

MODELAGEM MATEMÁTICA BIDIMENSIONAL DO ESCOAMENTO EM CONFLUÊNCIAS DE CANAIS

José Alfredo Carneiro dos Santos¹; Márcio Benedito Baptista¹;
Márcia Maria Lara Pinto Coelho¹ & Flávio César Borba Mascarenhas²

Resumo - O dimensionamento, ou até mesmo o estudo, de uma confluência de canais nem sempre é uma tarefa fácil para o engenheiro hidráulico. Inúmeras são as incertezas no que se refere aos fenômenos físicos que ocorrem quando os escoamentos de dois ou mais canais se misturam e são confinados em um único canal a jusante. Quando o escoamento nos canais ocorre no regime fluvial (subcrítico) e em alguns casos onde o regime torrencial (supercrítico) ocorre em um ou mais canais que formam a confluência, a utilização de modelos analíticos tem sido a ferramenta adotada, apesar das simplificações e/ou restrições impostas pelos mesmos. O emprego de modelos reduzidos para o estudo de um caso particular pode se tornar uma alternativa atraente, mas de alto custo, demandando ainda prazos significativos. Assim, este estudo apresenta subsídios para a simulação do escoamento através de uma confluência de canais com o software *AquaDyn*, que utiliza o Método dos Elementos Finitos para a solução das equações de Saint-Venant em sua forma bidimensional. Como produto da pesquisa, sugerem-se valores a serem utilizados como viscosidade artificial de forma que os resultados obtidos nas simulações representem melhor o escoamento através de confluências de canais.

Abstract - Channel junctions design and even its study is not always an easy task for hydraulic engineers. A large number of unknown physical phenomena occurs when mixing the flow of two or more channels into another channel downstream. Eventually, when the flow is subcritical and also in some cases where the flow is supercritical in one or another channel of the junction, the analytical models have been used even knowing the restrictions and the simplifications in respect to the adopted model. The use of physical models built in laboratory could be an attractive alternative but the costs are extremely heights. Hence, this research used the AquaDyn software to simulate the flow through an open channel junction. This software uses the Finite Elements Method to solve the

¹ Universidade Federal de Minas Gerais – Av. Contorno, 842 – 8º andar – CEP 30.110-060 – Tel.: 0xx 31 3238.1871, Fax: 0xx 31 3238.1001 – e-mail: alfredo@carneiro.eng.br

² Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE – Cidade Universitária – Centro de Tecnologia, Bloco C – Laboratório de Hidráulica Computacional – Ilha do Fundão – CEP: 21.945-970 - e-mail: flavio@hidro.ufjf.br

bidimensional form of the Saint-Venant equations. The final product of the research is the presentation of a value to be used as the artificial viscosity parameter which leads to the most accurate solution.

Palavras-chave - confluências; modelos matemáticos; elementos finitos.

INTRODUÇÃO

As confluências são estruturas hidráulicas destinadas a receber as vazões de dois ou mais canais e conduzi-las para um canal de jusante, como pode ser visto na Figura 1. Podem ocorrer naturalmente em sistemas fluviais ou artificialmente em sistemas de esgoto, abastecimento d'água e irrigação e, por fim, em sistemas de drenagem urbana, onde as conseqüências de um projeto subdimensionado podem se tornar catastróficas.

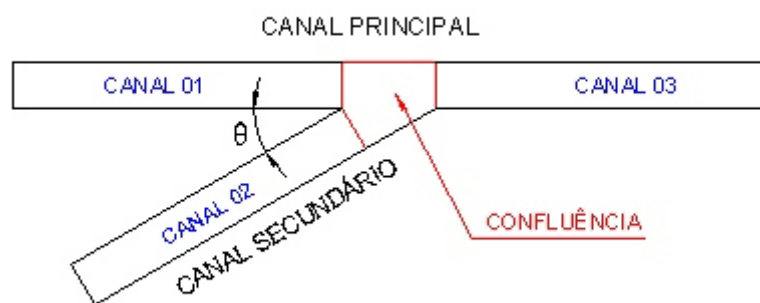


Figura 1 – Croquis de uma confluência entre dois canais

De todas as situações artificiais de ocorrência de confluências, é na drenagem urbana que as conseqüências de um projeto subdimensionado são mais observadas, em função do transtorno provocado nos centros urbanos. Como toda estrutura hidráulica, as confluências, dependendo dos parâmetros utilizados em seu projeto podem, no caso de superdimensionamento, ter o custo da obra majorado e, no caso de subdimensionamento, vir a provocar danos nas estruturas próximas, assim como inundações nas áreas adjacentes.

Assim sendo, a comunidade científica, vem procurando desenvolver modelos matemáticos que possam descrever com a maior fidelidade possível, as características do escoamento em uma confluência. Taylor (1942) foi o pioneiro, e conseguiu, através da investigação experimental, desenvolver um modelo matemático empírico e analítico para descrever o escoamento em confluências. O escoamento a montante da confluência, tanto no canal principal como no canal

secundário, assim como a jusante do canal principal, era sempre subcrítico. Diversos outros pesquisadores contribuíram para o enriquecimento deste modelo proposto, dando ênfase a uma ou outra característica a que estão sujeitas as confluências. Por exemplo, Modi *et al.* (1981) estudaram o comportamento do escoamento em confluências em função do ângulo de entrada do canal secundário, Biron *et al.* (1996) estudaram os efeitos, sobre o escoamento, da discordância do fundo do canal secundário no encontro com o canal principal, Hager (1989) estudou a elevação da profundidade do escoamento a jusante da confluência em função do acréscimo lateral da vazão escoada pelo canal secundário e Best e Reid (1984) pesquisaram a zona de separação em confluências.

