

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Raquel Polenz Wielewicki**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA SINUOSIDADE SOBRE O  
ESCOAMENTO EM RIOS COM PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO  
UTILIZANDO SIMULAÇÃO NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL**

Porto Alegre  
dezembro 2014

**RAQUEL POLENZ WIELEWICKI**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA SINUOSIDADE SOBRE O  
ESCOAMENTO EM RIOS COM PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO  
UTILIZANDO SIMULAÇÃO NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL**

Trabalho de Diplomação a ser apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientadora: Edith Beatriz Camaño Schettini**  
**Coorientador: Leonardo Romero Monteiro**

Porto Alegre  
dezembro 2014

**RAQUEL POLENZ WIELEWICKI**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA SINUOSIDADE SOBRE O  
ESCOAMENTO EM RIOS COM PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO  
UTILIZANDO SIMULAÇÃO NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Professora Orientadora e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2014

Profa. Edith Beatriz Camaño Schettini  
Dra. pelo Institut National  
Polytechnique de Grenoble  
Orientadora

Leonardo Romero Monteiro  
Msc. pelo IPH/UFRGS  
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt  
Dra. pelo PPGA/UFRGS  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Profa. Edith Beatriz Camaño Schettini**  
**UFRGS**  
Dra. pelo Institut National Polytechnique de  
Grenoble

**Leonardo Romero Monteiro**  
**UFRGS**  
Msc. pelo IPH/UFRGS

**Profa. Daniela Guzzon Sanagiotto**  
**UFRGS**  
Dra. pela UFRGS

**Prof. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva**  
**UFRGS**  
Dr. pela UFRGS

Dedico este trabalho à minha irmã Alice, pela alegria contagiante, mesmo distante, em cada aprendizado diário.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Professora Edith Beatriz Camaño Schettini, orientadora deste trabalho, pela sua dedicação e disponibilidade, imprescindíveis para a realização deste trabalho, e pela oportunidade de tamanho aprendizado.

Agradeço ao meu coorientador, Leonardo Romero Monteiro, pela enorme dedicação ao longo do desenvolvimento deste trabalho e pela paciência em todos os momentos de orientação.

Agradeço à Professora Carin Schmitt pela enorme dedicação no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a meus pais, Angélica e Hamilton, pelo apoio em todas as etapas da minha vida, e por sempre me incentivarem a seguir meus sonhos.

Agradeço ao meu irmão Fernando por ser sempre tão presente e atencioso.

Agradeço às minhas amigas por compreenderem a minha ausência quando necessário e por não deixarem eu estudar em excesso.

Não podemos nos banhar duas vezes no mesmo rio porque  
as águas se renovam a cada instante.

*Heráclito*

## RESUMO

O extravasamento das águas do leito de um rio em regime fluvial é uma consequência natural do ciclo hidrológico, com forte interação entre os fluxos do leito principal e da planície de inundação. Este trabalho tem por objetivo caracterizar o escoamento de rios com planície de inundação em situações com e sem extravasamento, para diferentes sinuosidades do canal principal e níveis de água, por meio de simulação numérica tridimensional, utilizando o *software* OpenFOAM. As análises foram realizadas para três diferentes sinuosidades do leito principal: canal retilíneo, canal com sinuosidade suave e severa. Para cada um destes casos, foram estabelecidos três níveis de água: o primeiro caso sem extravasamento e dois com extravasamento. Encontrou-se que nos resultados das simulações dos canais retilíneos existe pouca variação do nível da água, e não ocorre interação significativa entre o fluxo no canal principal e na planície de inundação. Verificou-se que a presença de meandros no canal exerce grande influência no comportamento do escoamento. Para canais sem planície de inundação, ocorre variação no nível da água, com inclinação da lâmina da água, e alteração na distribuição de velocidades. Estas mesmas mudanças são encontradas nos canais com planície de inundação com pequena altura da lâmina de água. Com o aumento do nível do escoamento sobre a planície de inundação, diminui a influência da sinuosidade sobre o fluxo de água. Nos canais sinuosos com planície de inundação foi observado o desenvolvimento de fluxo secundário em espiral ao longo da curva. Verificou-se ainda o movimento preferencial da água por caminhos mais curtos, com menor perda de energia.

Palavras-chave: Simulação Numérica Tridimensional. Planície de Inundação.  
Canal Sinuoso.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Planície de inundação do rio Nilo .....	15
Figura 2 – Representação esquemática do delineamento da pesquisa .....	18
Figura 3 – Parâmetros geométricos da seção transversal e da curva do canal .....	24
Figura 4 – Fluxo em espiral em um canal .....	26
Figura 5 – Planície de inundação .....	27
Figura 6 – Principais interações entre o fluxo na planície de inundação e o fluxo no canal principal .....	30
Figura 7 – Vista superior dos canais estudados .....	43
Figura 8 – Seção transversal dos canais estudados .....	44
Figura 9 – Malhas utilizadas nas simulações .....	46
Figura 10 – Lâmina da água na seção transversal dos canais sem inundação (H = 1,5 m) .....	48
Figura 11 – Módulo da velocidade da água na seção transversal dos canais sem inundação (H = 1,5 m) .....	49
Figura 12 – Vetores de velocidades tridimensionais da água na seção transversal dos canais sem inundação (H = 1,5 m) .....	50
Figura 13 – Linhas de corrente nos canais sem inundação (H = 1,5 m) .....	51
Figura 14 – Lâmina da água na seção transversal dos canais com pequeno nível de água (H = 1,7 m) .....	52
Figura 15 – Módulo da velocidade da água na seção transversal dos canais com pequeno nível de água (H = 1,7 m) .....	54
Figura 16 – Módulo da velocidade da água na seção transversal dos canais sinuosos com pequeno nível de água (H = 1,7 m) .....	55
Figura 17 – Vetores de velocidades tridimensionais na seção transversal dos canais com pequeno nível de água (H = 1,7 m) .....	56
Figura 18 – Linhas de corrente nos canais com pequeno nível de água (H = 1,7 m) .....	57
Figura 19 – Lâmina da água na seção transversal dos canais com grande nível de água (H = 2,5 m) .....	59
Figura 20 – Módulo da velocidade da água na seção transversal dos canais com grande nível de água (H = 2,5 m) .....	60
Figura 21 – Módulo da velocidade da água na seção transversal dos canais sinuosos com grande nível de água (H = 2,5 m) .....	61
Figura 22 – Vetores de velocidades tridimensionais na seção transversal dos canais com grande nível de água (H = 2,5 m) .....	62
Figura 23 – Linhas de corrente nos canais com grande nível de água (H = 2,5 m) .....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros geométricos dos canais estudados .....	42
--	----

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Casos simulados ..... 44

## **LISTA DE SIGLAS**

CFD – Computational Fluid Dynamics = Dinâmica dos Fluidos Computacional

DNS – Direct Numerical Simulation = Simulação Numérica Direta

IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

LES – Large Eddy Simulation = Simulação de Larga Escala

RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes = Navier-Stokes com Média de Reynolds

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C$  – constante de circulação em um movimento de vórtice livre ( $s^{-1}$ )

$F$  – fração do volume da célula ocupado pelo fluido (adimensional)

$Fr$  – número de Froude (adimensional)

$g$  – aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

$H$  – profundidade do escoamento (m)

$h$  – altura do canal principal (m)

$h_{rel}$  – altura relativa do canal composto (adimensional)

$I$  – inclinação do canal (m/m)

$\vec{i}$  – vetor unitário na direção x

$\vec{j}$  – vetor unitário na direção y

$k$  – energia cinética turbulenta ( $m^2/s^2$ )

$\vec{k}$  – vetor unitário na direção z

$L_C$  – extensão do canal principal (m)

$L_D$  – comprimento do domínio (m)

$n$  – coeficiente de rugosidade de Manning (adimensional)

$P$  – pressão (Pa)

$r_o$  – raio externo da curva (m)

$r_i$  – raio interno da curva (m)

$R_h$  – raio hidráulico (m)

$Re$  – número de Reynolds (adimensional)

$S$  – sinuosidade (adimensional)

$t$  – tempo (s)

$u$  – componente da velocidade na direção  $x$  (m/s)

$v$  – componente da velocidade na direção  $y$  (m/s)

$V$  – velocidade (m/s)

$w$  – componente da velocidade na direção  $z$  (m/s)

$x$  – coordenada cartesiana (m)

$y$  – coordenada cartesiana (m)

$z$  – coordenada cartesiana (m)

$\beta$  – parâmetro adimensional

$f_e$  – forças externas (N)

$\mu$  – viscosidade dinâmica (kg/m/s)

$\nu$  – viscosidade cinemática (m<sup>2</sup>/s)

$\nu_t$  – viscosidade turbulenta cinemática (m<sup>2</sup>/s)

$\rho$  – massa específica do fluido (kg/m<sup>3</sup>)

$\tau$  – tensão de cisalhamento (N/m<sup>2</sup>)

$\tau_{ij}^R$  – tensão de Reynolds (N/m<sup>2</sup>)

$\omega$  – taxa de dissipação específica (s<sup>-1</sup>)

$\zeta$  – vorticidade (s<sup>-1</sup>)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA</b> .....	17
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	17
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	17
<b>2.2.1 Objetivo Principal</b> .....	17
<b>2.2.2 Objetivos Secundários</b> .....	17
2.3 PRESSUPOSTO .....	17
2.4 DELIMITAÇÕES .....	18
2.5 LIMITAÇÕES .....	18
2.6 DELINEAMENTO .....	18
<b>3 ESCOAMENTO EM CANAIS ABERTOS</b> .....	20
3.1 CLASSIFICAÇÃO DO ESCOAMENTO EM CANAIS ABERTOS .....	20
3.2 EQUAÇÕES GOVERNANTES .....	21
3.2 SINUOSIDADE .....	23
<b>3.2.1 Sobre-elevação da linha de água</b> .....	24
<b>3.2.2 Fluxo em espiral</b> .....	25
<b>4 ESCOAMENTO EM PLANÍCIES DE INUNDAÇÃO</b> .....	27
4.1 FLUXO SECUNDÁRIO .....	27
4.2 TENSÃO DE CISALHAMENTO.....	28
4.3 VORTICIDADE .....	28
4.4 INTERAÇÃO ENTRE OS FLUXOS NO CANAL PRINCIPAL E NA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO .....	29
4.5 MODELAGEM COMPUTACIONAL DE RIOS COM PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO.....	32
<b>4.5.1 Modelagem unidimensional</b> .....	32
<b>4.5.2 Modelagem bidimensional</b> .....	33
<b>4.5.3 Modelagem tridimensional</b> .....	33
<b>5 METODOLOGIA NUMÉRICA</b> .....	34
5.1 CÁLCULO DO ESCOAMENTO.....	34
<b>5.1.1 Equações governantes</b> .....	34
<b>5.1.2 Representação espacial</b> .....	34
<b>5.1.3 Representação da turbulência</b> .....	36
5.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO E INICIAIS.....	38

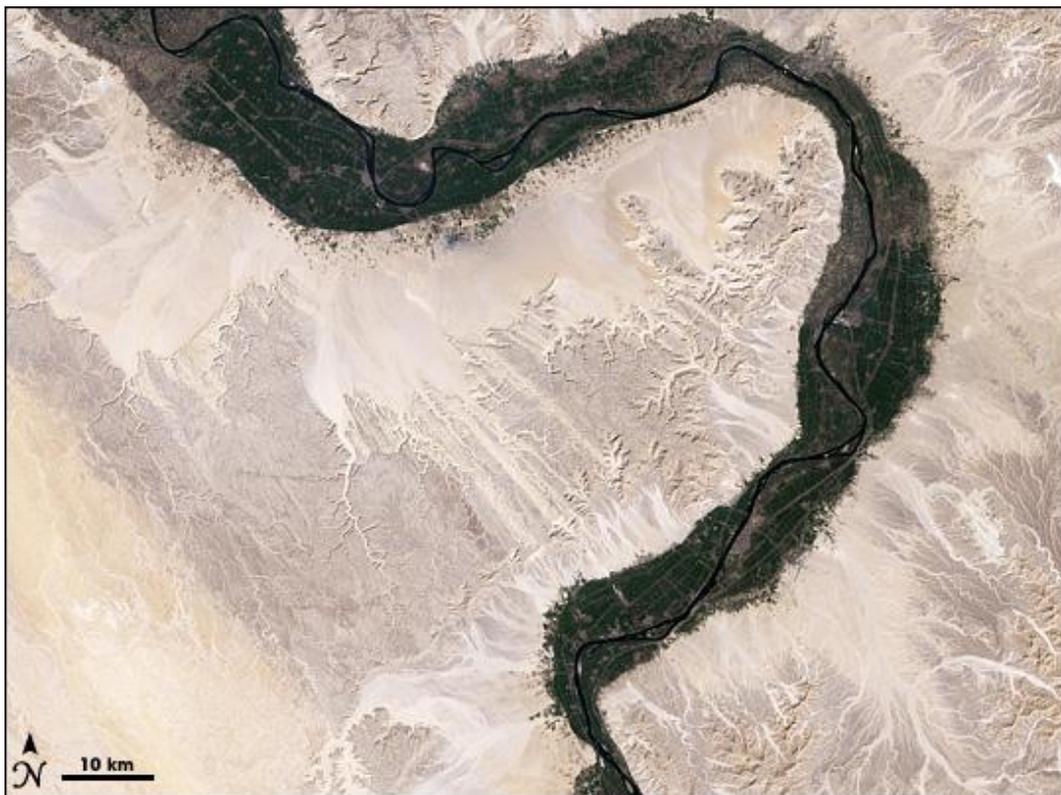
5.3 ESTABILIDADE E CONSISTÊNCIA .....	39
<b>5.3.1 Estabilidade</b> .....	39
<b>5.3.2 Convergência</b> .....	39
5.4 <i>SOFTWARE</i> OPENFOAM .....	40
<b>5.4.1 Solver interFoam</b> .....	40
<b>5.4.3 Representação da turbulência</b> .....	41
<b>6 APLICAÇÕES E RESULTADOS</b> .....	42
6.1 CASOS ESTUDADOS .....	42
<b>6.1.1 Condições de contorno e iniciais</b> .....	45
<b>6.1.2 Representação espacial e temporal</b> .....	45
6.2 CANAL SEM INUNDAÇÃO .....	47
<b>6.2.1 Nível da água</b> .....	47
<b>6.2.2 Velocidade</b> .....	48
6.3 CANAL COM PEQUENO NÍVEL DE ÁGUA .....	52
<b>6.3.1 Nível da água</b> .....	52
<b>6.3.2 Velocidade</b> .....	53
6.4 CANAL COM GRANDE NÍVEL DE ÁGUA .....	58
<b>6.4.1 Nível da água</b> .....	58
<b>6.4.2 Velocidade</b> .....	59
6.5 CONCLUSÕES .....	64
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	66



## 1 INTRODUÇÃO

Os leitos dos rios comportam o fluxo de água da vazão normal e de algumas descargas maiores que ocorrem frequentemente. A passagem de vazões maiores faz, muitas vezes, que as águas extravasem o seu leito natural e ocupem as regiões adjacentes, aumentando a área de escoamento. Esta área ocupada quando as águas saem do leito menor é chamada de planície de inundação. A figura 1 mostra a extensão desta região: o fino traço preto existente é o leito natural do rio Nilo e a área escura é a planície de inundação. A ocupação das planícies pelas águas de cheia é uma consequência natural do regime hidrológico da bacia e as planícies de inundação são uma parte importante do sistema fluvial (KNIGHT; SHIONO, c1996).

Figura 1 – Planície de inundação do rio Nilo



(fonte: NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, 2000)

Segundo Tucci (2007), quando a planície é ocupada e as inundações causam prejuízos socioeconômicos à população, há impacto significativo na sociedade. As planícies de

inundação são áreas propícias à ocupação por serem planas e baixas, especialmente em regiões de relevo acidentado. O crescimento da urbanização e da agricultura causa perda da cobertura natural das planícies, o que por sua vez pode aumentar a frequência de ocorrência das inundações e o dano socioeconômico.

É muito difícil eliminar os impactos causados pelas inundações devido aos altos custos das obras e a falta de conhecimento para prever com precisão a ocorrência de chuvas de grande intensidade. Desta forma, a gestão das inundações é feita através da minimização dos impactos (TUCCI, 2007). Compreender como ocorre o fluxo nas planícies pode contribuir, de modo significativo, para a proposição, elaboração e implementação de medidas mitigadoras.

O presente estudo busca analisar o comportamento do escoamento em rios com planícies de inundação, quando existe extravasamento do leito principal. Foi estudado, utilizando simulação numérica, a influência que a sinuosidade do canal principal exerce sobre a dinâmica da inundação.

Inicialmente, no capítulo 2, são apresentadas as diretrizes para o desenvolvimento do trabalho. No terceiro capítulo é apresentada uma revisão sobre escoamento em canais abertos. São estudadas as classificações do escoamento, as equações que governam o movimento e a sinuosidade do canal. Completando a pesquisa bibliográfica, o capítulo 4 versa sobre o fluxo de água nas planícies de inundação e alguns aspectos importantes sobre modelagem computacional.

Após a pesquisa bibliográfica, é apresentada a metodologia numérica e o software utilizado no capítulo 5. As aplicações e os resultados obtidos são expostos no sexto capítulo, enquanto as considerações finais são apresentadas no sétimo capítulo.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

As diretrizes para o desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa do trabalho é: qual é a influência da sinuosidade do leito no escoamento das vazões de cheia em rios com planície de inundação?

