

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Programa de Pós-graduação em Saneamento,**  
**Meio Ambiente e Recursos Hídricos**

**ESTUDOS DE REVITALIZAÇÃO DE CURSOS  
DE ÁGUA – TRECHO EXPERIMENTAL NO RIO  
DAS VELHAS**

**Isabela Labarrère Vieira Pereira**

**Belo Horizonte**

**2008**

**ESTUDOS DE REVITALIZAÇÃO DE CURSOS DE  
ÁGUA – TRECHO EXPERIMENTAL NO RIO DAS  
VELHAS**

**Isabela Labarrère Vieira Pereira**

**Isabela Labarrère Vieira Pereira**

**ESTUDOS DE REVITALIZAÇÃO DE CURSOS DE  
ÁGUA – TRECHO EXPERIMENTAL NO RIO DAS  
VELHAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem Física e Matemática em Hidráulica

Orientador: Márcio Benedito Baptista

Co-orientador: Edna Maria de Faria Viana

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2008



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Av. Contorno 842 – 7º andar 30110-060 Belo Horizonte – BRASIL

Tel: 55 (31) 3238-1882 Fax: 55 (31) 3238-1882 posgrad@desa.ufmg.br


www.smarh.eng.ufmg.br

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Estudos de Revitalização de Cursos de Água-Trecho Experimental  
no Rio das Velhas

**ISABELA LABARRÈRE VIEIRA PEREIRA**

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

  
Prof. MÁRCIO BENEDITO BAPTISTA - Orientador

  
Prof. EDNA MARIA DE FARIA VIANA - Co-Orientadora

  
Prof. MÁRCIA-MÁRIA LARA PINTO COELHO

  
Prof. MÁRIO CICARELI PINHEIRO

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por

\_\_\_\_\_  
Prof. Léo Heller  
Coordenador

\_\_\_\_\_  
Prof. Márcio Benedito Baptista  
Orientador

Belo Horizonte, 25 de janeiro de 2008.

*Aos meus Felipe e André, com todo amor.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por tornar isto possível e a todos que colaboraram na elaboração deste trabalho, especialmente:

Ao Professor Márcio Baptista, pelo exemplo de seriedade e profissionalismo, pela orientação presente em todas as etapas do projeto e pelo apoio e incentivo, que contribuíram para meu desenvolvimento na área de pesquisa.

Ao Professor Carlos Martinez pelo exemplo profissional e apoio sempre.

Aos Professores Mário Cicareli e Edna Viana pelo incentivo constante à pesquisa.

Aos Amigos Ana Paula Vianna, Márcio Resende e Alice Castilho pelas discussões produtivas, pelos incentivos e ajuda nos momentos mais importantes.

Aos Amigos João Alves, Lílian Magalhães, Humberto Soares e Carlos Lima pela colaboração no trabalho e contribuições essenciais.

À CPRM, em especial ao Eng<sup>o</sup>. Márcio Cândido, pela realização das medições hidrométricas e levantamento de dados em campo.

À Fapemig, CNPq e Deflor pela colaboração com o trabalho.

À Equipe de Botânica do ICB pela oportunidade do trabalho em conjunto.

À Golder Associates, pelo apoio e incentivo à continuidade de estudos.

Aos meus pais, José Vicente e Susana e ao meu marido Felipe, para os quais é difícil encontrar palavras que expressem todo o meu carinho e agradecimento. Muito obrigada!

Ao pequenino André que, na minha barriga, participou dos meus estudos. Um beijo da mamãe estudante!

## RESUMO

O presente trabalho visa apresentar os resultados do primeiro estudo na área de engenharia hidráulica desenvolvido em um trecho do rio das Velhas, na divisa das cidades de Belo Horizonte e Sabará. O trecho, com 500 metros de comprimento, é considerado como uma área experimental, no qual as diversas estruturas propostas e modeladas matematicamente serão implantadas no local. O trecho encontra-se em estado de degradação avançado, com acentuados processos de erosão e deposição de sedimentos.

O trabalho consiste, portanto, no estudo do comportamento hidráulico do referido trecho fluvial com vistas a subsidiar a análise do desempenho de estruturas de revestimento e contenção das margens propostas para revitalização de cursos de água. Foi, então, desenvolvido um modelo hidráulico unidimensional que permitiu a simulação da situação atual e das proposições de modificação.

Foram estudadas diversas técnicas de recuperação para proteção das margens, com foco especial nos espigões e revestimentos vegetais. Para o dimensionamento dos espigões foram utilizadas algumas referências consagradas. Entretanto, foi verificado que não existe uma consistência plena entre diversas referências consultadas, conduzindo a resultados pouco convergentes.

Os resultados das simulações e a observação do comportamento das diferentes técnicas estudadas, que estão sendo implantadas no local, devem possibilitar a verificação tanto da pertinência da modelagem computacional como também a real eficiência e aplicabilidade das técnicas utilizadas.

## ABSTRACT

The current work presents the results of the first study in the area of hydraulic engineering developed in a reach of the Velhas River, on the boundary between the cities of Belo Horizonte and Sabará. The reach, with 500 meters of length, is considered as experimental area, in which several restoring techniques will be implanted in the local. It is found in advanced state of degradation, with accentuated processes of erosion and sediment deposition.

The work consisted, therefore, in the study of the hydraulic behavior of the referred fluvial reach with the objective of analyzing the performance of revetment structures in mitigating erosive process for rehabilitation of water courses. The analysis included the development a one-dimensional hydraulic model allowing the simulation of the current situation and proposed mitigation measures.

Several protection techniques were studied, with special focus in the groynes and vegetative covers. For the dimensioning of the groynes some important references were used. However, it was verified that full consistency doesn't exist among several of the consulted references, leading to conflicting results.

The results of simulations and observation of the behaviour of different techniques studied, which are being deployed at the site, should enable the verification of both the relevance of computer modeling as well as the actual efficiency and applicability of the techniques used.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>v</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS .....</b>	<b>viii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
<b>2. JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>03</b>
<b>3. OBJETIVOS E ETAPAS METODOLÓGICAS .....</b>	<b>08</b>
3.1 OBJETIVO GERAL.....	08
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	08
3.3 ETAPAS METODOLÓGICAS .....	08
<b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>09</b>
4.1 HIDRÁULICA FLUVIAL.....	09
4.1.1 <i>Conceitos Relativos aos Escoamentos Livres</i> .....	09
4.1.2 <i>Velocidades Admissíveis e Tensões de Arraste</i> .....	14
4.1.3 <i>Turbulência</i> .....	17
4.2 MORFOLOGIA FLUVIAL.....	20
4.2.1 <i>Leito Fluvial</i> .....	21
4.2.2 <i>Conformação dos Sistemas Fluviais</i> .....	23
4.2.3 <i>Conformação dos Canais Fluviais</i> .....	24
4.3 SEDIMENTOS .....	28
4.4 MODELAGEM HIDRÁULICA.....	33
4.5 RECUPERAÇÃO E REVITALIZAÇÃO DE CURSOS DE ÁGUA .....	36
4.5.1 <i>Histórico</i> .....	36
4.5.2 <i>Principais Técnicas para Proteção das Margens</i> .....	38
4.6 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS .....	53
<b>5. DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO .....</b>	<b>55</b>
5.1 DESCRIÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL.....	55
5.2 LEVANTAMENTO DE DADOS .....	59
5.2.1 <i>Dados Topobatimétricos e Medição de Vazões</i> .....	59
5.2.2 <i>Estudos Hidrológicos</i> .....	62
5.3 INTERVENÇÃO EM ESTUDO: REVESTIMENTO VEGETAL E ESPIGÕES.....	64
5.4 MODELAGEM HIDRÁULICA.....	67
5.4.1 <i>Modelo Bidimensional: AQUADYN</i> .....	67
5.4.2 <i>Modelo Unidimensional: HEC-RAS</i> .....	71
<b>6. ANÁLISE E DISCUSSÃO .....</b>	<b>90</b>
<b>7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>100</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>102</b>
<b>APÊNDICE 1 .....</b>	<b>105</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 4.1 – Isótacas observadas no rio Amazonas, no estreito de Óbidos.....	11
FIGURA 4.2 – Perfil das velocidades em uma vertical.....	12
FIGURA 4.3 – Esquema da distribuição das velocidades em um curso de água .....	12
FIGURA 4.4 – Situações típicas de elevada turbulência.....	19
FIGURA 4.5 – Seção fluvial típica .....	22
FIGURA 4.6 – Fatores que afetam o equilíbrio morfológico de um curso de água .....	25
FIGURA 4.7 – Processo de formação de meandros .....	27
FIGURA 4.8 – escoamento em curvas .....	28
FIGURA 4.9 – Ábaco de Shields .....	31
FIGURA 4.10 – Desenho esquemático de plantio de brotos junto às margens.....	41
FIGURA 4.11 – Desenho esquemático de estabilização por meio de faxinas.....	41
FIGURA 4.12 – Espigões no rio Lek, Holanda.....	42
FIGURA 4.13 – Esquema em planta do fluxo entre os espigões.....	43
FIGURA 4.14 – Desenho esquemático de gabiões.....	52
FIGURA 5.1 – Localização regional do trecho em estudo.....	56
FIGURA 5.2 – Mapa Hidrográfico da Região em Estudo.....	57
FIGURA 5.3 – Foto de jusante para montante no rio das Velhas, Ponte BR 381 .....	58
FIGURA 5.4 – Vista geral do trecho em estudo.....	58
FIGURA 5.5 – Detalhe da erosão na margem esquerda do rio das Velhas .....	58
FIGURA 5.6 – Detalhe da deposição de sedimentos na margem direita do rio das Velhas .....	58
FIGURA 5.7 – Seção típica do trecho em estudo.....	60
FIGURA 5.8 – Fotos do trabalho de campo para levantamento de dados no rio das Velhas – Foto 1 .....	61
FIGURA 5.9 – Fotos do trabalho de campo para levantamento de dados no rio das Velhas – Foto 2.....	61
FIGURA 5.10 – Localização esquemática das seções batimétricas .....	61
FIGURA 5.11 – Detalhe da implantação da proteção na margem direita do rio das Velhas - Foto 1 .....	64
FIGURA 5.12 – Detalhe da implantação da proteção na margem direita do rio das Velhas - Foto 2 .....	64
FIGURA 5.13 – Detalhe da implantação da proteção na margem direita do rio das Velhas - Foto 3 .....	64
FIGURA 5.14 – Detalhe da implantação da proteção na margem direita do rio das Velhas - Foto 4 .....	64
FIGURA 5.15 – Espécies escolhidas e seqüência de plantio.....	66
FIGURA 5.16 – Seção retangular inserida no AquaDyn.....	68
FIGURA 5.17 – Velocidade – Seção retangular .....	68
FIGURA 5.18 – Elevação do nível d’água – Seção retangular .....	69
FIGURA 5.19 – Resultado obtido na simulação: velocidade.....	70
FIGURA 5.20 – Entrada de dados no HEC-RAS – Seção típica.....	72
FIGURA 5.21 – Visualização das oito seções inseridas no HEC-RAS.....	72
FIGURA 5.22 – Visualização das oito seções inseridas no HEC-RAS – Perspectiva.....	73

FIGURA 5.23 – Detalhes da margem esquerda do rio das Velhas – Foto 1 .....	76
FIGURA 5.24 – Detalhes da margem esquerda do rio das Velhas – Foto 2 .....	76
FIGURA 5.25 – Detalhes da margem direita do rio das Velhas – Foto 1 .....	76
FIGURA 5.26 – Detalhes da margem direita do rio das Velhas – Foto 2 .....	76
FIGURA 5.27 – Mancha de inundação para a vazão de 2 anos de período de retorno .....	78
FIGURA 5.28 – Margem esquerda do rio das Velhas: local proposto para implantação de espigões, Foto 1 .....	79
FIGURA 5.29 – Margem esquerda do rio das Velhas: local proposto para implantação de espigões, Foto 2 .....	79
FIGURA 5.30 – Localização esquemática da implantação dos espigões .....	81
FIGURA 5.31 – Geometria do HEC-RAS – Espigões na margem esquerda do rio das Velhas.....	82
FIGURA 5.32 – Figura esquemática de um espigão inserido no HEC-RAS .....	82
FIGURA 5.33 – Figura esquemática do espigão no HEC-RAS com alturas crescentes .....	83
FIGURA 6.1 – Figura comparativa entre a situação atual e situação modificada – tensões de cisalhamento.....	95
FIGURA 6.2 – Figura comparativa entre a situação atual e situação modificada 02 – tensões de cisalhamento.....	96
FIGURA 6.3 – Figura comparativa entre a situação atual e situação modificada 03 – tensões de cisalhamento.....	97

## LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 – Velocidades admissíveis em canais naturais.....	15
TABELA 4.2 – Tensões de arraste críticas .....	17
TABELA 4.3 – Inclinações admissíveis de taludes em canais .....	26
TABELA 4.4 – Principais Tipos de Proteção das Margens.....	38
TABELA 4.5 – Velocidades permissíveis para canais gramados.....	40
TABELA 4.6 – Espaçamento dos espigões, recomendados por diversos autores .....	45
TABELA 4.7 – Inclinação dos espigões, recomendada por diversos autores .....	46
TABELA 4.8 – Intensidade de Turbulência .....	51
TABELA 4.9 – Velocidades Críticas e Limites para Gabiões.....	53
TABELA 5.1 – Resumo das medições obtidas no 1º. trabalho de campo .....	62
TABELA 5.2 – Resumo das medições obtidas no 2º. trabalho de campo .....	62
TABELA 5.3 – Quantis regionais adimensionalizados .....	63
TABELA 5.4 – Vazões de cheia para o trecho em estudo (m <sup>3</sup> /s).....	63
TABELA 5.5 – Calibração das seções obtidas no dia 31/03 – Q <sub>média</sub> =28,1 m <sup>3</sup> /s .....	74
TABELA 5.6 – Calibração das seções obtidas no dia 01/04 – Q <sub>média</sub> =31,6 m <sup>3</sup> /s .....	74
TABELA 5.7 – Calibração considerando a vazão média – Q <sub>média</sub> =29,4 m <sup>3</sup> /s .....	75
TABELA 5.8 – Validação do modelo, considerando a vazão média da 1ª. Campanha – Q <sub>média</sub> =19,5 m <sup>3</sup> /s .....	75
TABELA 5.9 – Resultados da Simulação do HEC-RAS – Situação Atual .....	77
TABELA 5.10 – Resultados da Simulação do HEC-RAS – Situação Modificada .....	84
TABELA 5.11 – Resultados da Simulação do HEC-RAS – Situação Modificada – 02.....	86
TABELA 5.12 – Resultados da Simulação do HEC-RAS – Situação Modificada – 03.....	87
TABELA 5.13 – Informações Básicas da Estação Honório Bicalho.....	88
TABELA 5.14 – Análise dos Parâmetros – Estação Honório Bicalho.....	88
TABELA 6.1 – Tabela comparativa entre a simulação da situação atual e situação modificada .....	92
TABELA 6.2 – Tabela comparativa entre a simulação da situação atual e situação modificada – 02 .....	93
TABELA 6.3 – Tabela comparativa entre a simulação da situação atual e situação modificada – 03 .....	94

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$\alpha$	Coeficiente de Coriolis
$\beta$	Coeficiente de Boussinesq
$\tau$	Tensão de arraste
$\gamma$	Peso específico da água
$\nu$	viscosidade cinemática da água
$\rho$	massa específica
$\tau_0$	Tensão de arraste no leito
$\tau_t$	Tensão de arraste no talude
$\tau_x(y)$	Tensão tangencial na direção x e a uma profundidade y
$\theta$	ângulo do talude com a horizontal
$\Phi$	ângulo de repouso do material
$\aleph$	coeficiente de mistura para escoamento turbulento
$\varepsilon$	coeficiente de viscosidade aparente ou de viscosidade turbulenta
A	Área de drenagem
ANA	Agência Nacional das Águas
B	Largura média do canal
C	Fator de resistência
$C_t$	Coeficiente de turbulência do escoamento
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
D	Diâmetro médio dos sedimentos
Fr	Número de Froude
g	Aceleração da gravidade
h	Altura da lâmina d'água ou profundidade
HEC-RAS	River Analysis System
I	Declividade
ICB	Instituto de Ciências Biológicas
IT	Intensidade de Turbulência
k	Coeficiente de correção
$k_s$	Fator de correção granulométrica
K	Fator de correção para determinação da tensão permissível nos taludes

$L$	–	Distância entre os espigões
$L_T$	–	Comprimento de trabalho do espigão
MEF	–	Método dos Elementos Finitos
MMA	–	Ministério do Meio Ambiente
$n$	–	Coefficiente de Rugosidade de Manning
NA	–	Nível d'água
PNRH	–	Plano Nacional de Recursos Hídricos
$Q$	–	Vazão
$Q_s$	–	Descarga do material sólido
$Q_{\max med}$	–	Média das vazões máximas anuais
$Q_{MLT}$	–	Vazão média de longo termo
$R_h$	–	Raio Hidráulico
$R_{h1}$	–	Ro Hidráulico referente à profundidade de um metro
SMS	–	Surface-Water Modeling System
$t$	–	Tempo
TR	–	Período de retorno
UFMG	–	Universidade Federal de Minas Gerais
$v$	–	Velocidade média do escoamento na seção
$v^*$	–	Velocidade de arraste
$V_b$	–	Velocidade de escoamento junto ao leito
$x$	–	distância ao longo do canal
$y$	–	Profundidade da lâmina d'água

# 1 INTRODUÇÃO

A atividade humana tem afetado profundamente cursos de água em corpos hídricos de todas as partes do mundo, a tal extensão que é difícil encontrar um córrego ou rio que não tenha sido de alguma maneira alterado (H.B.N. Hynes, 1970 *apud* FISRWG, 2001).

Ao longo das últimas décadas, um sistema eficiente de drenagem urbana foi admitido como aquele capaz de evacuar rapidamente as cheias, minimizando os riscos de inundações e prejuízos às populações urbanas. No entanto, a prática da canalização não tem trazido solução para os problemas da falta de saneamento, como pode ser comprovado pelas sucessivas crises nos sistemas de drenagem implantados em diversas cidades e metrópoles brasileiras. Pelo contrário: as canalizações suprimem as condições naturais dos mananciais de águas e induzem à ocupação de suas várzeas e planícies de inundações, além de transferirem as inundações locais para regiões situadas a jusante. As impermeabilizações reduzem o potencial de infiltração das águas pluviais, alterando o regime do escoamento nos rios.

Nas áreas rurais também são verificados problemas nos cursos de água, com áreas de instabilidade e erosões das margens. Isto se deve às modificações que vêm sendo realizadas na morfologia fluvial, relacionadas principalmente à retirada das matas ciliares e retificações dos cursos de água. As ocupações nas bacias hidrográficas e cabeceiras dos rios levam à alterações nas vazões, conduzindo a um aumento na velocidade do escoamento, impactos nos cursos de água e inundações.

Entretanto, tem sido defendido ao longo dos últimos anos, o conceito de que a melhor intervenção a se realizar num curso de água é a implantação de ações ambientais, de planejamento da ocupação do espaço urbano, de revitalização da fauna e flora dos cursos de água e a preservação de áreas necessárias à sua evolução natural.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma modelagem hidráulica para avaliação de alternativas de revestimentos de canais e contenção das margens para revitalização de cursos de água, analisando o desempenho das estruturas propostas.

O trabalho tem como base um estudo de caso em um trecho do rio das Velhas, a jusante da ponte sobre o rio das Velhas, na BR 381, divisa das cidades de Belo Horizonte e Sabará, com extensão de aproximadamente 500 m. O trecho encontra-se em estado avançado de

degradação e as interferências causadas a montante do rio inevitavelmente se fazem presentes na morfologia fluvial. O curso de água, na busca do equilíbrio, escava uma das margens e deposita sedimentos na outra, podendo-se verificar, no local, problemas de erosão, assoreamento e instabilidade das margens.

O trecho em estudo é considerado como uma área experimental para avaliação de alternativas de revitalização de cursos de água, no qual as diversas estruturas propostas e modeladas matematicamente serão implantadas no local, permitindo verificar, na prática, a real eficiência e aplicabilidade das estruturas.

O projeto representa uma conjugação de esforços de diversas instituições, sendo coordenado pelo Departamento de Botânica do Instituto de Ciências Biológicas da UFMG, que está estudando espécies de vegetação apropriadas para revitalização dos cursos de água e preservação da mata ciliar. Ele conta com a parceria do Projeto Manuelzão, projeto de extensão da UFMG, sendo as medições hidrométricas realizadas pela CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais). O órgão financiador do conjunto dos estudos é o Ministério do Meio Ambiente – MMA.

A dissertação de mestrado, objeto do presente documento, é estruturada em sete capítulos, sendo que no Capítulo 2 é apresentada a justificativa para elaboração do estudo. No Capítulo 3 são apresentados os objetivos e etapas metodológicas adotadas no desenvolvimento do estudo. A revisão bibliográfica, apresentada no Capítulo 4, discorre sobre hidráulica fluvial, morfologia fluvial, sedimentos, modelagem hidráulica e recuperação e revitalização de cursos de água. No Capítulo 5 é apresentado o desenvolvimento do estudo, com descrição do trecho experimental e intervenções propostas. As análises e discussões estão apresentadas no Capítulo 6 e as conclusões e recomendações, no Capítulo 7. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas, utilizadas como base para o presente estudo.

## 2 JUSTIFICATIVA

A expansão urbana acelerada das cidades brasileiras ocorreu em um cenário de escassez de recursos financeiros públicos para investimentos em infra-estrutura básica. Assim, os cursos de água naturais transformaram-se, via de regra, em meios receptores de poluição, esgotos e lixo. Além disto, cresceu também o percentual de áreas impermeabilizadas, que reduzem o potencial de infiltração de águas pluviais. Uma parcela cada vez maior das chuvas é convertida em escoamento superficial, levando estruturas de drenagem ao colapso e, por outro lado, ocorre a redução do volume de água disponibilizado para a recarga de aquíferos, que se constituem em importantes reservatórios subterrâneos e garantem o escoamento nos cursos de água ao longo dos períodos de estiagem.

Como resultado da diminuição do potencial de infiltração, as cheias nos cursos de água ao longo de bacias urbanas, escoando por canais naturais ou revestidos, tendem a ocorrer com maior intensidade, tanto em termos de vazão quanto em termos de velocidade, uma vez que a impermeabilização de bacias acelera a chegada das águas aos fundos de vale, tornando, assim, mais acentuados, os picos de vazão. Dependendo do grau da cobertura impermeável, o volume anual da vazão de cheia pode aumentar em até 16 vezes em relação à vazão natural (Schueler, 1995 *apud* FISRWG, 2001).

Na visão da população urbana ribeirinha, tem sido preferível excluir um curso de água com a construção de um canal de concreto do que conviver com a insalubridade, o mau cheiro, a degradação ambiental e inundações recorrentes. Essa maneira de encarar o problema no meio urbano reflete uma forma estanque de enxergar a realidade. Revela, também, uma ambigüidade na medida em que atualmente presencia-se um grande avanço das concepções ambientalistas para a organização do espaço urbano.

Em áreas rurais também pode-se verificar a modificação da morfologia fluvial, causando danos às margens e ao escoamento nos rios. Diversos rios em áreas rurais foram retificados e suas extensões diminuíram. O objetivo foi baixar o nível freático, drenar as águas e aproveitar as terras para a agricultura, a pecuária e expansão urbana. Com a perda da mata nas bacias contribuintes, as vazões naturais dos rios e córregos se modificaram. As águas passaram a escoar com maior velocidade e a erosão aumentou. Como decorrência dessas transformações,

verificaram-se grandes prejuízos aos ecossistemas e o rebaixamento do leito do curso d'água (Selles *et al.*, 2001).

A retirada da mata ciliar provoca a perda da estrutura do solo e dos organismos, afetando bastante os lugares propícios à alimentação, desova e condições de vida da fauna aquática e ribeirinha, além de potencializar a erosão. As retiradas de areia dos rios também afetam o ecossistema aquático. Entretanto, em áreas rurais, a possibilidade de revitalização e recuperação de rios é maior, devido à facilidade de se obter maiores áreas e por suas águas serem, normalmente, menos poluídas.

O avanço de minerações localizadas nas cabeceiras das bacias hidrográficas também tem contribuído para a deterioração dos cursos de água, com o aumento do aporte de sedimentos às bacias, modificação do regime hidrológico, devido às captações e implantação de barragens e alteração na qualidade das águas com o lançamento de efluentes.

Toda essa combinação de fatores, tanto em rios presentes em áreas urbanas como rurais, propicia o rompimento de uma situação de equilíbrio morfológico das bacias hidrográficas e cursos de água, no qual os rios e córregos são naturalmente transportadores de sedimentos, escavados durante décadas ao longo dos terrenos das bacias e de sua calha. Em trechos de maior velocidade de escoamento, o rio escava suas margens, num processo de transferência de energia, transporta os sedimentos escavados pelo leito ou em suspensão e os deposita em trechos de menor velocidade, num contínuo e lento processo de busca de equilíbrio.

As condições do equilíbrio morfológico podem ser traduzidas pela Equação de Lane (1955, *apud* Baptista e von Sperling, 2007), dada por:

$$Q_s \cdot D \propto Q \cdot I \quad (2.1)$$

onde  $Q_s$  é a descarga sólida,  $Q$  a descarga líquida,  $D$  o diâmetro mediano do material sólido transportado e  $I$  a declividade do leito fluvial.

Uma vez alterada a gênese das vazões numa determinada bacia hidrográfica e o estado de equilíbrio é rompido, começam a ocorrer problemas com erosões, assoreamentos, instabilidade das margens e aumento de áreas potencialmente inundáveis. Muitas obras estruturais, ou seja, que promovem drásticas alterações na morfologia da calha fluvial, se

apresentam como agentes altamente degradantes, se considerados os impactos causados a jusante.