Poucos cientistas, no entanto, estudaram o escoamento em confluências através de modelos numéricos. Mesmo porque, trata-se de uma ferramenta relativamente recente. Garcia-Navarro e Savirón (1992) estudaram o escoamento não permanente em confluências, utilizando o Método das Características. No que diz respeito ao Método das Diferenças Finitas – MEF –, este apresenta dificuldades ligadas a introdução das condições de contorno quando a geometria do caso estudado não possibilita a sua discretização em pontos nodais que formam células quadradas. Shetar e Murthy (1996) resolveram as equações de escoamento bidimensional com profundidade média através do Método de Volumes Finitos. Mais recentemente, Khan *et al.* (2000) estudaram o escoamento em confluências utilizando o modelo CCHE2D baseado no MEF e que foi originalmente desenvolvido para simular grandes extensões de rios.

Assim, tendo em vista as incertezas dos modelos unidimensionais para descrever as diversas configurações passíveis de ocorrer no projeto de uma confluência, este estudo propõe a verificação do interesse pragmático da utilização de modelos numéricos bidimensionais no seu estudo. Efetuou-se, então, a calibração e a validação de um modelo numérico bidimensional comercial para representar o escoamento subcrítico em uma confluência do tipo apresentado na Figura 1, integralmente sujeita à pressão atmosférica.

São apresentados os dados obtidos através da utilização do software Aquadyn, específico para a simulação do escoamento em canais abertos, baseado nas equações de Saint-Venant, utilizando o Método dos Elementos Finitos, com a ponderação de Galerkin e malha de elementos isoparamétricos triangulares quadráticos. Para a calibração do modelo em estudo foi utilizada a viscosidade artificial.

METODOLOGIA

O Método dos Elementos Finitos

O MEF resume-se no equacionamento do problema físico de forma que se consigam colocar

as variáveis em um sistema de equações da forma (Stasa, 1985):

$$K \cdot a = f$$

onde, K é a matriz de rigidez do elemento, a o vetor de incógnitas do elemento e f o vetor de forças nodais do elemento. A denominação destas variáveis, no entanto, é mais conveniente para o campo de Estruturas, que é a área de domínio do autor. Na pesquisa em questão, as variáveis deverão ser entendidas, de acordo com Taylor e Hughes (1981), como:

K = Matriz do fluido do elemento

a = vetor de incógnitas do elemento

f = vetor de forças nodais do elemento

O método mais comumente utilizado para se escrever as equações diferenciais que caracterizam o problema físico em estudo, ou seja, o escoamento em canais abertos, na forma matricial sugerida acima, é a *Aproximação através dos Resíduos Ponderados de Galerkin* (Stasa, 1985 e ZienKiewicz e Taylor, 2000), ou seja: dada uma função $f[T(x)] = 0$ num domínio Ω com condições de contorno Γ , deve-se definir $T(x)$ de modo que $f[T(x)] = 0$. Assim, escolhe-se uma função $T'(x; a_1, a_2, \dots, a_n) \approx T(x)$. Do método dos Resíduos Ponderados tira-se que $T'(x) = \Psi + \sum a_i N_i$, onde a função ψ deve satisfazer as condições de contorno. Percebe-se, então, que $f[T'(x; a_1, a_2, \dots, a_n)] = \mathfrak{R}$, onde \mathfrak{R} é o resíduo que aparece em função da aproximação. Para minimizar este resíduo pelo Método dos Resíduos Ponderados, faz-se:

$$\int_{\Omega} W_i \cdot \mathfrak{R} \cdot d\Omega = 0$$

onde W_i são funções de peso. Galerkin recomenda que se faça $W_i = N_i$.

No método dos elementos finitos, as funções N_i são conhecidas como as funções de forma do elemento. Assim, torna-se necessária a definição do elemento que deverá ser utilizado. Esta escolha, por sua vez, deve ser criteriosa e de acordo com o problema a ser estudado. No caso de escoamento bidimensional em confluências, podem-se utilizar elementos triangulares ou retangulares (Stasa, 1985). O software escolhido neste estudo utiliza elementos triangulares isoparamétricos de 6 nós para as equações de conservação de momento e elementos triangulares isoparamétricos de 3 nós para as equações de conservação de massa, como sugere Taylor e Hughes (1981).

Após a definição do elemento a ser utilizado, as funções de forma referentes a cada nó, de cada elemento, deverão ser estabelecidas para que se possa dar início à modelagem matemática do problema físico.

O produto da modelagem matemática do escoamento de fluidos sujeitos à pressão atmosférica, através do MEF, é um sistema de equações não lineares. A convergência deste sistema não é simples e pode demorar a ser alcançada se os valores atribuídos às variáveis iniciais (condições iniciais) não estiverem próximos da solução. Mesmo assim, a instabilidade numérica é acentuada, ou seja, os valores do vetor de incógnitas (vetor de solução) do problema ficam variando em torno da solução sem, no entanto, adquirirem uma tendência de convergência para alcançar a solução do sistema de equações. Para melhorar esta convergência, minimizando as instabilidades numéricas, utiliza-se uma constante que, multiplicada em um dos termos das equações, faz com que a solução do sistema seja alcançada com mais objetividade. No caso das Equações de Saint-Venant aplica-se esta constante à viscosidade cinemática do fluido, denominando-a, então, Viscosidade Artificial.

O Modelo Reduzido de Confluência

Para a efetiva validação dos resultados obtidos nas simulações, este trabalho baseou-se nos dados observados em um modelo reduzido de confluência – Figura 2, construído no laboratório do Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH) da Escola de Engenharia da UFMG. Conforme descrito em Coelho (2003), através da observação do escoamento no modelo e da instalação de dispositivos para a medição da profundidade do escoamento em pontos previamente definidos, dados concernentes a diversas condições de escoamento foram obtidos. Destes dados, apenas aqueles referentes ao escoamento fluvial serão aproveitados no presente trabalho.