### **2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

#### **2.2.1 Objetivo principal**

O objetivo principal do trabalho é a análise do comportamento do escoamento em rios com planície de inundação para diferentes sinuosidades do leito principal.

#### **2.2.2 Objetivos secundários**

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) apresentação da simulação do escoamento sem extravasamento;
- b) apresentação da simulação do escoamento em canal retilíneo.

### **2.3 PRESSUPOSTO**

O trabalho tem por pressuposto que podem ser realizadas simulações numéricas com o *software* OpenFOAM com boa aproximação do escoamento real para os casos estudados.

## 2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo do escoamento em canais regulares, sem rugosidade, desenvolvido por simulação numérica no *software* OpenFOAM.

## 2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

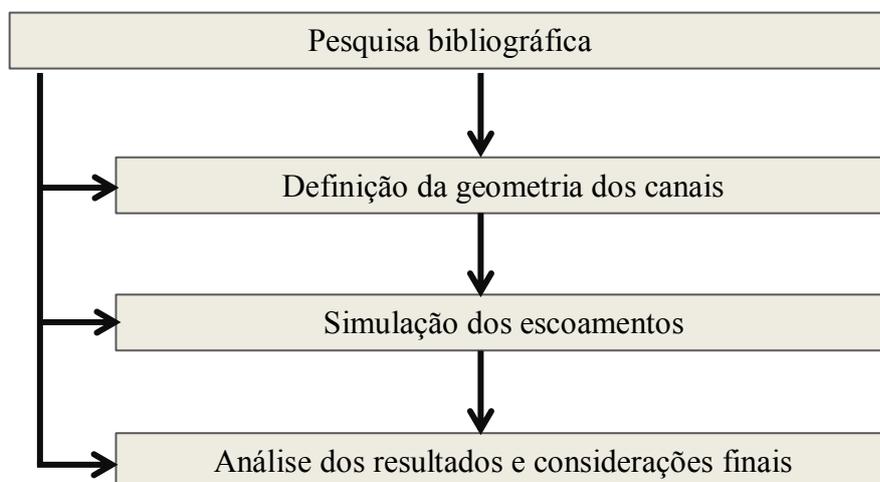
- a) a análise do escoamento permanente e uniforme no canal principal e na planície de inundação;
- b) canal principal com seção transversal trapezoidal;
- c) canal sem rugosidade.

## 2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado por meio das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 2, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) definição da geometria dos canais;
- c) simulação dos escoamentos;
- e) análise dos resultados e considerações finais.

Figura 2 – Representação esquemática do delineamento da pesquisa



(fonte: elaborada pela autora)

Inicialmente, foi realizada a pesquisa bibliográfica para obter informações que auxiliem no desenvolvimento do trabalho. Foram estudados três pontos principais: escoamentos em canais abertos, escoamento em planícies de inundação e simulação numérica. Essa etapa foi desenvolvida ao longo de todo o trabalho de pesquisa.

Posteriormente foi feita a definição da geometria dos rios utilizados para as simulações. Nesta etapa foram definidos parâmetros e características que descrevem o canal, como seção transversal, inclinação do leito, comprimento do canal e sinuosidade.

Após a definição dos parâmetros geométricos foram realizadas as simulações para diferentes sinuosidades do canal principal. Essas simulações foram feitas com três geometrias diferentes, um canal retilíneo, um com meandros suaves e outro com meandros severos.

Na etapa de análise dos resultados e considerações finais foram analisadas as simulações dos escoamentos com as diferentes sinuosidades e comparadas com o escoamento em canal retilíneo para poder entender a influência que a sinuosidade do leito principal exerce sobre o escoamento, para diferentes níveis de água.

### 3 ESCOAMENTO EM CANAIS ABERTOS

O escoamento em canal aberto ocorre quando o fluido possui uma superfície livre, que está em contato com o ar e sujeita à pressão atmosférica. Esse escoamento acontece pela ação das forças gravitacionais, inerciais e de difusão que atuam sobre o fluido.

Neste capítulo são apresentados alguns aspectos importantes relacionados ao escoamento em canais abertos. Inicialmente é feita uma apresentação das classificações dos fluxos. Em uma segunda parte são estudadas algumas equações governantes dos escoamentos em canais aberto. Por fim, é feita uma análise do fluxo de água em canais sinuosos.

#### 3.1 CLASSIFICAÇÃO DO ESCOAMENTO EM CANAIS ABERTOS

O fluxo é uniforme quando não há variação da velocidade do escoamento em nenhuma seção do canal. Quando há mudança, o escoamento é dito variado. Se a velocidade varia com o tempo se diz que o fluxo é não permanente, e quando se mantém constante é chamado permanente.

Também existe a classificação referente ao efeito da gravidade. Quando as forças gravitacionais são dominantes o fluxo é chamado de subcrítico e é caracterizado por velocidades baixas. Se as forças inerciais forem maiores que as gravitacionais, o escoamento é dito supercrítico e é caracterizado por velocidades altas. Essa divisão é feita utilizando o parâmetro adimensional número de Froude que é definido por:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}} \quad (1)$$

Sendo:

$Fr$  – número de Froude;

$V$  – velocidade do escoamento;

$g$  – aceleração da gravidade;

$H$  – profundidade do escoamento.

O escoamento é subcrítico quando o número de Froude,  $Fr$ , for menor que 1, supercrítico para  $Fr$  maior que 1 e crítico quando  $Fr$  for igual a 1 (ÇENGEL; CIMBALA, 2006, p. 683).

Uma quarta forma de classificação é com relação à viscosidade. Quando as partículas desenvolvem uma trajetória bem definida, em camadas, o escoamento é dito laminar. Geralmente ocorre com baixas velocidades e em fluidos com grande viscosidade. O escoamento é dito turbulento quando o movimento é desordenado e não linear, e ocorre com velocidades altas e não constantes. Quando se encontra entre estas duas situações é dito que o escoamento está em transição. O parâmetro adimensional que define esta classificação é o número de Reynolds, que, para canais com superfície livre, é definido por:

$$Re = \frac{VR_h}{\nu} \quad (2)$$

Sendo:

$Re$  – número de Reynolds;

$R_h$  – raio hidráulico do canal;

$\nu$  – viscosidade cinemática.

Çengel e Cimbala (2006, p. 682) definem o escoamento em canais abertos como laminar para  $Re$  menor que aproximadamente 500 e turbulento para  $Re$  maior que cerca de 2500.

Rios são canais abertos naturais, nos quais as seções transversais não possuem uma geometria definida e mudam constantemente ao longo do canal. Conseqüentemente, pode-se dizer que a situação de escoamento perfeitamente uniforme e permanente não é encontrada na natureza.

### 3.2 EQUAÇÕES GOVERNANTES

Diversas grandezas dos escoamentos em canais abertos podem ser calculadas por leis de resistência, que segundo Knight e Shiono (c1996, p. 140, tradução nossa) “[...] relacionam a capacidade de transporte de um canal com a seção transversal, a inclinação do leito e com

parâmetros de resistência.”. Uma das leis de resistência mais utilizadas é a equação de Manning, que relaciona a velocidade média do escoamento aos fatores de forma da seção transversal e é definida como:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} I^{1/2} \quad (3)$$

Sendo:

$n$  – coeficiente de rugosidade;

$I$  – inclinação do canal.

Pode-se observar que a equação de Manning representa o escoamento unidimensional. Para o estudo do fluxo em três dimensões são utilizadas leis de conservação, como a equação da continuidade, ou equação da conservação da massa, que mostra que a taxa de variação da massa no tempo em um sistema é zero. Simplificando a equação da continuidade para fluidos incompressíveis, tem-se:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

Sendo:

$\{u, v, w\}$  – componentes da velocidade nas direções  $\{x, y, z\}$ , respectivamente.

As equações de Navier-Stokes descrevem o fluxo de fluidos incompressíveis:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial w} + \rho g_w + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

Sendo:

$\rho$  – massa específica do fluido;

$t$  – tempo;

$P$  – pressão;

$\mu$  – viscosidade dinâmica;

$g_{\{x,y,z\}}$  – componentes da aceleração da gravidade nas direções  $\{x,y,z\}$ , respectivamente.

### 3.3 SINUOSIDADE

Sellin *et al.* (1993, p. 101) define a sinuosidade como a razão entre a extensão do canal principal e a distância em linha reta entre o início e o fim do canal.

$$S = \frac{L_c}{L_D} \quad (8)$$

Sendo:

$S$  – sinuosidade;

$L_c$  – extensão do canal principal;

$L_D$  – comprimento do domínio.

Escoamentos em canais sinuosos possuem comportamento complexo devido à ação de uma força centrífuga. Além disso, Yen (1965, p. 1, tradução nossa) cita a curva “[...] como um

obstáculo para o fluxo, causando perda adicional de energia e aumento do remanso a montante.”.

Quando o fluxo que se desenvolve no canal é subcrítico, ocorre uma pequena sobre-elevação da superfície da água na curva do lado externo da mesma, e são geradas correntes secundárias em espiral.

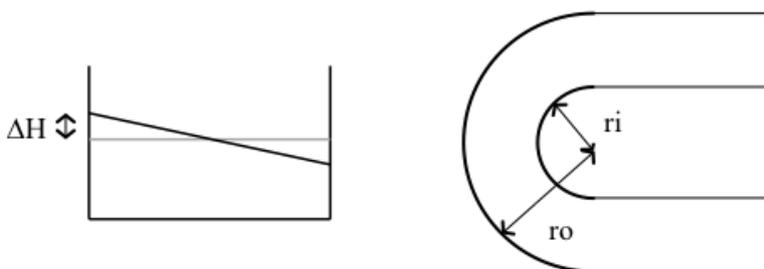
A influência da curva não está apenas dentro do seu limite, mas se estende a montante e a jusante, e as características do fluxo variam a cada seção. Quando o escoamento ocorre em rios naturais, o comportamento se torna ainda mais complexo devido às irregularidades da geometria do canal e leito móvel (SELLIN *et al.*, 1993).

### 3.3.1 Sobre-elevação da linha da água

Em canais retilíneos, as maiores velocidades ocorrem normalmente no centro da seção. Em canais sinuosos, a velocidade é máxima na região próxima à margem interna, no centro da curva, e próxima à margem externa na saída da curva, até retornar à sua posição original no trecho retilíneo. A menor velocidade na parte externa da curva faz com que aumente a pressão nesta região, aumentando assim o nível da água.

Existem diversas formas de determinar a sobre-elevação da linha da água. A mais precisa é utilizando a lei do movimento do vórtice livre (CHOW, c1994). A figura 3 apresenta os parâmetros geométricos da seção transversal e da curva do canal utilizados no cálculo da sobre elevação da linha da água.

Figura 3 – Parâmetros geométricos da seção transversal e da curva do canal



(fonte: elaborada pela autora)

A equação da sobre-elevação é dada por:

$$\Delta H = \frac{C^2}{2gr_o^2r_i^2} (r_o^2 - r_i^2) \quad (9)$$

Sendo:

$\Delta H$  – sobre elevação da linha de água;

$C$  – constante de circulação em um movimento de vórtice livre;

$r_o$  – raio externo da curva;

$r_i$  – raio interno da curva.

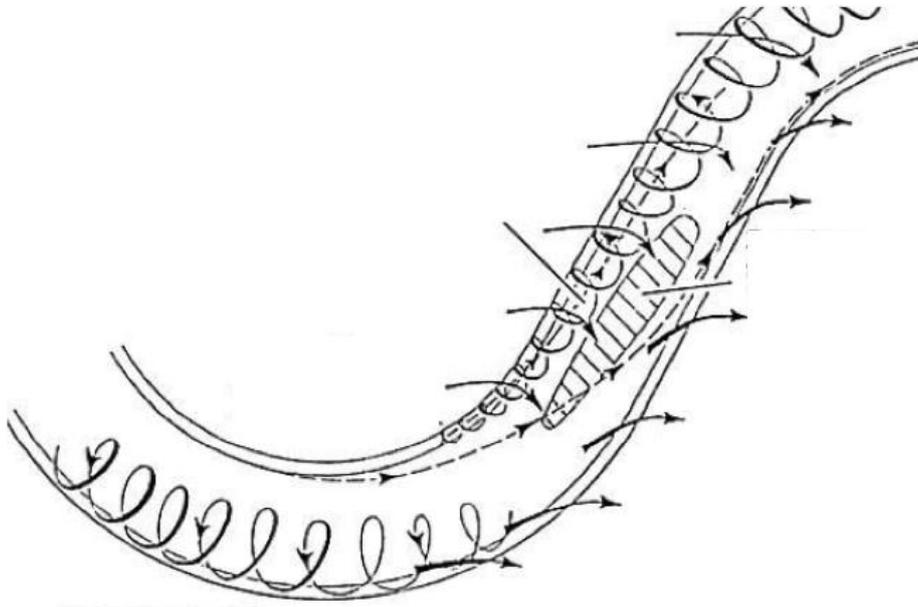
### 3.3.2 Fluxo em espiral

O fluxo em espiral é um fluxo secundário que ocorre no canal. Chow (c1994, p. 430, tradução nossa) cita como prováveis causas da sua ocorrência:

[...] fricção nas paredes do canal, que causa velocidades maiores dos filamentos perto do centro do canal do que das margens; força centrífuga, que desvia as partículas de água do movimento retilíneo; distribuição vertical de velocidades, que existe no canal de aproximação e inicia o movimento espiral no fluxo.

Este fenômeno também ocorre em canais retilíneos, mas com menor intensidade. Em canais sinuosos o escoamento em espiral é acentuado e ocorre de forma irregular devido à força centrífuga (CHOW, c1994). A figura 4 ilustra este fenômeno.

Figura 4 – Fluxo em espiral em um canal



(fonte: adaptado de SELLIN et al., 1993, p. 111)

## 4 ESCOAMENTO EM PLANÍCIES DE INUNDAÇÃO

Planície de inundação é a área adjacente ao leito natural dos rios que é ocupada pela água quando ocorre extravasamento do canal principal durante a passagem de vazões maiores das que o leito principal pode suportar. A figura 5 ilustra a seção transversal de um rio, com o canal principal, ou leito menor, e a planície de inundação ou leito maior, formando um canal composto.

Figura 5 – Planície de inundação



(fonte: elaborado pela autora)

Inundações são fenômenos que ocorrem como uma consequência natural do regime hidrológico. Quando o nível da água se encontra acima do leito natural do rio, surgem processos adicionais que aumentam a complexidade do comportamento do escoamento, especialmente na interação que ocorre entre o fluxo de água no canal principal e na planície de inundação (KNIGHT; SHIONO, c1996, p. [139]).

Inicialmente, são definidos alguns conceitos importantes para entender os processos que ocorrem entre a planície de inundação e o canal principal. Em seguida, é estudada a interação que ocorre entre o fluxo de água no canal principal e o fluxo de água na planície de inundação. Por último, são analisados alguns aspectos importantes sobre métodos de simulação do escoamento em canais compostos.

### 4.1 FLUXO SECUNDÁRIO

O escoamento que flui ao longo de um canal numa direção perpendicular à seção transversal e cujo comportamento pode ser previsto por equações de resistência é chamado de fluxo

primário. O escoamento que ocorre paralelo ao primário é chamado de secundário e está relacionado à perda de energia e ao aumento da resistência ao escoamento (CHOW, c1994, p. 12).

## 4.2 TENSÃO DE CISALHAMENTO

A componente tangencial da força que atua sobre uma superfície é chamada força de cisalhamento ou de corte. A tensão de cisalhamento é a componente da força tangencial por unidade de área e é definida por:

$$t_{ij} = \frac{1}{2} \rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

Sendo:

$\tau$  – tensão de cisalhamento.

## 4.3 VORTICIDADE

A vorticidade é definida como “[...] uma medida da rotação de uma partícula fluida.” (ÇENGEL; CIMBALA, 2006, p. 144, tradução nossa), e existe quando o fluido rotacionar enquanto gira ao redor de um ponto, ou seja, é um movimento relativo. A vorticidade é definida como:

$$\vec{\zeta} = \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \vec{i} + \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \vec{j} + \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \vec{k} \quad (11)$$

Sendo:

$\zeta$  – vorticidade;

$\{ \vec{i} \vec{j} \vec{k} \}$  – vetores unitários de velocidade nas direções  $\{xyz\}$ .

Pode-se utilizar a vorticidade como um indicador de turbulência em um escoamento.

#### 4.4 INTERAÇÃO ENTRE OS FLUXOS NO CANAL PRINCIPAL E NA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO

Quando as águas migram do canal principal para a planície de inundação, ocorre uma busca pelo equilíbrio, e o fluxo de água do canal principal cede energia na forma de *momentum* para o fluxo de água que ocorre na planície de inundação. Essa troca ocorre devido à fricção entre as diferentes camadas, causada pelo movimento das partículas, que existe devido à viscosidade do fluido. Isso faz com que o escoamento que ocorre no canal principal perca energia e seja retardado pelo escoamento na planície de inundação (KNIGHT; DEMETRIOU, 1983, p. 1089).

Se o escoamento na planície de inundação ocorrer com uma profundidade relativamente pequena, as irregularidades do fundo exercerem maior influência sobre o escoamento e a água fluirá com uma velocidade menor que no canal principal, onde a altura da lâmina d'água será maior e a vazão escoará com uma velocidade maior. Essa diferença de velocidades cria uma camada de cisalhamento lateral entre os dois fluxos, ilustrada na figura 6.