Tem sido defendido ao longo dos últimos anos, o conceito de que a melhor intervenção a se realizar num curso de água é a implantação de ações ambientais, de maneira que os cursos de água fiquem o mais próximo possível do natural. Entretanto, para que os projetos de revitalização e recuperação de cursos de água sejam eficientes, são necessários estudos mais avançados das técnicas de revitalização existentes e da hidráulica fluvial do curso de água nos quais as estruturas serão implantadas, com utilização de modelagem matemática, identificação de pontos críticos, verificação das velocidades do escoamento, capacidade limite das estruturas propostas entre outros.

É de consenso geral que a água é um recurso natural limitado, essencial à existência e bem estar do homem e à manutenção dos ecossistemas do planeta e, conforme apresentado na Lei 9.433/97, dotado de valor econômico. Os benefícios da revitalização de cursos de água demoram a aparecer, mas é preciso reconhecer a importância da água no planeta e investir na sua preservação e recuperação.

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (2006) o termo revitalização de cursos de água compreende o processo de recuperação, conservação e preservação ambiental, por meio da implementação de ações integradas e permanentes, que promovam o uso sustentável dos recursos naturais, a melhoria das condições socioambientais, o aumento da quantidade e a melhoria da qualidade da água para usos múltiplos.

A preservação dos mananciais naturais de água oferece melhores condições de ambientação das cidades, além de proporcionar meios de lazer e recreação para as comunidades. A preservação das várzeas oferece a vantagem da contenção dos problemas de inundação, além da preservação do ecossistema natural.

A mata ciliar melhora as condições ecológicas, hidrológicas e morfológicas dos cursos de água, sendo de extrema importância sua recuperação e preservação. O Código Florestal (Lei nº 4.771/65) estabelece restrições ao direito de propriedade sobre as árvores e a vegetação em geral, condicionando seu uso ao interesse público e delimita áreas onde a vegetação não pode ser suprimida.

Riley (1998) destaca os seguintes aspectos incentivadores da restauração de cursos de água:

- redução de danos das inundações;
- redução de danos da erosão nas margens dos cursos de água;
- preservação ou restauração de recursos históricos ou culturais;
- encorajamento de retorno e aves e vida selvagem a refúgios urbanos;
- desenvolvimento de trilhas de pedestres e ciclistas;
- elevação da qualidade de vida urbana e ambientes vizinhos;
- restauração da identidade regional ou local;
- fornece cinturões verdes, espaços abertos e parques;
- cria oportunidades de navegação e outras recreações aquáticas;
- cria oportunidades educacionais interessantes para escolas;
- volta ou melhora a pesca recreacional ou comercial;
- revive um centro urbano decadente e uma economia comercial depreciada;
- cria trabalhos significativos e fornece treinamento para trabalhos;
- aumenta o valor de propriedades;
- corrige os problemas de performance e reverte os danos de grande e pequenos projetos de engenharia;
- fornece uma fonte segura de alimento para família de pescadores;
- volta a vida pública e comercial para regiões ribeirinhas urbanas.

Desta forma, revitalizar rios é fundamental para a possibilidade de que outros usos sejam novamente introduzidos, ao invés da sua utilização apenas como meio drenante e de transporte de esgotos, lixo e águas de enchentes.

A conservação e revitalização de cursos de água, em áreas urbanas e rurais, e a proteção das águas subterrâneas são importantes na gestão dos Recursos Hídricos.

Com a assinatura da Convenção sobre Diversidade Biológica em 1992, o Brasil assumiu alguns compromissos com o objetivo de promover a conservação, o uso sustentável e a repartição dos benefícios oriundos da biodiversidade. O Programa de Revitalização de Bacias Hidrográficas está incluído dentre as políticas públicas que o Brasil vem adotando, destinadas à proteção da biodiversidade (PNRH, 2006).

As diversas propostas de revitalização de cursos de água utilizam técnicas de engenharia ambiental e buscam compatibilizar obras e interesses, tais como: proteção contra enchentes, drenagem, irrigação, recreação e proteção de espécies, minimizando os impactos ambientais nos sistemas fluviais (Selles *et al.*, 2001).

Entretanto, são poucos os estudos científicos existentes para verificar a real eficiência e aplicabilidade das estruturas propostas.

Com a utilização de modelagem hidráulica, o presente trabalho apresenta uma abordagem técnico-científica para o estudo de alternativas de revitalização de cursos de água, permitindo um maior conhecimento do tema, com vistas a possibilitar uma utilização racional das técnicas de engenharia.

## **3 OBJETIVOS E ETAPAS METODOLÓGICAS**

### **3.1 *Objetivo Geral***

Dentro do contexto apresentado anteriormente, o objetivo geral do trabalho é estudar o comportamento hidráulico de um trecho fluvial com vistas a analisar o desempenho de estruturas de revestimento e contenção das margens para sua revitalização.

### **3.2 *Objetivos Específicos***

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Estudar alternativas de contenção e estabilização das margens de cursos de água para um trecho do rio das Velhas, que se encontra em estado avançado de degradação;
- Estabelecer um modelo hidráulico do trecho em estudo e desenvolver simulações da situação atual e projetada;
- Com base na modelagem realizada, avaliar a aplicabilidade das estruturas propostas, subsidiando a avaliação da eficiência das mesmas.

### **3.3 *Etapas Metodológicas***

Para a consecução dos objetivos apresentados, foram realizadas as seguintes etapas metodológicas:

- Revisão bibliográfica com base nos temas relacionados a hidráulica fluvial, morfologia fluvial, sedimentos, modelagem hidráulica e recuperação e revitalização de cursos de água;
- Levantamento de dados relativos ao estudo de caso, com a obtenção de dados topobatimétricos, medições de vazões no curso de água e realização de estudos hidrológicos;
- Estudos de alternativas de revitalização de cursos de água;
- Construção do modelo hidráulico computacional;
- Desenvolvimento de simulações, considerando a situação atual e a situação modificada, conforme as intervenções propostas;
- Análises dos resultados obtidos.

## **4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A revisão bibliográfica teve como principal objetivo ampliar o conhecimento nos diversos temas relacionados a recuperação e revitalização de cursos de água, servindo como base para o desenvolvimento do presente estudo.

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica dos principais conceitos e parâmetros envolvidos na hidráulica fluvial que podem afetar tanto o escoamento nos cursos de água como a morfologia fluvial. Em seguida é apresentada uma revisão bibliográfica sobre morfologia fluvial e sedimentos em cursos de água. No item 4.4 é apresentada uma revisão sobre modelagem hidráulica. Por fim, no item 4.5, é apresentada a evolução histórica dos estudos de revitalização e recuperação de cursos de água e as principais técnicas usualmente adotadas.

### **4.1 Hidráulica Fluvial**

Este item tem como objetivo apresentar os principais conceitos relativos aos escoamentos livres, as velocidades admissíveis nos canais e tensões de arraste, além de considerações relativas a meandros e canais em curvas.

#### **4.1.1 Conceitos Relativos aos Escoamentos Livres**

Para que as propostas de revitalização de cursos de água sejam eficientes é necessário conhecer os fundamentos da hidráulica fluvial do trecho em estudo. Desta forma, o presente item apresenta os principais conceitos relacionados ao escoamento livre e alguns problemas específicos de relevância para estudos de revitalização de cursos de água.

O escoamento livre é caracterizado pela presença de uma superfície em contato com a atmosfera. Devido a uma maior variabilidade, tanto quanto à forma, quanto à rugosidade das paredes dos condutos, os escoamentos livres apresentam maior complexidade nas formulações matemáticas, se comparados aos escoamentos em condutos forçados (Baptista e Coelho, 2003).

Os escoamentos podem ser laminar ou turbulento. Na hidráulica fluvial, em geral, os escoamentos se enquadram na categoria de turbulento. O escoamento laminar pode ocorrer quando o fluido é muito viscoso ou a velocidade de escoamento é muito pequena. No

escoamento turbulento as partículas têm trajetórias irregulares, causando uma transferência da quantidade de movimento de uma parte a outra do fluido.

Define-se como Escoamento Permanente aquele em que a velocidade e a profundidade, numa determinada seção transversal, não variam no tempo. No caso contrário, onde existe a variação temporal da velocidade e, como consequência, da profundidade, o escoamento é chamado de Escoamento Não-Permanente.

As equações utilizadas para o estudo do escoamento, tanto na sua forma unidimensional, como em sua forma bidimensional ou tridimensional, são as equações gerais de Navier-Stokes. Uma simplificação das equações de Navier-Stokes, levando-se em consideração características que ocorrem no escoamento livre da água na temperatura ambiente, leva às equações de Saint-Venant, que são largamente utilizadas para a descrição do escoamento em canais abertos (Baptista *et al.*, 2001).

As equações de Saint-Venant são formadas pela equação da continuidade e pela equação da quantidade de movimento. Conforme apresentado por Strasser *et al.* (2005), a equação da continuidade é dada por:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + v \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{q}{B} \quad (4.1)$$

Onde:

$h$  é a profundidade;

$t$  é o tempo;

$v$  é a velocidade média do escoamento na seção;

$x$  é a distância ao longo do canal;

$q$  é a contribuição lateral por unidade de comprimento;

$B$  é a largura superficial da seção transversal.

A equação da quantidade de movimento, também denominada equação dinâmica, é dada por:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{q}{A} = g(S_0 - S_f) \quad (4.2)$$

Onde:

$g$  é a aceleração da gravidade;

$A$  a área molhada da seção transversal do canal;

$S_0$  é a declividade do rio ou do canal;

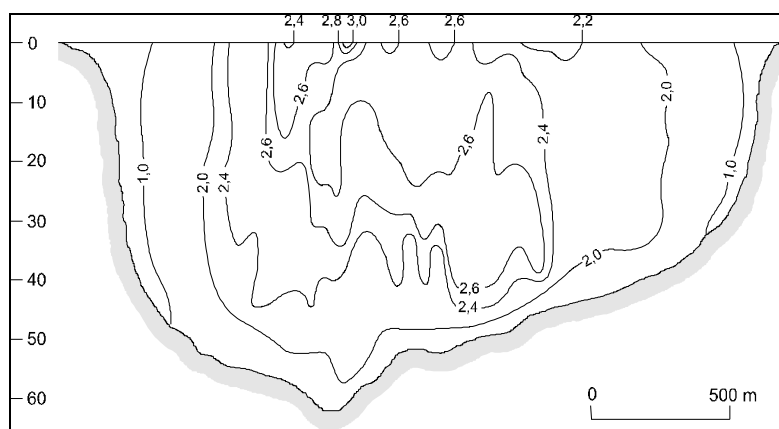
$S_f$  é a declividade da linha de energia (perda de carga por unidade de comprimento do canal).

Para o cálculo da perda de carga, utiliza-se uma terceira equação, que representa a resistência ao escoamento, que pode ser representada pela fórmula de Manning.

As equações apresentadas correspondem às equações gerais de Saint-Venant. A solução analítica das Equações de Navier-Stokes ou de Saint-Venant é impossível, fazendo com que a aplicação de procedimentos aproximados de discretização das equações seja necessária para que se torne possível uma solução do problema através de métodos numéricos (Santos, 2003).

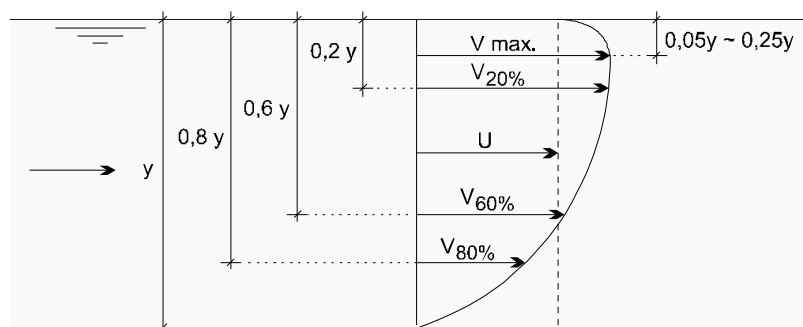
O escoamento também pode ser classificado como Escoamento Uniforme e Escoamento Variado. No primeiro caso, tanto a velocidade como a profundidade não variam no espaço. No segundo caso, existe a variação tanto da velocidade como da profundidade. O Escoamento Variado, por sua vez, pode ser classificado como Gradualmente Variado, quando a variação da velocidade e da profundidade se dá de forma suave, e Bruscamente Variado, quando a variação da velocidade e da profundidade ocorre de maneira abrupta, e as linhas de corrente do escoamento apresentam curvaturas acentuadas.

As velocidades em uma seção transversal apresentam uma distribuição espacial que é geralmente substituída pela velocidade média na maioria das aplicações. Esta distribuição ocorre pela ação das tensões tangenciais no leito, com a presença de superfícies de atrito distintas, correspondentes às interfaces líquido-parede e líquido-ar, acarretando em uma distribuição não uniforme da velocidade nos diversos pontos da seção transversal, conforme mostrado na Figura 4.1, para um canal natural, através das Isótacas, ou seja, das curvas de igual velocidade (Baptista *et al.*, 2001).