Assim, no contexto desta pesquisa, estão sendo estudados 3 casos distintos, todos com seção transversal, nos dois canais, retangular:

- **Caso 1:** Canal principal e canal secundário com 30 cm de largura, declividade do fundo do canal igual a 0,14%, ângulo da confluência igual a 30° e coeficiente de Manning igual a 0,009;
- **Caso 2:** Canal principal com 30 cm de largura, canal secundário com 16 cm de largura, declividade do fundo do canal igual a 0,14%, ângulo da confluência igual a 30° e coeficiente de Manning igual a 0,009; e,
- **Caso 3:** Canal principal e canal secundário com 30 cm de largura, declividade do fundo do canal igual a 0,14%, ângulo da confluência igual a 60° e coeficiente de Manning igual a 0,009.



Figura 2 – Fotografia do modelo reduzido de confluência, construído no laboratório do CPH - EEUFMG.

O Software *AquaDyn*

O software escolhido para a presente investigação foi o *AquaDyn* da *Hydrosoft Energy Inc.* Este software utiliza o Método dos Elementos Finitos para a solução das equações de Saint-Venant e sua formulação matemática contempla elementos triangulares quadráticos e isoparamétricos, significando que os três lados do triângulo não são, necessariamente, retos. Ou seja, eles podem se ajustar melhor aos contornos do problema físico. Para a minimização do resíduo provocado pela função de forma utilizada, o Método dos Resíduos Ponderados de Galerkin é utilizado.

O modelo matemático é baseado nas equações de Saint-Venant mostradas abaixo e disponibiliza, como parâmetros de calibração para a solução das mesmas, a viscosidade artificial e o coeficiente de turbulência.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial H}{\partial x} + gU \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 h} - \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t \frac{\partial U}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t \frac{\partial U}{\partial y} \right) = F_x$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - fU + g \frac{\partial H}{\partial y} + gV \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 h} - \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t \frac{\partial V}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t \frac{\partial V}{\partial y} \right) = F_y$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU}{\partial x} + \frac{\partial hV}{\partial y} = 0$$

onde,

- H Cota da lâmina d'água
- h Profundidade do escoamento
- Z Cota do fundo do canal
- U,V Componentes da velocidade
- C Coeficiente de Chézy

- f Coeficiente de Coriolis
g Aceleração da gravidade
 ν_t Viscosidade cinemática total
 F_x, F_y Componentes da força do vento

sendo:

$$\nu_t = \nu + \gamma A \sqrt{2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right)^2}$$

e,

- ν Viscosidade artificial
A Área do elemento triangular
 γ Coeficiente de turbulência

Modelagem da confluência para o Caso 1

Na figura 3 apresenta-se a malha de elementos finitos utilizada para validação e calibração do modelo construído no software AquaDyn para o Caso 1 de confluências. Ela foi construída a partir dos pontos de medição de profundidade utilizados nos trabalhos experimentais, apresentados na Figura 4.

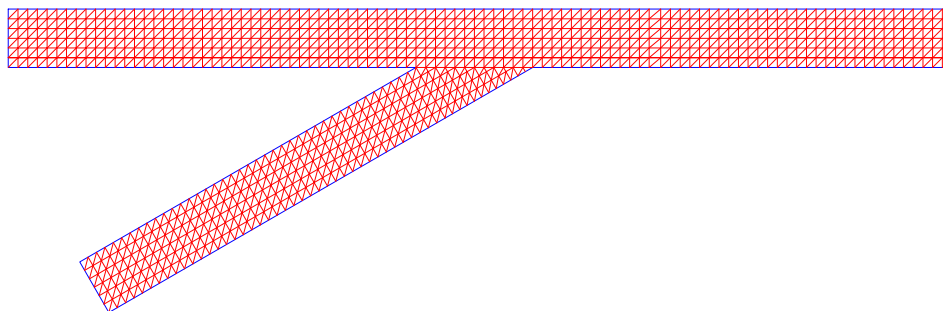


Figura 3 – Malha de elementos finitos para o Caso 1

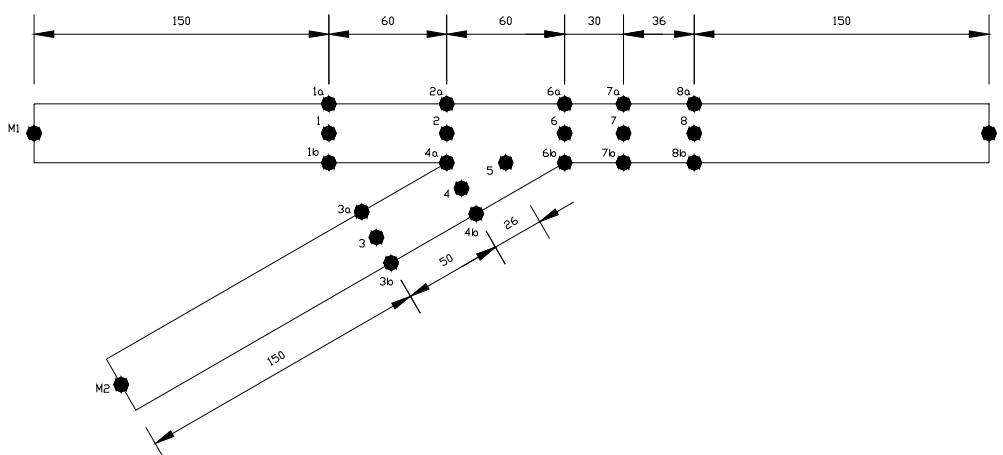


Figura 4 – Pontos de instalação dos piezômetros na confluência do Caso 1

A malha de elementos finitos gerada automaticamente pelo software não possuía nós coincidentes com os pontos onde foram instalados os piezômetros no modelo reduzido, forçando o estabelecimento manual da malha de elementos finitos mostrada anteriormente.

Por fim, os dados observados no modelo reduzido estão listados na tabela 1, que mostra valores obtidos em nove configurações de escoamento distintas e denominadas de teste 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92 e 93.

Tabela 1 – Dados observados no modelo reduzido do CPH para o caso 1.

