6º SILUSBA - Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa

Perfil Longitudinal								
Entre Câmaras de Visita Conduta	is Elevatórias							
De D 1	A D 12							
Legenda Altura do texto 5.000	Factores de escala Horizontal 1.000							
Incluir	Vertical 10.000							
🔽 Distância à Origem	Guardar em							
🔽 Distância entre Câmaras	Trongramas R-NetCAD							
🔽 Cota do Terreno								
🔽 Cota da Soleira								
🔽 Profundidade da Soleira								
🔽 Inclinação do Terreno								
🔽 Inclinação do Colector								
🔽 Diâmetro do Colector								
(Seleccionar tudo)	KCancelar V OK							

Figura 10 – Quadro de selecção de perfil longitudinal de um colector.



Figura 11 – Diagrama do perfil longitudinal de um colector.

A figura 12 mostra o aspecto típico de um relatório do dimensionamento de colectores numa rede doméstica.

6º SILUSBA – Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa

🖄 R-NetCAD C:\Programas\R-NetCAD\Exemplos\Hipotetico.RCD - [Rede-Resultados]											×						
위 Fichei	ro Editar	Bases de Ca	álculo Rede	e Catálog	jos Janela	Ajuda										_ 8	×
	8																
k⊃ ‡	/ 6	s 🗸 🔽	7	Q. Q.	⊇ @ €		- - -	\odot			*** 7 7	/	E 🖹 🖬	* \$	3 🏊 🖬		
																	1
Resulta	dos do Di	mensiona	mento														
Rede Dor	néstica/U	nitária															
Condições de Dimensionamento																	
			Co.	lectores		Domést	icos	Unità	rios								
Velocida	ade Mínim	a (m/s):					0.60		0.90								
Velocida	ade Máxim	a (m/s):					3.00		5.00								
Incline	an Minim	a (%):					0.3		0.3								
Ingline	ses Névie						15.0		15 0								
inclina	çao daxim	a (*):					10.0	_	10.0								
Caudal I	Minimo de	Auto-Li:	mpeza (l,	/s):		1	.500	5	.000								
Diâmetro	o Nominal	Mínimo	(mm):				200		200								
Capitaçã	ão Ano O	(1/hab/d	ia):	130													
Canitaci	So ino 40	(1/heh/	diel-	180													
Reptonça	de Deute	To at and 8	ula, . Wénén	100	10.0												
Factor (de Ponca	inscanca	neo naxii	10:	10.0												
Factor (de Afluën	cia:	0.80														
Peso Esp	pecífico	da Água	(N/m3):		9800												
Colector	res exist	entes-Ca	udais de	Cálculo													
N*	Caudal	Médio	Factor	Ponta	Cau. Co	nc.Ac.	Caudal	Ponta	Cauda	l Inf.							
	(1	/s)			(1	/s)	(1	/s)	(1	/s)							
	ano0	ano40	ano()	ano40	ano0	Ano40	ano0	ano40	Col	 							
CD C	0.24	0.00	5 74	4 24	0.00	11 00	10.00	14 20	0.40	0.00							
007	0.24	0.00	3.74	4.24	9.00	11.00	10.30	14.35	0.40	0.00							
CD8	0.00	0.40	0.00	5.37	8.00	9.00	8.00	11.15	0.40	0.40							
CD 9	0.48	1.20	4.50	3.74	10.00	13.00	12.17	17.48	0.40	1.20							
CD10	0.72	1.60	3.95	3.44	11.00	15.00	13.85	20.50	0.40	1.60							
Colector	res exist	entes-Cá	lculo Hi	dráulico													
N*	Caud	ais	Diâmet	tro	Inclina	ção	Veloc	idades	Alt.	Escoa.	Tens. A	rrasto	Tem. Perc	curso			
1	(1	/s)	(mm))	(%)	-	(m	(s)	(m.)	(N/:	m2)	(min)				
1	Min	Máv					Min	Máv	Min	Máv	Min	Máv	Min	Máv			
0.00	10.00	15 10	100	00	~	27	1 50	1 35		0.005	0.02	11 54	0.40				
L (107	10.38	15.19	192.	. 00	3	. 21	1.59	1.77	0.053	0.065	9.82	11.54	0.40	0.45			
CD8	8.00	11.55	192.	. UO	1	. 19	1.03	1.14	0.060	0.073	3.98	4.63	0.61	U.68			
CD9	47.17	53.68	240.	. 20	3	. 14	2.35	2.43	0.109	0.118	17.37	18.25	0.22	0.23			
CD10	48.85	57.10	240	. 20	5	. 22	2.86	2.98	0.097	0.106	26.48	28.18	0.21	0.22			
Colector	Colectores existentes-Elementos para implantação																
N*	Câ	mara	Diâmet	tro	Comprime:	nto	Cota T	erreno	Cota S	oleira	Prof. S	oleira	Recobrig	aento			
1			(70 70 ')	(m)			m)		m)	0	ա՝	(10)				
L.,			,	<i>,</i>	()		,		```								-
4																•	
Rede-Res	ultados														CAPS	NUM INS	1
																	_