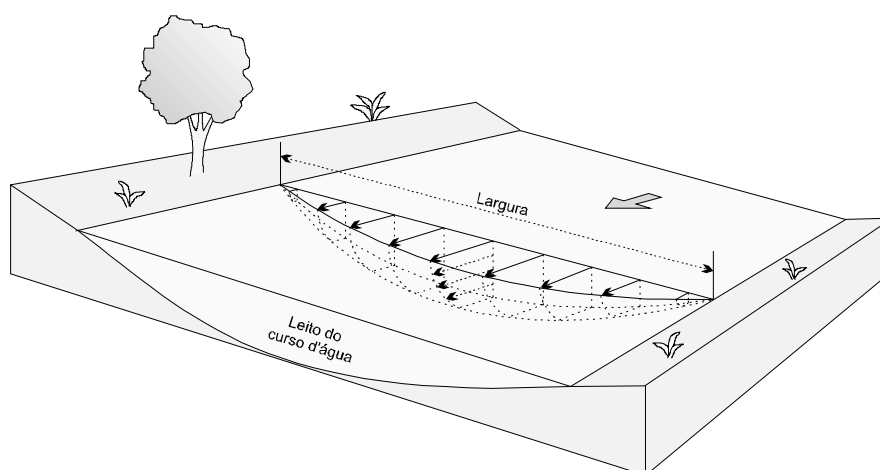
**Figura 4.1** – Isótacas observadas no rio Amazonas, no estreito de Óbidos. (Fonte: Christofolletti, 1988 *apud* Baptista *et al.*, 2001).

O perfil de distribuição das velocidades em uma vertical é aproximadamente logarítmico, indo do valor nulo, junto ao fundo, até um valor máximo logo abaixo da superfície, entre 5% e 25% da profundidade, conforme ilustrado na Figura 4.2. O valor da velocidade média corresponde, grosseiramente, à média aritmética das velocidades medidas a 20% e 80% da profundidade, podendo também ser considerado aproximadamente igual à velocidade observada a 60% da profundidade (Baptista *et al.*, 2001).



**Figura 4.2** – Perfil das velocidades em uma vertical (Fonte: Baptista *et al.*, 2001).

No sentido horizontal, as velocidades em uma seção também vão de valores nulos, junto às margens, a valores máximos nas proximidades do centro do escoamento, conforme ilustrado na Figura 4.3. Em canais curvos, constata-se a presença de correntes secundárias, que originam velocidades de escoamento no plano da seção, tornando a distribuição das velocidades bastante complexa. No item 4.2 do presente documento são apresentadas considerações a respeito da complexidade dos canais em curva.



**Figura 4.3** – Esquema da distribuição das velocidades em um curso de água (Fonte: Baptista *et al.*, 2001).

O uso da velocidade média em substituição à distribuição de velocidades em uma seção pode conduzir a erros quando esta distribuição apresentar gradientes muito acentuados, como é o caso de escoamentos muito rápidos em seções estreitas, transições bruscas, escoamentos em torno de pilares ou pontes entre outros. Para corrigir este problema utiliza-se o Coeficiente de Coriolis ( $\alpha$ ), proposto por G. Coriolis em 1836 (Vieira da Silva *et al.*, 2003), o qual deve ser aplicado sobre a velocidade média sempre que esta substituir a distribuição de velocidades. De acordo com as características do curso de água o valor de  $\alpha$  pode variar de 1,15 a 1,50 para grandes rios com grandes profundidades e velocidades moderadas entre 1,50 e 2,00 para planícies de inundação (Vieira da Silva *et al.*, 2003).

A distribuição de velocidades também pode afetar a quantidade de movimento dos escoamentos através de uma seção e por unidade de tempo. Por um procedimento análogo ao utilizado para determinar o coeficiente de Coriolis, Boussinesq propôs a utilização de um coeficiente  $\beta$ . Experiências indicam que este coeficiente varia entre 1,07 e 1,33 para a calha fluvial e entre 1,25 e 1,33 para a planície de inundação (Vieira da Silva *et al.*, 2003).

A maioria dos cálculos hidráulicos relacionados com a estimativa indireta de vazão exige uma avaliação das características de rugosidade do canal. O Coeficiente de Rugosidade de Manning, "n", representa a resistência ao escoamento associada à parede do conduto.

Uma das maneiras para fixação do coeficiente de rugosidade Manning é a determinação direta do coeficiente, baseada na medição de vazões e das características das seções. Esta determinação envolve medidas de campo e o "n" médio é calculado pela aplicação da equação de Manning, utilizando as características médias entre duas seções.

Na literatura encontra-se um grande número de tabelas, obtidas a partir de ensaios e medições de campo, permitindo a estimativa do coeficiente de rugosidade de Manning. O livro *Open Channel Hydraulics* (Chow, 1959) apresenta uma extensa lista de coeficientes de rugosidade associados a diversos materiais e situações de utilização.

O número de Froude (Fr) é um adimensional extremamente importante na hidráulica, representando a razão entre as forças inerciais e gravitacionais que atuam no escoamento. Se houver uma preponderância das forças gravitacionais, tem-se  $Fr < 1$ , correspondente ao escoamento subcrítico, regime Fluvial. No caso de preponderância das forças inerciais, tem-se

que  $Fr > 1$ , sendo, então, o regime Torrencial e o escoamento supercrítico. Para o número de Froude igual à unidade ( $Fr = 1$ ) tem-se o escoamento crítico.

Nos próximos itens são apresentados alguns temas específicos que devem ser verificados e analisados em estudos e projetos de proteção das margens.

#### **4.1.2 Velocidades Admissíveis e Tensões de Arraste**

Um aspecto extremamente importante que deve ser avaliado na proposição de revestimentos de canais e recuperação de cursos de água é a faixa de velocidades de funcionamento da estrutura proposta, tanto em relação à velocidade mínima quanto à velocidade máxima.

No que diz respeito às velocidades máximas, mesmo considerando que o revestimento seja estável, deve-se atentar para que a velocidade de escoamento não seja tão elevada de forma a acarretar abrasão na parede ou deslocamento do material do revestimento. Da mesma forma, deve-se prever uma velocidade mínima de escoamento, de modo a evitar a deposição de sedimentos. Valores da ordem de 0,60 m/s são usualmente recomendados para canais com possibilidade de carreamento de material (Baptista *et al.*, 2001).

A velocidade máxima permissível é função do material constituinte do revestimento e da carga de material sólido transportada pelo canal.

A seguir serão apresentados o método da velocidade permissível e o método das tensões de arraste.

- Método da Velocidade Permissível

O método da velocidade permissível consiste em efetuar o dimensionamento respeitando-se as limitações de velocidade para que não ocorra a erosão do canal, após a verificação da estabilidade dos taludes. Na Tabela 4.1 são apresentados alguns valores de velocidades admissíveis usualmente adotados em canais naturais, baseados em estudos de Fortier e Scobey, datados de 1926 (Yang, 1996 *apud* Baptista e Coelho, 2003).

**Tabela 4.1 – Velocidades admissíveis em canais naturais**

Material do Canal	Velocidade Admissível (m/s)			
	Água sem sedimentos	Água com sedimentos não coloidais	Água com sedimentos coloidais	
Solos não coloidais	Areia fina	0,46	0,46	0,76
	Argilo-arenoso	0,53	0,61	0,76
	Argilo-siltoso	0,61	0,61	0,91
	Silte aluvionar	0,61	0,61	1,07
	Argiloso	0,76	0,69	1,07
	Argila estabilizada	1,14	1,52	1,52
	Cascalho fino	0,76	1,14	1,52
	Cascalho grosso	1,22	1,98	1,83
	Seixos e pedregulhos	1,52	1,98	1,68
Solos Coloidais	Argila densa	1,14	1,52	1,52
	Silte aluvionar	1,14	0,91	1,52
	Silte estabilizado	1,22	1,52	1,68

Fonte: Yang, 1996 *apud* Baptista e Coelho, 2003.

Os valores apresentados na Tabela 4.1 referem-se a canais funcionando com lâmina de água igual ou inferior a um metro. Para profundidades superiores a esta, deve-se majorar a velocidade limite através da multiplicação por um coeficiente corretor, calculado segundo a Equação 4.3 (Yang, 1996):

$$k = \left( \frac{R_h}{R_{hl}} \right)^{1/6} \quad (4.3)$$

Onde:

$k$  = coeficiente de correção;

$R_h$  = raio hidráulico efetivo (m);

$R_{hl}$  = raio hidráulico referente à profundidade de um metro (m).

Salienta-se que os valores apresentados na Tabela 4.1 referem-se a canais aproximadamente retilíneos, sendo que reduções de 5% a 22% dos valores apresentados devem ser aplicadas para o caso de canais sinuosos (Chow, 1959 *apud* Baptista e Coelho, 2003).

No item 4.5 do presente relatório serão descritos diversos tipos de técnicas para proteção das margens, sendo apresentados também os valores de velocidades máximas usualmente adotadas para cada tipo de revestimento.

- Método das Tensões de Arraste

A tensão de arraste corresponde à tensão de cisalhamento exercida pela água junto ao leito e às paredes do canal. O método das tensões de arraste consiste em calcular as tensões de cisalhamento nas paredes e fundo dos canais, de modo que estas fiquem inferiores a uma tensão admissível, a partir da qual podem ocorrer processos erosivos.

Na hipótese de escoamento uniforme tem-se a seguinte Equação (4.4):

$$\tau = \gamma \cdot R_h \cdot I \quad (4.4)$$

Onde:

$\tau$  = tensão de arraste (kgf/m<sup>2</sup>);  
 $\gamma$  = peso específico da água (kgf/m<sup>3</sup>);  
 $R_h$  = raio hidráulico (m);  
 $I$  = declividade (m/m).

Esta tensão de arraste, entretanto, não se distribui igualmente em todo o perímetro molhado. Em seções trapezoidais, que correspondem ao caso mais usual em termos de canais não revestidos, podem ser definidas as seguintes equações:

$$\text{Tensão de arraste no fundo: } \tau_0 = \gamma \cdot y \cdot I \quad (4.5)$$

$$\text{Tensão de arraste nos taludes: } \tau_t = 0,76 \cdot (\gamma \cdot y \cdot I) \quad (4.6)$$

Onde:

$\tau_0$  e  $\tau_t$  = tensão de arraste no leito e talude, respectivamente (kgf/m<sup>2</sup>);  
 $\gamma$  = peso específico da água (kgf/m<sup>3</sup>);  
 $y$  = profundidade da lâmina d'água (m);  
 $I$  = declividade (m/m).

Assim, se estas duas tensões de arraste efetivas forem inferiores a uma tensão de arraste crítica, o canal será estável. A tensão crítica ( $\tau_c$ ) é função do material constituinte do canal e das características do sedimento eventualmente transportado pela água. Na Tabela 4.2 são apresentados alguns valores de tensões críticas de arraste para diversos materiais constituintes dos canais naturais e para duas condições de transporte de sedimentos (Baptista e Coelho, 2003).

**Tabela 4.2 – Tensões de arraste críticas**

Material do Canal	Tensões de Arraste Críticas (kgf/m <sup>2</sup> )		
	Água sem sedimentos	Água com sedimentos coloidais	
Solos não coloidais	Areia fina	0,13	0,37
	Argilo-arenoso	0,18	0,37
	Argilo-siltoso	0,23	0,53
	Silte aluvionar	0,23	0,73
	Argiloso	0,37	0,73
	Argila estabilizada	1,85	3,22
	Cascalho fino	0,37	1,56
	Cascalho grosso	1,46	3,27
	Seixos e pedregulhos	4,44	5,37
Solos Coloidais	Argila densa	1,27	2,24
	Silte aluvionar	1,27	2,24
	Silte estabilizado	2,10	3,90

Fonte: Adaptado de Santos, 1984 *apud* Baptista e Coelho, 2003.

Segundo French (1986 *apud* Baptista e Coelho, 2003), Lane identificou que canais sinuosos apresentam menor resistência ao arraste. Assim, ele propôs, em 1955, fatores de correção de  $\tau_c$  que variam de 1 para canais retilíneos a 0,60 para canais extremamente sinuosos.

Em função da inclinação dos taludes e, conseqüentemente, da ação da força gravitacional a que todas as partículas estão sujeitas, a tensão de arraste crítica nos taludes é apenas uma fração da tensão crítica para o leito. Assim, deve ser introduzido um fator de correção dado pela seguinte equação:

$$K = \sqrt{1 - \frac{\text{sen}^2 \theta}{\text{sen}^2 \phi}} \quad (4.7)$$

Onde:

$K$  = fator de correção para determinação da tensão permissível nos taludes;

$\theta$  = ângulo do talude com a horizontal;

$\phi$  = ângulo de repouso do material.