Essa camada cisalhante é composta por duas partes, uma devido às tensões de Reynolds e outra devido ao fluxo secundário, e cada uma dessas camadas se espalha lateralmente para dentro do rio e da planície com uma taxa diferente (SHIONO; KNIGHT, 1991, p. 628).

Sabe-se que muitas interações têm uma forte dependência da profundidade do escoamento na planície e no canal principal. Por isso, é utilizado para análises um parâmetro adimensional conhecido como profundidade relativa, que é a razão entre a profundidade do fluxo na planície e a profundidade do escoamento no canal principal.

$$h_{rel} = \frac{H - h}{H} \quad (12)$$

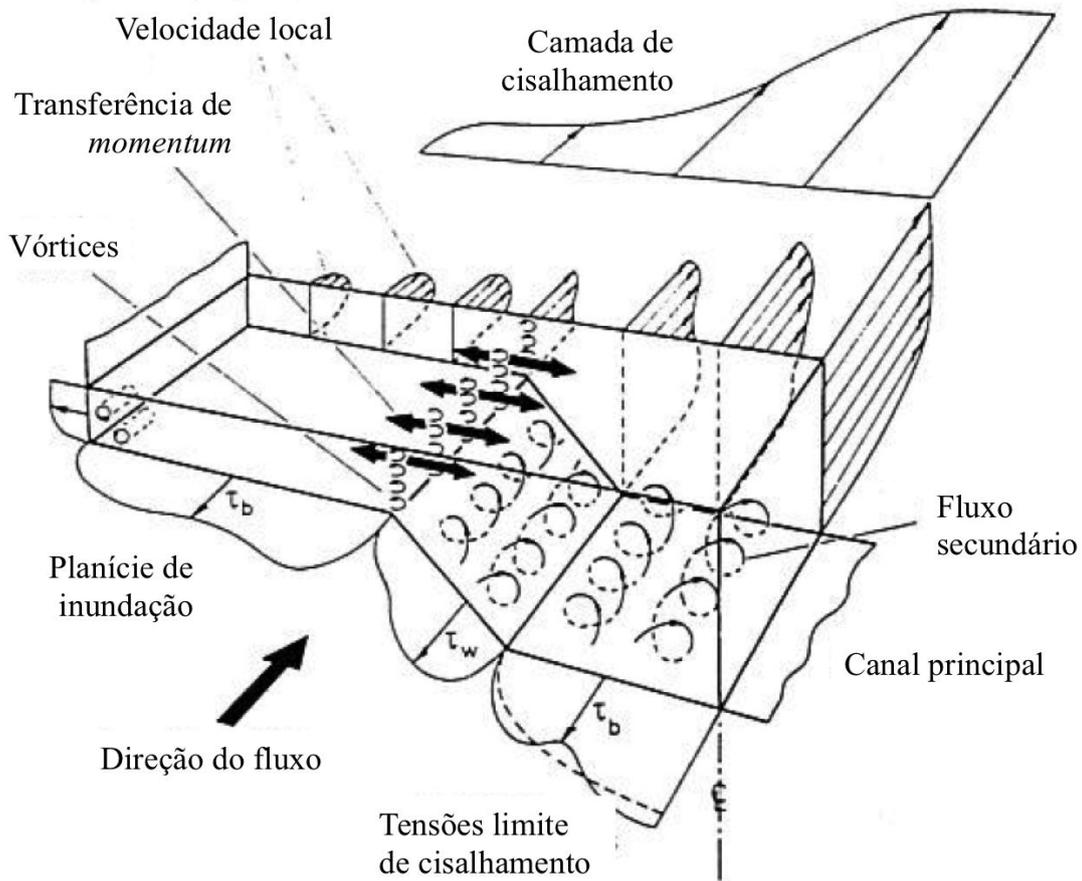
Sendo:

$h_{rel}$  – altura relativa;

$h$  – altura do canal principal;

H – altura total do escoamento.

Figura 6 – Principais interações entre o fluxo na planície de inundação e o fluxo no canal principal



(fonte: KNIGHT, c1989, p. 95, tradução nossa)

Segundo Knight e Demetriou (1983, p. 1082-1083), a força de cisalhamento aparente na vertical depende da profundidade relativa e é sempre positiva, o que prova que o escoamento na planície retarda o fluxo total de água no canal. Os autores também avaliaram a força de cisalhamento aparente na divisão horizontal do canal e perceberam que para grandes profundidade relativas os valores da força aparente são negativos, o que indica que a região correspondente à inundação acelera o fluxo do canal principal.

Knight (c1989, p. 93) destaca a importância de conhecer a distribuição das tensões de cisalhamento, visto que a posição do valor máximo está relacionada com a erosão nos canais e a tensão média está relacionada com o transporte de sedimentos em rios.

Sellin et al. (1993, p. 109) estudaram o comportamento do fluxo de água em canais compostos com meandros. Os autores verificaram que o escoamento não é plano, e que a variação do nível da água está relacionada com acelerações que ocorrem em diversos locais. A influência da sinuosidade é grande mesmo para grandes profundidades relativas e pequenas rugosidades. A interação entre os fluxos adjacentes é mais forte quando o canal principal é curvo, e é caracterizado especialmente pela transferência de massa líquida. Os autores citam que:

Como resultado da troca de *momentum* com o escoamento da planície de inundação na região de cruzamento, o fluxo de água do canal entra na curva com uma circulação secundária contrária à que o escoamento na curva induz. Essa circulação contrária persiste até pelo menos metade de curva. Isso acentua a tendência da curvatura do escoamento falhar ao tentar se igualar à curvatura do leito porque o gradiente de pressão necessária para curvar o escoamento não se desenvolve facilmente quando o escoamento não está contido no leito principal. Como resultado, a água do seção transversal do canal no ápice da curva (incluindo a água do leito do canal) escapa para a planície de inundação à jusante imediatamente após a curva;

A capacidade de transporte de um canal é dada pela curva chave, que relaciona a vazão com a profundidade do escoamento. Sellin et al. (1993, p. 102) salientam a importância da curva chave como uma medida da performance em qualquer canal, e em particular para canais compostos com meandros, onde a seção transversal e a direção do fluxo variam constantemente.

Quando o objeto de estudo é um canal composto, sempre é esperada uma descontinuidade na curva devido à mudança brusca da largura da seção. Para pequenas profundidades relativas a capacidade de transporte diminui muito devido à força das interações e transferência de momento. Essa interação é tão forte que Knight e Hamed<sup>1</sup> (1984 apud KNIGHT, c1989, p. 99) afirmam que a capacidade de transporte de um canal composto pode ser menor que a capacidade de transporte deste mesmo canal principal com a mesma profundidade, mas sem interações. Devido a essas interações, equações como a de Manning não podem ser utilizadas para determinar a relação entre altura e vazão (KNIGHT; SHIONO, c1996, p. 145).

---

<sup>1</sup> KNIGHT, D. W.; HAMED, M. E. Boundary shear in symmetrical compound channels. **Journal of hydraulic Engineering**, v. 110, n. 10, p. 1412-1430, 1984.

## 4.5 MODELAGEM COMPUTACIONAL DE RIOS COM PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO

O estudo do escoamento pode ser feito através de simulação numérica. Neste capítulo são feitos alguns comentários sobre a modelagem unidimensional, bidimensional e tridimensional de canais compostos.

### 4.5.1 Modelagem unidimensional

Métodos unidimensionais são incompletos pois não consideram nenhuma estrutura tridimensional que ocorre num fluxo real. Ainda assim, essa análise é muito utilizada por apresentar uma boa aproximação para estudos simplificados e por não haver dados experimentais de turbulência (KNIGHT; SHIONO, c1996, p. 155). Nestes modelos considera-se o escoamento com direção unicamente perpendicular à seção transversal. As equações utilizadas para os cálculos são as de Manning e Darcy-Weisbach.

Segundo Knight e Shiono (c1996, p. 155-157), o método tradicional de análise unidimensional de seções complexas é a divisão da região em subáreas, cada uma com seus valores de área, profundidade de escoamento, rugosidade e perda de carga. A capacidade de escoamento do canal é a soma de todas as capacidades de transporte. Esse método apresenta algumas limitações, em especial com relação à variação do coeficiente de rugosidade. Para simular de uma forma mais realística este processo, quatro variações para o método das subáreas foram propostas:

- a) alteração da subárea;
- b) método da coerência;
- c) quantificação das tensões ou forças de cisalhamento aparentes;
- d) mudança no desenhos das linhas divisórias das subáreas.

Knight e Shiono (c1996) ressaltam a importância da previsão correta da capacidade de transporte de um canal. Além de prever a capacidade, o método deve ser capaz de prever a tensão de cisalhamento média e realizar uma divisão do fluxo nas subáreas de forma correta. Quando for necessário ter mais informações sobre a distribuição das tensões de cisalhamento ao longo do perímetro molhado deve ser utilizado um método mais sofisticado, como os de análise bidimensional.

### **4.5.2 Modelagem bidimensional**

Métodos de análise bidimensional apresentam mais detalhadamente o comportamento do fluxo das inundações do que os métodos unidimensionais porque adicionam as componentes de cisalhamento lateral e fluxo secundário ao coeficiente de rugosidade do leito.

Os valores destes fatores devem ser estudados detalhadamente e comparados com resultados experimentais para a sua determinação. Knight e Shiono (c1996, p. 160-165) fizeram comparações com três métodos de calibração em dois canais e mostraram a importância de uma boa calibração para a obtenção de resultados precisos.

A maior exatidão dos dados obtidos a partir de estudos feitos em modelos bidimensionais demonstra sua superioridade com relação aos métodos unidimensionais. Entretanto, quando se procura uma análise completa das interações entre os escoamentos, como o fluxo em espiral, é necessário utilizar modelos tridimensionais.

### **4.5.3 Modelagem tridimensional**

A existência de estruturas tridimensionais na interação entre os fluxos de água da planície de inundação e do canal principal, como vórtices e fluxos secundários, exige modelos que possam representar a complexidade destas estruturas.

O desenvolvimento de métodos de análise tridimensional é dificultado pela existência de turbulência, que torna o escoamento extremamente complexo, necessitando, muitas vezes, que a turbulência também seja simulada. Para simplificar, as simulações de canais compostos usualmente são realizadas utilizando modelagem unidimensional ou bidimensional.

## 5 METODOLOGIA NUMÉRICA

A dinâmica de fluidos computacional (CFD) é uma área da mecânica de fluidos que utiliza métodos numéricos para simular fluidos em movimento. Dentro desta área de estudos, existem diversas formas de simular os fenômenos.

O funcionamento dos códigos CFD pode ser dividido em três etapas:

- a) pré-processamento: processo no qual são detalhados todos os dados de entrada do problema, como geometria e divisão da malha (domínio), definição das propriedades do fluido e determinação das condições iniciais e de contorno;
- b) solução: etapa na qual é calculada a solução numérica do problema, através da aproximação das variáveis desconhecidas, discretização através da substituição de aproximações das derivadas e integrais nas equações governantes do escoamento e subsequentes manipulações e, por fim, solução das equações algébricas;
- c) pós-processamento: etapa final, na qual são tratados e visualizados os resultados obtidos.

### 5.1 CÁLCULO DO ESCOAMENTO

#### 5.1.1 Equações governantes

Os códigos de CFD calculam o escoamento utilizando as equações da continuidade (equação 4) e de Navier-Stokes (equações 5 a 7), e possivelmente um modelo para representar a turbulência.

#### 5.1.2 Representação espacial

A discretização é o processo no qual as derivadas parciais existentes nas equações governantes são aproximadas por quocientes algébricos diferenciais. Esse procedimento ocorre no espaço e no tempo.

Segundo Sturm (c2010, p. 509), três métodos são os mais utilizados para a discretização espacial das equações governantes:

- a) diferenças finitas;
- b) volumes finitos;
- c) elementos finitos;

O método de diferenças finitas se baseia na aproximação de derivadas para a solução das equações diferenciais por diferenças finitas. Apresenta grande exatidão, mas pequena flexibilidade porque exige o uso de coordenadas cartesianas. (STURM, c2010, p. 509)

A discretização espacial através do método de volumes finitos possui flexibilidade e exatidão intermediárias se comparada com os outros dois métodos. O domínio é dividido em volumes de controle, hexaédricos para os casos tridimensionais, e pode ser utilizado em malha estruturada e não-estruturada. (STURM, p. 509, c2010)

Segundo Versteeg e Malalasekera (c1995, p. 4, tradução nossa), o método de volumes finitos consiste nas seguintes etapas:

- a) integração formal das equações governantes do escoamento ao longo de todo o volume de controle finito do domínio da solução;
- b) a discretização envolve a substituição de uma variedade de aproximações de diferenças finitas para os termos na equação integrada representando os processos do fluxo como convecção, difusão e fontes. Isso converte a equação integral em um sistema de equações algébricas;
- c) solução das equações algébricas através de um método iterativo.

O método de elementos finitos realiza a discretização por meio de elementos finitos, e é muito flexível porque baseia a discretização em uma rede não estruturada. (STURM, c2010, p. 509)

A representação da superfície livre pode ser feita através do método *Volume Of Fluid* (VOF), que controla o volume de fluido em uma célula através de uma descrição lagrangeana. A função do volume de fluido é utilizada em todo o domínio da malha, e o valor 1 corresponde à célula cheia de fluido, 0 corresponde à célula vazia e qualquer número intermediário representa uma superfície livre dentro do domínio. (KAWASAKI, c2013)

A equação que representa a superfície livre é dada por:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial Fu}{\partial x} + \frac{\partial Fv}{\partial y} + \frac{\partial Fw}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

Sendo:

$F$  – fração do volume da célula ocupado pelo fluido.

### 5.1.3 Representação da turbulência

A representação de escoamentos turbulentos é feita através de três métodos principais:

- a) Equações de Navier-Stokes com Média de Reynolds (RANS);
- b) Simulação de Grande Escala (LES).
- c) Simulação Numérica Direta (DNS);

Segundo Sturm (c2010, p. 503-504, tradução nossa):

uma forma de calcular o escoamento turbulento é realizar uma média no tempo das equações de Navier-Stokes, que leva às Equações de Navier-Stokes com Média de Reynolds. O vetor do fluxo instantâneo  $u_i$  e o vetor de pressão  $p$  são utilizados com uma média no tempo  $T$ , de forma que apareçam as componentes médias  $\bar{u}$  e  $\bar{p}$  e as componentes flutuantes  $u'$  e  $p'$ .

As equações são dadas por:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (14)$$

$$\bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) + \bar{f}_e \quad (15)$$

Sendo:

$f_e$  – forças externas.

O termo  $\overline{u_i u_j}$ , que considera as flutuações turbulentas, ao ser multiplicado pela densidade do fluido é chamado de tensão de Reynolds:

$$\tau_{ij}^R = -\rho \overline{u_i u_j} \quad (16)$$

Sendo:

$\tau_{ij}^R$  – tensões de Reynolds.

Ao utilizar RANS, cria-se um sistema com mais incógnitas que equações. Para resolver este problema é necessário o auxílio de um modelo de turbulência. Um dos modelos mais conhecido é o modelo  $\kappa$ - $\omega$ .

O modelo  $\kappa$ - $\omega$ , segundo Wilcox (2000, p. 120-121), é composto por duas equações, da dissipação específica e da viscosidade turbulenta cinemática. A dissipação específica é representada por:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = -b\omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\epsilon}{\sigma} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (17)$$

Sendo:

$\omega$  – taxa de dissipação específica;

$\beta$  – parâmetro adimensional.

$\nu_t$  – viscosidade turbulenta cinemática.

A viscosidade turbulenta cinemática é definida como:

$$v_t = \frac{\kappa}{\omega} \quad (18)$$

Sendo:

$\kappa$  – energia cinética turbulenta;

A simulação de grande escalas (LES) modela apenas os pequenos vórtices turbulentos, partindo do pressuposto de que são isotrópicos e resolve os grandes vórtices. Apresenta resultados mais completos que o RANS, mas exige computadores mais avançados e mais tempo de simulação. (ÇENGEL; CIMBALA, 2006)

Para obter melhores resultados, pode-se utilizar a técnica DNS, que consiste em resolver o movimento em todos os pontos e escalas temporais e espaciais, através da solução das equações completas de Navier-Stokes. É a técnica mais completa e que apresenta resultados mais aproximados, mas exige o uso de malha extremamente fina e de computadores de alta performance. (ÇENGEL; CIMBALA, 2006)

## 5.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO E INICIAIS

Para chegar a resultados adequados é fundamental definir corretamente as condições de contorno da malha e de início do escoamento. Para o escoamento em canais abertos, há quatro condições de contorno de maior utilização:

- a) paredes fixas: representam os limites físicos do canal, onde ocorre a condição de não deslizamento. Para representar esta situação, define-se a velocidade como um valor fixo, uniforme, igual a zero em todas as direções;
- b) entrada: é definida a velocidade com a qual a água entra no canal como um valor fixo, uniforme e diferente de zero na direção normal à face, e igual a zero nas direções tangenciais à face;
- c) saída: para que a saída de água não influencie o escoamento a montante, é utilizada a condição de saída livre na direção normal à face de saída de água, ou seja, a derivada da velocidade em todas as direções é igual a zero;
- d) atmosfera: é definida como entrada e saída livre de ar para compensar a variação da superfície livre.

