetro λ , definido em (4), traduz a turbulência da camada de mistura e relaciona-se com o gradiente $\partial U_d / \partial y$ e H . Assim, tem sentido que λ seja menor nas zonas em que existam elevados gradientes, como é o caso da zona de transição entre o LP e o LC. Como existe uma diferença na altura de água é natural que no LP apresente um valor mais baixo que no LC. Da análise efectuada constata-se que o valor de λ tem grande influencia na forma do perfil transversal de U_d , especialmente nas zonas de maiores gradientes de velocidades. Dado que o valor de λ de um painel tem influência no painel adjacente, a existência de três painéis dificulta a interpretação da calibração, pois os valores de λ_1 , λ_2 e λ_3 são dependentes entre si, *i.e.*, para um dado λ_1 pode-se encontrar os valores λ_2 e λ_3 que melhor ajustam a solução aos dados. Porém, para outro valor de λ_1 podem encontrar-se outros valores de λ_2 e λ_3 que permitem um ajuste melhor.

O factor de resistência de Darcy-Weisbach representa a resistência do fundo e o seu cálculo por via da equação de Colebrook-White permitiu obter bons resultados para a distribuição de velocidades médias (Figura 4). O valor do factor f_1 obtido para o LP é menor que o valor f_3 dos LC (Tabela 1), dado que a altura de água nos LC é muito inferior, o que se traduz por um factor de resistência maior. Para o caso em que existe inclinação transversal foram estudadas três alternativas mais simples à utilização da equação de Colebrook-White para determinar o valor de f_2 . SHIONO e KNIGHT (1991) utilizaram o valor médio entre os dois painéis adjacentes, $f_2 = (f_1 + f_3) / 2$, SHIONO (2011) utilizou o valor igual ao utilizado no LC, $f_2 = f_3$. No presente estudo, além destes dois casos, foi também estudado o valor considerando uma progressão linear entre os valores dos painéis adjacentes

$$f_2(y) = f_1 - \frac{f_3 - f_1}{0,3 - 0,2}(y - 0,2) \quad (11)$$

Os valores de f_2 obtidos pelas diferentes metodologias apresentaram bons resultados (Figura 4), com excepção para o f_2 obtido com a progressão linear (11). Para o cálculo das distribuições de velocidade para painéis com inclinação transversal para a geometria estudada, o factor de resistência f_2 que apresentou melhores resultados, em termos de coeficiente de determinação, foi o valor médio dos factores de resistência nos painéis adjacentes, como utilizado por SHIONO e KNIGHT (1991). Porém, ressalva-se que outras combinações de parâmetros λ e Γ , diferentes dos valores de referência, com os valores de f_2 obtidos pelas outras metodologias podem, eventualmente, conduzir a melhores resultados.