Teste	Vazões (l/s)			Profundidades (cm)																							
	Q ₁	Q ₂	Q ₃	1	1a	1b	2	2a	3	3a	3b	4	4a	4b	5	6	6a	6b	7	7a	7b	8	8a	8b	J	M1	M2
85	5,0	10,1	15,1	10,1	10,2	10,2	10,2	10,3	9,9	10,0	10,3	10,0	10,2	10,1	9,9	8,7	9,2	7,9	8,6	8,7	8,4	8,3	8,0	8,5	8,5	9,6	9,7
86	5,0	14,9	19,8	11,8	11,9	11,9	12,0	12,1	11,7	11,3	12,0	11,8	11,8	11,9	11,6	10,2	11,0	9,3	10,0	10,1	10,5	9,9	10,2	10,1	10,1	11,5	11,4
87	5,1	5,4	10,4	8,0	8,0	7,9	8,1	8,2	7,8	7,9	8,1	7,9	8,0	8,0	7,9	6,9	7,3	6,3	6,7	6,9	6,9	6,7	6,7	6,7	6,9	7,6	7,7
88	9,9	5,3	15,3	10,0	10,1	10,1	10,1	10,3	9,8	9,9	10,2	9,9	10,1	10,1	9,9	8,6	9,2	8,0	8,5	8,8	8,5	8,3	8,0	8,5	8,6	9,6	9,8
89	9,9	14,9	24,8	14,0	14,1	14,2	14,2	14,3	13,9	14,0	14,2	14,0	14,1	14,1	13,7	11,9	12,7	11,1	11,7	11,5	12,7	11,5	12,1	12,0	11,6	13,6	13,6
90	10,0	10,1	20,0	12,2	12,4	12,4	12,3	12,4	12,0	12,2	12,4	12,1	12,3	12,3	12,0	10,3	11,1	9,8	10,3	10,4	10,2	10,4	10,7	10,0	10,2	11,8	11,9
91	14,9	9,8	24,7	13,8	14,1	14,2	14,0	14,2	13,8	13,9	14,1	14,0	14,0	14,0	13,7	11,8	12,6	11,3	11,6	11,6	12,0	11,4	11,7	11,5	11,5	13,4	13,7
92	14,9	14,9	29,8	15,7	16,0	16,1	16,0	16,1	15,6	15,8	16,0	15,9	15,9	15,9	15,5	13,4	14,4	12,7	13,0	12,7	14,2	12,7	12,3	13,2	13,0	15,4	15,5
93	15,1	5,3	20,4	11,8	12,0	12,1	11,9	12,1	11,7	11,8	12,0	11,8	11,8	11,9	11,7	10,3	11,0	9,8	10,1	10,3	10,0	9,8	10,7	10,1	10,1	11,4	11,6

Após algumas simulações, as condições de contorno que forneceram melhores resultados foram a vazão nos pontos M1 e M2 (a montante dos canais 1 e 2) e a profundidade do escoamento no ponto J (a jusante do canal 3). Como condições iniciais de profundidade e velocidade, foram utilizados os seguintes valores:

Profundidade nos canais 1, 2 e 3: 7,70 cm

Componente *u* da Velocidade nos Canais 1 e 3: 0,2208 m/s

Componente v da Velocidade nos Canais 1 e 3: 0,0 m/s
 Componente u da Velocidade no Canal 2: 0,2051 m/s
 Componente v da Velocidade no Canal 2: 0,1184 m/s

Para a calibração do modelo foi utilizado o Teste 85 conduzido por Coelho (2003), em seus experimentos. Foram executadas 10 simulações variando-se o valor da Viscosidade Artificial. O Critério de Nash, correspondente ao somatório da razão entre os quadrados das diferenças entre os valores medidos e observados, foi escolhido para a análise da aderência entre os dados da simulados e observados no modelo reduzido. Para o valor de Viscosidade Artificial igual a 0,02 m²/s obteve-se o índice de 0,926 (quanto mais perto de 1 melhor a aderência).

Os testes de número 86 a 93 foram simulados com o valor da Viscosidade Artificial igual a 0,02 m²/s, obtendo-se os seguintes índices, de acordo com o critério de Nash:

Tabela 2 – Valores do índice de Nash para as simulações (Caso 1)

Teste	Q1 (l/s)	Q2 (l/s)	Yj (cm)	Nr. Foude			Nash %
				Canal 1	Canal 2	Canal 3	
86	5.0	14.9	10.1	0.1	0.4	0.7	85.0
87	5.1	5.4	6.9	0.2	0.3	0.6	95.1
88	9.9	5.3	8.6	0.3	0.2	0.7	94.0
89	9.9	14.9	11.6	0.2	0.3	0.6	85.2
90	10.0	10.1	10.2	0.2	0.3	0.6	92.4
91	14.9	9.8	11.5	0.3	0.2	0.7	91.9
92	14.9	14.9	13.0	0.2	0.3	0.7	89.5
93	15.1	5.3	10.1	0.4	0.1	0.7	89.0

Deve ser aqui ressaltado que os valores de Fr nos canais 1, 2 e 3, citados nas Tabelas 2, 4 e 6, referem-se, respectivamente, aos pontos de medição números 1, 3 e 8.

Modelagem da confluência para o Caso 2

Na figura 5 apresenta-se o croquis da confluência utilizada para validação e calibração do modelo construído no software AquaDyn, para o Caso 2. Ela foi construída a partir dos pontos de medição de profundidade utilizados nos trabalhos experimentais, apresentados na Figura 6.