Além das condições de contorno, é fundamental definir corretamente as condições iniciais, ou seja, o valor inicial das variáveis. Duas condições iniciais devem ser definidas para este caso:

- e) nível da água: a altura da lâmina de água é condição inicial;
- f) velocidade inicial da água: é a velocidade aplicada ao volume de água definido pela condição inicial nível da água.

### 5.3 ESTABILIDADE E CONSISTÊNCIA

As soluções das equações devem ser representativas da solução real das equações diferenciais das quais elas são discretizadas. Para determinar se as soluções são adequadas é fundamental analisar a estabilidade, consistência e convergência do método numérico e das equações de diferenças finitas utilizadas. (FORTUNA, p. 128, 2012)

#### 5.3.1 Estabilidade

Versteeg e Malalasekera (c1995, p. 6, tradução nossa) definem estabilidade como um conceito associado ao amortecimento dos erros introduzidos no desenvolvimento do método numérico. Segundo Fortuna (2012, p. 131), “Um método numérico estável é aquele no qual quaisquer erros ou perturbações na solução não são amplificados sem limite”. Esses erros e perturbações podem ser causados por definições incorretas das condições iniciais e de contorno e por erros de arredondamento cometidos durante o cálculo.

#### 5.3.2 Convergência

Versteeg e Malalasekera (c1995, p. 6, tradução nossa) afirmam que “Convergência é a propriedade de um método numérico de produzir uma solução que se aproxime da solução exata na medida em que o tamanho do volume ou elemento de controle tende a zero.”. A demonstração da convergência é feita pelo teorema da equivalência de Lax, que determina que um sistema consistente e estável é condição necessária e suficiente para que um sistema seja convergente.

Para problemas de escoamentos permanentes, a convergência pode ser verificada quando os resultados das soluções dos sistemas de equações deixam de variar com o tempo. Assim, diz-se que a solução convergiu.

## 5.4 SOFTWARE OPENFOAM

*Open Source Field Operation and Manipulation* (OpenFOAM) é um código aberto e livre desenvolvido para simular problemas de mecânica de meios contínuos. O *software* é uma biblioteca na linguagem de programação C++ utilizada para criar dois tipos de arquivos executáveis (*applications*), *solvers* e *utilities*. Os *solvers* são desenvolvidos especificamente para cada tipo de problema, e as *utilities* são desenvolvidos para realizar a manipulação de dados. Por ser um código aberto, o OpenFOAM permite que os usuários criem seus próprios *solvers* e *utilities* de acordo com suas necessidades. (OPEN SOURCE FIELD OPERATION AND MANIPULATION, 2014)

O código tem ampla utilização em diversas áreas, especialmente na ciência e engenharia, por resolver problemas de fluxos de fluidos compressíveis, incompressíveis, multifásicos, combustão e transferência de calor, por exemplo.

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizada a versão 2.3.0, disponível desde fevereiro de 2014.

### 5.4.1 Solver interFoam

O presente trabalho foi desenvolvido com o uso do *solver* interFoam, que soluciona problemas com superfície livre, utilizando dois fluidos incompressíveis, isotérmicos e imiscíveis de forma tridimensional.

A técnica utilizada para a modelagem da superfície livre é volume de fluido (VOF).

É definida a tensão superficial existente entre os dois fluidos e duas propriedades de cada fluido estudado, a viscosidade cinemática e a massa específica. Os fluidos utilizados para o estudo do escoamento em rios foram água e ar.

O *solver* interFoam utiliza as equações da continuidade (equação 4) e de Navier-Stokes (equações 5 a 7) para representar o escoamento e calcular a solução.

A discretização espacial é feita através do método de volumes finitos com malha estruturada.

### **5.4.2 Representação da turbulência**

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado o método das Equações de Navier-Stokes com Média de Reynolds, com o auxílio do modelo de turbulência  $\kappa$ - $\omega$  (equações 17 e 18).

## 6 APLICAÇÕES E RESULTADOS

Este capítulo apresenta as aplicações realizadas no estudo e os resultados obtidos. Inicialmente, são apresentadas as geometrias dos canais estudados. Em seguida, são expostos os resultados obtidos, separados de acordo com o nível da água e o tipo de sinuosidade.

### 6.1 CASOS ESTUDADOS

Para a realização deste trabalho foram definidos 3 canais com diferentes sinuosidades. Os parâmetros geométricos de cada canal se encontram na tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros geométricos dos canais estudados.

<b>Forma do canal (figura 7)</b>	<b>Retilíneo</b>	<b>Sinuosidade suave</b>	<b>Sinuosidade severa</b>
Comprimento do domínio ( $L_D$ )	100 m	115,9 m	168,5 m
Extensão do canal principal ( $L_C$ )	100 m	149,1 m	253 m
Largura do domínio ( $b_D$ )	16 m	34,6 m	52,5 m
Sinuosidade (equação 8)	1	1,29	1,47
Ângulo dos meandros	0°	120°	160°
Declividade de fundo	0,0005	0,0005	0,0005
<b>Seção transversal do canal principal (figura 8)</b>			
Altura	1,5 m	1,5 m	1,5 m
Base	5 m	5 m	5 m
Largura	8 m	8 m	8 m

(fonte: elaborado pela autora)

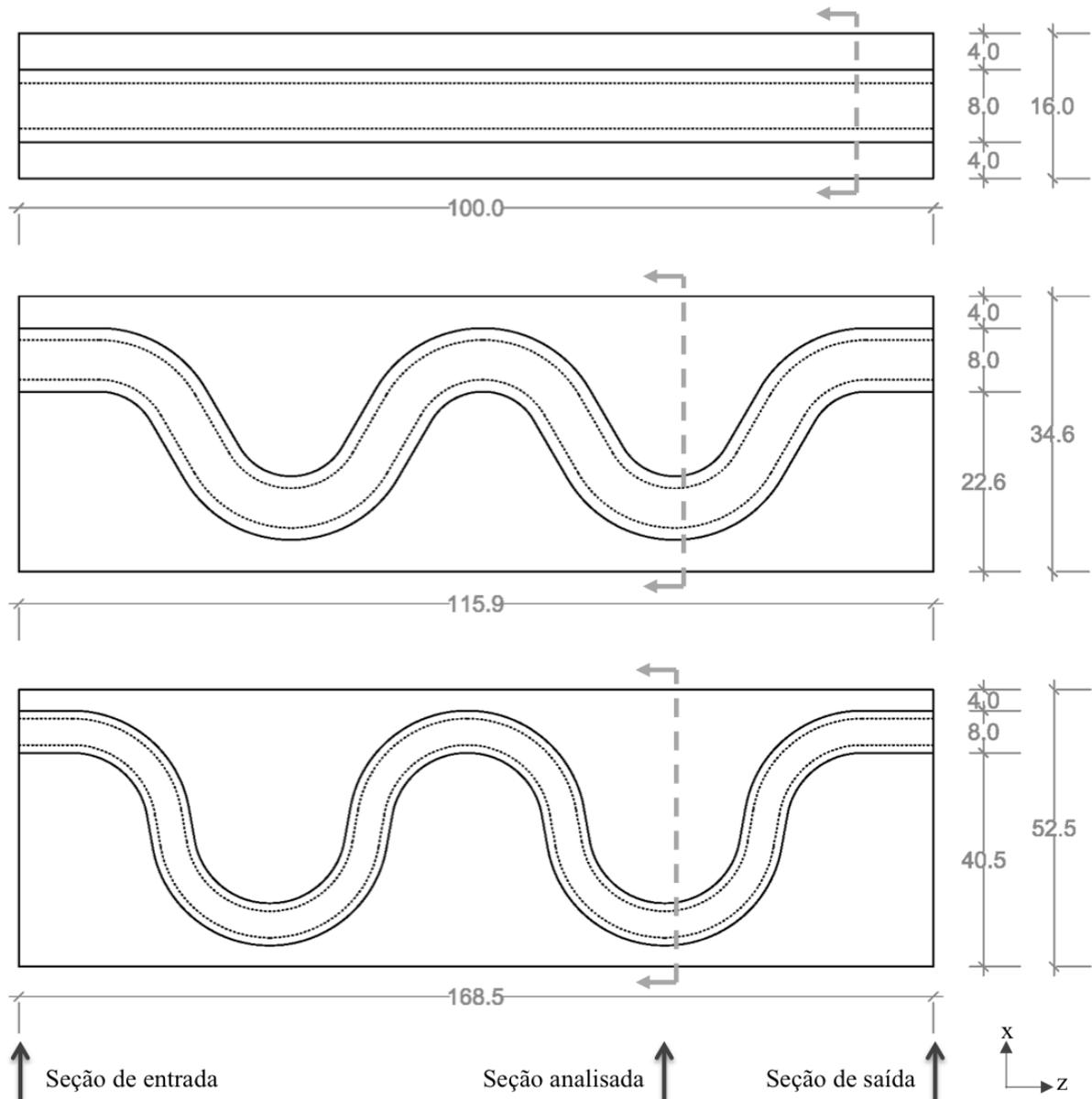
Para cada geometria, foram definidos três alturas da lâmina de água medida a partir do fundo do leito do rio:

- a) Escoamento sem inundação, com altura de 1,5 m;

- b) Inundação com lâmina de água de 1,7 m (0,2 m na planície de inundação);
- c) Inundação com lâmina de água de 2,5 m (1,0 m na planície de inundação).

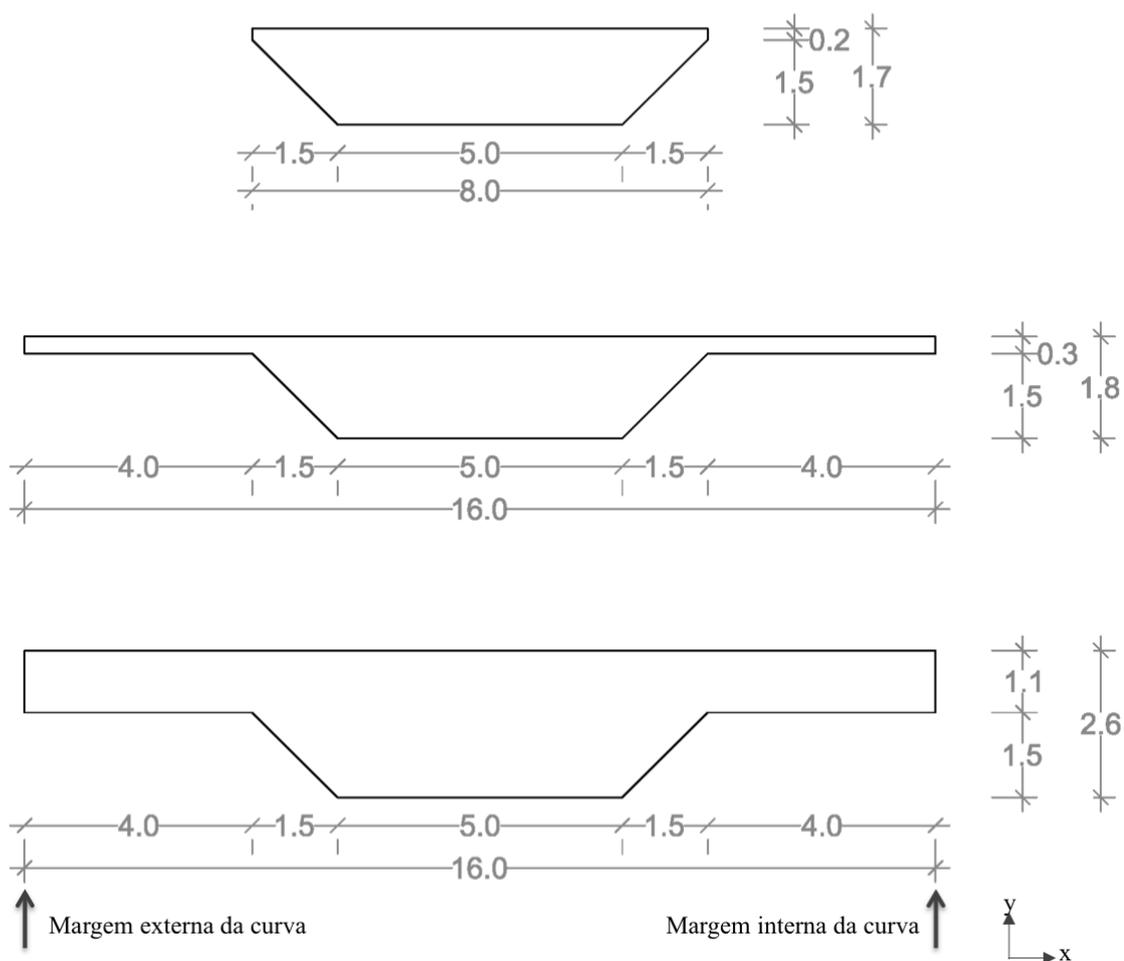
A vista superior de cada canal está ilustrada na figura 7, e a figura 8 apresenta a seção transversal de cada altura estudada.

Figura 7 – Vista superior dos canais estudados



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 8 – Seção transversal dos canais estudados



(fonte: elaborado pela autora)

A partir destas definições de geometria, foram determinados os casos a serem simulados, apresentados no quadro 1.

Quadro 1 – Casos simulados

Altura da lâmina de água na planície de inundação	H = 1,5 m (H1)	H = 1,7 m (H2)	H = 2,5 m (H3)
Sinuosidade S = 1 (S1)	S1H1	S1H2	S1H3
Sinuosidade S = 1,29 (S2)	S2H1	S2H2	S2H3
Sinuosidade S = 1,47 (S3)	S3H1	S3H2	S3H3

(fonte: elaborado pela autora)

### 6.1.1 Condições de contorno e iniciais

Foram definidas cinco diferentes condições de contorno:

- a) paredes fixas: condição de não deslizamento, com velocidade nula em todas as direções;
- b) seção de entrada do canal principal: valor constante e uniforme da velocidade da água de 1 m/s, normal à seção;
- c) seção de entrada da planície de inundação: valor constante e uniforme da velocidade da água de 0,5 m/s, normal à seção;
- c) seção de saída: saída livre de água;
- d) atmosfera: entrada e saída livre de ar.

Foram definidas duas condições iniciais para cada caso:

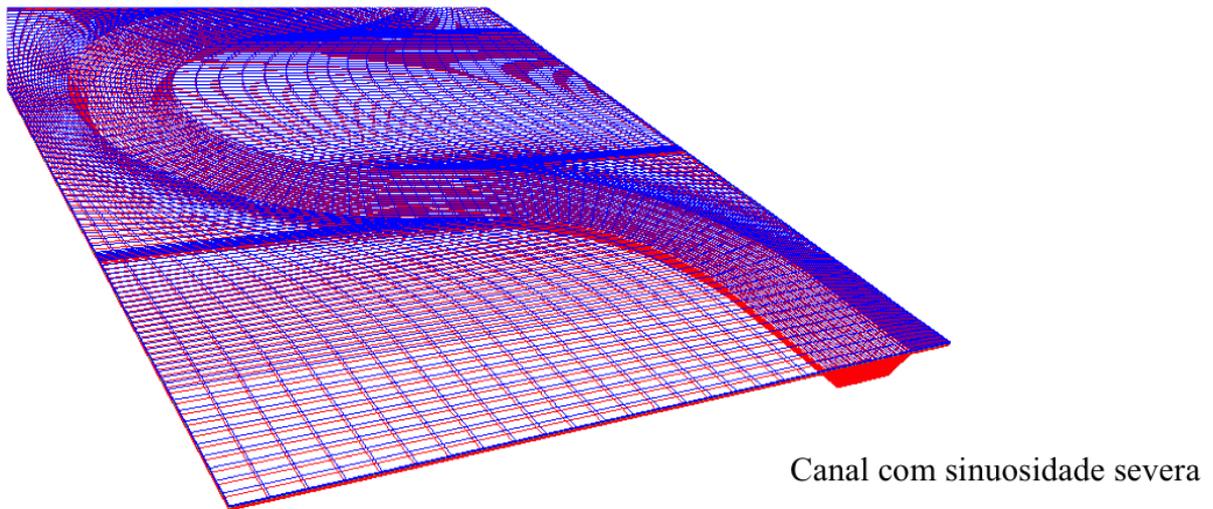
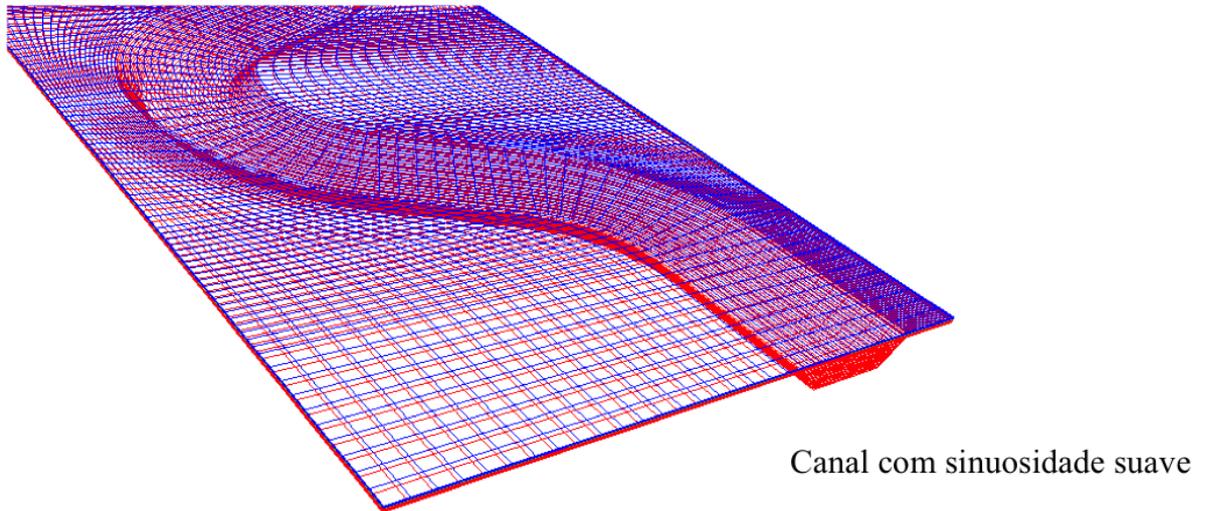
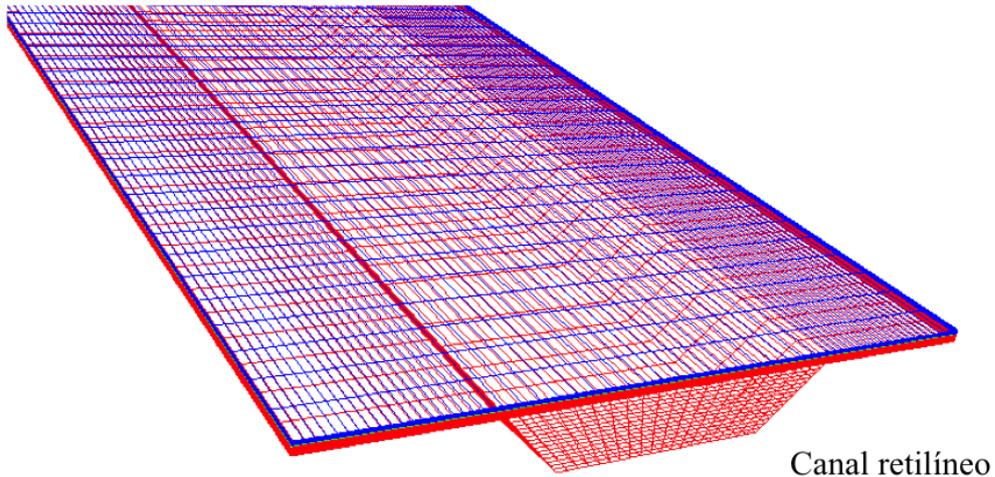
- e) nível da água inicial constante para cada caso estudado:
  - escoamento sem inundação: 1,5 metros;
  - inundação com nível da água baixo: 1,7 metros;
  - inundação com nível da água alto: 2,5 metros;
- f) velocidade inicial da água: 0,7 m/s na direção do fluxo principal.