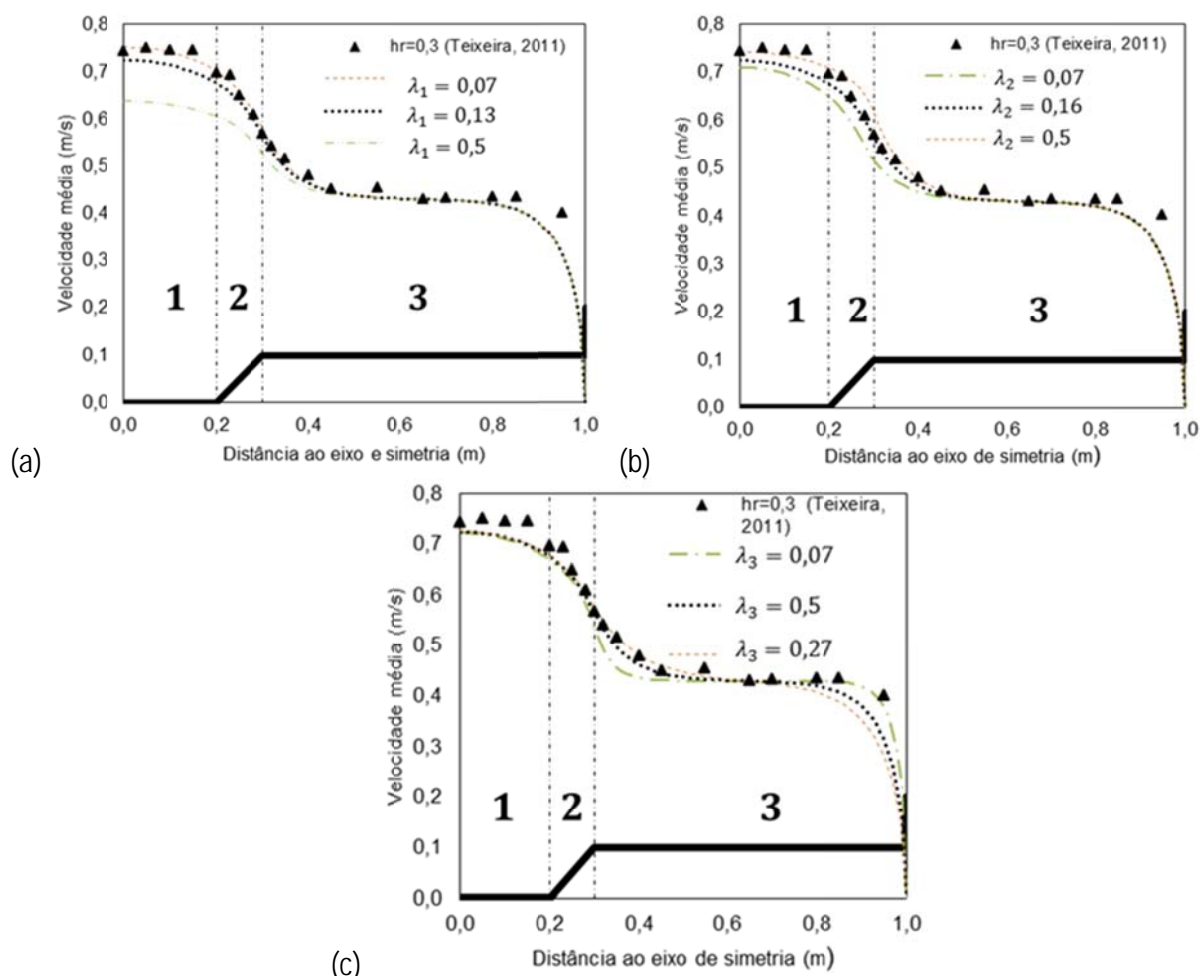


Figura 3 – Influência na distribuição transversal de U_d da viscosidade turbulenta adimensional do: a) painel 1, λ_1 ; b) painel 2, λ_2 ; c) painel 3, λ_3 .

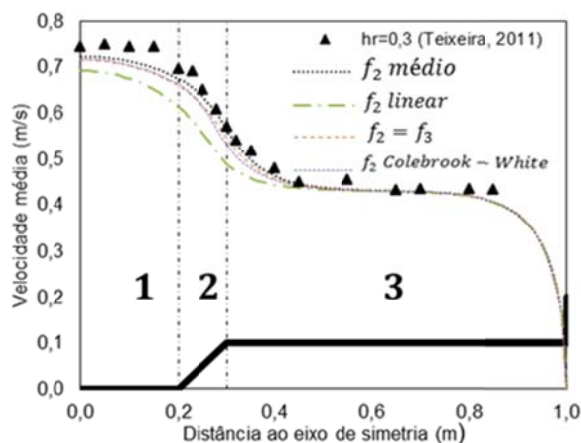


Figura 4 – Influência na distribuição transversal de U_d do factor de resistência do painel 2, f_2 .

O facto das células do escoamento secundário não se encontrarem bem definidas, torna o processo de calibração do termo do escoamento secundário, Γ , definido em (5), mais difícil. SHIONO e KNIGHT (1991) observaram, através de dados experimentais obtidos na instalação experimental SERF-FCF, que a parcela $(\rho UV)_d$ apresenta um valor máximo na interacção entre o LP e o LC e vai decrescendo de um modo quase linear ao longo do LC. Este comportamento indica a existência de apenas uma célula de escoamento secundário no LC. No LP a parcela $(\rho UV)_d$ apresenta uma distribuição mais complexa, mostrando a existência de várias células de escoamento secundário como comprovado por KNIGHT *et al.* (2007). O sinal adoptado para Γ traduz o sentido de rotação das células do escoamento secundário.

Na Figura 5 apresentam-se os resultados obtidos variando o valor de Γ em cada um dos painéis. De um modo geral, valores negativos de Γ incrementam as velocidades médias do painel em estudo e dos painéis adjacentes, enquanto valores positivos reduzem as velocidades médias no painel considerado. Este parâmetro é considerado por vários autores como o parâmetro mais importante para calibração do SKM sendo-lhe atribuída principal importância por KNIGHT *et al.* (2007), que demonstram que com uma divisão do canal em pontos-chave se consegue uma correcta distribuição de velocidades alterando apenas o parâmetro Γ . No presente estudo, dado que a calibração do termo Γ_3 (Figura 5 (c)) não permite obter simultaneamente bons resultados nas metades direita e esquerda do LC, opta-se por adoptar uma subdivisão do painel 3 em dois painéis (Figura 6), passando a secção a ser constituída por 4 painéis. Esta divisão em quatro zonas permite uma melhor calibração do modelo SKM, aumentando a dificuldade de calibração, mas permitindo obter melhores resultados nas extremidades do LC.