Figura 12 – Relatório do dimensionamento de colectores numa rede doméstica.

Nas figuras 13 e 14 são, ainda, ilustradas outras características do programa, nomeadamente o estudo de grupos motor/bomba, de condutas elevatórias de águas residuais, determinação da capacidade das respectivas câmaras de aspiração e análise simplificada do choque hidráulico, utilizando a metodologia simplificada de Allievi-Michaud.

Dimensionamento da Conduta Elevatória 🛛 🛛 🛛 🔀								
(Proj.) Conduta Elevatória I	Nº CE 1(PVC	classe 1.0 MPa)						
Caudal Máximo Caudal Afluente (I/s) Elevado 31.02) (I/s) Di 35 Di	âmetro Nominal	200					
Diâmetro (mm)		ametro interno (mmj	180.8					
Mínimo Máximo	M	ód. Elasticidade (GPa)	3.10					
172.36	252.31 Ve	elocidade (m/s)	1.36					
			[Dimensionar]					
			~					
Grupo Motor/Bomba		Câmara de Aspira	ção					
Caudal Elevado (I/s)	35.00	Volume Mínimo (n	n 3) 2.62					
Altura de Elevação (m)	24.77	Volume Máximo (n	n 3) 4.91					
Potência do Grupo (KW)	12.14							
Choque Hidráulico								
Celeridade (m/s)	389.68	Tempo de Paragem (s) 5.49					
Tempo de Fase (s)	2.05	Manobra Lenta: Mich	aud					
Tempo de Paragem de Rosich (s)	5.49	Amplitude da Onda de Choque (m)	20.27					

Figura 13 – Dimensionamento de uma conduta elevatória de uma rede doméstica.

6º SILUSBA – Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa



Figura 14 – Dimensionamento de uma conduta elevatória de uma rede doméstica. Finalmente, a figura 15 ilustra a capacidade que, evolutivamente, este *software* já permite de representar as plantas das redes sobre um mapa urbano "importado" em formato dxf.



Figura 15 – Mapa de rede doméstica sobre planta topográfica.

3. CONCLUSÃO

O sistema R-NetCAD constitui uma ferramenta poderosa de apoio às funções de planeamento, projecto e de análise de redes urbanas de drenagem de águas residuais. Tendo sido desenvolvido no quadro de uma família de produtos de CAD/CAE, exibe as vantagens daí decorrentes de fiabilidade, versatilidade e facilidade operacional. Por outro lado, em resultado da fácil e intuitiva forma de exploração que decorre da sua elaborada interface humana gráfica, e da cuidada coerência de resultados ao nível do motor de cálculo, este conjunto de ferramentas apresenta um potencial de função formativa que poderá ser utilizado em escolas de Engenharia Civil.

REFERÊNCIAS

CARDOSO, FRANCISCO J. A.; FRANCISCO, FRANCISCO F. – "*Net*CAD/*Net*MAP: uma Abordagem Estruturada de Sistemas de Planeamento e Projecto Assistidos por Computador de Redes de Serviços Públicos", in *Actas 3º SILUSBA - Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa*, Maputo (Moçambique), 1997.

SÁ MARQUES, J. ALFEU A.; CARDOSO, FRANCISCO J. A.; SOUSA, JOAQUIM J. O.; FRANCISCO, FRANCISCO F. – "H-*Net*CAD: um Sistema de Projecto Assistido por Computador de Redes Urbanas de Abastecimento de Água", in *Actas 3º SILUSBA - Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa*, Maputo (Moçambique), 1997.