### 4.1.3 Turbulência

Turbulência é o processo pelo qual a energia de um fluxo é convertida em energia cinética aleatória. O movimento irregular e rápido das partículas do fluxo produz, instantaneamente, mudanças tanto na intensidade e direção, como na velocidade do escoamento. Turbulências elevadas podem ser encontradas em diversas situações como, por exemplo, a jusante de

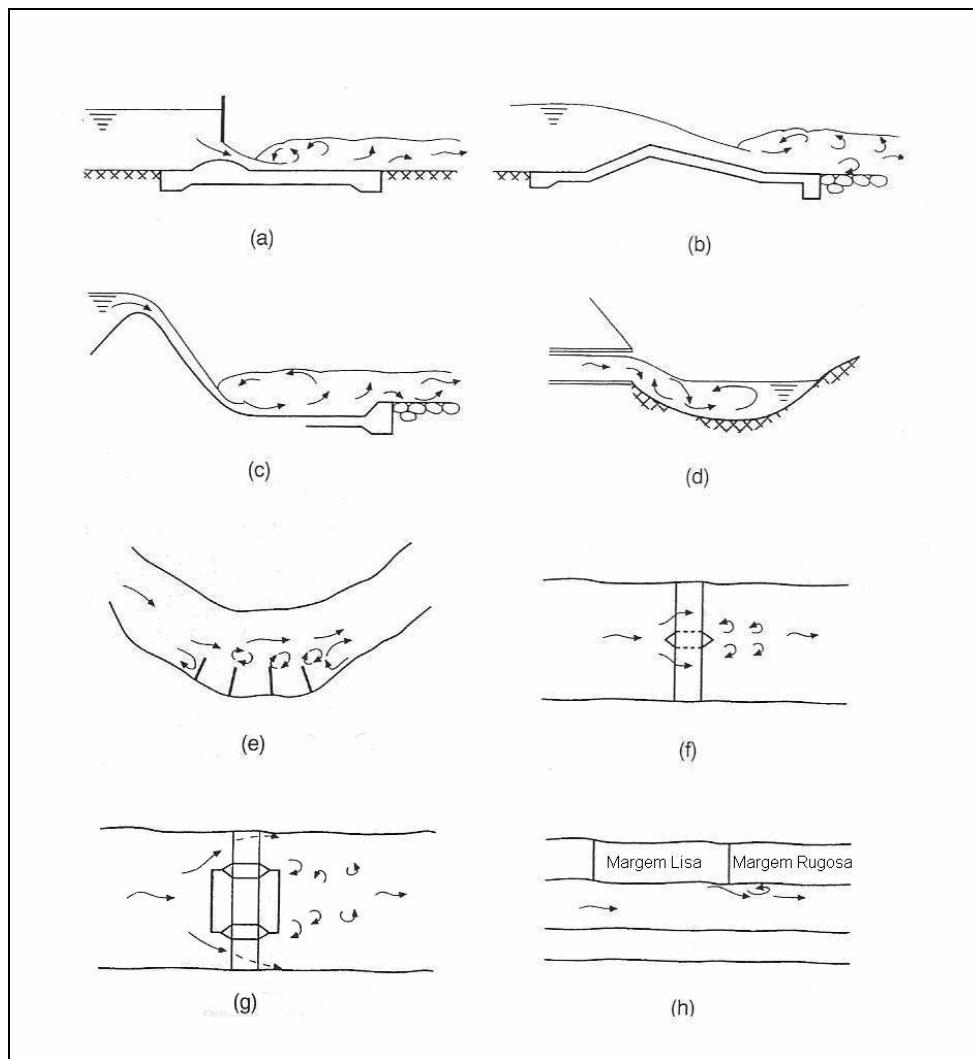
estruturas hidráulicas, próximo a pilares de pontes, em curvas acentuadas, mudanças abruptas da direção do escoamento, entre outros (Escarameia, 1998).

Conforme mencionado anteriormente, na hidráulica fluvial, o escoamento pode ser classificado como laminar ou turbulento, mas a maioria dos escoamentos que ocorrem em rios e canais são turbulentos. A distinção pode ser feita entre os níveis de turbulência que ocorrem em seções de rios quase retas e em níveis elevados que resultam predominantemente em perturbações para o padrão normal do fluxo.

Os diversos processos que ocorrem nos cursos de água como transporte de sedimentos, dispersão, erosão dos leitos e das margens e resistência ao fluxo são afetados pela turbulência. Contudo, esses efeitos ainda não são totalmente conhecidos devido à carência de medidas de turbulência em campo e uma correta compreensão deste fenômeno nos rios (Babaeyan-Koopaei *et al.*, 2002).

A importância da turbulência na engenharia hidráulica reside nos efeitos deste fenômeno relacionados principalmente ao nível da água, ao transporte de sedimentos e às condições de contorno para avaliar as estruturas. Nos estudos e projetos de revestimentos de rios é essencial que se leve em conta estas forças, pois elas podem ser responsáveis pela erosão de bancos naturais e pela desestabilização de revestimentos, além de persistirem por distâncias consideráveis dos rios.

A Figura 4.4 apresenta uma série de situações típicas nas quais são observados níveis elevados de turbulência.



**Figura 4.4:** Situações típicas de elevada turbulência: (a) represas com comportas; (b) represas sem comportas; (c) vertedores e bacias; (d) aqueduto (descarregando perpendicularmente para uma corrente); (e) espigões (planta); (f) pilar de ponte (planta); (g) ensecadeira (planta); (h) transições (planta). (Fonte: Escarameia, 1998).

O nível de turbulência presente em um fluxo pode ser medido de várias maneiras, mas é comum sua definição em termos de intensidade de turbulência (IT), que é basicamente a razão que reflete a variação da velocidade do fluxo em torno da velocidade média e da velocidade de cisalhamento. Entretanto, a quantificação da intensidade de turbulência requer dados que normalmente não estão disponíveis. Desta forma, na maioria dos casos, a turbulência é definida apenas qualitativamente, sendo comum encontrar valores “altos, médios e baixos”. No item 4.5.2 será apresentada a equação de Escarameia e May (1992 *apud* Escarameia, 1998) para o cálculo da intensidade de turbulência.

Nos escoamentos turbulentos, a relação entre as tensões tangenciais e o gradiente de velocidades deixa de ser governada pela viscosidade e passa a depender das propriedades da turbulência do escoamento, e, por conseqüência, da própria distribuição de velocidades. A partir desta hipótese, a relação entre tensões tangenciais e os gradientes de velocidades pode ser escrita na forma generalizada sugerida por Saint-Venant:

$$\tau_x(y) = \mathfrak{K} \left[ \frac{\partial v(y)}{\partial x} \right] \quad (4.8)$$

Onde:

$\tau_x(y)$  é a tensão tangencial na direção x e a uma profundidade y;

v é a velocidade longitudinal na mesma profundidade;

$\mathfrak{K}$  é o coeficiente de mistura para escoamento turbulento.

O mecanismo interno de turbulência produz uma dissipação de energia. Partindo desta constatação, Boussinesq introduziu um conceito de viscosidade virtual ou turbulenta e substituiu o coeficiente  $\mathfrak{K}$  pela expressão  $\rho\varepsilon$  onde  $\varepsilon$  é conhecido como coeficiente de viscosidade aparente ou de viscosidade turbulenta. Este coeficiente, devido à sua dimensão, equivale à viscosidade cinemática  $\nu = \mu/\rho$ .

Uma diferença fundamental entre estes dois coeficientes é que, enquanto a viscosidade dinâmica é por definição uma propriedade do fluido, o coeficiente de difusão depende das propriedades do escoamento (Vieira da Silva *et al.*, 2003).

Introduzindo o coeficiente de viscosidade turbulenta na equação, a relação entre a tensão tangencial e o gradiente de velocidades em uma vertical, pode ser escrita da seguinte forma:

$$\tau_x(y) = \rho\varepsilon \frac{\partial v(y)}{\partial y} \quad (4.9)$$

## 4.2 Morfologia Fluvial

A morfologia fluvial resulta do arraste, transporte e deposição de partículas de sedimentos, estando relacionada a uma complexa combinação de elementos, como a geologia, o clima, a vegetação, o relevo, as vazões no rio entre outros.

De acordo com Przedwojski *et al.* (1995) a formação dos canais nos rios depende de características hidrológicas, geológicas e sedimentológicas. Enquanto estas características permanecem constantes numa determinada bacia de drenagem, a morfologia do rio permanece estável mesmo que o canal não seja estático. Os meandros nos cursos de água podem mudar rapidamente na direção de jusante, podendo ser completamente alterados com a entrada de tributários. O equilíbrio na formação de um canal está ligado a um relacionamento contínuo de força-resistência.

Por causa das complexas inter-relações entre as variáveis dos canais dos rios ainda não é possível dar uma descrição física e matemática completa dos vários processos morfológicos, sendo comumente utilizadas duas aproximações (Ackers, 1982 *apud* Przedwojski *et al.* 1995):

- Estudos empíricos: estudos de campo em rios naturais; estudos de laboratório de pequenos meandros; critérios para classificação da forma; correlação de geometria e vazão; análise estatística; medidas de vazão incluindo correntes secundárias; entre outros.
- Estudos teóricos: solução, com vários níveis de simplificação, da equação de Navier-Stokes para fluxos em canais curvilíneos, incluindo geração de correntes secundárias; instabilidade do movimento da água e dos sedimentos devido aos meandros; modelos numéricos de interação entre vazão e sedimentos; entre outros.

#### **4.2.1 Leito Fluvial**

Em escala local, a morfologia dos leitos e canais fluviais está profundamente ligada ao substrato, podendo ser identificados os rios aluviais e os rios com leitos consolidados. Os primeiros são localizados em planícies, vales aluvionais, constituídos de materiais sedimentares recentes, em geral aportados pelo próprio rio. Os rios com leitos consolidados localizam-se em vales encaixados, constituídos de materiais rochosos ou coesivos.

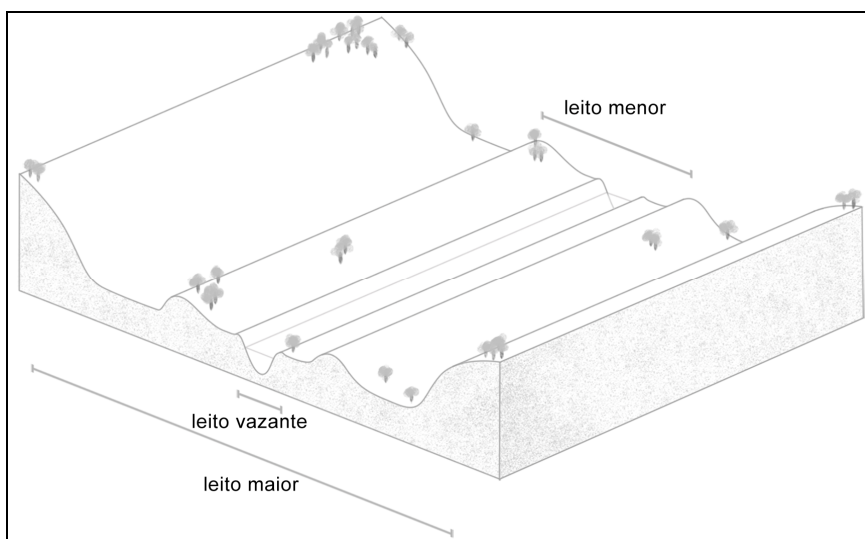
O fluxo e o material sedimentar são dois elementos fundamentais na estruturação do sistema de geometria hidráulica. Cada um desses elementos pode ser caracterizado por diversas variáveis ou atributos, cujas mensurações são realizadas nas seções transversais, sendo elas:

- para o fluxo: largura do canal, profundidade, velocidade do fluxo, área, relação entre largura e profundidade, perímetro molhado entre outros;
- para o material sedimentar: granulometria e rugosidade do leito.

Como essas variáveis são inter-relacionadas, torna-se necessário considerar as mudanças e as relações que se apresentam em determinada seção transversal e as que ocorrem na análise comparativa de diversos perfis transversais ao longo do rio.

Considerando a variabilidade da frequência das descargas e da topografia dos canais fluviais, Jean Tricart (1966 *apud* Christofolletti 1981) apresentou a seguinte classificação dos tipos de leitos, mostrada na Figura 4.5:

- leito de vazante: incluído no leito menor, acompanhando o talvegue;
- leito menor: bem delimitado, encaixado entre margens bem definidas. Apresenta, usualmente, irregularidades de fundo, com soleiras e depressões;
- leito maior: ocupado periodicamente pelas cheias, associado frequentemente à planície de inundação.



**Figura 4.5** – Seção fluvial típica (Fonte: Baptista e von Sperling, 2007).

A forma do canal e de suas margens pode variar significativamente. Em relação ao escoamento, o leito menor corresponde ao canal principal, sendo mais bem definido que os outros canais em termos de largura, profundidade, continuidade da vazão e da vegetação. Ao leito menor associa-se a vazão dominante, que corresponde à cheia com um período de retorno próximo de 2 anos. Esta vazão corresponde à vazão que efetivamente molda a calha do rio.

Pode-se também, eventualmente, identificar canais secundários, junto ao canal principal ou na planície de inundação, menores e transportando vazões reduzidas.