Simulação analítica de escoamentos em canais com secção composta

Foi aplicado o SKM a escoamentos experimentais com diferentes alturas relativas para se obter uma melhor compreensão de como variam os valores dos parâmetros de calibração em relação aos valores recomendados para a SERF-FCF, por KNIGHT (1999) e por ABRIL e KNIGHT (2004), e também como variam os parâmetros de calibração para escoamentos com condições diferentes entre si.

Nesta primeira parte são mostrados os resultados obtidos com 4 painéis para escoamentos em fundos lisos onde foi aplicado o SKM com os parâmetros recomendados por autores referidos anteriormente e comparados com obtidos para a melhor calibração obtida.

Os parâmetros recomendados por KNIGHT (1999) e ABRIL e KNIGHT (2004) conduziram a bons resultados para todas as alturas relativas, com excepção de $h_r = 0,38$ (Figura 7). Refira-se que para as alturas relativas mais baixas, os resultados obtidos com os valores de referência apresentam diferenças consideráveis na camada de mistura no LC (painel 3). Com uma calibração específica para cada situação foi possível obter melhores resultados. Os parâmetros calibrados para as diversas situações encontram-se

apresentados na Tabela 1. Em todas as calibrações efectuadas mantiveram-se constantes os valores de λ_1 , λ_2 e λ_4 , iguais a 0,07, 0,16 e 0,07, respectivamente. O que levou que nesses painéis apenas fosse utilizado o termo das correntes secundárias, Γ_1 , Γ_2 e Γ_4 , como parâmetro de calibração, o que simplificou este processo. No painel 3 a calibração foi efectuada através dos parâmetros de calibração λ_3 e Γ_3 .