SÁ MARQUES, J. ALFEU A.; CARDOSO, FRANCISCO J. A.; SOUSA, JOAQUIM J. O.; FRANCISCO, FRANCISCO F. – "H-NetCAD: Dynamic Modelling in the Computer Aided Design of Water Supply Networks", in *Proc. EPMESC VII – International Conference on Enhancement and promotion of Computational Methods in Engineering and Science*, Macao, 1999, pp. 923-932.

SÁ MARQUES, J. ALFEU A., CARDOSO, FRANCISCO J. A., SOUSA, JOAQUIM J. O., FRANCISCO, FRANCISCO F. – *H-NetCAD* – *Sistemas Urbanos de Abastecimento de Água*, Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra (Portugal), 2000.

MODELAÇÃO COMPUTACIONAL DE ESCOAMENTOS RÁPIDOS EM CANAIS COM TRANSIÇÕES LINEARES – VALIDAÇÃO COM RESULTADOS CLÁSSICOS E EXPERIMENTAIS

Paulo Lopes Gameiro¹ António Bento Franco² António Betâmio de Almeida³

¹ Engenheiro Civil, Mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos, Engenheiro Projectista da GIBB Portugal ² Engenheiro Civil, Professor Auxiliar do Instituto Superior Técnico, Consultor da GIBB Portugal ³ Engenheiro Civil, Professor Catedrático do Instituto Superior Técnico

RESUMO

Apresentam-se os fundamentos teóricos e as equações de base de um modelo computacional desenvolvido para simulação de escoamentos rápidos em transições, modelo DESCC, bem como as simplificações consideradas e os limites de aplicabilidade.

São apresentados resultados do modelo computacional e comparados com soluções clássicas e com resultados experimentais, com o objectivo de proceder à validação do modelo e, avaliar da sua capacidade de modelação e aplicabilidade a casos práticos de engenharia.

Para a validação com ensaios experimentais, foi criada uma instalação experimental no Laboratório de Hidráulica do Instituto Superior Técnico, sendo apresentados os resultados de um dos ensaios efectuado e sua comparação com o modelo computacional.

Palavras Chave: Descarregador de Cheias em Canal, Escoamentos Transcríticos, Ondas Cruzadas, Ondas de Frente Abrupta, Modelos Computacionais Bidimensionais, Método de MacCormack TVD

1. INTRODUÇÃO

Na natureza ou em canais artificiais, os escoamentos permanentes com elevado número de Froude exibem propriedades específicas, em especial no que diz respeito à respectiva superfície livre. Com efeito, o comportamento do escoamento, face a singularidades espaciais ou a condições de fronteira não uniformes, é particularmente complexo atendendo a que a compatibilização hidrocinemática é realizada por perturbações na superfície livre, nomeadamente através de ondas estacionárias oblíquas à direcção principal do escoamento. Estas ondas, usualmente designadas por, *ondas cruzadas* no domínio das estruturas hidráulicas, podem provocar sobrelevações significativas junto às fronteiras do escoamento e distribuições de velocidades e de caudal diferentes das pretendidas. Este problema é particularmente importante na concepção e dimensionamento de canais descarregadores de cheias e em outras obras hidráulicas onde seja necessário determinar com rigor as alturas máximas atingidas.

As dificuldades existentes na análise deste tipo de escoamento, decorrentes da potencial formação de múltiplas perturbações, resultantes de reflexões e transmissões de ondas estacionárias, constituem um obstáculo à adopção, a nível de projecto, de soluções não convencionais e, porventura, mais económicas.

O modelo computacional desenvolvido, modelo DESCC, é um modelo bidimensional baseado nas equações de Saint-Venant e no método numérico de MacCormack TVD (Franco, 1996). Neste artigo são apresentados resultados de simulações efectuadas com o objectivo de validar o modelo desenvolvido através da comparação com uma solução clássica e com um resultado de modelo experimental. Uma descrição mais pormenorizada do modelo, bem como, comparação com outras soluções clássicas e resultados experimentais.