### 6.1.2 Representação espacial e temporal

O domínio foi representado por blocos hexaédricos, divididos em elementos também hexaédricos. Na figura 9 é apresentada a malha de cálculo.

Utilizou-se um intervalo de tempo inicial  $\Delta t = 0,001$  s. O intervalo de tempo foi recalculado a cada passo para garantir a estabilidade do cálculo. O tempo total de simulação foi de 600 segundos, sendo que o tempo necessário para a convergência do cálculo foi de, no máximo, 400 segundos. Todos os resultados apresentados correspondem ao tempo final de simulação, 600 segundos.

Figura 9 – Malhas utilizadas nas simulações



(fonte: elaborado pela autora)

## 6.2 CANAL SEM INUNDAÇÃO

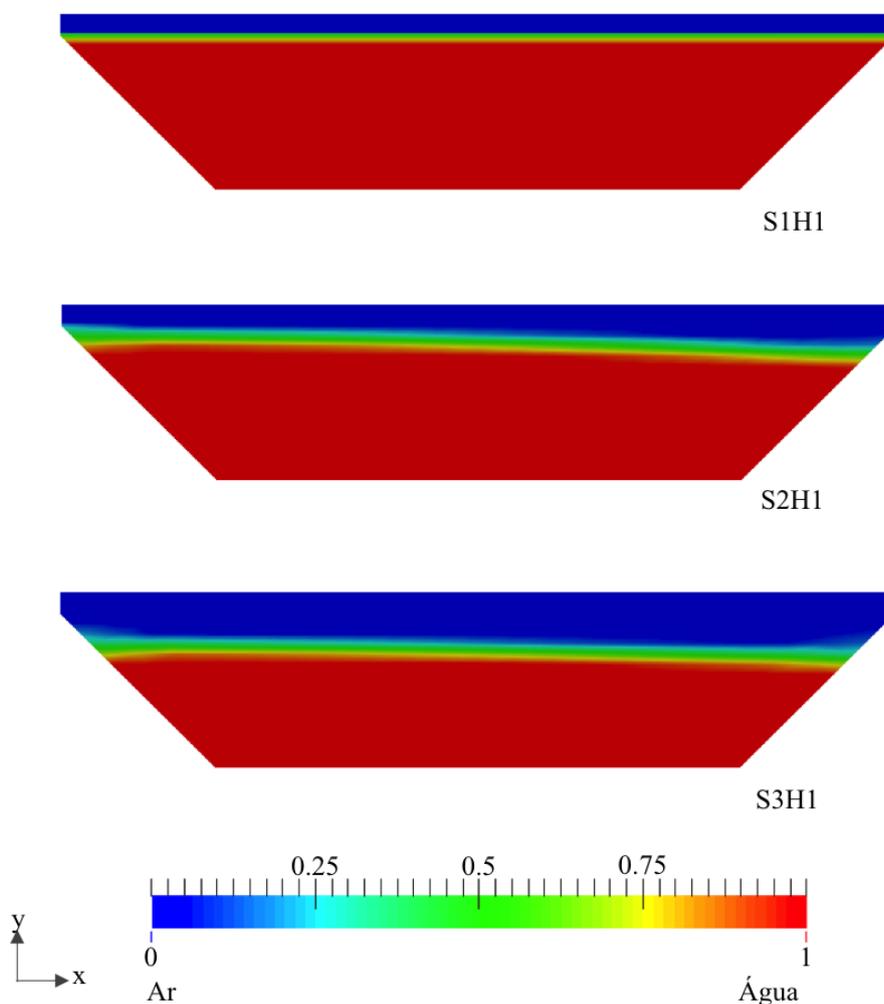
A primeira aplicação corresponde ao caso de um canal sem planície de inundação. O domínio possui altura total de 1,7 m, sendo 1,5 m a altura do canal principal, onde ocorre o fluxo de água, e 0,2 m correspondente à área onde há escoamento de ar. A seguir são analisados os resultados obtidos de nível da água e velocidade para as três sinuosidades do canal principal.

### 6.2.1 Nível da água

A interface água/ar inicial foi definida como 1,5 m, medidos desde o fundo do canal principal, para todos os casos. A figura 10 apresenta o nível de água em cada canal, onde a cor vermelha corresponde à água e a cor azul indica a presença de ar.

A superfície da água no canal retilíneo se manteve constante e não apresentou diferença de altura. No canal com pequena sinuosidade ocorreu uma diminuição do nível da água, mais acentuada na parte interna da curva. Essa diminuição é maior no canal com grande sinuosidade, embora a diferença entre os desníveis das duas extremidades da seção transversal não seja tão grande quanto no canal de sinuosidade suave.

Figura 10 – Lâmina da água na seção transversal dos canais sem inundação ( $H = 1,5$  m)



(fonte: elaborado pela autora)

## 6.2.2 Velocidade

A velocidade de entrada de água nos três canais sem planície de inundação é de 1 m/s, perpendicular à face e sempre constante ao longo de todo o tempo de simulação. A figura 11 apresenta a velocidade da água na seção transversal e a figura 12 ilustra os vetores velocidade tridimensionais correspondentes.

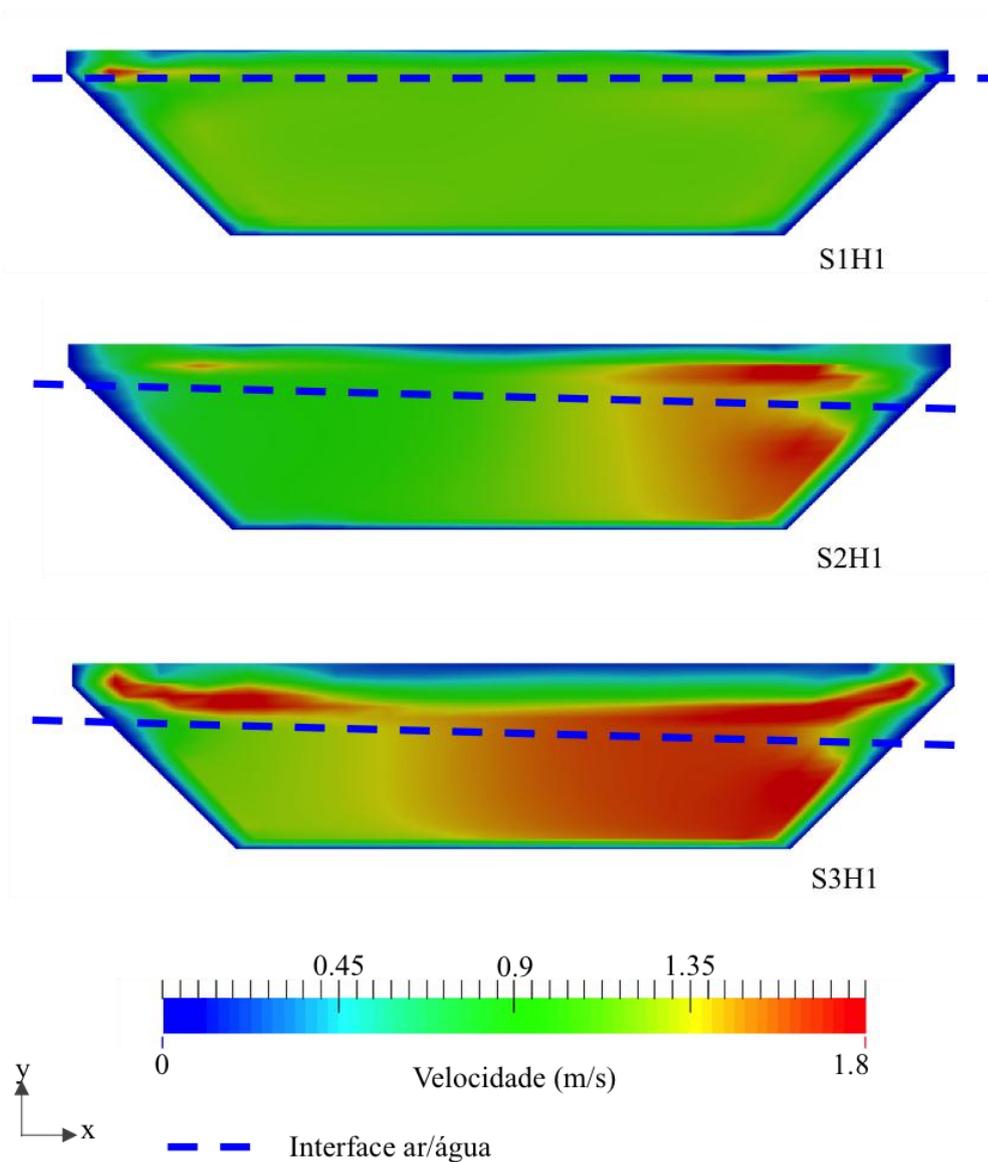
Analisando em conjunto os campos de velocidade do ar e da água, percebe-se que as áreas horizontais de grandes velocidades que aparecem na parte superior do canal correspondem ao fluxo de ar, assim como os maiores vetores velocidade.

No canal retilíneo a velocidade é praticamente uniforme em toda a seção transversal, com valores próximos a 1 m/s. Ao introduzir a sinuosidade, a velocidade aumenta na parte interna

da curva. Os vetores velocidade das três simulações indicam que o fluxo de água ocorre sempre normal à seção transversal.

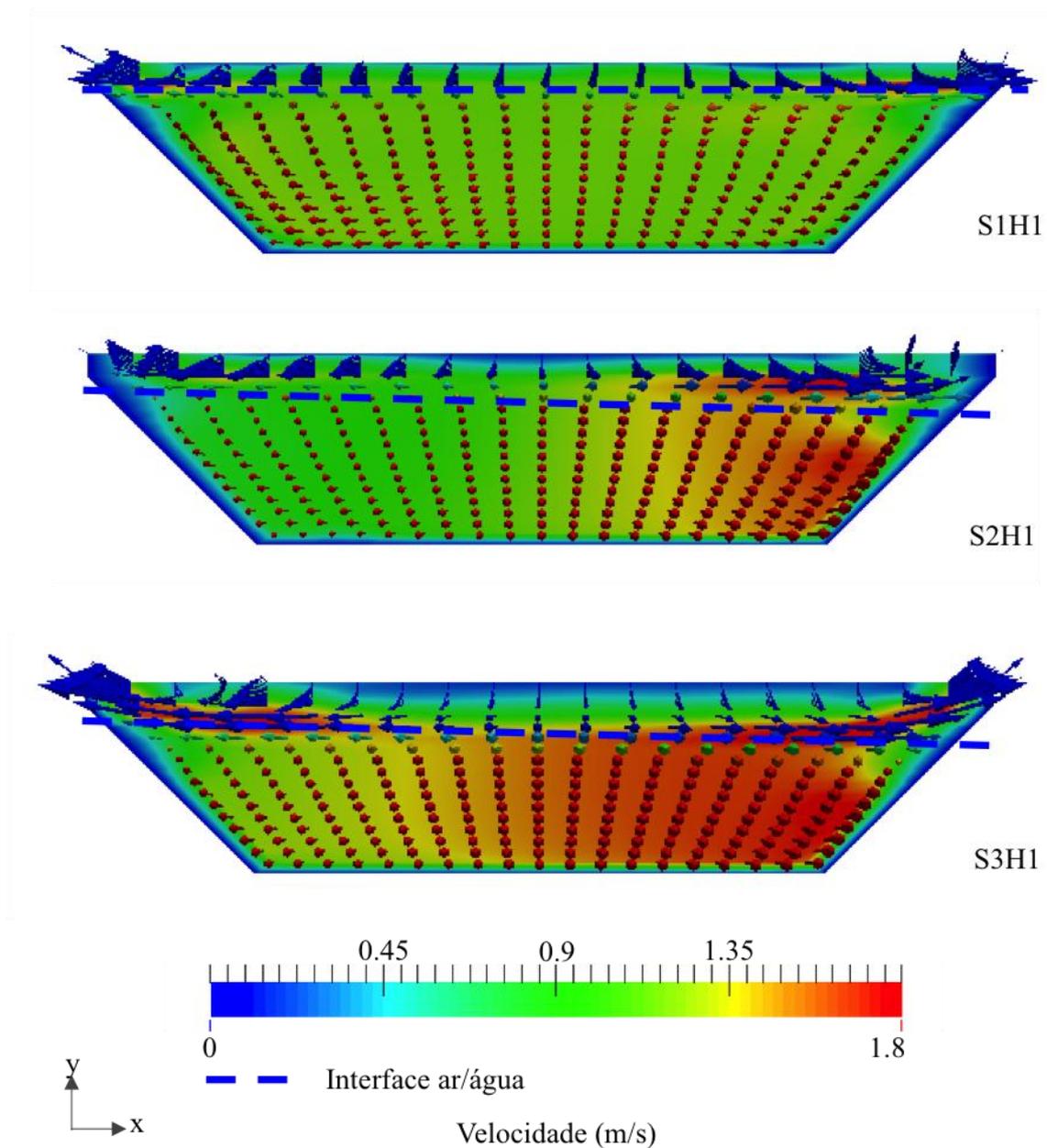
O aumento da velocidade de escoamento nos canais sinuosos está relacionada com a declividade do domínio. Foi definido que a declividade de fundo dos canais é igual para todos os casos estudados, resultando em uma maior declividade total do domínio dos canais sinuosos. Como visto na equação de Manning (equação 3), a inclinação está diretamente relacionada com a velocidade de escoamento.