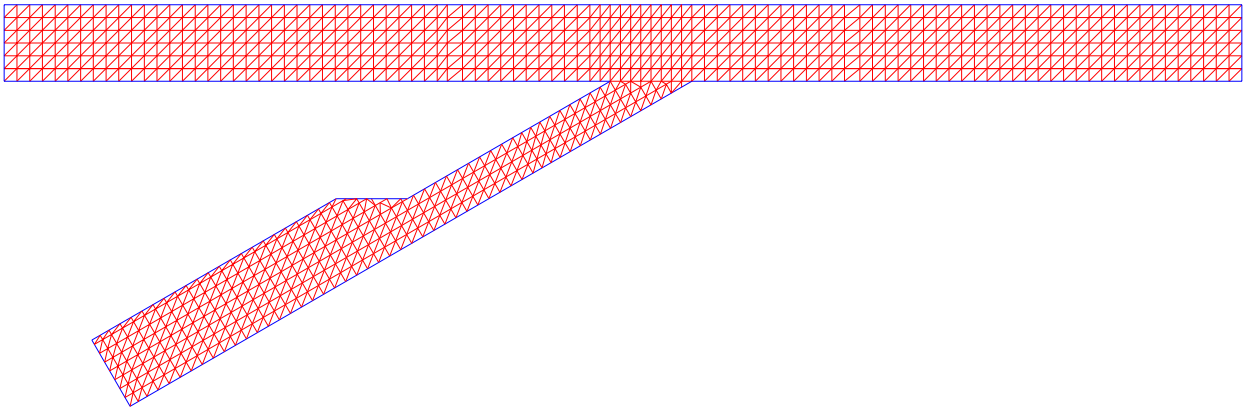


Figura 5 – Malha de elementos finitos para o Caso 2

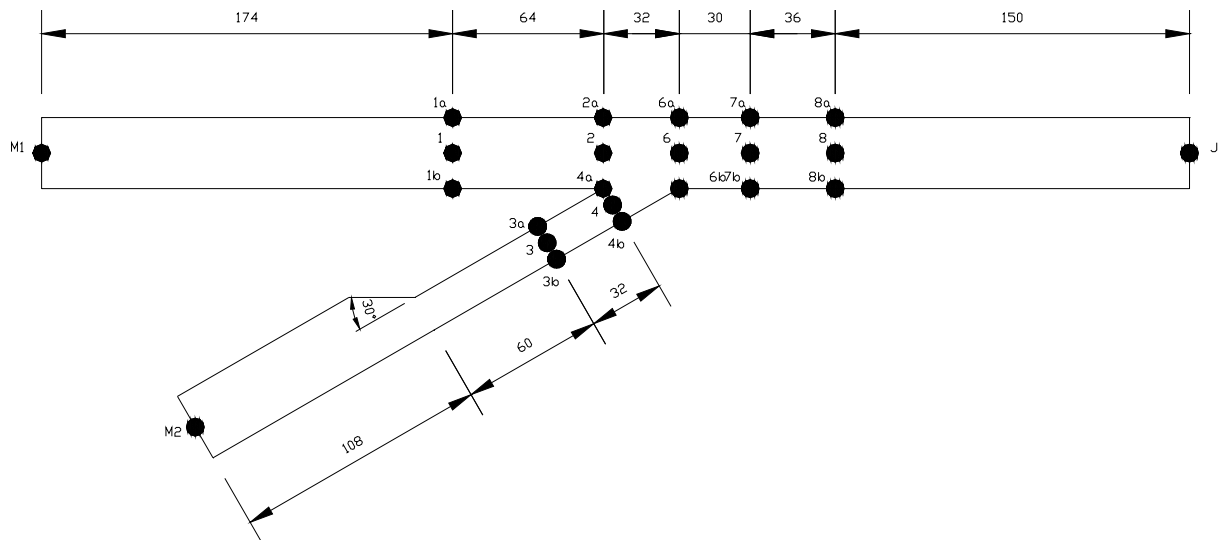


Figura 6 – Pontos de instalação dos piezômetros na confluência do Caso 2

Assim como no Caso 1, a malha de elementos finitos gerada automaticamente pelo software não possuía nós coincidentes com os pontos onde foram instalados os piezômetros no modelo reduzido, forçando o estabelecimento manual da malha de elementos finitos mostrada anteriormente.

Os dados observados no modelo reduzido estão listados na tabela 3, que mostra valores obtidos em nove configurações de escoamento distintas e denominadas de teste 76 a 84.

Tabela 3 – Dados observados no modelo reduzido do CPH para o caso 2.

Teste	Vazões (l/s)			Profundidades (cm)																						
	Q ₁	Q ₂	Q ₃	1	1a	1b	2	2a	3	3a	3b	4	4a	4b	6	6a	6b	7	7a	7b	8	8a	8b	y _j	M1	M2
76	5.0	5.5	10.4	7.6	7.6	7.6	7.7	7.8	8.5	7.8	7.6	7.6	7.7	7.6	6.8	7.2	6.6	6.7	6.7	6.7	6.6	6.6	6.5	7.0	7.2	7.7
77	5.0	8.1	13.1	8.8	8.8	8.9	8.9	8.9	9.8	8.8	9.0	8.8	9.0	8.7	7.9	8.4	7.8	7.7	7.5	7.6	7.9	7.8	7.8	8.4	8.4	10.3
78	5.1	2.7	7.7	6.5	6.6	6.6	6.5	6.7	7.4	6.6	6.4	6.6	6.6	6.4	5.8	6.2	5.9	5.8	5.8	5.8	5.7	5.8	5.8	6.1	6.2	5.9
79	9.9	8.2	18.1	11.3	11.2	11.2	11.2	11.3	12.1	11.4	11.4	11.2	11.4	11.3	9.9	10.3	10.0	9.7	9.6	9.8	9.6	9.6	9.7	9.9	10.8	12.0
80	9.9	2.8	12.7	8.7	8.8	8.8	8.7	8.8	9.6	8.9	8.8	8.8	8.9	8.7	7.7	8.1	7.9	7.7	7.8	7.7	7.6	7.0	7.4	8.0	8.4	8.0
81	10.0	5.4	15.4	9.9	10.0	10.1	9.9	10.1	10.9	10.1	10.1	10.0	10.1	9.9	8.7	9.2	8.7	8.7	8.9	8.5	8.4	8.1	8.5	8.8	9.5	9.6
82	14.9	8.1	23.0	13.0	13.2	13.1	12.9	13.2	13.9	13.2	13.1	13.0	13.2	13.1	11.3	12.0	11.5	11.1	10.8	11.6	11.0	11.2	11.5	11.2	12.5	13.2
83	14.9	5.4	20.3	11.7	11.8	11.7	11.7	11.9	12.7	12.0	11.9	11.8	11.9	11.8	10.3	10.9	10.4	10.2	10.3	10.1	10.0	10.7	9.8	10.4	11.2	11.5
84	15.0	2.8	17.8	10.5	10.6	10.7	10.5	10.7	11.4	10.7	10.5	10.6	10.6	10.5	9.4	10.0	9.5	9.4	9.6	9.3	9.2	9.9	8.8	9.5	10.0	9.8