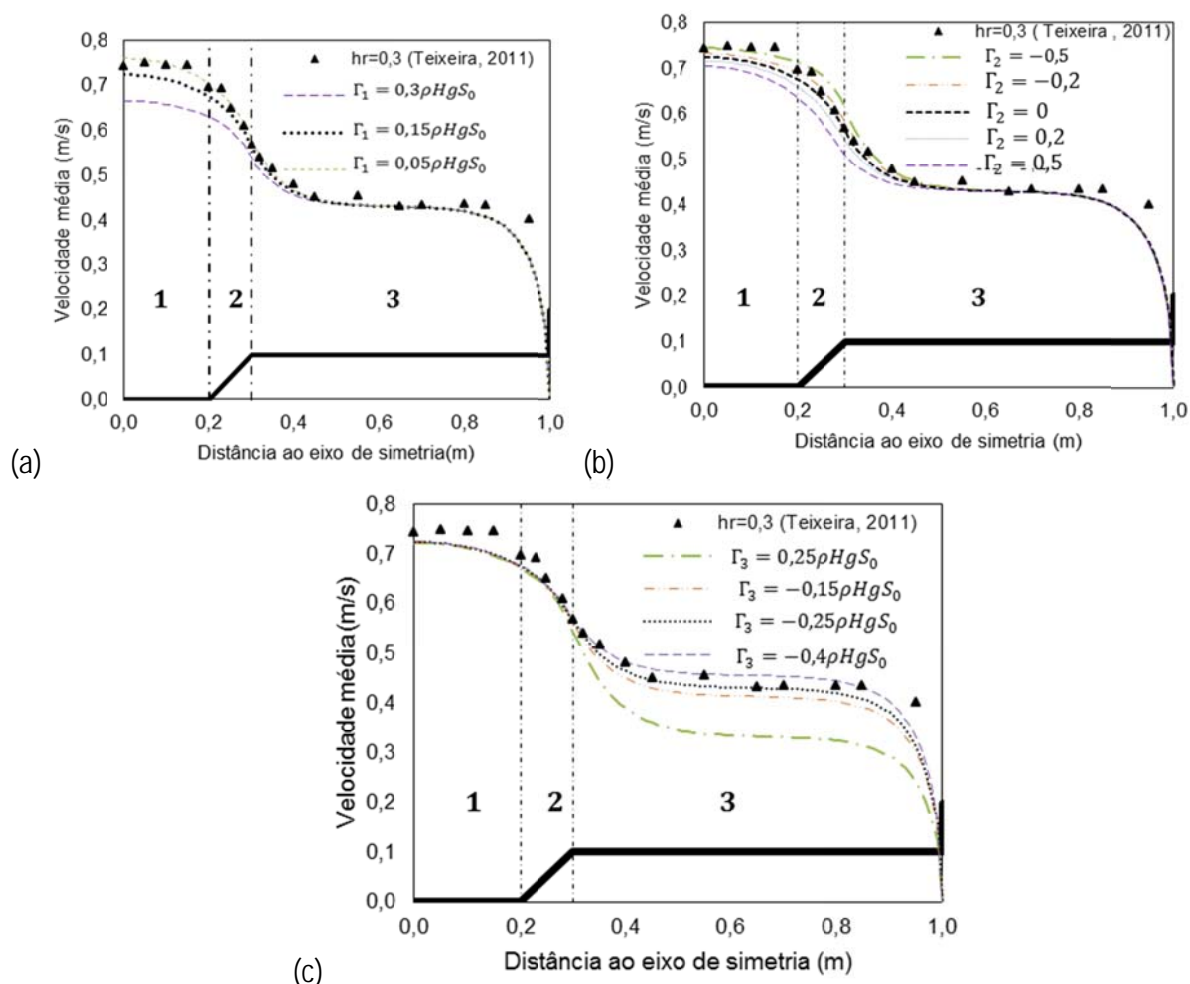


Figura 5 – Influência na distribuição transversal de U_d do termo das correntes secundárias do: (a) painel 1, Γ_1 ; (b) painel 2, Γ_2 ; (c) painel 3, Γ_3 .

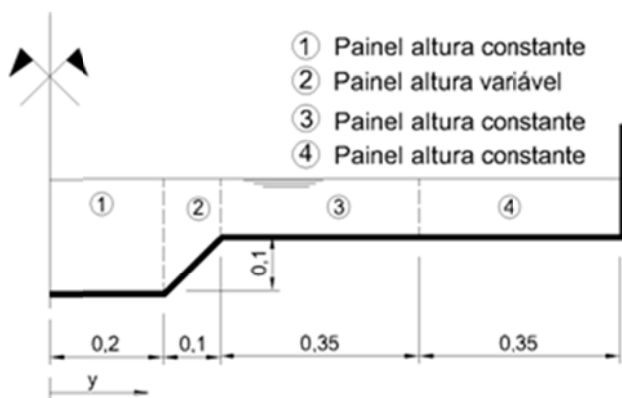


Figura 6 – Divisão lateral do canal LNEC-CVC em quatro painéis considerando simetria.