Figura 11 – Módulo da velocidade da água na seção transversal dos canais sem inundação ( $H = 1,5$  m)



(fonte: elaborado pela autora)

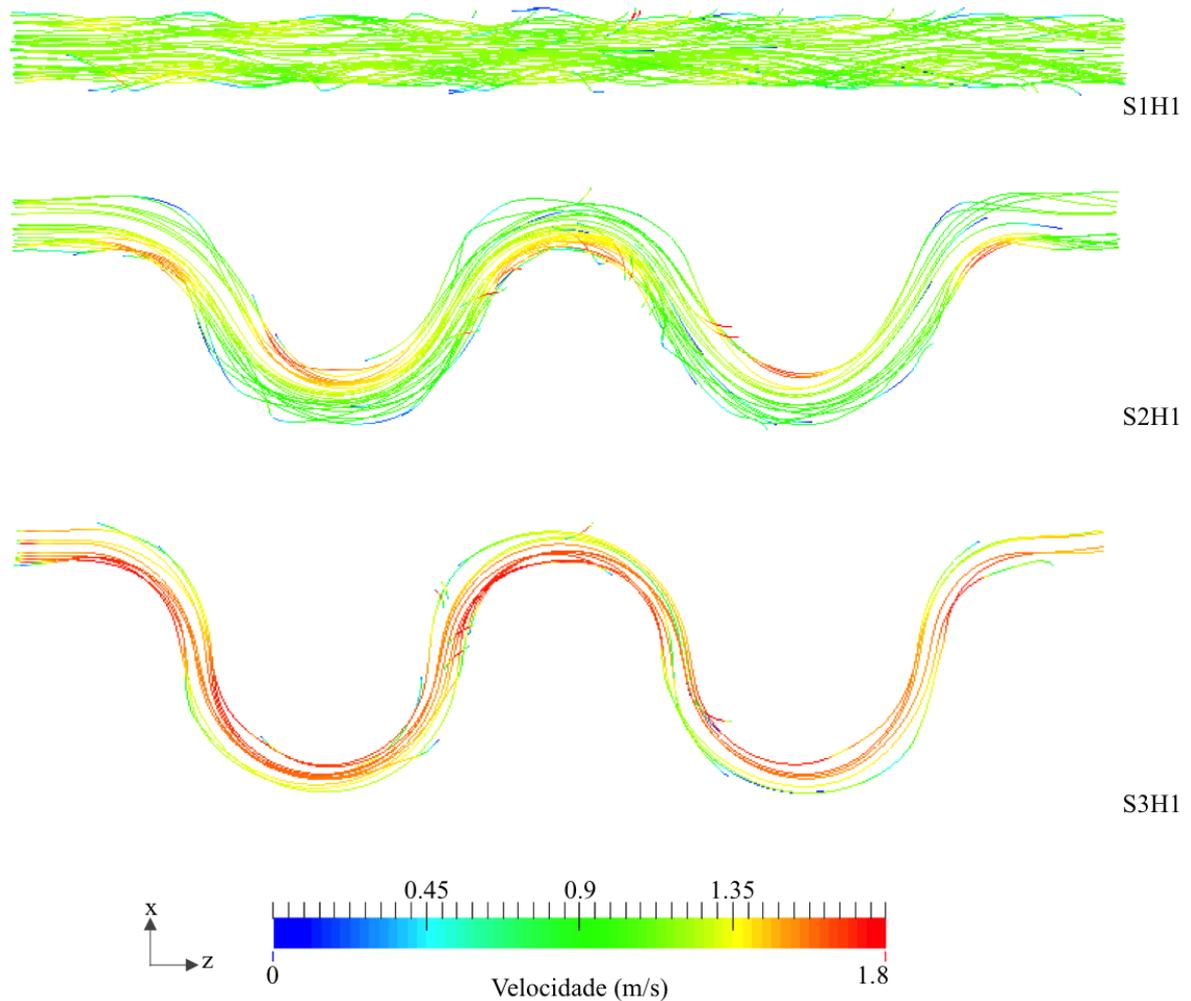
Figura 12 – Vetores de velocidades tridimensionais da água na seção transversal dos canais sem inundação ( $H = 1,5$  m)



(fonte: elaborado pela autora)

A figura 13 apresenta o caminho percorrido pelas partículas ao longo da extensão do canal e a distribuição de velocidades da água no canal.

Figura 13 – Linhas de corrente nos canais sem inundação ( $H = 1,5$  m)



(fonte: elaborado pela autora)

A tendência do escoamento é seguir em linha reta, pelo caminho no qual ocorre menor perda de energia. A presença de meandros faz com que o fluxo busque o menor caminho, condição verificada pela ocorrência das maiores velocidades nas margens internas das curvas. Este aumento de velocidade na parte interna da curva causa a diminuição das pressões, que por sua vez faz com que o nível da água diminua. O mesmo fenômeno ocorre na margem externa, onde as menores velocidades resultam em maiores pressões, aumentando o nível da água e gerando o desnível na seção transversal.

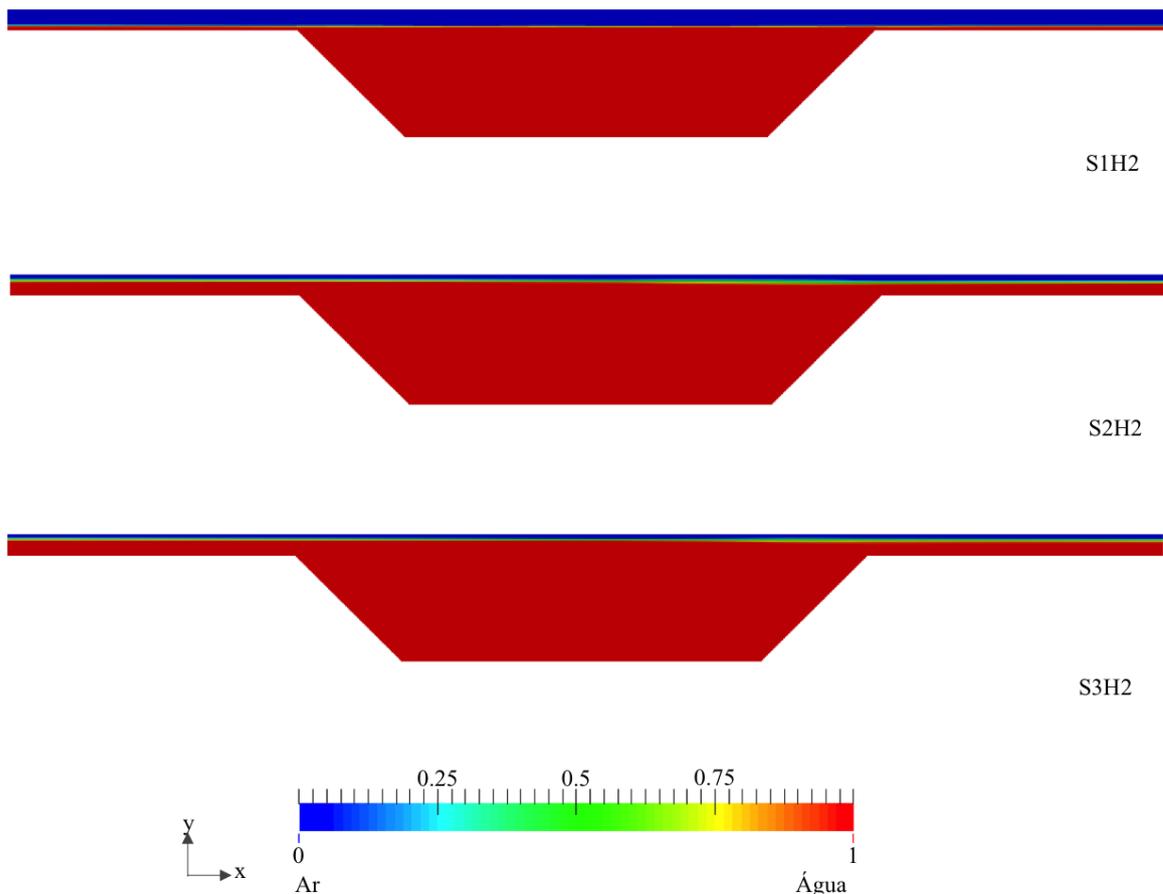
### 6.3 CANAL COM MENOR NÍVEL DE ÁGUA

A pequena inundação corresponde a uma lâmina de água de 0,2 m na planície de inundação. A altura total do domínio é de 1,8 m, sendo 1,7 m de água e 0,1 m de ar. A seguir são apresentados os resultados de velocidade e nível da água obtidos.

#### 6.3.1 Nível da água

A condição inicial de nível da água foi definida como uma altura de 20 cm de água na planície de inundação (1,7 m no canal principal), com uma camada de ar de 10 cm acima. A figura 14 ilustra o nível da água no tempo final de simulação.

Figura 14 – Lâmina da água na seção transversal dos canais com pequeno nível de água ( $H = 1,7$  m)



(fonte: elaborado pela autora)

No canal retilíneo ocorreu uma diminuição da altura da lâmina de água sobre a planície de inundação e essa superfície se mantém paralela ao fundo do canal. Nos canais com sinuosidade não há essa redução, mas é possível perceber que ocorre uma pequena sobre-elevação da interface água/ar, com menor nível da água no lado interno da curva.

### 6.3.2 Velocidade

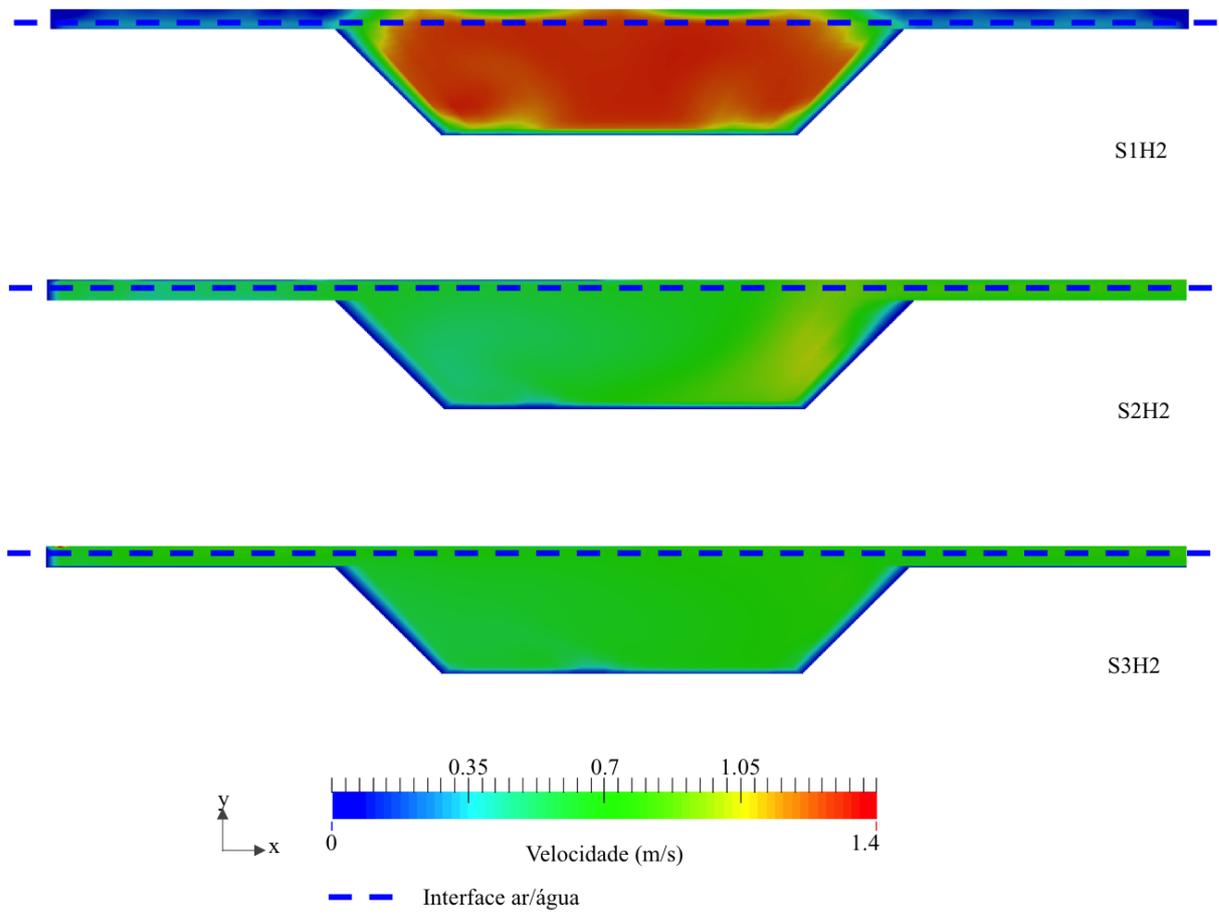
No canal principal até a altura de 1,7 m está definida a entrada de água com uma velocidade de 1 m/s, constante em todo o tempo de simulação. Na planície de inundação a velocidade é de 0,5 m/s. A figura 15 mostra a distribuição de velocidades nos três canais estudados no tempo 600 segundos, com a mesma escala de velocidades. Na figura 16 encontram-se as seções dos canais S2H2 e S3H2 em uma escala com velocidade máxima igual a 1 m/s. A figura 17 ilustra os vetores velocidade no canal principal para o mesmo momento.

A grande diferença de velocidades entre o canal principal e a planície de inundação no canal retilíneo mostra que houve pequena variação da velocidade inicial, indicando que há pouca interação entre os fluxos que ocorrem nestas duas áreas.

Nos canais sinuosos a velocidade é maior na parte interna da curva, onde ocorre o menor nível da água, e não há muita diferença entre os valores de velocidade no canal principal e na planície de inundação. Isso demonstra que ocorre interação entre estes dois fluxos, diminuindo a velocidade do escoamento no canal principal e aumentando a velocidade na planície de inundação, e que esta interação é mais forte no canal com maior sinuosidade. A existência da planície atenua o efeito da declividade observado nos canais sinuosos sem inundação.

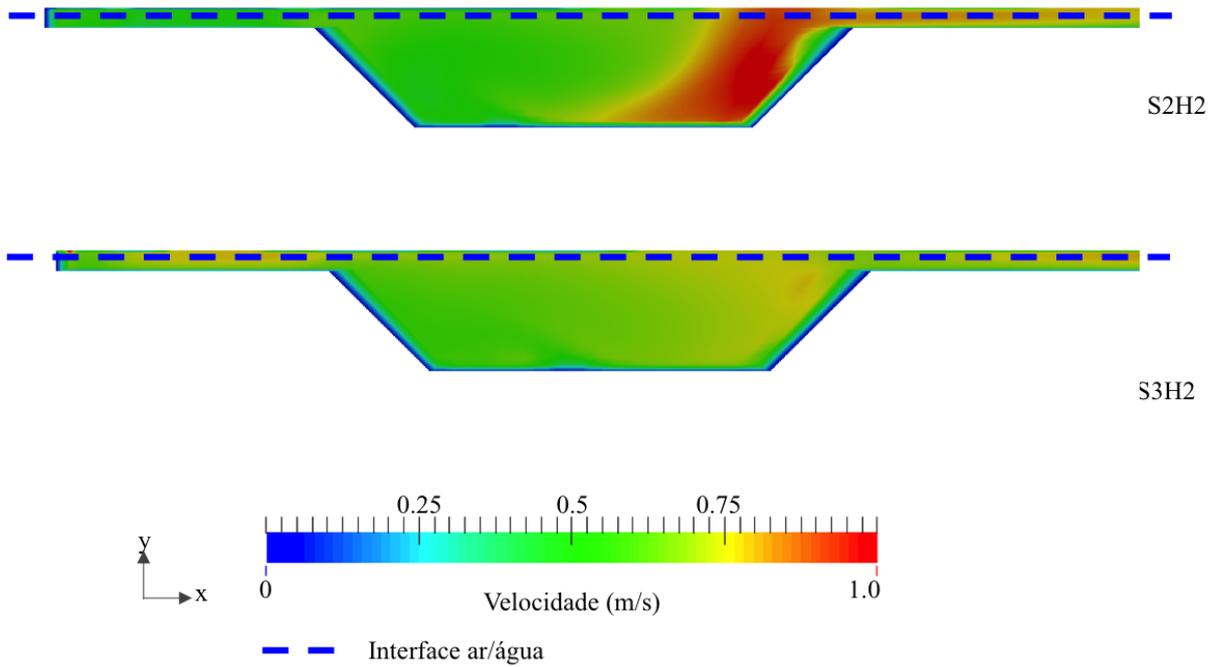
Os vetores velocidade ilustrados na figura 17 indicam a existência de fluxo em espiral nos meandros do canal principal. Este fluxo ocorre devido às diferenças de velocidade e pressão que ocorrem entre as margens interna e externa.