2. MODELO MATEMÁTICO E COMPUTACIONAL

2.1 - Equações de Saint-Venant

As equações utilizadas no modelo computacional são as equações de Saint-Venant escritas na forma da conservação (Richtmyer e Morton, 1967), adoptando as variáveis do escoamento $W = (h, uh, vh)^{T}$, onde h é a altura do escoamento, u é a componente da velocidade na direcção x, e v é a componente da velocidade na direcção y (Abbott, 1979):

 $W_t + E_x + F_v + S = 0$

(1)

Na equação (1) os índices t, x, e y indicam, respectivamente, as derivadas parciais em ordem ao tempo e às direcções x e y, e

$$E = \begin{bmatrix} u h \\ u^{2}h + \frac{1}{2}gh^{2} \\ u v h \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} v h \\ u v h \\ v^{2}h + \frac{1}{2}gh^{2} \end{bmatrix}, \quad S = \begin{bmatrix} 0 \\ -gh(i_{x} - J_{x}) \\ -gh(i_{y} - J_{y}) \end{bmatrix}$$
(2)

onde,

g - aceleração da gravidade;

 $i_x e i_y$ - declives do fundo nas direcções x e y, respectivamente;

6º SILUSBA – Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa

 $J_x e J_y$ - perdas de carga unitária nas direcções x e y, respectivamente.

As perdas de carga unitárias nas direcções x e y são calculadas, admitindo-se a hipótese do regime uniforme tangente, através da fórmula empírica de Manning-Strickler:

$$J_{x} = \frac{u\sqrt{u^{2} + v^{2}}}{K^{2}h^{1,33}}$$

$$J_{y} = \frac{v\sqrt{u^{2} + v^{2}}}{K^{2}h^{1,33}}$$
(3a)
(3b)

em que K é o coeficiente de Manning-Strickler.

Mantendo as condições de fronteira adequadas à solução do problema invariáveis no tempo, a resolução do sistema (1) permitirá a obtenção de soluções convergentes em regime permanente.

2.2 - Método numérico de MacCormack TVD

2.2.1 - Descrição do método

Para a resolução do sistema (1), o método de MacCormack foi aplicado no modelo bidimensional desenvolvido seguindo a metodologia empregue por Fennema (1985) e Fennema e Chaudhry (1990), de acordo com o seguinte conjunto de algoritmos:

Algoritmo de previsão (diferenças regressivas):

$$\begin{split} \widetilde{W}_{i,j}^{n+1} &= W_{i,j}^{n} - \frac{\Delta t}{\Delta x} \Big(E_{i,j}^{n} - E_{i-1,j}^{n} \Big) - \frac{\Delta t}{\Delta y} \Big(F_{i,j}^{n} - F_{i,j-1}^{n} \Big) - \Delta t \ S_{i,j}^{n} \end{split}$$

$$\begin{aligned} \text{válido para} \qquad \begin{cases} 2 \leq i \leq N \\ 2 \leq j \leq M \end{cases}$$

$$\end{split}$$

$$\end{split}$$

$$\end{split}$$

$$\end{split}$$

• Algoritmo de correcção (diferenças progressivas):

$$\widetilde{\widetilde{W}}_{i,j}^{n+1} = W_{i,j}^{n} - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(\widetilde{E}_{i,j+1}^{n+1} - \widetilde{E}_{i,j}^{n+1} \right) - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left(\widetilde{F}_{i+1,j}^{n+1} - \widetilde{F}_{i,j}^{n+1} \right) - \Delta t \ \widetilde{S}_{i,j}^{n+1}$$
(5)

 $\label{eq:valido para} \begin{array}{l} \left\{ \begin{aligned} 2 \leq i \leq N \\ 2 \leq j \leq M \end{aligned} \right.$

No final de cada passo de cálculo obtém-se,

$$W_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{2} \left(\widetilde{W}_{i,j}^{n+1} + \widetilde{\widetilde{W}}_{i,j}^{n+1} \right)$$
(6)

Nas equações atrás apresentadas, N e M são, respectivamente, o número de intervalos de cálculo espaciais na direcção x e y. Os valores das variáveis do escoamento são calculados através do vector **W** no final de cada

passo de cálculo:

$$h^{n+1} = h^{n+1}$$
 (7)

$$u^{n+1} = \frac{(uh)^{n+1}}{h^{n+1}}$$
(8)

$$\mathbf{v}^{n+1} = \frac{(\mathbf{v}\mathbf{h})^{n+1}}{\mathbf{h}^{n+1}} \tag{9}$$

A estabilidade do esquema numérico é determinada pela condição de Courant-Friedrichs-Lewy (C.F.L.) que, para escoamentos bidimensionais, segundo Dammuller, Bhallamudi e Chaudhry (1992), citando Roache (1972), pode ser dada por:

$$C_{n} = \frac{\left(\sqrt{u^{2}v^{2}} + \sqrt{gh}\right)\Delta t}{\Delta x \ \Delta y} \sqrt{\Delta x^{2} + \Delta y^{2}} \le 1$$
(10)

No presente caso admitiu-se $\rm C_n$ igual a 0,8, fazendo variar $\Delta t\,$ em cada passo de cálculo.