Nas simulações do escoamento na confluência do Caso 2, utilizaram-se as mesmas condições de contorno estabelecidas para o caso 1, ou seja, a vazão nos pontos M1 e M2 (a montante dos canais 1 e 2) e a profundidade do escoamento no ponto J (a jusante do canal 3). Como condições iniciais de profundidade e velocidade, os seguintes valores foram adotados: definidos como *default* pelo software:

- Profundidade nos canais 1, 2 e 3: 1,00 m
- Componente *u* da Velocidade nos Canais 1 e 3: 0,0 m/s
- Componente *v* da Velocidade nos Canais 1 e 3: 0,0 m/s
- Componente *u* da Velocidade no Canal 2: 0,0 m/s
- Componente *v* da Velocidade no Canal 2: 0,0 m/s

Na validação deste modelo, com base no teste 76, o valor da viscosidade artificial igual a 0,02 m²/s fez com que o índice de Nash caísse para 0,46. Assim, depois de nova calibração, o melhor índice de Nash conseguido foi o de 0,70, para um valor de Viscosidade Artificial igual a 0,012.

Os testes de número 77 a 84 foram, então, simulados com o valor da Viscosidade Artificial igual a 0,012 m²/s, obtendo-se os seguintes índices, de acordo com o critério de Nash:

Tabela 4 – Valores do índice de Nash para as simulações (Caso 02)

Teste	Q1 (l/s)	Q2 (l/s)	Yj (cm)	Nr. Foude			Nash %
				Canal 1	Canal 2	Canal 3	
77	5.0	14.9	10.1	0.2	0.5	0.6	34.6
78	5.1	5.4	6.9	0.3	0.3	0.6	71.0
79	9.9	5.3	8.6	0.3	0.4	0.6	71.6
80	9.9	14.9	11.6	0.4	0.2	0.7	72.0
81	10.0	10.1	10.2	0.3	0.3	0.7	81.7
82	14.9	9.8	11.5	0.3	0.3	0.6	70.9
83	14.9	14.9	13.0	0.4	0.2	0.7	80.4
84	15.1	5.3	10.1	0.5	0.2	0.7	64.8

O teste 77, que apresentou valor do critério de Nash bastante reduzido, deverá ser devidamente analisado com vistas a exploração das causas da distorção.

Modelagem da confluência para o Caso 3

Na figura 7 apresenta-se o croquis da confluência utilizada para validação e calibração do modelo construído no software AquaDyn, para o Caso 3. Ela foi construída a partir dos pontos de medição de profundidade utilizados nos trabalhos experimentais, apresentados na Figura 8.