Figura 15 – Módulo da velocidade da água na seção transversal dos canais com pequeno nível de água ( $H = 1,7$  m)



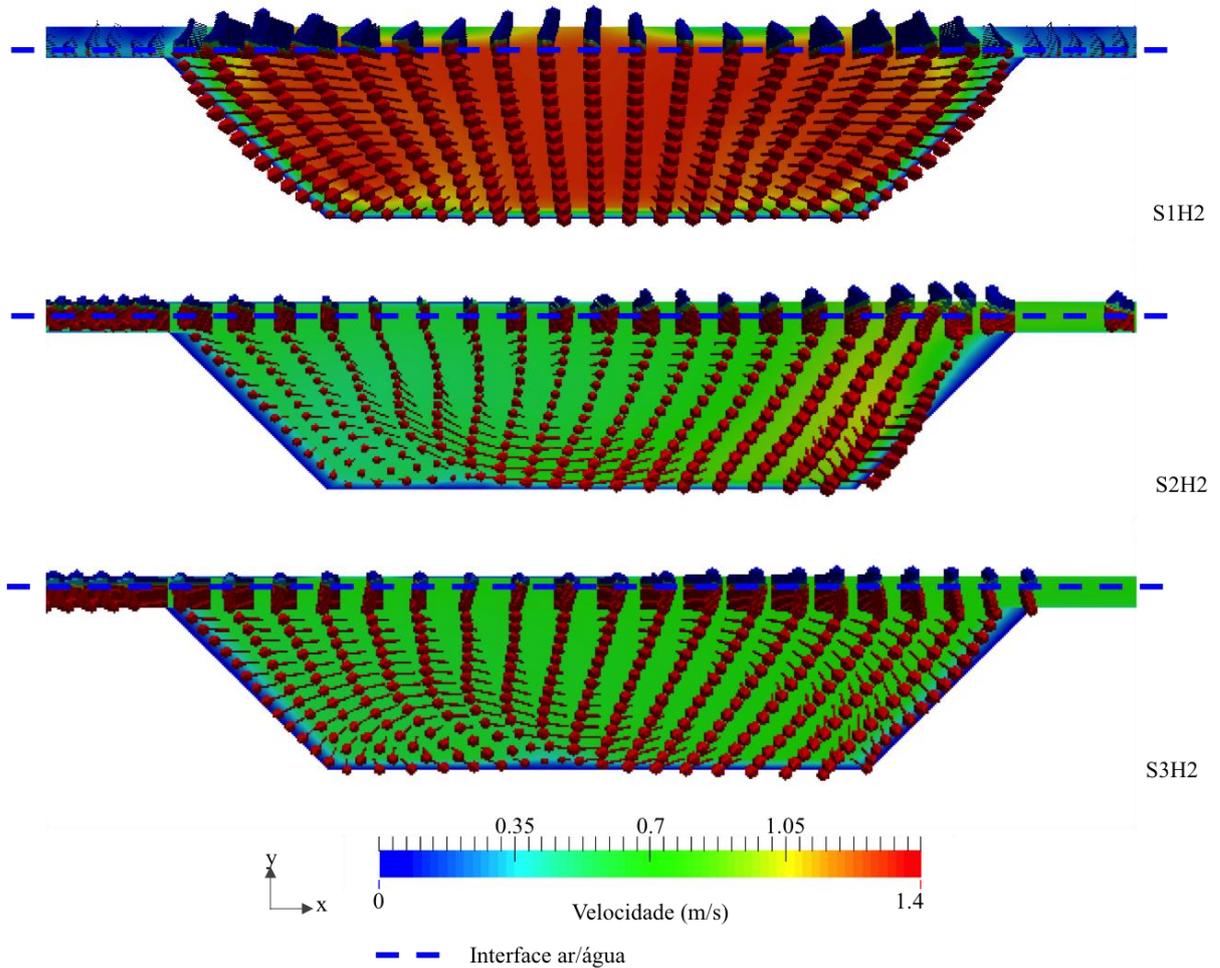
(fonte: elaborado pela autora)

Figura 16 – Módulo da velocidade da água na seção transversal dos canais sinuosos com pequeno nível de água ( $H = 1,7$  m)



(fonte: elaborado pela autora)

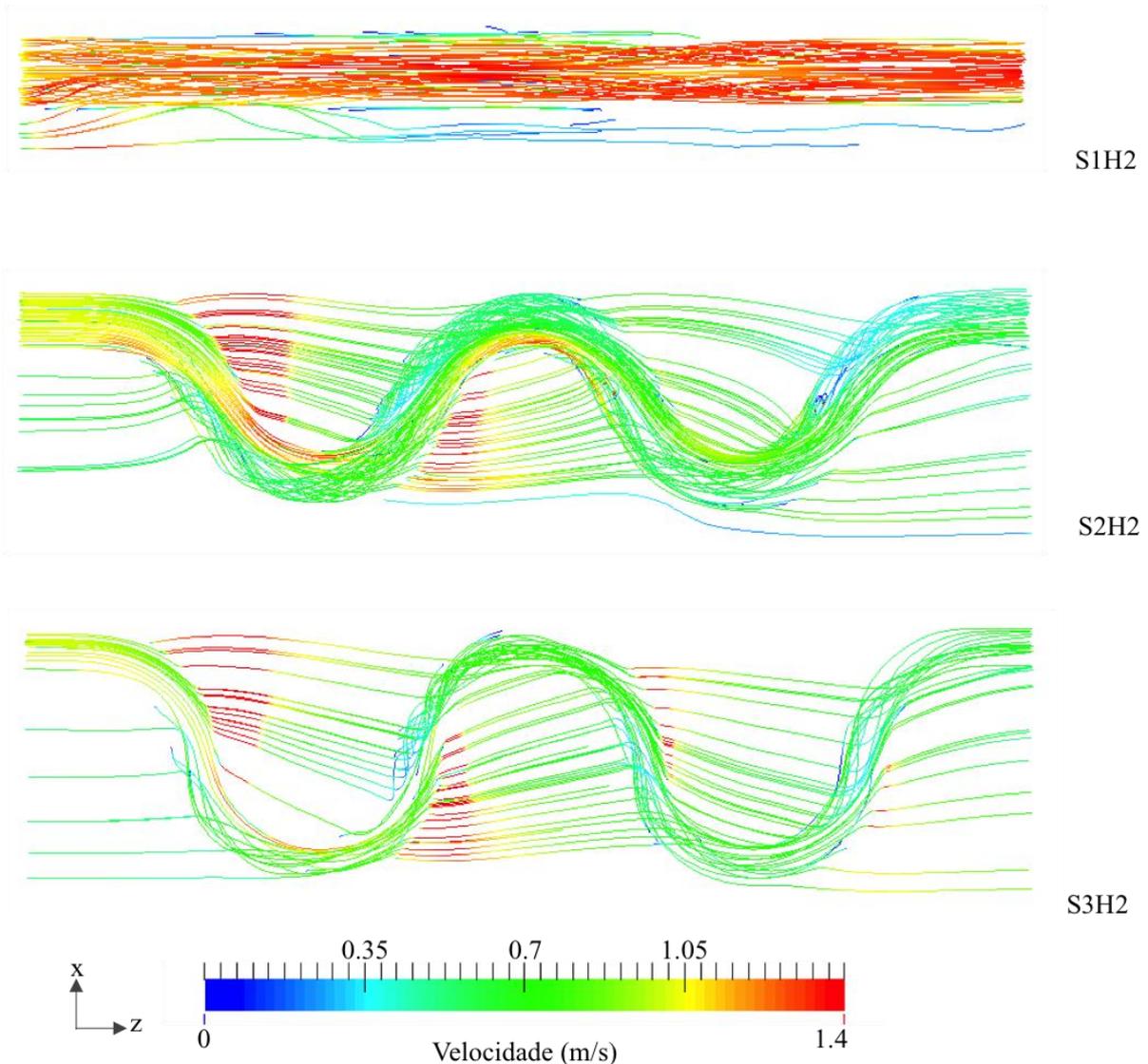
Figura 17 – Vetores de velocidades tridimensionais na seção transversal dos canais com pequeno nível de água ( $H = 1,7$  m)



(fonte: elaborado pela autora)

A figura 18 mostra a distribuição de velocidades ao longo da extensão do canal principal e da planície de inundação na forma de linhas de corrente que mostram o deslocamento das partículas no canal.

Figura 18 – Linhas de corrente nos canais com pequeno nível de água ( $H = 1,7$  m)



(fonte: elaborado pela autora)

As linhas de deslocamento das partículas dentro dos meandros do canal principal mostram o deslocamento secundário em espiral visualizado na distribuição de velocidades na seção transversal. Este movimento ocorre de forma mais intensa no início da curva, na margem externa, e perde força na região final do meandro, onde o deslocamento retilíneo é predominante.

A figura 18 mostra também que as maiores velocidades nos canais sinuosos com planície de inundação ocorrem na planície, após a metade da curva. Estas velocidades são mais elevadas

próximas ao primeiro meandro, devido à influência da condição de entrada. As análises são realizadas no segundo meandro, onde esta influência não é tão forte.

As linhas de deslocamento das partículas mostram que uma parte da água que flui pelo canal principal, especialmente pela margem externa, passa a escoar pela planície de inundação com grande velocidade.

## 6.4 CANAL COM GRANDE NÍVEL DE ÁGUA

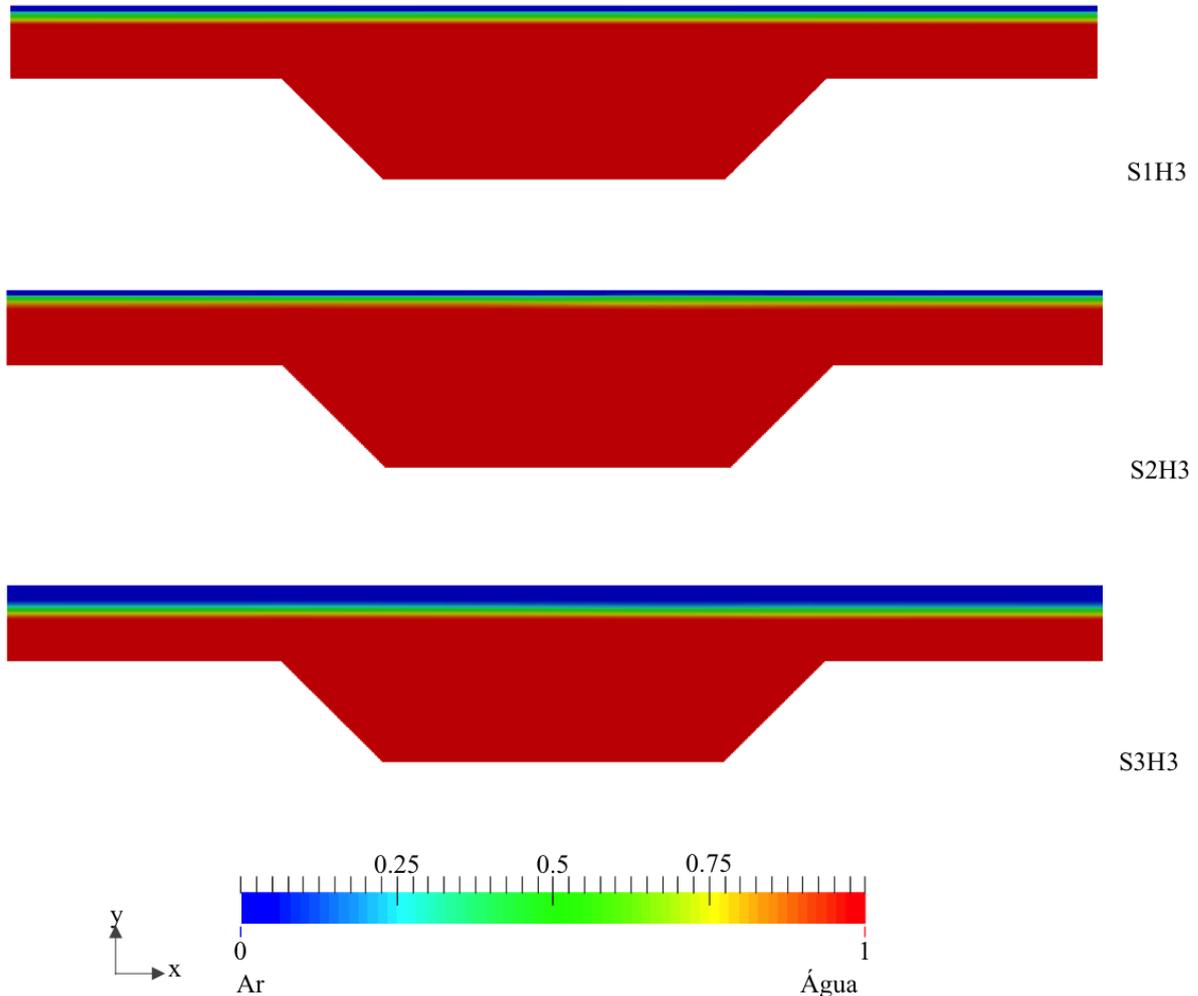
O domínio do canal com grande nível de água possui 2,6 m de altura. Acima do leito natural do rio há uma lâmina de água com 1 m, e acima desta encontra-se uma camada de ar de 0,1 m. Os resultados obtidos nas simulações dos canais com as três diferentes sinuosidades e grande nível de água são expostos a seguir.

### 6.4.1 Nível da água

Foi definido como condição inicial para a simulação de grande nível de água a lâmina de 1 m de água acima do leito natural do rio. A figura 19 apresenta os níveis da água para as três sinuosidades estudadas.

No canal retilíneo e com meandros suaves houve pequena variação do nível da água com relação ao nível inicial. O canal com grande sinuosidade apresentou redução significativa da altura da lâmina de água. Não há inclinação da superfície da água entre as duas margens dos canais.

Figura 19 – Lâmina da água na seção transversal dos canais com grande nível de água ( $H = 2,5$  m)



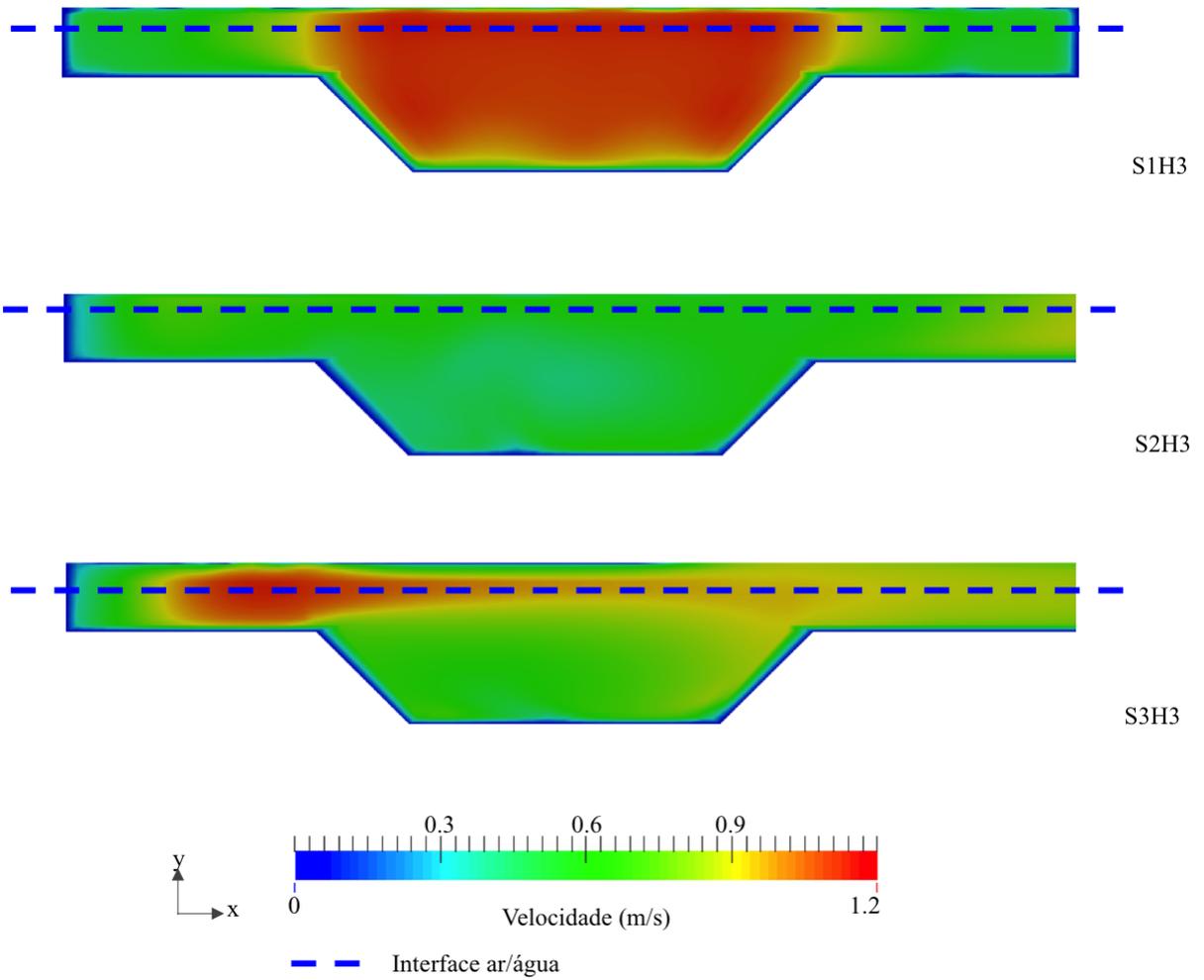
(fonte: elaborado pela autora)

### 6.4.2 Velocidade

A entrada de água no canal é constante ao longo de todo o tempo de simulação. A velocidade no canal principal é de 1 m/s. Nas planícies a velocidade de entrada é de 0,5 m/s.