Devido à truncatura dos termos de terceira ordem, o método de MacCormack conduz a soluções com oscilações junto das descontinuidades, sem justificação física e comum aos métodos de segunda ordem, as quais podem dar origem a instabilidades com a consequente interrupção do processo de cálculo.

2.2.2 - Método MacCormack TVD

Para resolver os problemas numéricos referidos anteriormente, investigadores na área da mecânica dos gases desenvolveram os designados métodos de alta resolução ("High Resolution Methods") que têm, entre outras, as seguintes características gerais (Leveque, 1990):

- resolução correcta da descontinuidade sem provocar adoçamentos excessivos;
- ausência de oscilações espúrias;
- uma condição de entropia que permita garantir a convergência para a solução fraca que seja correcta sob o ponto de vista físico.

Os métodos designados Métodos de Variação Total Decrescente (TVD - "Total Variation Diminishing Methods") têm propriedades características dos métodos de alta resolução.

No modelo DESCC, é seguida a metodologia proposta por Franco (1996), que se baseou no trabalho desenvolvido por Alcrudo (1992).

A introdução do esquema TVD conduz à adição de dois termos adicionais de correcção na equação (6):

$$W_{i,j}^{n+1} = \underbrace{\frac{1}{2} \left(\widetilde{W}_{i,j}^{n+1} + \widetilde{\widetilde{W}}_{i,j}^{n+1} \right)}_{\text{equac}\tilde{a}o(6)} + \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(D_{i+1/2,j}^{n} - D_{i-1/2,j}^{n} \right) + \frac{\Delta t}{\Delta y} \left(D_{i,j+1/2}^{n} - D_{i,j-1/2}^{n} \right)$$
(11)

As expressões para o cálculo dos vectores **D**, nas quais estão presentes os termos referentes ao limitador de fluxo e ao coeficiente de correcção de entropia estão apresentadas em Franco (1996) e Gameiro (1997).

2.3 - Condições iniciais

A resolução numérica das equações do regime variável exige o conhecimento das condições iniciais, ou seja, o valor das variáveis dependentes em cada ponto da malha de cálculo (e.g, h, u e v), no instante inicial da simulação.

No modelo numérico desenvolvido foi adoptado para a condição inicial caudal constante no trecho a simular, calculando-se a curva de regolfo para a altura de água especificada na fronteira de montante.

2.4 - Condições de fronteira

No modelo DESCC são modelados dois tipos de fronteiras:

• fronteiras fechadas ou paredes sólidas;

• fronteiras abertas.

Nas fronteiras fechadas a velocidade normal à parede é anulada permitindo-se a existência de velocidade tangencial.

Nas fronteiras abertas, nos escoamentos em regime rápido, é necessário especificar três condições de fronteira a montante para modelos 2D e nenhuma condição a jusante.

No presente caso, para as fronteiras sólidas (paredes) adoptou-se o esquema de reflexão antissimétrica proposto por Fennema (1985), admitindo a condição de não aderência ("free-slip boundary"), podendo este tipo de modelação ser englobado na categoria de reflexão ou pontos imagem. Neste tipo de fronteira, a componente da velocidade paralela à parede não é anulada, só o sendo a componente normal. Nestas condições, a fronteira representa um plano de simetria do escoamento.

Com este tipo de condição fronteira, na qual são definidos pontos fictícios nos pontos da malha de cálculo exteriores ao domínio, o método de MacCormack torna-se aplicável nas fronteiras admitindo-se que a componente da velocidade normal à parede, no ponto fictício, é simétrica à existente no correspondente ponto de imagem no interior do domínio.