Em relação às formas topográficas, os leitos fluviais podem ser identificados conforme os seguintes tipos (Baptista e von Sperling, 2007):

- leito plano, de ocorrência rara na natureza, limitada às condições de ausência de movimentação de sedimentos;
- leito ondulado ou com marcos ondulares: forma triangular, com alturas e comprimentos da ordem de poucos centímetros, apresentando declividades suaves para montante e íngremes para jusante;
- dunas: formas assimétricas similares às ondulações, mas com dimensões que podem atingir a ordem de metros, limitada usualmente ao valor da profundidade média. Características de fluxos com relativa potência, mas regime fluvial;
- antidunas: formas assimétricas associadas a canais com altas declividades e carga sedimentar, ou seja, características de fluxos potentes e escoamento torrencial. As formas individuais movimentam-se em direção contrária ao escoamento e as dimensões podem atingir a ordem de metros.

Em leitos não consolidados os processos de transporte de sedimentos conferem um caráter dinâmico ao leito fluvial. Assim, em condições de baixa vazão pode ocorrer o acúmulo de sedimentos, eventualmente aflorantes, interferindo no escoamento nos períodos de estiagem. Em condições de altas vazões, os sedimentos voltam a ser carregados, vindo a se formar novamente com a alteração das condições de fluxo e da velocidade de escoamento.

#### **4.2.2 Conformação dos Sistemas Fluviais**

A deposição de sedimentos em zonas de baixas velocidades está normalmente associada à parte interna das curvas ou meandros, em combinação com processos erosivos na margem oposta. Já os bancos correspondem a sedimentos depositados no canal, constituídos de sedimentos grosseiros, em rios de montanhas, e sedimentos finos, em rios com elevadas cargas sedimentares.

Em escala de trecho ou sub-bacia, observa-se a evolução das características dos sistemas fluviais de montante para jusante. Com o aumento da área de drenagem ocorre também o aumento da vazão, observando-se, quanto ao perfil longitudinal, a redução da declividade.

De acordo com Christofolletti (1981), os sistemas fluviais podem ser classificados, de forma geral, nas seguintes categorias principais: canais únicos, múltiplos e em uma categoria transicional, que se subdividem nos seguintes tipos:

- canais únicos: retilíneos, sinuosos, meandranes e tortuosos ou irregulares;
- canais múltiplos: ramificados, anastomosados, reticulados, deltaicos e em canais labirínticos;
- transicional: categoria transicional entre as duas anteriores, na qual o curso de água pode exibir tendência incipiente para se alterar do padrão de canal único para o de canais múltiplos.

### 4.2.3 Conformação dos Canais Fluviais

O caráter dinâmico da evolução morfológica dos rios é evidenciado com a possibilidade de mudança de um tipo para outro. A variação das características do fluxo, segundo as diferentes condições hidrológicas e morfológicas inerentes ao canal natural, implica no caráter bastante dinâmico destes processos, ocorrendo a tendência para uma condição de equilíbrio próprio, de estabilidade, conforme a carga sólida transportada.

O equilíbrio morfológico pode ser estabelecido qualitativamente por meio da Equação de Lane, já apresentada anteriormente (Equação 2.1):

$$Q_s \cdot D \propto Q \cdot I$$

Onde:

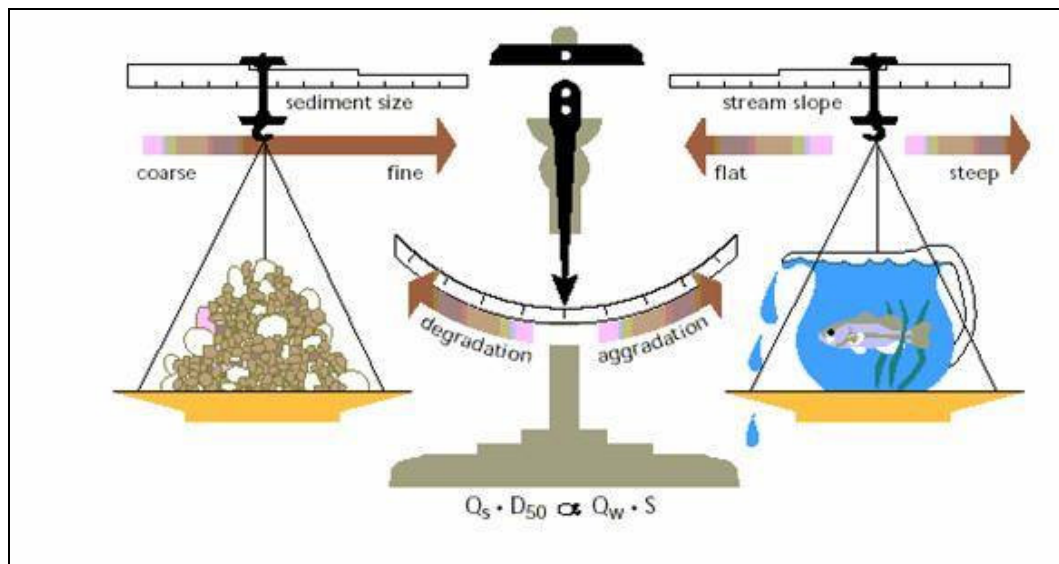
$Q_s$  = descarga do material sólido, em volume por unidade de tempo;

$D$  = diâmetro médio das partículas do leito;

$Q$  = vazão do rio, em volume por unidade de tempo;

$I$  = declividade do leito.

Uma visualização qualitativa da aplicabilidade dessa equação pode ser resumida no esquema da Figura 4.6.



**Figura 4.6** – Fatores que afetam o equilíbrio morfológico de um curso de água.

Para o caso dos cursos de água em leito natural, cujas bacias de contribuição passam pelo processo de urbanização, o aumento da vazão dominante ( $Q$ ) tende a produzir uma acelerada erosão na calha menor, como forma de aumentar a descarga sólida para recompor o equilíbrio.

A erosão e instabilidade das margens afetam significativamente a morfologia fluvial. As causas mais comuns de instabilidade e erosão das margens induzidas pelos homens são: modificação da calha fluvial de rios e meandros, dragagem de cascalho e areia dos rios, remoção de vegetação ribeirinha, construção de barramentos e outras obras de engenharia e navegação. Entretanto, a erosão superficial também é função das ações dinâmicas de natureza hídrica ou eólica sobre o solo, das características intrínsecas do solo, da geomorfologia da bacia e de sua cobertura.

Segundo Brighetti e Martins (2001) as causas das instabilidades das margens por ação do escoamento são subdivididas em:

- Ação erosiva das correntes: consideram-se as forças erosivas críticas sobre o material constituinte do leito e das margens. Se a força erosiva atuante for superior à força erosiva crítica ou limite do material, ocorrerá a erosão;
- Ação das ondas: as erosões causadas pelo movimento das ondas contra as margens podem ocorrer devido a diferentes agentes como o vento, embarcações ou a operação de estruturas hidráulicas do tipo comportas, usinas hidrelétricas e estações elevatórias;

- Irregularidades localizadas no escoamento: neste caso, a presença de extremidade de espigões, pilares de pontes, afloramentos rochosos e outros podem gerar turbilhões na corrente líquida que causam o solapamento da parte inferior das margens.

Já as causas das instabilidades geotécnica dos taludes de margem podem ser identificadas por:

- Diminuição do ângulo natural de equilíbrio: a saturação do terreno tem por consequência uma redução do ângulo natural de equilíbrio relativo ao material, diminuindo sua resistência.
- Rompimento generalizado da margem: a descida ou subida rápida do nível d'água ou a elevação do lençol freático podem provocar o escorregamento do talude da margem.
- 'piping' ou retro-erosão: este fenômeno, causado pela existência de escoamento através de caminhos preferenciais, em pontos fracos do terreno, permite que as partículas do talude sejam transportadas pelo fluxo provocando assim a erosão progressiva retrógrada.

A verificação da inclinação dos taludes laterais em canais naturais, função das características geotécnicas locais, é um importante fator de estabilidade das margens. Na Tabela 4.3 são apresentados os valores máximos de inclinação de taludes naturais, de acordo com o material adjacente.

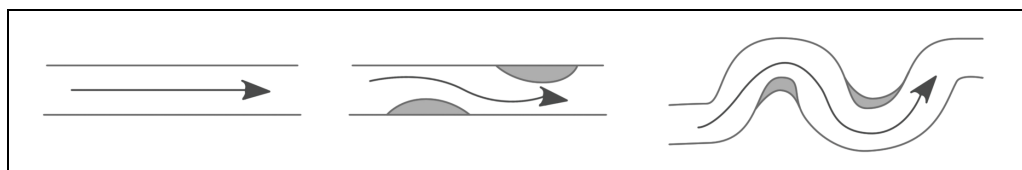
**Tabela 4.3 – Inclinações admissíveis de taludes em canais**

<b>Material do Canal</b>	<b>Inclinação Máxima (H:V)</b>
Rocha sã	Vertical
Rocha alterada	¼:1
Solo argiloso compactado	½:1 a 1:1
Solo em geral, canais largos	1:1
Solo em geral, canais estreitos	1 ½:1
Solo arenoso solto	2:1
Solo argiloso poroso	3:1

Fonte: adaptado de Chow, 1959 *apud* Baptista e Coelho, 2003.

Em relação à forma dos canais pode-se afirmar, de maneira geral, que não existem cursos de água naturais retilíneos. O rio procura o seu equilíbrio, que também é dinâmico, aumentando a extensão, erodindo, depositando sedimentos e diminuindo, conseqüentemente, a sua declividade longitudinal (Brighetti e Martins, 2001).

A distribuição irregular da velocidade de escoamento nas seções e os processos de erosão e deposição de sedimentos correspondentes dão origem aos processos de meandramento, como ilustrado na Figura 4.7.

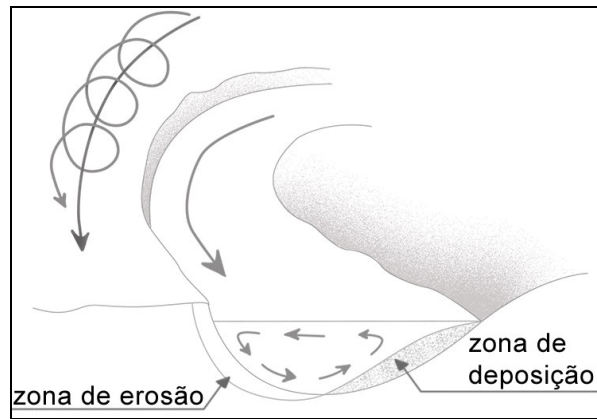


**Figura 4.7** – Processo de formação de meandros (Fonte: Baptista e von Sperling, 2007).

A complexidade deste processo geomorfológico não é totalmente conhecida, mas sabe-se que obstruções no rio causam a formação de meandros e que o processo tende a ser sustentável. Entretanto, as curvas nos rios geram fluxos secundários, que causam desgaste em suas margens. Esta ação, combinada com a deposição de sedimentos na margem oposta, aumenta a curvatura do meandro. O distúrbio causado pode persistir por consideráveis distâncias a jusante e é uma combinação das correntes secundárias e, em alguns casos, o início de ondas. As ondas podem causar erosão e desbarrancamento das margens, particularmente em regimes supercríticos (Escarameia, 1998).

A distribuição das velocidades em uma seção de canais curvos é bastante complexa, implicando na necessidade de um tratamento matemático tridimensional para sua adequada descrição, o que acarretaria dificuldades operacionais (Baptista *et al.*, 2001).

No escoamento em curvas observa-se a ocorrência de correntes secundárias decorrentes de um fluxo em espiral, como pode ser observado na Figura 4.8, acarretando maiores velocidades no bordo externo e menores velocidades no bordo interno das curvas. Ocorrem, portanto, zonas de erosão e de deposição de sedimentos, que desempenham importante papel na conformação dos rios.



**Figura 4.8** – Escoamento em curvas (Fonte: adaptado de Leopold, 1997 *apud* Baptista e von Sperling, 2007).

Para levar em conta as irregularidades da distribuição das velocidades nas seções sem, no entanto, adotar uma abordagem tridimensional complexa, pode-se adotar uma simplificação, em alguns casos, com as velocidades médias nas equações de Bernoulli e do Teorema de Euler, utilizando e ajustando os coeficientes de Coriolis ( $\alpha$ ) e Boussinesq ( $\beta$ ), descritos anteriormente.

É importante destacar que o comportamento de canais naturais ou construídos em materiais erodíveis é mais complexo do que o comportamento dos canais em materiais estáveis (Julien, 2002). Desta forma, é preciso respeitar a velocidade limite das estruturas e manter as tensões de cisalhamento junto às paredes e ao fundo do canal inferiores à tensão admissível, evitando assim a ocorrência de processos erosivos.

### **4.3 Sedimentos**

De acordo com Bruk (1988, *apud* Przedwojski *et al.*, 1995), a engenharia hidráulica é mais uma arte do que uma ciência exata, especialmente quando é levado em consideração o transporte de sedimentos.