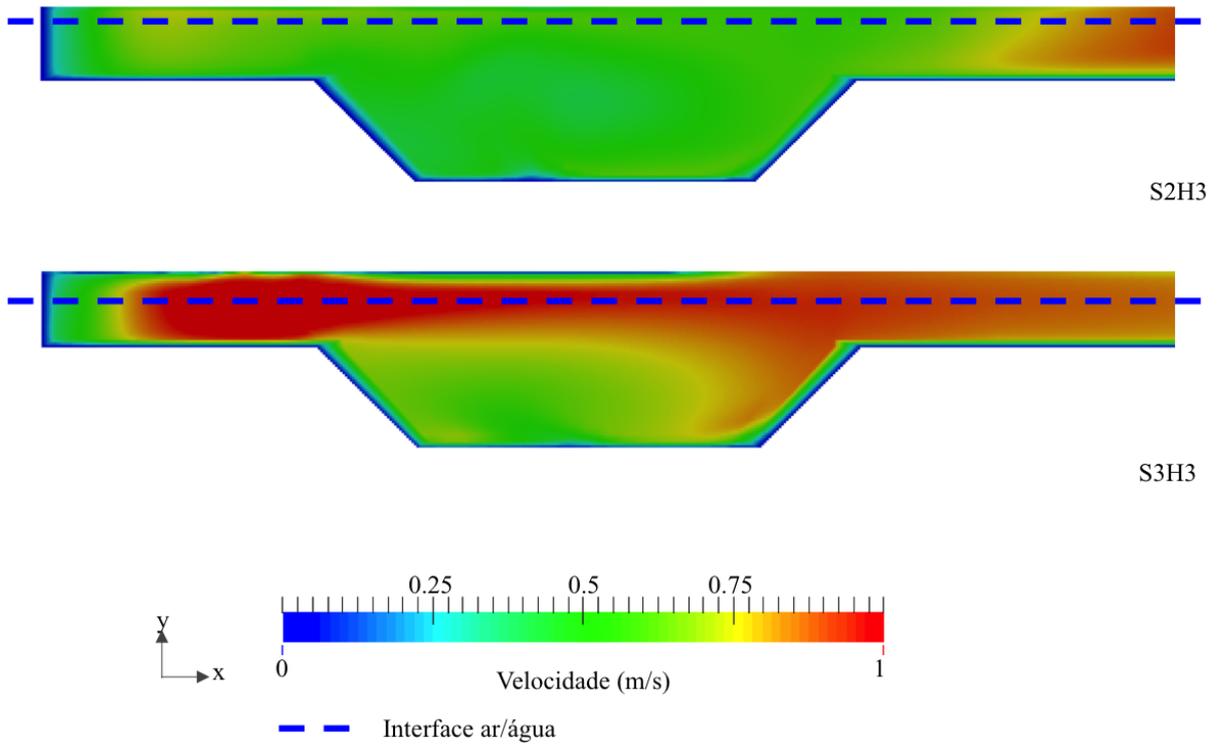
Na figura 20 encontra-se a distribuição de velocidades na seção transversal do canal. A figura 21 apresenta esta mesma distribuição com ajuste de escala para os canais S2H3 e S3H3. Os vetores velocidade são ilustrados na figura 22.

Figura 20 – Módulo da velocidade da água na seção transversal dos canais com grande nível de água ( $H = 2,5$  m)



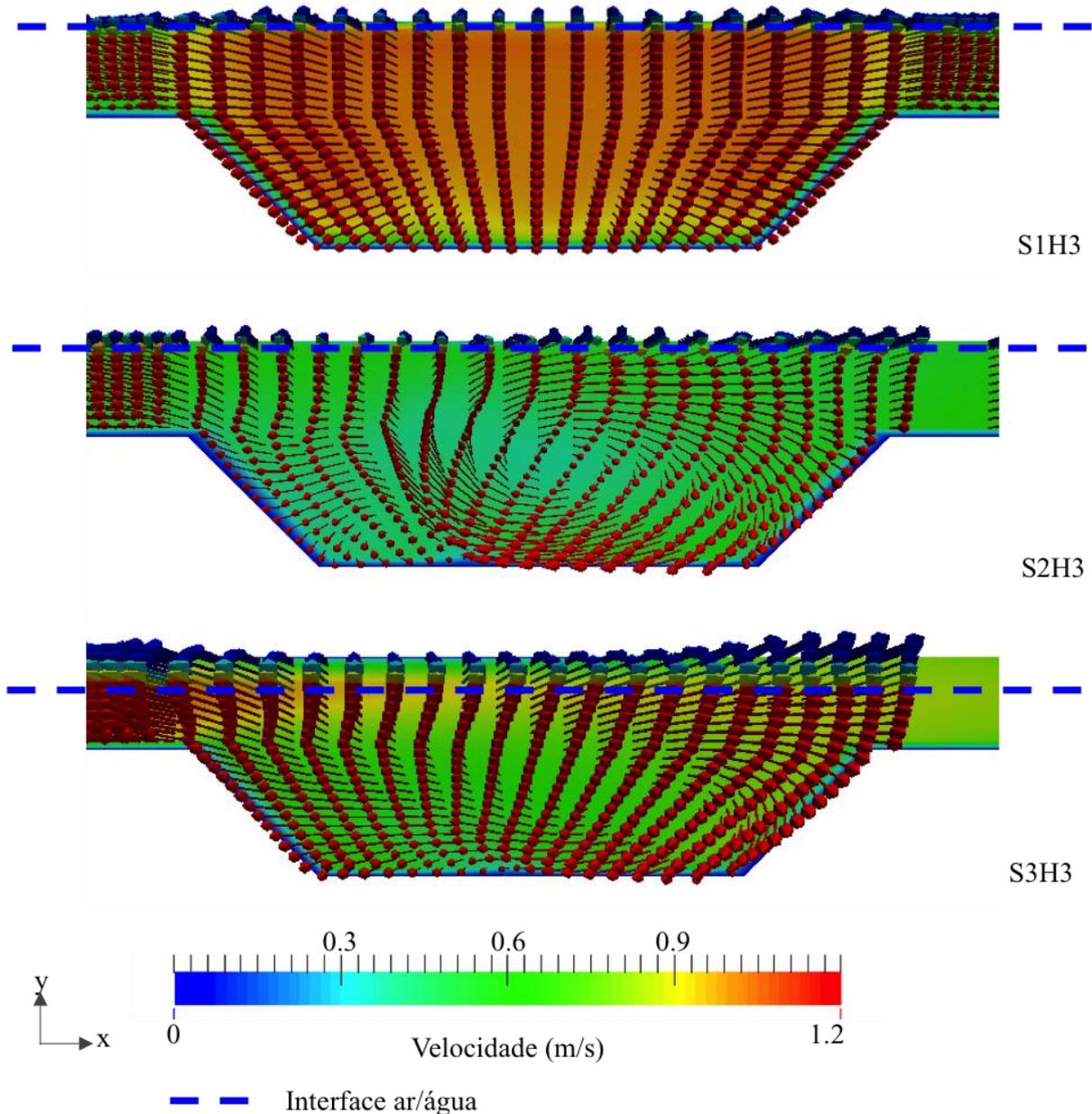
(fonte: elaborado pela autora)

Figura 21 – Módulo da velocidade da água na seção transversal dos canais sinuosos com grande nível de água ( $H = 2,5$  m)



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 22 – Vetores de velocidades tridimensionais na seção transversal dos canais com grande nível de água ( $H = 2,5\text{ m}$ )



(fonte: elaborado pela autora)

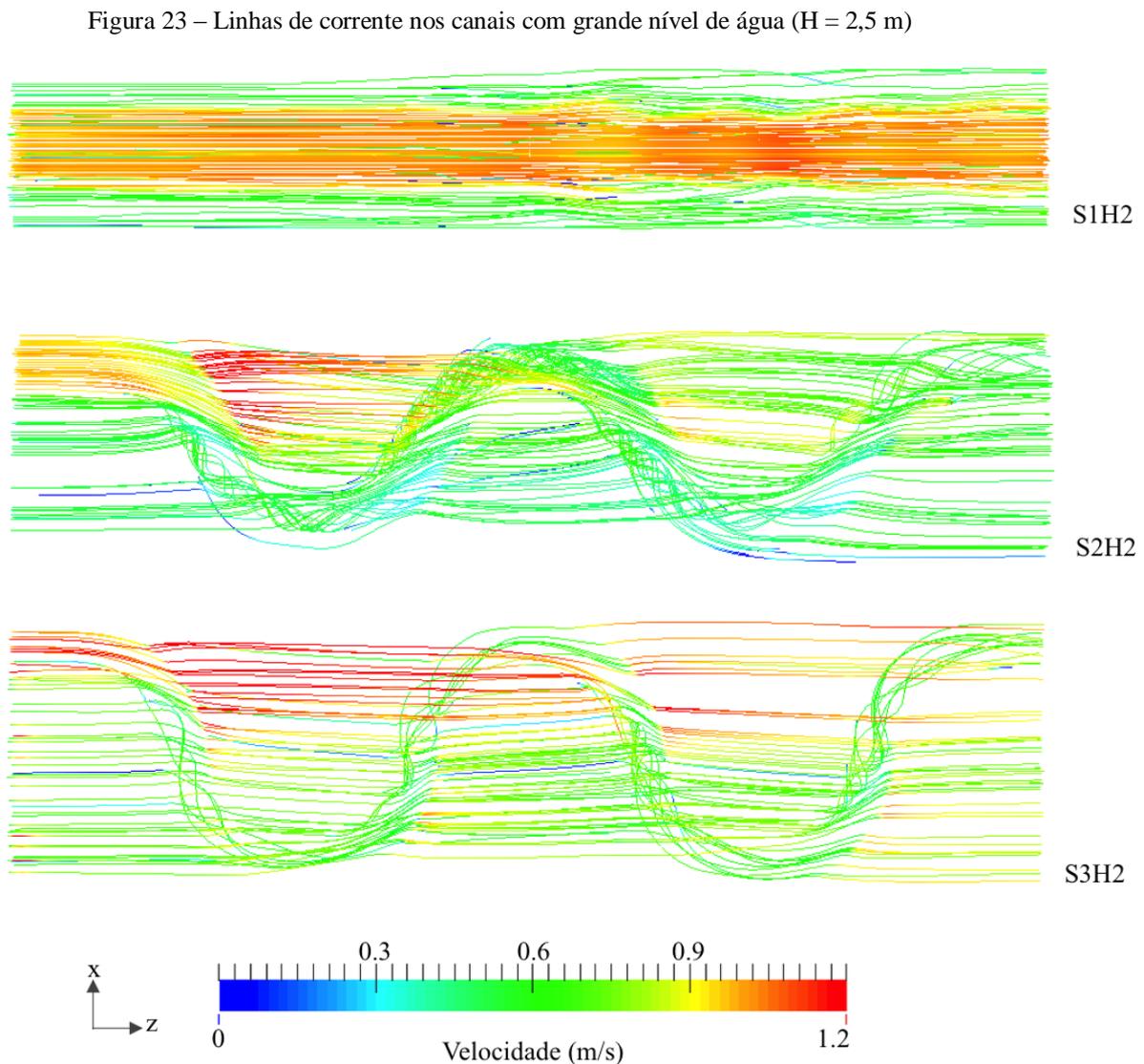
A distribuição de velocidades nas três seções transversais dos canais com grande inundação é distinta para cada canal. No canal retilíneo encontra-se a velocidade semelhante à velocidade de entrada da água, no canal principal e na planície de inundação.

Nos canais com meandros, a velocidade da água no canal principal é semelhante à velocidade definida na condição de contorno de entrada da água na planície de inundação. A mesma situação ocorre na planície de inundação, que possui velocidade mais alta, semelhante à

velocidade de entrada da água no canal principal. Uma provável causa deste efeito é a inexistência de rugosidade na planície de inundação e no canal principal.

Nas duas seções transversais dos canais com curvas está presente o fluxo secundário em espiral.

A figura 23 apresenta o deslocamento das partículas na extensão do canal, com a distribuição de velocidades.



(fonte: elaborado pela autora)

As maiores velocidades nos canais com meandros são encontradas próximas à entrada de água no canal principal, sendo muito influenciadas pela condição de contorno de entrada. A análise

da trajetória das partículas mostra que a água que entra no canal principal com grande velocidade flui pela planície de inundação, e que a água presente na seção transversal analisada é proveniente da entrada de água que ocorre na planície de inundação, com menor velocidade.

As linhas de deslocamento das partículas indicam também que os deslocamentos em espiral ocorrem no canal principal, mais intensamente no início das curvas.

## 6.5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo caracterizar o escoamento de rios com planície de inundação em situações com e sem extravasamento, para diferentes sinuosidades do canal principal e níveis de água, por meio de simulação numérica tridimensional, utilizando o *software* OpenFOAM. As análises foram realizadas para três diferentes sinuosidades do leito principal: canal retilíneo, canal com sinuosidade suave e severa. A simulação do escoamento em canais retilíneos foi realizada para servir de base de comparação com o fluxo da água nos canais sinuosos. O aumento do nível da água nos canais sem meandro não resultou em variações importantes no comportamento da água. Em geral, a água flui com velocidade semelhante à definida como condição de entrada. Mesmo com uma elevada altura de água na planície, a interação entre os fluxos de água que ocorrem no canal principal e na planície de inundação é fraca.

A presença da sinuosidade no canal principal faz com que as velocidades sejam menos uniformes dentro do canal, com valores muito maiores que os médios na margem interna e menores que a média na margem externa.

Quando ocorre a inundação e a água passa a escoar pela planície de inundação, estas velocidades tornam-se menos extremas e passam a ser mais uniformes na seção transversal do canal composto. Quando o nível da água na planície de inundação aumenta, o comportamento do escoamento varia muito, o efeito da presença dos meandros é menos intenso e as maiores velocidades passam a ocorrer na planície de inundação.

A influência da sinuosidade e do nível da água também é encontrada na variação da sobre-elevação da água. No escoamento sem inundação há uma grande inclinação da superfície livre do canal. Quando ocorre a pequena inundação ainda é possível perceber a inclinação da

lâmina da água, mas de forma suave. O aumento do nível da água na planície elimina esta pendente lateral da interface água/ar, pois o efeito da sinuosidade do canal principal é menor.

A existência do fluxo secundário em espiral foi verificada somente quando ocorre a inundação. O escoamento espiral possui padrão diferente para as duas sinuosidades, que se repete quando aumenta o nível da água na planície de inundação. A ocorrência deste fluxo está relacionada com a variação de pressões e velocidades encontrada entre as margens interna e externa da curva.

O escoamento busca sempre percorrer a menor distância, onde ocorre a menor perda de energia. Esse fenômeno pôde ser verificado através das linhas de corrente, em duas situações distintas. Dentro do canal sinuoso sem inundação, a maior parte do volume de água flui próximo à margem interna, aproximando o deslocamento o máximo possível de uma linha reta. Quando ocorre a inundação, as partículas que se movimentam pelo canal principal não realizam toda a curva, mas “cortam caminho” pela planície de inundação.

Por fim, foi verificado que a sinuosidade possui grande influência sobre o fluxo da vazão de rios, tanto durante o escoamento restrito ao canal principal, quanto quando ocorre a inundação. No momento em que há inundação, quanto maior o nível da água, menor é a influência da sinuosidade do canal.

## **7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.**

Neste trabalho foi estudada a influência que a sinuosidade do canal principal exerce sobre o escoamento de cheia em rios com planícies de inundação.

Verificou-se que há muita diferença no comportamento do escoamento em canal retilíneo e canal sinuoso, mas a diferença não é tão acentuada na comparação entre as duas sinuosidades estudadas. Além disso, é possível afirmar que quanto maior o nível da água, menor é a influência que a sinuosidade exerce sobre o escoamento da vazão de cheia.

Recomenda-se, como continuação do trabalho, pesquisar os seguintes assuntos:

- a) utilização de declividade única no domínio;
- b) variação da rugosidade da planície de inundação;
- c) aumento do número de períodos das senoides, para que não ocorra influência da condição de contorno;
- d) fazer as análises das tensões de cisalhamento e das vorticidades.

## REFERÊNCIAS

- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Fluid Mechanics: fundamentals and applications**. 1st ed. New York: McGraw-Hill, 2006.
- CHOW, V. T. **Hidráulica de canales abiertos**. 1. ed. Santafé de Bogotá: McGraw Hill, c1994.
- FORTUNA, A. O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012.
- KAWASAKI, K. VOF method. In: GOTOH, H.; OKAYASU, A.; WATANABE, Y. (Ed.) **Computational wave dynamics**. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., c2013. p. 75-99.
- KNIGHT, D. W. Hydraulics of flood channels. In: BEVEN, K.; CARLING, P. (Ed). **Floods: hydrological, sedimentological, and geomorphological implications**. Bath, UK: Wiley, c1989. p. 83-105.
- KNIGHT, D. W.; DEMETRIOU, J. D. Flood plain and main channel interaction. **Journal of Hydraulic Engineering**, [S. l.], v. 109, n. 8, p. 1073-1092, Aug. 1983.
- KNIGHT, D. W.; SHIONO, K. River channel and floodplain hydraulics. In: ANDERSON, M. G.; WALLING, D. E.; BATES, P. D. (Ed). **Floodplain processes**. Chichester, UK: Wiley, c1996. p. 139-181.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. Nile Bend, Egypt: Image of the Day, [S. l.], 2000. Disponível em: <<http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=8770>>. Acesso em: 05 maio 2014.
- OPEN SOURCE FIELD OPERATION AND MANIPULATION, version 2.3.0: computational fluid dynamics software. [S.l.]: OpenFOAM Foundation, 2014. Código computacional. Disponível em: <<http://www.openfoam.org/version2.3.0/>>. Acesso em: 29 nov. 2014.
- SELLIN, R. H. J.; ERVINE, D. A.; WILLETS, B. B. Behaviour of meandering two-stage channels. **Proceeding of the Institution of Civil Engineers Water Maritime and Energy**, London, v. 101, p. 99-111, June 1993.
- SHIONO, K.; KNIGHT, D. W. Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. **Journal of Fluid Mechanics**. [S. l.], v. 222, p. 617-646, 1991.
- STURM, T. W. **Open channel hydraulics**. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, c2010.
- TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas**. 1. ed. Porto Alegre: ABRH/RHAMA, 2007.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. 1st ed. Harlow: Longman, c1995.

WILCOX, D. C. **Turbulence modeling for CFD**. 2nd. ed. La Cañada: DCW Industries, Inc., c2000.

YEN, B. C. **Characteristics of subcritical flow in a meandering channel**. [Iowa City]: The University of Iowa, 1965.