3. VALIDAÇÃO E EXPLORAÇÃO DO MODELO

3.1 - Validação com solução clássica - Anulação das ondas cruzadas

O critério de anulação dos efeitos das ondas cruzadas para jusante de uma transição convergente num canal, consiste em fazer coincidir a secção de encontro das ondas reflectidas com as paredes com a secção final da transição. Esta condição, sugerida por Ippen e Dawson (1951), e referida em Henderson (1966), Sturm (1985) e Hager e Bretz (1987), será válida para um determinado número de Froude do escoamento incidente.

Para avaliar a capacidade do modelo computacional, no apoio ao projecto de canais evacuadores de cheia, procedeu-se a um teste de anulação das perturbações para jusante de uma transição convergente linear e simétrica, esquematizada na Figura 1, com uma relação de contracção r = 1/3 e o número de Froude $F_r = 4$ para o escoamento incidente. Para este valor do número de Froude, a relação gráfica proposta por Sturm (1985) e a expressão proposta por Hager e Bretz (1987) são equivalentes e conduzem ao ângulo de convergência de $\theta = 14,32^{\circ}$.



Figura 1 - Anulação das ondas cruzadas a jusante de um convergente simétrico. Esquema do canal simulado (Gameiro, 1997)

A solução clássica para estas condições é a seguinte:

$$\frac{h_2}{h_1}$$
=2,193, $\frac{V_2}{V_1}$ =0,909

$$\frac{h_3}{h_2}$$
=1,757, $\frac{V_3}{V_2}$ =0,854

em que os índices 1, 2 e 3 se referem, respectivamente, aos valores do escoamento incidente, do escoamento a jusante da frente de onda gerada no início da transição e do escoamento no trecho do canal a jusante da convergência.

Na simulação efectuada, adoptaram-se para as condições do escoamento incidente os seguintes valores para a altura de água e velocidade:

h = 0,5 m , V = 8,85 m/s

Para a discretização da malha de cálculo, adoptaram-se os trechos de cálculo $\Delta x = 0,078$ m e $\Delta y = 0,020$ m, a que correspondem 111 × 151 nós de cálculo.

Na Figura 2 apresentam-se dois perfis longitudinais da superfície livre do escoamento simulado, segundo o eixo e junto da parede. Na mesma figura apresentam-se os resultados da solução clássica de referência.

A solução dada pelo modelo computacional junto das descontinuidades do escoamento é mais suave que a solução clássica, prevendo, no entanto, com grande precisão a altura do escoamento e a localização da descontinuidade.

Nas Figuras 3 e 4, apresentam-se, respectivamente, a superfície do escoamento obtida pelo modelo computacional e o campo de velocidades. Nestas figuras, pode-se observar que para jusante da descontinuidade o escoamento fica praticamente sem perturbações na superfície livre e tem uma distribuição transversal de velocidade muito próxima da uniforme.



Figura 2 - Anulação das ondas cruzadas a jusante de um convergente simétrico. Perfis longitudinais do escoamento segundo o eixo e junto da parede do canal (Gameiro, 1997)



Figura 3 - Anulação das ondas cruzadas a jusante de um convergente simétrico. Superfície livre do escoamento obtida pela simulação computacional, modelo DESCC (Gameiro, 1997)



Figura 4 - Anulação das ondas cruzadas a jusante de um convergente simétrico. Campo de velocidades obtido pela simulação computacional, modelo DESCC (Gameiro, 1997)

3.2 - Validação com ensaios experimentais

Para a validação experimental, montou-se uma instalação num canal existente no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico.

A instalação experimental é constituída, essencialmente, por um canal com um apoio articulado ao centro e suspenso nas duas extremidades (Figuras 5 e 6), que permite obter inclinações até cerca de 8° e, ainda, inclinações diferentes em cada metade do canal, sendo a alimentação efectuada a partir de um reservatório que é ligado ao canal através de uma tubagem de diâmetro D = 125 mm que termina num pequeno reservatório imediatamente a montante do canal.

O caudal é regulado por intermédio de uma válvula de cunha existente na tubagem de alimentação.

O canal tem um comprimento total de 5,0 m, largura de 0,3 m e as paredes têm de 0,3 m de altura. As paredes do canal, bem como o fundo, são em "perspex".

A jusante do canal o escoamento processa-se em queda livre para um canal de recepção no qual, após elementos colocados para tranquilização do escoamento, existe um descarregador "Bazin" com um hidrómetro a montante para medição do caudal escoado no canal, entrando depois a água no circuito de recirculação do Laboratório.