Os problemas relativos a sedimentos são antigos, mas somente há pouco mais de cem anos é que começaram os estudos com bases teóricas, sendo que apenas após 1930 as pesquisas tomaram maior impulso. Apesar dos estudos, gerando grande quantidade de dados e conhecimentos, muito ainda tem que ser feito para que seja obtida a precisão desejada nas previsões e avaliações (Carvalho, 1994).

Os sedimentos são partículas resultantes da desagregação de rochas ou matéria orgânica. A quantidade de sedimentos transportada em cursos de água, conhecida como descarga sólida, pode ser estimada através de equações que foram desenvolvidas a partir de modelos matemáticos, de base física ou empírica, e através do uso de aparelhos amostradores (Curi, 1986 *apud* Castilho, 1998).

Os processos responsáveis pela sedimentação são muito complexos, abrangendo, além da erosão, deslocamento das partículas por enxurradas ou outros meios até os rios, transporte de sedimento nos cursos de água, deposição do sedimento na calha dos rios, lagos e reservatórios e sua compactação. Todos esses fenômenos são processos naturais, que sempre ocorreram através dos tempos geológicos.

Os principais agentes dinâmicos externos do processo de sedimentação são a água, o vento, a gravidade, o gelo e os agentes biológicos, como a ação humana, e podem atuar combinados ou isoladamente.

O comportamento sedimentológico de uma bacia hidrográfica é resultante de características naturais da área contribuinte, como regime de chuvas, tipo de solo, topografia, área de drenagem e outros, e da influência antrópica nela como uso e ocupação do solo, uso da água, alterações no curso de água entre outros.

O desprendimento de partículas sólidas de um meio do qual fazem parte, seja o leito fluvial ou a superfície da bacia, sob efeito de uma gama de fatores naturais ou antrópicos, é denominado de desagregação. Quando as forças hidrodinâmicas exercidas pelo escoamento sobre as partículas desagregadas ultrapassam a resistência por elas oferecida, ocorre o seu deslocamento, denominando-se erosão.

A erosão é tanto mais intensa quanto menor for a proteção do solo. O deslocamento e o transporte do sedimento dependem da forma, do tamanho, peso da partícula e forças exercidas pela ação do escoamento.

Segundo o comportamento físico-químico os sedimentos transportados pela água podem ser classificados em pelíticos e não-pelíticos. A diferenciação destas duas classes, de um modo geral, pode ser feita de acordo com o tamanho dos grãos, sendo que os pelíticos são

difícilmente distinguíveis a olho nu. As areias e sedimentos mais grossos são classificados como não pelíticos e as argilas como pelíticos.

Entretanto, além do tamanho dos grãos, o comportamento físico-químico das partículas é distinto. Alguns sedimentos pelíticos são capazes de formar flóculos que por sua vez possuem uma velocidade de sedimentação maior do que a dos grãos individuais. A formação de flóculos é mais intensa quando o diâmetro das partículas é menor, o número de grãos é maior e a salinidade do meio aquoso é maior do que 5 por mil. Tais partículas são também chamadas de sedimentos coesivos. Já as partículas não coesivas referem-se aos sedimentos pelíticos inertes e aos não pelíticos.

Os sedimentos podem ser originários do leito do rio ou da bacia hidrográfica. Os primeiros são resultantes das ações erosivas do escoamento líquido sobre as margens e o fundo do canal, podendo ser transportados por arraste junto ao leito do rio ou em suspensão na massa líquida, consistindo na carga de material do leito. Os sedimentos originários da bacia hidrográfica constituem a carga de lavagem da bacia, sendo geralmente mais finos e transportados em suspensão, pois os grãos mais grossos sedimentam rapidamente ao alcançarem os cursos de água, incorporando-se ao material do leito.

Quanto ao mecanismo de transporte, os sedimentos são classificados de três modos, denominado genericamente de transporte sólido. As partículas mais pesadas deslocam-se junto ao fundo, por rolamento, deslizamento ou saltação, constituindo a descarga de fundo, ou descarga de arraste. As partículas mais leves são transportadas ao longo de todo o fluido em escoamento, constituindo a descarga em suspensão. De forma menos importante, em termos de morfologia fluvial, a terceira modalidade de transporte de material corresponde ao transporte em solução, com o material sólido dissolvido no meio líquido (Baptista e von Sperling, 2007).

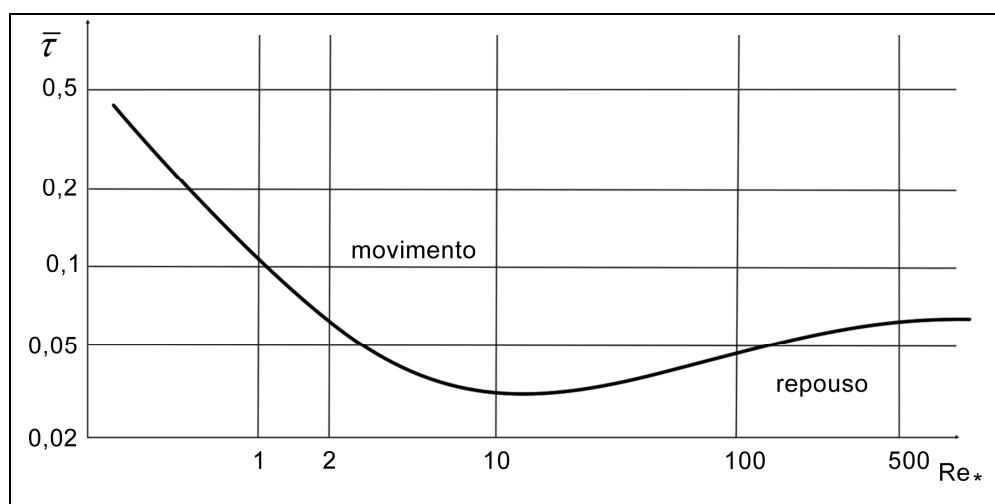
A proporção entre as duas formas de transporte de sedimentos importantes em morfologia fluvial é bastante variável, de acordo com as características do curso de água, dos sedimentos e do regime hidrológico. Segundo Christofolletti (1981), constata-se que a descarga em suspensão é predominantemente maior do que a de fundo, chegando a 90% a 95% da carga sólida nos rios. Apesar de representar um menor volume transportado, a descarga de fundo apresenta maior repercussão na morfologia fluvial.

Os processos de formação e movimentação dos sedimentos na natureza configuram o ciclo sedimentológico. Os processos que regem este ciclo são: a desagregação, a extração ou erosão, o transporte, a decantação ou a sedimentação, o depósito e a consolidação (Castilho, 1998).

Usualmente o tamanho das partículas é determinado por meio de ensaios granulométricos, sendo caracterizado por  $D_n$ , sendo  $D$  o diâmetro da peneira correspondente à passagem de  $n\%$  do material, em peso. Frequentemente adota-se o valor de  $D_{50}$  como sendo o diâmetro médio do material.

O escoamento junto ao leito fluvial pode levar ao deslocamento das partículas. Uma abordagem bastante empregada para tratar a questão foi proposta por Shields, em 1936, que relacionou o princípio do movimento das partículas a fatores adimensionais, relativos às características do escoamento e das partículas.

O *Ábaco de Shields*, apresentado na Figura 4.9, relaciona as Tensões de Arraste Críticas (descritas no item 4.1.2) e o Número de Reynolds de Arraste (apresentado a seguir). A curva do *Ábaco de Shields* delimita a área correspondente à ausência de movimento (abaixo da curva) e à ocorrência do transporte sólido (acima da curva).



**Figura 4.9** – Ábaco de Shields (Fonte: Vanoni, 1975 *apud* Baptista e von Sperling, 2007)

O Número de Reynolds de Arraste ( $Re_*$ ) traduz a razão entre as forças inerciais e viscosas em torno das partículas e pode ser descrito de acordo com a seguinte equação:

$$Re_* = \frac{v_* D}{\nu} \quad (4.10)$$

Onde:

$v_*$  = velocidade de arraste (m/s);

$D$  = diâmetro médio dos sedimentos (m);

$\nu$  = viscosidade cinemática da água (m<sup>2</sup>/s).

Sendo que a velocidade de arraste ( $v_*$ ), correspondente à ação da água sobre o fundo, é definida a partir da tensão de arraste no fundo (apresentada na Equação 4.5) e da massa específica ( $\rho$ ):

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} \quad (4.11)$$

Onde:

$\tau_o$  = tensão de arraste no fundo (kgf/m<sup>2</sup>);

$\rho$  = massa específica (kg/m<sup>3</sup>).

As equações definidas para cálculo da descarga sólida são baseadas em conceitos de probabilidade, aproximação por regressão e na tentativa do equacionamento do processo físico. Nesse caso, as fórmulas geralmente assumem que a descarga sólida depende de uma variável dominante associada a um valor crítico. As variáveis dominantes são geralmente vazão, velocidade, gradiente de energia, tensão de cisalhamento, entre outras.

As equações para cálculo da descarga sólida podem ser, basicamente, de quatro tipos:

- descarga em suspensão, referentes aos sedimentos mais finos que são transportados na massa líquida devido à turbulência da corrente;
- descarga sólida de arrasto, que consiste no material mais grosso e pesado, que é transportado por arrasto;
- descarga de material do leito, que representa a descarga sólida de arrasto mais uma parcela da descarga em suspensão;
- descarga sólida total, que consiste na descarga de fundo mais a descarga em suspensão.

Yang (1996) cita as seguintes equações para cálculo da descarga de arrasto:

- Du Boys (1879), desenvolvida em laboratório;
- Shields (1936) e Chang, Simons e Richardson (1967) em que a variável dominante é a tensão de cisalhamento;
- Kalinske (1947), em que a variável dominante é a velocidade;
- Meyer Peter (1934) e Meyer Peter & Müller (1948) em que a variável dominante é o gradiente de energia;
- Schoklistch (1934 e 1943) em que a variável dominante é a descarga líquida;
- O método de Einstein (1942 e 1950) com base probabilística;
- Rottner (1959) baseada na análise de regressão.

Para descarga de material do leito, Yang (1996) cita:

- Bagnold (1966), Engelund & Hansen (1972), Ackers & White (1973), baseadas no conceito de potência de fluxo;
- Velikanov (1954) baseada na teoria gravitacional;
- Laursen (1958) baseada na tensão de cisalhamento;
- Shen e Hung (1972), Karim e Kennedy (1990), baseadas na análise de regressão;
- Yang para areias (1973) e Yang para pedregulhos (1984) baseadas no conceito de potência de fluxo unitária.

De acordo com Carvalho (1994) podem ser destacadas as seguintes fórmulas de descarga sólida total: Método Simplificado de Einstein (1955), Método Simplificado de Colby (1957), Colby (1964) e Toffaleti (1969).

#### **4.4 Modelagem Hidráulica**

A modelagem hidráulica desempenha um papel significativo em estudos e projetos de engenharia de recursos hídricos. Com a modelagem é possível avaliar e simular diversas condições de contorno, além do desenvolvimento de regras gerais de projeto.

Nos estudos de revitalização de cursos de água, a utilização de modelagem hidráulica permite a simulação do escoamento no rio para diversas vazões de projeto, verificação do comportamento das estruturas de proteção das margens, comparação da velocidade do escoamento com a velocidade limite das estruturas, as interferências, benefícios e eficiência das estruturas propostas entre outros.

Numerosos problemas de engenharia hidráulica podem ser convenientemente investigados por meio da modelagem hidráulica. Os algoritmos a serem utilizados dependem do tipo de equação diferencial a ser resolvida.

As equações utilizadas para o estudo do escoamento em cursos de água, tanto em sua forma unidimensional, como bidimensional ou tridimensional, são as equações gerais de Navier-Stokes, compostas pela equação de conservação de massa e pelas equações de conservação da quantidade de movimento. Estas equações referem-se a um sistema de equações diferenciais parciais do tipo hiperbólico, deduzidas a partir de leis físicas baseadas no princípio de conservação de massa e no princípio de conservação de quantidade de movimento.

Uma simplificação das equações de Navier-Stokes, levando-se em consideração características que ocorrem no escoamento livre da água na temperatura ambiente, leva às equações de Saint-Venant, já vistas anteriormente, que são largamente utilizadas para a descrição do escoamento em canais abertos.

No regime de escoamento subcrítico é necessário o conhecimento das condições de contorno a jusante do escoamento. Já no escoamento supercrítico deve-se conhecer as condições de contorno a montante do escoamento. As equações diferenciais do tipo hiperbólico, por sua estrutura matemática, requerem o conhecimento das condições de contorno nas duas extremidades do problema físico descrito por elas. No caso de escoamento em canais abertos, torna-se necessário conhecer a velocidade ou a profundidade do escoamento tanto a montante como a jusante do trecho em estudo, ou então, uma equação que relacione estas duas variáveis na seção limite de jusante.

Entretanto, conforme mencionado anteriormente, a solução analítica geral das Equações de Navier-Stokes ou de Saint-Venant é impossível, fazendo com que a aplicação de

procedimentos aproximados de discretização das equações seja necessária para que se torne possível uma solução do problema através de métodos numéricos.