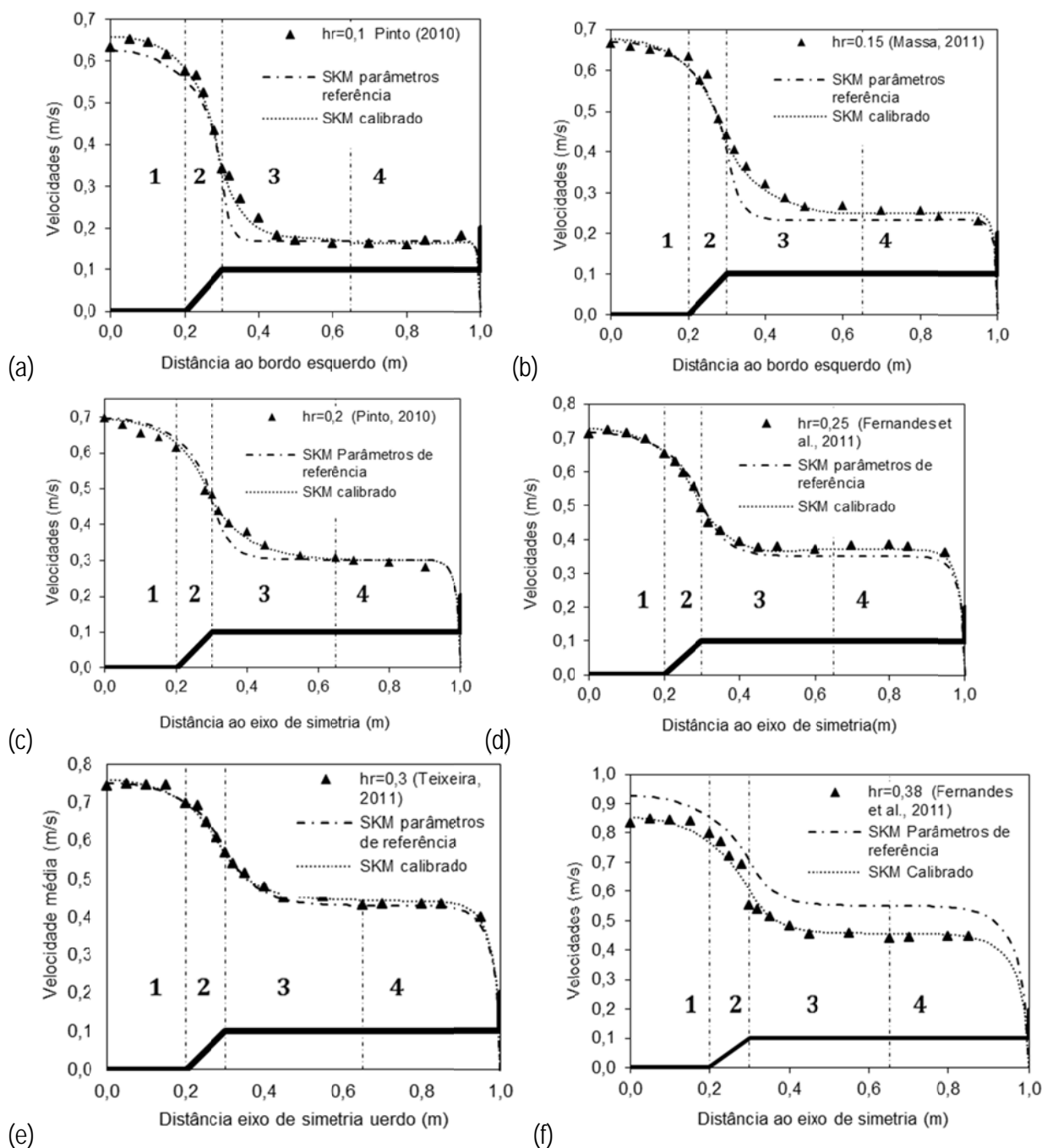


Figura 7 – Distribuição transversal de U_d experimental e calculada pelo SKM para fundo liso: (a) $h_r = 0,1$; (b) $h_r = 0,15$; (c) $h_r = 0,2$; (d) $h_r = 0,25$; (e) $h_r = 0,3$; (f) $h_r = 0,38$.

Na Figura 8 apresentam-se os parâmetros obtidos na calibração do SKM, para os vários painéis, em função das alturas relativas de modo a formar uma proposta de parâmetros a utilizar para o LNEC-CVC com fundos lisos.

Na Figura 8(a) encontram-se todos os valores utilizados para Γ_1 após calibração, para diferentes alturas relativas com as mesmas condições de escoamento onde são comparados com os parâmetros recomendados por ABRIL e KNIGHT (2004). Pode-se concluir que os valores de Γ_1 calibrados seguem, com excepção da altura relativa 0,38, a equação proposta por aqueles autores.

Tabela 1 – Parâmetros de calibração do SKM para fundo liso

		Calibrados					
	Referência	$h_r = 0,1$	$h_r = 0,15$	$h_r = 0,2$	$h_r = 0,25$	$h_r = 0,3$	$h_r = 0,38$
Γ_1	$0,15\rho gHS_0$	$0,1\rho gHS_0$	$0,13\rho gHS_0$	$0,15\rho gHS_0$	$0,11\rho gHS_0$	$0,12\rho gHS_0$	0
Γ_2	0	0,1	0,12	0,3	0,3	0,25	0,7
Γ_3	$-0,25\rho gHS_0$	$-0,39\rho gHS_0$	$-0,5\rho gHS_0$	$-0,3\rho gHS_0$	$-0,225\rho gHS_0$	$-0,35\rho gHS_0$	$-0,14\rho gHS_0$
Γ_4	$-0,25\rho gHS_0$	$-0,19\rho gHS_0$	$-0,45\rho gHS_0$	$-0,2\rho gHS_0$	$-0,4\rho gHS_0$	$-0,325\rho gHS_0$	$-0,14\rho gHS_0$
λ_1	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
λ_2	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
λ_3	0,27	2,3	2,5	1,3	0,6	0,27	0,07
λ_4	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07