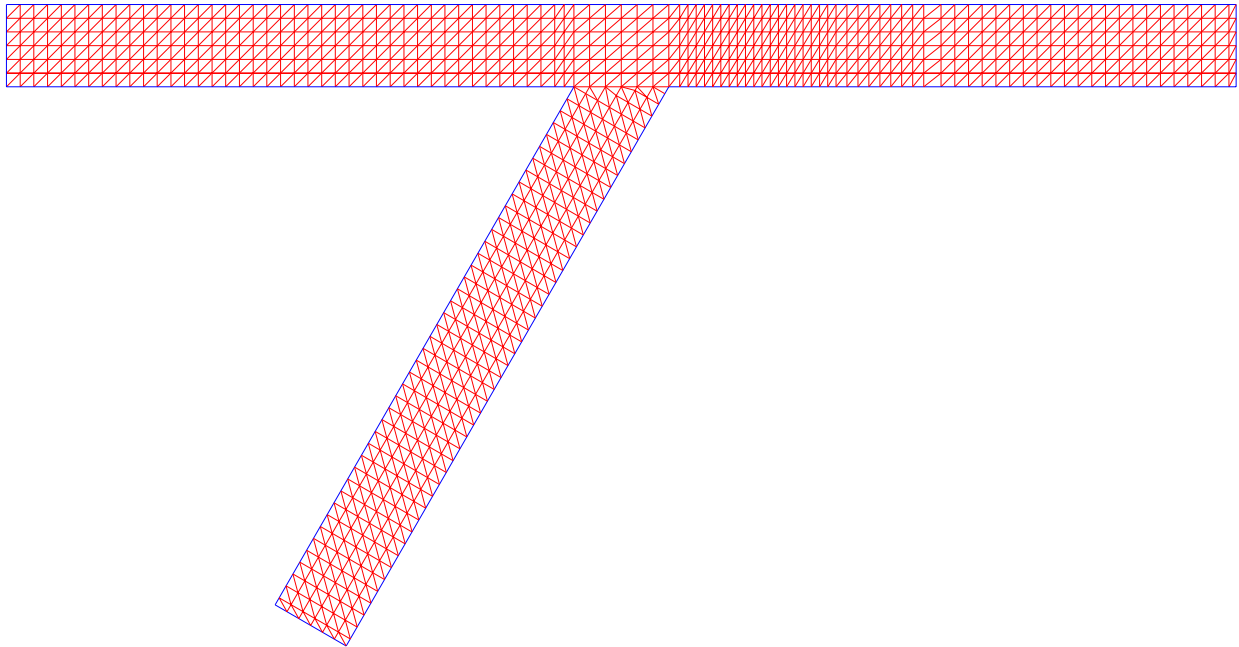


Figura 7 – Malha de elementos finitos para o Caso 3

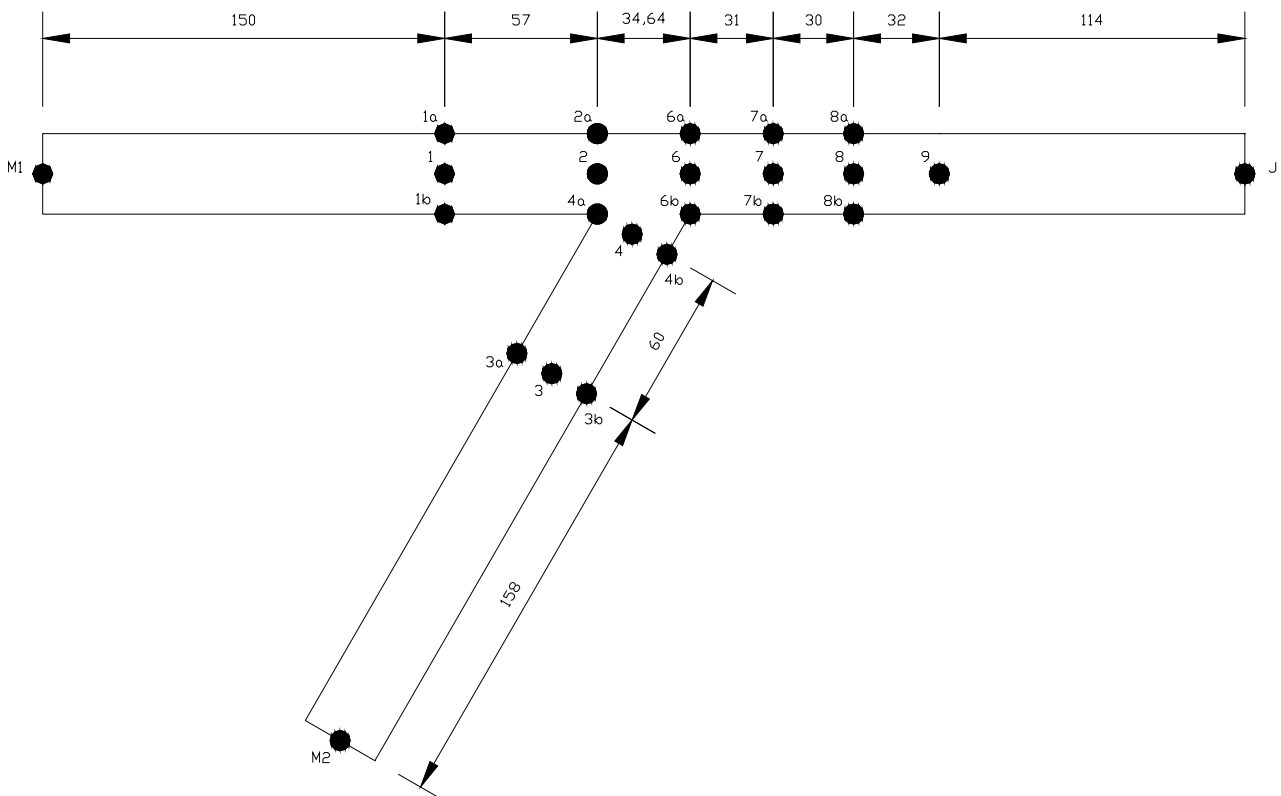


Figura 8 – Pontos de instalação dos piezômetros na confluência do Caso 3

Como nos casos anteriores, a malha de elementos finitos gerada automaticamente pelo software não possuía nós coincidentes com os pontos onde foram instalado os piezômetros no modelo reduzido, forçando o estabelecimento manual da malha de elementos finitos mostrada anteriormente.

Os dados observados no modelo reduzido, para o Caso 3, estão listados na tabela 5, que mostra os valores obtidos em nove configurações de escoamento distintas e denominadas de teste 44 a 52.

Tabela 5 – Dados observados no modelo reduzido do CPH para o caso 3.

Teste	Vazões (l/s)			Profundidades (cm)																							
	Q ₁	Q ₂	Q ₃	1	1a	1b	2	2a	3	3a	3b	4	4a	4b	6	6a	6b	7	7a	7b	8	8a	8b	9	y _j		
44	5,1	4,9	10,0	8,0	8,2	8,2	7,9	8,2	7,2	7,6	7,3	7,6	8,2	7,7	6,9	6,9	6,4	6,5	6,8	6,2	6,5	6,6	5,2	6,3	6,8		
45	5,1	9,9	15,0	10,7	10,7	10,4	10,4	10,8	9,2	10,0	9,9	10,1	10,8	10,2	9,0	9,5	9,2	8,2	7,8	9,0	8,3	8,0	8,3	8,2	8,6		
46	5,1	14,8	19,9	12,4	12,7	12,8	12,4	12,8	11,8	11,8	11,6	12,2	12,5	12,0	10,7	11,7	9,2	9,3	8,8	9,2	10,2	9,7	9,9	10,1	10,0		
47	10,0	4,9	15,0	10,0	10,2	10,2	9,7	10,2	9,3	9,6	9,5	9,6	10,1	9,7	8,5	8,3	8,6	8,4	8,3	8,2	8,3	8,7	8,2	8,1	8,3		
48	10,1	9,9	20,0	12,5	12,7	12,7	12,3	12,7	11,9	12,2	12,0	12,1	12,7	12,2	10,6	11,2	10,7	9,7	9,2	10,2	10,0	9,4	10,2	9,9	10,0		
49	10,1	14,8	24,9	14,4	14,6	14,6	14,4	14,5	13,8	13,9	13,9	14,0	14,5	14,0	12,4	13,3	12,0	10,8	10,4	11,2	11,5	11,2	11,5	11,5	11,4		
50	15,1	4,9	20,0	11,8	12,1	12,2	11,6	12,1	11,2	11,6	11,4	11,6	12,0	11,7	10,8	10,7	10,7	10,0	10,2	10,2	9,8	9,5	10,0	9,6	10,0		
51	15,1	9,9	25,0	14,4	14,6	14,6	14,1	14,6	13,7	13,9	14,0	14,0	14,6	14,2	12,2	12,7	13,0	11,2	10,5	11,7	11,5	11,2	11,7	11,5	11,6		
52	15,1	14,8	29,9	16,0	16,3	16,5	16,2	16,2	15,7	15,7	15,6	16,0	16,4	15,6	14,0	14,7	13,7	12,3	11,6	13,5	12,8	12,5	12,7	12,8	12,7		