Para medição das alturas de água no canal foi utilizado um hidrómetro de ponta.

Para simular o convergente, utilizaram-se elementos em PVC colocadas no interior do canal (Figura 7) por forma a constituírem um convergente rectilíneo com o ângulo e comprimento desejados. O convergente estudado consiste na redução da largura do canal de 0,30 m para 0,15 m e tem um comprimento 1,0 m, formando um ângulo de aproximadamente 4° com o eixo do canal.



Figura 5 - Vista geral do canal

Dos ensaios realizados, seleccionou-se um, realizado para as seguintes condições:

- Caudal, Q = $14,9 \times 10^{-3}$ m³/s
- Altura de água a montante, h₁ = 0,020 m
- Velocidade a montante do convergente, V₁ = 2,48 m/s
- Froude, $F_r = 5,6$

Na simulação computacional considerou-se o início do trecho de canal a simular a uma distância de $4 \times \Delta x$ a montante do início do convergente (Figura 8), tendo o trecho a simular uma extensão total de cerca de 3,11 m. Para a discretização computacional, considerou-se uma malha de cálculo com 47 × 61 nós de cálculo, respectivamente, para as direcções x e y, a que corresponde trechos de cálculo de $\Delta x = 0,0676$ m e $\Delta y = 0,005$ m.



Figura 6 - Esquema do canal



Figura 7 - Canal experimental - Pormenor do convergente



1,0140 — extensão aproximada pela malha computacional (1,025) — extensão real

Figura 8 -Definição esquemática do domínio a simular

Para a caracterização dos resultados experimentais, efectuou-se o levantamento de quatro perfis transversais, em secções consideradas relevantes, sendo apresentada nas Figuras 9 e 10 a sua comparação com os resultados obtidos com o modelo computacional desenvolvido.

Durante a realização do ensaio experimental, foi ainda levantado um perfil longitudinal do escoamento ao longo de uma das paredes, sendo este apresentado na Figura 11, apresentandose também o resultado do modelo computacional.

Finalmente, na Figura 12 apresenta-se uma representação tridimensional da superfície do escoamento e na Figura 13 uma representação vectorial do campo de velocidades como

resultado do modelo computacional. Na Figura 12 utilizou-se uma sobreelevação de 2,5 vezes na altura do escoamento relativamente às dimensões em planta, para uma melhor visualização das ondas cruzadas.





Figura 9 - Ensaio: Perfis transversais do escoamento - comparação de resultados (Gameiro, 1997)

- a) distância ao início do convergente de 0,6 m
- b) distância ao início do convergente de 1,025 m





Figura 10 - Ensaio: Perfis transversais do escoamento - comparação de resultados (Gameiro, 1997)

- a) distância ao início do convergente de 1,55 m
- b) distância ao início do convergente de 2,025 m



Figura 11 - Ensaio: Perfil longitudinal do escoamento junto da parede - comparação de resultados (Gameiro, 1997)



Figura 12 - Ensaio: Superfície livre do escoamento - modelo DESCC (altura sobreelevada 2,5 vezes) (Gameiro, 1997)



Figura 13 - Ensaio: Campo de velocidades - modelo DESCC (Gameiro, 1997)

4. CONCLUSÕES

Dos testes efectuados para validação do modelo computacional desenvolvido, com base em soluções clássicas de paredes convergentes em canais e em ensaios experimentais publicados na literatura, pode concluir-se que o modelo tem capacidade para modelar escoamentos rápidos em canais não uniformes com ondas cruzadas provocadas por transições lineares, simulando, com bastante precisão, as alturas máximas junto das paredes laterais.

No caso da solução clássica do convergente, em que computacionalmente se simulou a resistência ao escoamento com um valor bastante elevado para o coeficiente de Manning-Strickler (K = 2 000 m^{1/3} s⁻¹), sem significado físico, e um declive de i = 1×10^{-5} , o qual em termos práticos pode ser considerado nulo, estando por tal cumpridas as hipóteses consideradas no estabelecimento das equações, pode observar-se na Figura 6 que a superfície livre simulada corresponde praticamente à que se obtém por recurso às equações das ondas transversais oblíquas, havendo unicamente alguma discrepância na vizinhança da frente onda, dando o modelo computacional uma solução mais suave. No entanto, no presente modelo, verifica-se que a introdução do esquema de alta resolução do tipo TVD elimina as oscilações junto da descontinuidade e que o modelo converge rapidamente para a solução analítica.