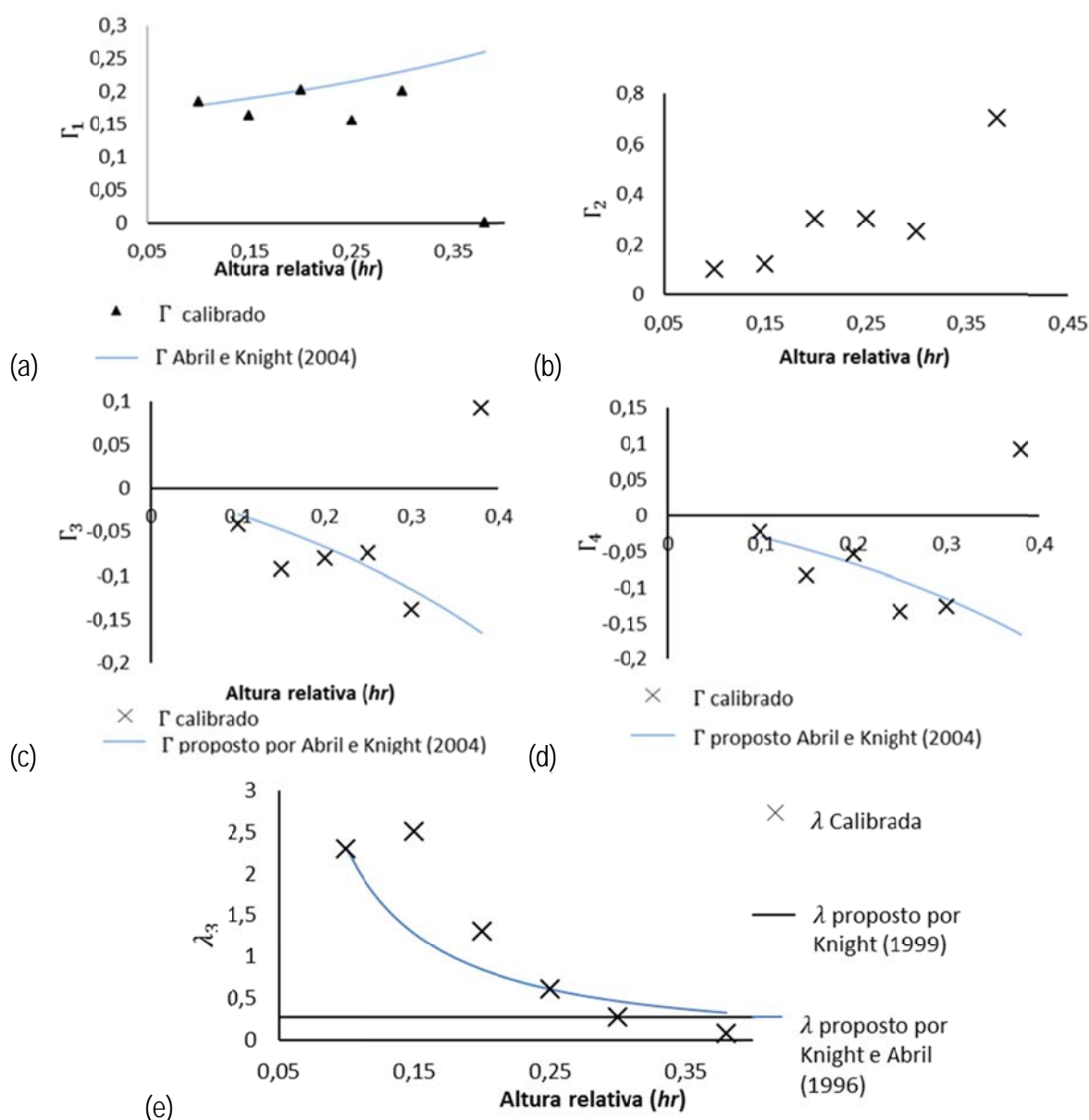


Figura 8 – Variação com a altura relativa para fundo liso de: (a) Γ_1 ; (b) Γ_2 ; (c) Γ_3 ; (d) Γ_4 ; (e) λ_3 .

Após calibração foram obtidos vários valores de Γ_2 para diferentes alturas relativas (Figura 8(b)). Pode-se observar que Γ_2 tem um andamento aproximadamente linear, crescente com o aumento da altura relativa. Foi observado, entre outros por NEZU (1994), que a intensidade das células de escoamento secundário aumenta com a altura relativa pelo que os resultados são coerentes. Apenas na altura relativa de 0,3 ouve uma redução de Γ_2 em relação à altura relativa anterior, que poderá ser causada pelo conjunto de termos de calibração utilizados neste painel e painéis adjacentes. Para esta região os valores recomendados são nulos.

A relação entre λ_3 e a altura relativa encontra-se apresentada na Figura 8(e). Nesta Figura são também apresentados os parâmetros de calibração propostos por ABRIL e KNIGHT (2004) que dependem dos parâmetros utilizados no LP e da altura relativa. Pode-se observar que λ_3 decresce de um modo aproximadamente linear com o aumento da altura relativa. Os valores recomendados por KNIGHT (1999) para esta situação eram constantes e iguais a 0,27. Os termos de λ_3 obtidos através de calibração são muito semelhantes aos propostos por ABRIL e KNIGHT (2004).