Nas simulações do escoamento na confluência do Caso 3, as condições de contorno foram as mesmas que a dos casos anteriores e, como condições iniciais, foram adotados os mesmos valores adotados para o Caso 3, ou seja:

- Profundidade nos canais 1, 2 e 3: 1,00 m
- Componente *u* da Velocidade nos Canais 1 e 3: 0,0 m/s
- Componente *v* da Velocidade nos Canais 1 e 3: 0,0 m/s
- Componente *u* da Velocidade no Canal 2: 0,0 m/s
- Componente *v* da Velocidade no Canal 2: 0,0 m/s

Na validação deste modelo, o valor da Viscosidade Artificial igual a 0,02 m²/s levou a um índice de Nash igual a 0,55. O valor de 0,012 m²/s, utilizado no caso 2, conduziu a um índice igual a 0,70. Calibrando-se o modelo com base no teste 44, o melhor valor para a Viscosidade Artificial, no entanto, foi igual a 0,008 m²/s, que resultou em um índice de Nash igual a 0,71, praticamente idêntico ao valor obtido no caso 2.

Os testes de número 45 a 52 foram, então, simulados com o valor da Viscosidade Artificial igual a 0,008 m²/s, obtendo-se os seguintes índices, de acordo com o critério de Nash:

Tabela 6 – Valores do índice de Nash para as simulações (Caso 03)

Teste	Q1 (l/s)	Q2 (l/s)	Yj (cm)	Nr. Foude			Nash %
				Canal 1	Canal 2	Canal 3	
45	5.1	9.9	8.6	0.2	0.3	0.7	58.1
46	5.1	14.8	10.0	0.1	0.4	0.7	81.9
47	10.0	4.9	8.3	0.3	0.2	0.7	77.6
48	10.1	9.9	10.0	0.2	0.3	0.7	75.0
49	10.1	14.8	11.4	0.2	0.3	0.7	72.8
50	15.1	4.9	10.0	0.4	0.1	0.7	75.4
51	15.1	9.9	11.6	0.3	0.2	0.7	70.6
52	15.1	14.8	12.7	0.2	0.3	0.7	70.8

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho evidenciou a possibilidade da utilização do MEF, no contexto do software AQUADYN, na descrição do escoamento em confluências de canais, subsidiando as atividades práticas de projeto e dimensionamento de confluências de canais.

De forma global, as características do escoamento foram bem representadas, refletindo-se em valores de critério de Nash satisfatórios. A princípio, os valores obtidos podem ser melhorados com o confinamento dos limites da malha nos pontos de medição e com o seu à confluência propriamente dita.

Outro aspecto importante diz respeito à viscosidade artificial utilizada no software. Os estudos efetuados permitem identificar o intervalo 0,01 a 0,02 m²/s como adequado em aplicações práticas. Entretanto, tendo em vista a elevada sensibilidade do modelo aos valores deste parâmetro, o intervalo deverá ser melhor afinado, ainda no contexto do prosseguimento da presente pesquisa.

O desenvolvimento de modelo específico, não integrante de pacote computacional, utilizando elementos finitos de maior precisão e centrado nas equações, mais gerais, de Navier-Stokes, deve conduzir a resultados ainda mais satisfatórios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEST, J. L.; REID, I. Separation Zone at Open-Channel Junctions. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 11, pp. 1588-1594, 1984
- BIRON, P; Best, L. J.; Roy, A. G. Effects of Bed Discordance on Flow Dynamics at Open Channel Confluences. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 12, pp. 676-682, 1996
- COELHO, M. M. L. P. Comportamento hidráulico em confluência de canais: uma abordagem conceitual e experimental. *Tese de Doutorado apresentada à USP*, 2003, 273 p.

- GARCIA-NAVARRO, M. P.; Savirón, J. M. Numerical Simulation of Unsteady Flow at Open Channel Junctions. *Journal of Hydraulics Research*, IAHR, Vol. 30, No. 5, pp. 595-609, 1992
- HAGER, W. H. Transitional Flow in Channel Junctions. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 2, pp. 243-259, 1989
- KHAN, A. A.; CADAVID, R.; WANG, S. S. Y. Simulation of Channel Confluence and Bifurcation Using the CCHE2D Model. *Journal of Water, Maritime and Energy*, The Institution of Civil Engineers, IAHR, Vol. 142, No. 2, pp. 97-102, 2000
- MODI, P. N.; Ariel, P. D.; Dandekar, M. M. Conformal Mapping for Channel Junction Flow. *Journal of the Hydraulics Division*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ASCE, Vol. 107, No. HY12, pp 1713-1733, 1981
- SHETTAR, A. S.; MURTHY, K. K. A Numerical Study of Division of Flow in Open Channels, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 34, No. 5, pp 651-675, 1996
- STASA, F. L. *Applied Finite Element Analysis for Engineers*. Harcourt Brace Jovanovich, Inc, 1985
- TAYLOR, C.; HUGHES, T. G. *Finite Element Programming of the Navier-Stokes Equations*. Pineridge Press Swansea, 1981
- TAYLOR, E. H. Flow Characteristics at Rectangular Open-Channel Junctions. *Transactions ASCE*. Paper No. 2223, pp. 893-912, 1942
- ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. *The Finite Element Method, Volume 1, The Basis, Volume 3, Fluid Dynamics* Butterworth-Heinemann, 2000