A exploração do modelo computacional permitiu concluir que, para manter a estabilidade da solução junto das fronteiras sólidas (paredes) nas zonas de transição linear, é necessário que a relação entre os trechos de cálculo nas duas direcções, x e y, obedeça à seguinte relação:

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \tan \theta$$

em que θ é o ângulo de deflexão da parede medido em relação à direcção principal do escoamento e que coincide com o eixo do canal (eixo x).

Confirmou-se a capacidade de convergência para o regime permanente através das necessárias aproximações no domínio do tempo.

O modelo computacional DESCC revelou ter capacidade adequada para modelar situações diversas com rigor suficiente para aplicação a casos práticos de engenharia, nomeadamente a canais com transições lineares de largura, podendo substituir, em alguns casos, o recurso a modelos físicos.

A exploração do modelo veio confirmar a conclusão, evidenciada na literatura técnica recente, de que as equações de Saint-Venant escritas na forma da conservação resolvidas através do método numérico de MacCormack TVD demonstra capacidade para simular escoamentos com descontinuidades hidráulicas, como sejam ondas de frente abrupta e ressaltos hidráulicos.

Os modelos computacionais bidimensionais para simulação de escoamentos em descarregadores de cheias, se bem que não substituam, na generalidade dos casos, a utilização de modelos físicos, podem ser utilizados numa primeira fase do dimensionamento e constituem,

seguramente, uma clara alternativa à utilização de soluções clássicas e a modelos computacionais unidimensionais, os quais não têm em conta a bidimensionalidade existente neste tipo de escoamento e não podem reproduzir adequadamente a realidade.

BIBLIOGRAFIA

- ABBOTT, M. B. (1979), "Computational hydraulics; elements of the free surface flow", Pitman Publishing Limited, London, England.
- ALCRUDO, F. (1992), "Esquemas de alta resolution de variacion total decresciente para el estudio de flujos discontinuos de superficie libre", Tese submetida para obtenção do grau de Doutor, Universidade de Zaragoza, Faculdade de Ciências, Zaragoza.
- BHALLAMUDI, S. M. e CHAUDHRY, M. H. (1992), "Computation of flows in open-channel transitions", Journal of Hydraulic Research, IAHR, 30 (1), 77-93.
- DAMMULLER, D. C.; BHALLAMUDI, S. M. e CHAUDHRY, M. H. (1989), "Modelling of unsteady flow in curved channel", Journal of the Hydraulic Division, ASCE, 115 (11), 1479-1495.
- FENNEMA, R. J. (1985), "Numerical solution of two-dimensional transient free-surface flows", Ph.D. Thesis, Washington State University, Washington.
- FENNEMA, R. J. e CHAUDHRY, M. H. (1990), "*Explicit methods for 2-D transient free-surface flows*", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 116 (8), 1013-1034.
- FRANCO, A. B. (1996), "Modelação computacional e experimental de escoamentos provocados por roturas de barragens", Tese de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- GAMEIRO, P. L. (1997), "Modelo computacional para simulação de ondas estacionárias de frente abrupta em descarregadores de cheias", Dissertação de Mestrado, IST, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- HAGER, W. H. e BRETZ, N. V. (1987), Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 113(3), 422-424, Discussão de STURM, T. W. (1985), "Simplified design of contractions in supercritical flow", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 111(5), 871-875.
- HENDERSON, F. M. (1966), "Open channel flow", The MacMillan, New York.
- IPPEN, A. T. e DAWSON, J. H. (1951), "Design of channel contraction", Trans. ASCE, 116, 326-349.
- LEVEQUE, R. J. (1990), "Numerical methods for conservation laws", Birkhäuser-Verlag, Basel.
- RICHTMYER, R. D. e MORTON, K. W. (1967), "*Difference methods for initial value problems*", 2nd Ed., Interscience Publishers, New York.
- ROACHE, P. J. (1972), "Computational fluid dynamics", Hermosa Publishers, Albuquerque, N.M..
- STURM, T. W. (1985), "Simplified design of contractions in supercritical flow", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 111 (5), 871-875.