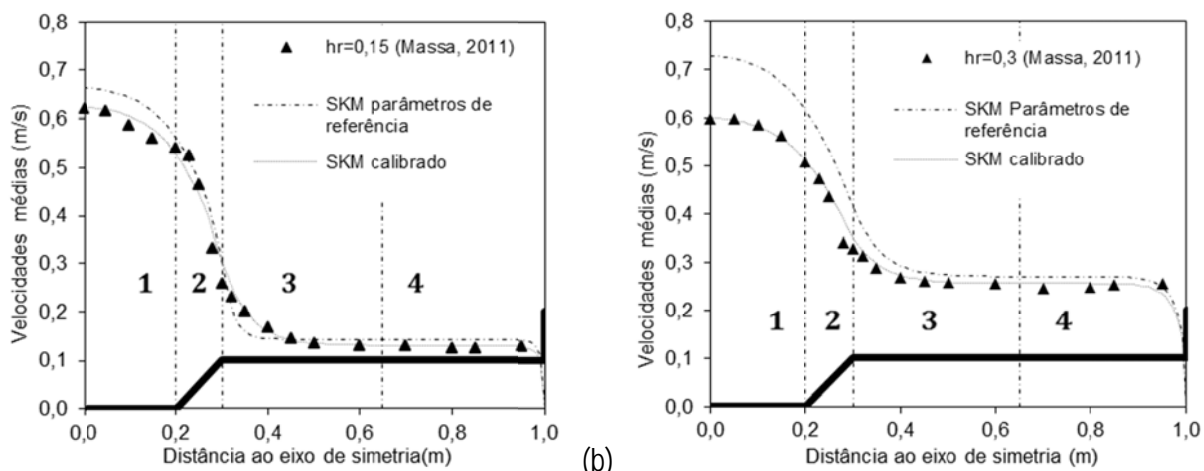
Para este painel também foram obtidos vários valores de Γ_3 , após calibração do SKM, correspondentes às diversas alturas relativas, a relação obtida encontra-se apresentada na Figura 8(c) **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** Para esta região o valor do termo das correntes secundárias decresce ligeiramente com a altura relativa, tomando sempre valores negativos, com excepção da altura relativa de 0,38, que obteve um valor de intensidade semelhante mas de sinal contrário ao registado anteriormente para as outras situações estudadas. Os valores obtidos aproximam-se razoavelmente dos propostos por ABRIL e KNIGHT (2004).

Na Figura 8(d), onde se encontra apresentada a relação entre Γ_4 e a altura relativa, verifica-se que, exceptuando a altura relativa de 0,38, aquele parâmetro apresenta uma progressão aproximadamente linear decrescente e semelhante aos valores de Γ_3 .

Procedeu-se também ao estudo de escoamentos em canais em secção composta com leito principal liso e leitos de cheia rugosos. Esta rugosidade heterogénea altera as estruturas secundárias que se desenvolvem. A resistência gerada pelos limites de um canal produz turbulência anisotrópica responsável pelo aparecimento de células de escoamento secundário. Com a utilização de fundo rugoso nos LC aumenta-se a anisotropia da turbulência aumentando os efeitos do escoamento secundário. De notar que a intensidade das correntes secundárias para planícies de cheia rugosas são cerca de 70% superiores (NEZU, 1994).

Obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 9 para as alturas relativas $h_r = 0,15$ e $0,3$. Os parâmetros de calibração apresentam-se na Tabela 2. O valor do factor de resistência, f , foi calculado através da equação de Colebrook-White aplicada aos dados experimentais. O factor de resistência no painel 2, f_2 , foi calculado através do valor médio dos factores de resistência nos painéis adjacentes.

Neste caso de estudo os parâmetros recomendados por KNIGHT (1999) e ABRIL e KNIGHT (2004) não ofereceram bons resultados para $h_r = 0,3$, pelo que os parâmetros de referência não são aplicáveis a qualquer situação genérica. A este propósito refira-se que a rugosidade (relva artificial) utilizada no presente estudo é bastante distinta da rugosidade (cilindros) utilizada na calibração do SKM por outros autores. Entre aqueles dois tipos de rugosidade existe uma componente de atrito que se gera na superfície dos cilindros que não está presente no caso da relva artificial. A importância desta componente cresce com o aumento da altura relativa, pelo que pode ajudar a explicar o afastamento dos parâmetros obtidos neste estudo para $h_r = 0,3$ dos parâmetros de referência propostos por outros autores.



(a) (b)
 Figura 9 – Distribuição transversal de U_d experimental e calculada pelo SKM para fundo rugoso: (a) $h_r = 0,15$; (b) $h_r = 0,3$.

Tabela 2- Parâmetros de calibração do SKM para fundo rugoso

	Referência	Calibrados	
		$h_r = 0,15$	$h_r = 0,3$
Γ_1	$0,15 \rho g H S_0$	$0,25 \rho g H S_0$	$0,425 \rho g H S_0$
Γ_2	0	$0,1 \rho g H S_0$	0,9
Γ_3	$-0,25 \rho g H S_0$	$-0,05 \rho g H S_0$	$-0,05 \rho g H S_0$
Γ_4	$-0,25 \rho g H S_0$	$0,025 \rho g H S_0$	$-0,025 \rho g H S_0$
λ_1	0,07	0,07	0,07
λ_2	0,16	0,16	0,16
λ_3	0,22	1,3	0,27
λ_4	0,07	0,07	0,07

Conclusões

Na presente comunicação apresenta-se um estudo sobre a aplicação do modelo analítico quase-2D SKM a escoamentos em canais com secção composta. Os resultados da modelação utilizando parâmetros recomendados por vários autores e após calibração foram comparados com os dados experimentais. Do estudo desenvolvido conclui-se:

- Um aumento do termo das correntes secundárias, Γ , conduz a uma redução das velocidades médias para uma região e regiões adjacentes, dado que se aumenta a dissipação de origem turbulenta.
- Um aumento da viscosidade turbulenta adimensional, λ , torna as transições de velocidade mais suaves entre as várias regiões, dado que λ se relaciona directamente com $\partial U_d / \partial y$.
- O SKM obtém melhores resultados se factor de resistência Darcy-Weisbach nos painéis não horizontais for mantido constante e igual ao valor médio dos painéis horizontais adjacentes.
- O SKM é um modelo com capacidade de obter resultados precisos para escoamentos em regime uniforme, em canais de secção composta onde se desenvolvem vórtices de eixo

vertical e estruturas de escoamento secundário. Em especial se o leito apresentar rugosidade homogénea.

- Os parâmetros recomendados por Knight (1999) e Abril e Knight (2004) apresentam bons resultados para grande parte dos escoamentos do LNEC-CVC, apesar do seu desenvolvimento ter sido feito para escoamentos do SERF-FCF.
- É possível obter melhores aproximações, que as obtidas via parâmetros recomendados, para os dados experimentais do LNEC-CVC otimizando os parâmetros de calibração.
- A divisão do LC em dois painéis permitiu obter bons resultados junto à parede lateral do canal.

Resumindo o SKM permite obter distribuições transversais de velocidade médias em profundidade de um modo simples e com parâmetros de calibração standard, permitindo obter resultados mais completos e precisos do que os modelos 1D mais comuns e constituindo uma boa alternativa à utilização de métodos mais complexos, 2D ou 3D.

Agradecimentos

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

Bibliografia

- ABRIL, J.B. e KNIGHT, D.W. (2004). "Stage-discharge prediction for rivers in flood applying a depth-averaged model", *Journal Hydraulic Research*, Vol. 42, No. 6, 616-629.
- BOUSMAR D., RIVIÈRE, N., PROUST, S., PAQUIER, A., MOREL, R. e ZECH, Y. (2005). "Upstream Discharge Distribution in Compound-Channel Flumes", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, No. 5, 408-412.
- FERNANDES, J.N., LEAL, J.B., CARDOSO, A.H. (2011). Discussão de "Apparent friction coefficient in straight compound channels", por Moreta, P.J.M., Martin-Vide, J.P., *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 49, No. 6, 836-838.
- KNIGHT, D.W., e ABRIL, B. (1996). "Refined calibration of a depth averaged model for turbulent flow in a compound channel", *Proceedings of the Institute Civil Engineering - Water Maritime*, Vol. 118, 151-159.
- KNIGHT, D.W. (1999). "Flow mechanisms and sediment transport in compound channels", *International Journal of Sediment Research*, Vol. 14, No. 2, 217-236.
- KNIGHT, D.W., OMRAN, M. e TANG, X. (2007). "Modelling depth-averaged velocity and boundary shear in trapezoidal channels with secondary flows", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 133, No. 1, 39-47.
- MASSA, P. (2011). "Influência da rugosidade dos leitos de cheia em escoamentos em canais de secção composta", Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica, 175 págs.
- NEZU, I. (1994). "Compound Open-Channel Turbulence and its Role in River Environment". Department of Civil and Global Environment Engineering, University of Kyoto, Japan.
- PINTO, D. (2010). "Caracterização experimental de escoamentos em canais de secção composta". Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica, 113 págs.
- SHIONO, K. e KNIGHT, D.W. (1991). "Turbulent open channel flows with variable depth across the channel". *Journal of Fluid Mechanics*, 222, 617-646.

SHIONO, K. (2011). "Stage-discharge estimation with analytical solutions in single and two stage channel flows", Technical Session under the work of the Specialized Commission in Fluvial Hydraulics of APRH, LNEC, Lisbon, Portugal, 2011.

TEIXEIRA, E. (2011). "Estudo experimental de escoamentos em regime uniforme e não uniforme em canais de secção composta", Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica, 89 págs.