Nos modelos unidimensionais são considerados valores médios dos parâmetros do escoamento e dos sedimentos para cada seção transversal, como uma função do tempo e espaço. As seções transversais são utilizadas para definir a geometria do canal. Um exemplo de modelo unidimensional amplamente utilizado é o HEC-RAS (*U.S. Army Corps of Engineers*), cuja calibração é realizada através da variação do coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ).

Os modelos bidimensionais apresentam uma maior aproximação às condições reais de escoamento. Nestes modelos as equações do escoamento bidimensionais são utilizadas nas direções  $x$  e  $y$ . Na direção  $x$ - $z$  (no plano vertical) é considerada uma aproximação, com valores médios. Alguns exemplos de modelos bidimensionais para simulação do escoamento em rios são: AquaDyn (HydroSoft Energie Inc., 2000) e SMS (Environmental Modeling Research Laboratory, 2005).

Para calibração dos modelos bidimensionais é usualmente adotada a viscosidade cinemática “ $\nu$ ”, normalmente é conhecida como *Viscosidade Artificial*. Trata-se de um artifício criado para auxiliar na calibração dos modelos numéricos, através da redução das instabilidades numéricas, comumente encontradas nestes casos, otimizando a convergência dos sistemas de equações não lineares, para a solução de sistemas hidráulicos.

Nos modelos tridimensionais as aproximações realizadas referem-se basicamente à hidrodinâmica (Vide, 1997). Esta aproximação permite uma completa definição do fluxo, incluindo as correntes secundárias. Entretanto, a complexidade e tempo de simulação são elevados em modelos tridimensionais. Um exemplo de modelo tridimensional é o FLOW 3D (*Flow Science*).

No presente trabalho foram utilizados dois modelos de simulação de escoamento em cursos de água, detalhados no Capítulo 5: o modelo bidimensional AquaDyn e o modelo unidimensional HEC-RAS.

## **4.5 Recuperação e Revitalização de Cursos de Água**

O presente item apresenta um histórico sobre recuperação e revitalização de cursos de água e as principais técnicas adotadas para proteção das margens.

### **4.5.1 Histórico**

Para iniciar uma discussão sobre revitalização de cursos de água, é importante reconhecer que conceitos e práticas históricas são responsáveis pelo presente desenvolvimento no campo da recuperação e revitalização dos cursos de água.

De acordo com Riley (1998) as práticas de conservação e gerenciamento de recursos, preservação e restauração ambiental, e a consideração da qualidade de vida em ambientes humanos são preocupações antigas. Há muito tempo as populações e cidades sofrem com problemas de poluição das águas, erosões do solo, sedimentação dos rios, enchentes e perda de matas ciliares. E esses, provavelmente, continuarão a ser problemas no futuro.

Nos vales dos rios Eufrates e Nilo, histórias de 3.500 A.C. mostram que árvores foram plantadas e canais escavados para modificar o clima quente da região, dar amenidades estéticas e transmitir conceitos religiosos e simbólicos. Água, plantas e recreações continuaram a ser integrados nas paisagens, e a tradição foi carregada pela cultura Persa para as culturas Mediterrâneas da África do Norte, Espanha e, mais tarde, Itália. Projetos de paisagens italianas da Renascença chegaram a afetar profundamente a França dos Séculos XVI e XVII, e a França, em troca, influenciou a Inglaterra. Os ingleses então promoveram a idéia de melhorar a natureza e criar aspectos “naturais” tais como lagos e reservatórios para compor um ambiente pitoresco que iria misturar visualmente com os sistemas naturais existentes. Olmsted levou esta tradição para seu projeto do Central Park na cidade de Nova York. Mais tarde, ele encorajou comunidades em desenvolvimento nos Estados Unidos para integrar ribeirões e zonas verdes no projeto de cidades e povoados, com a utilização de plantas nativas em seus projetos (Riley, 1998).

A prática de regularização das margens dos rios vem desde o Século XVI quando o Rio Amarelo, na China, foi regularizado por aterramento das margens para que o fluxo fosse confinado em um único canal profundo, que transportaria os sedimentos para o mar. A prática moderna de regularização de rios, entretanto, começou na Europa no Século XIX, conduzidos

pelas demandas da revolução industrial com o propósito de manter a profundidade suficiente dos canais e melhor curso para navegação.

O trabalho de Frederick Law Olmsted, de 1860 até o final daquele século, com a criação de canais urbanos e as primeiras técnicas de restauração, nas décadas de 1930 e 1940, foram os pilares para os atuais movimentos de revitalização dos canais urbanos americanos (Riley, 1998).

A restauração de cursos de água, contudo, é um esforço complexo, que começa reconhecendo os distúrbios naturais ou humanos que estão danificando a estrutura e as funções do ecossistema, ou impedindo a sua recuperação a uma condição sustentável (Pacific Rivers Council, 1996 *apud* FISRWG, 2001).

Do ponto de vista ambiental, o melhor projeto de canalização é aquele que é absolutamente necessário e envolve o mínimo de modificação possível no canal natural. A degradação ambiental dos cursos de água está principalmente relacionada aos danos nas planícies de inundação, no *habitat* aquático, na qualidade das águas, ao uso inapropriado do solo, ao transporte e deposição de sedimentos, aos problemas de erosões das margens entre outros.

A atual tendência nos projetos de engenharia relacionada à recuperação de rios inclui a construção de estruturas que possibilitem uma diversidade dos ambientes bióticos e abióticos, a construção de canais o mais próximo possível do natural e a restauração de rios degradados pelo uso inadequado do solo. Os projetos de engenharia hidráulica devem ser funcionais e satisfatórios esteticamente, causando o mínimo de interferências possível no meio ambiente (Przedwojski *et al.*, 1995).

Além disto, todo projeto de revitalização de cursos de água necessita de um estudo cuidadoso, pois não é fácil prever seu impacto, a longo prazo, no rio (FISRWG, 2001). Desta forma, modelos físicos e computacionais tornaram-se importantes ferramentas para a simulação das condições de escoamento, verificação das características hidráulicas do rio e dos revestimentos, permitindo uma proposição de técnicas de revitalização adequadas.

O item a seguir apresenta as principais técnicas utilizadas para proteção das margens, com ênfase nos revestimentos que têm como objetivo a recuperação, conservação e preservação ambiental dos cursos de água, considerados nos projetos de revitalização de rios.

#### 4.5.2 Principais Técnicas para Proteção das Margens

A ação hidráulica sobre as margens dos cursos de água se dá na forma de correntes, originando processos erosivos e de deposição de sedimentos. Desta forma, o principal objetivo de proteção e estabilização das margens é manter o curso de água estável e dentro dos limites estabelecidos para sua utilização, seja como via de navegação, abastecimento de água, irrigação, aproveitamento hidrelétrico ou sistema de drenagem. A estabilização das margens evita o processo erosivo e contribui para a manutenção dos aspectos visuais e paisagísticos dos rios.

As técnicas de proteção das margens usualmente empregadas podem ser classificadas como proteções diretas ou contínuas, executadas diretamente nos taludes, e proteções indiretas ou descontínuas, construídas a uma distância da margem para desviar o fluxo. A Tabela 4.4 apresenta os principais tipos de proteção das margens (Brighetti e Martins, 2001).

**Tabela 4.4 – Principais Tipos de Proteção das Margens**

PROTEÇÃO	Revestimentos (Proteções contínuas)	Flexíveis	Enrocamento	Lançado Arrumado
			Colchões	Gabião Manta Elementos de concreto articulados Elementos de madeira Elementos de plástico
			Enrocamento sintético	Bolsas de concreto Bolsas de solo-cimento Bolsas de argamassa Blocos pré-fabricados
			Vegetação	Gramíneas Plantas semi-aquáticas
			Gabiões	Caixa / Saco
			Outras	Pneus usados Troncos de árvores lançados
		Rígidos	Concreto	Painéis armados Gabiões revestidos Muros de gravidade Painéis pré-moldados Blocos pré-fabricados Paredes diafragma
			Enrocamento	Argamassado Com injeção de consolidação
			Rocha	Argamassada/alvenaria de pedras
			Cercas	Madeira Metálicas
	Diques ou Espigões (Proteções não contínuas)	Flexíveis	Enrocamento	Lançado Enrocamento com pilares de concreto ou madeira
			Enrocamento sintético	Bolsas de concreto, solo-cimento e argamassa Blocos pré-moldados
		Rígidos	Concreto	Muros de gravidade Muros de concreto armado

Entretanto, as técnicas de revitalização de cursos de água buscam a adoção de estruturas de proteção das margens de modo que os rios e córregos se tornem o mais próximo possível do natural, permitindo o restabelecimento da vegetação marginal e da fauna migratória.

Os tipos mais comuns e usuais de revestimentos de canais adotados em projetos de revitalização (Vide, 1997; Escarameia, 1998; Selles *et al.*, 2001; e Julien, 2002) são:

- Plantio de brotos / vegetação nas margens;
- Espigões e estacas de madeira;
- Rochas: rip-rap (enrocamento), blocos de rochas, rochas lançadas a mão.
- Gabiões: gabião tipo caixa, gabião tipo manta, rolos de rocha.

A seguir são apresentadas descrições das referidas técnicas de proteção das margens.

### **Plantio de Brotos / Vegetação nas Margens**

A técnica de recuperação de cursos de água que consiste no plantio de brotos ou vegetação nas margens, configurando os canais gramados, é muito interessante, tanto pelo baixo custo de implantação como pelo aspecto estético, fazendo com que o curso de água fique o mais próximo possível do natural e favorecendo, ainda, o desenvolvimento da flora e da fauna aquática.

A vegetação é provavelmente o método mais natural de proteção das margens, além de ser de menor custo que a maioria dos métodos estruturais. A presença de vegetação abaixo da superfície da água protege as margens em dois aspectos. Em primeiro lugar, as raízes das plantas contribuem para aumentar a estabilidade do solo, formando uma “rede de ligação” com o solo. Em segundo lugar, os caules, folhagens e plantas expostas oferecem maior resistência ao fluxo, proporcionando a perda de energia do fluxo com a deformação das plantas e não através da remoção de partículas do solo (Julien, 2002).

A utilização de vegetação para proteção das margens é geralmente dividida em duas categorias: as gramíneas e as “plantas com madeiras”, correspondentes às árvores e arbustos. As gramíneas são menos onerosas e requerem um período de tempo menor para promoverem a estabilidade. Já as árvores e arbustos oferecem maior proteção contra a erosão por possuírem sistemas radiculares mais extensos. Contudo, considerações sobre o peso das

árvores devem ser avaliadas, pois caso as raízes não penetrem profundamente ou no caso de margens altas, o peso da árvore pode causar o rompimento e queda da margem.

O uso de vegetação para controle de erosão e proteção das margens apresenta, entretanto, limitações. Estas limitações incluem dificuldade de crescimento, resistência a períodos alternados de seca e chuvas e possibilidade de sofrer danos devido ao ataque de animais como gado entre outros. Contudo, os principais inconvenientes no emprego desta técnica estão relacionados à capacidade de suportar baixas velocidades de escoamento admissíveis e às dificuldades de manutenção. As limitações relativas às velocidades de operação podem implicar no surgimento de erosões e assoreamentos. Já o crescimento desordenado da vegetação pode prejudicar o funcionamento hidráulico do canal, devido ao aumento da rugosidade.

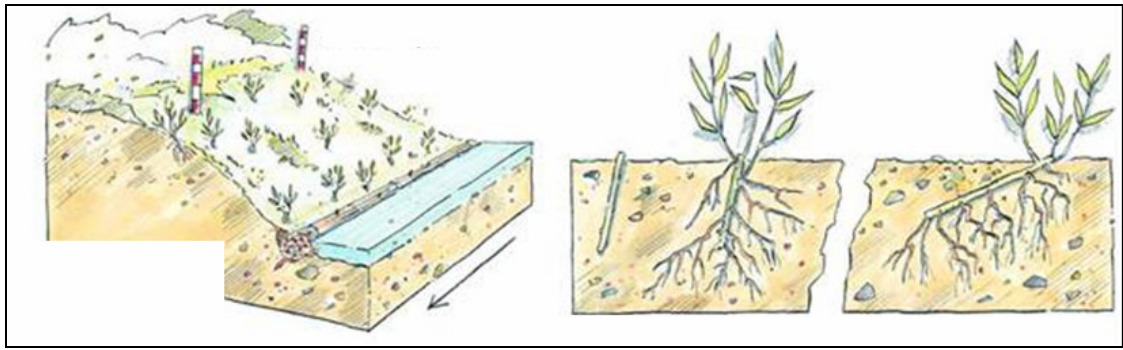
Desta forma, alguns aspectos hidráulicos devem ser levados em consideração quando da utilização de vegetação para proteção das margens dos rios. Deve ser verificado o efeito da vegetação nas condições do fluxo, isto é, a resistência causada ao fluxo, os valores e distribuições das velocidades e a proteção contra erosão do rio e áreas inundáveis.

A Tabela 4.5 apresenta alguns valores indicativos de velocidades máximas permissíveis para canais gramados e as Figuras 4.10 e 4.11 apresentam um desenho esquemático de plantio de brotos junto às margens.

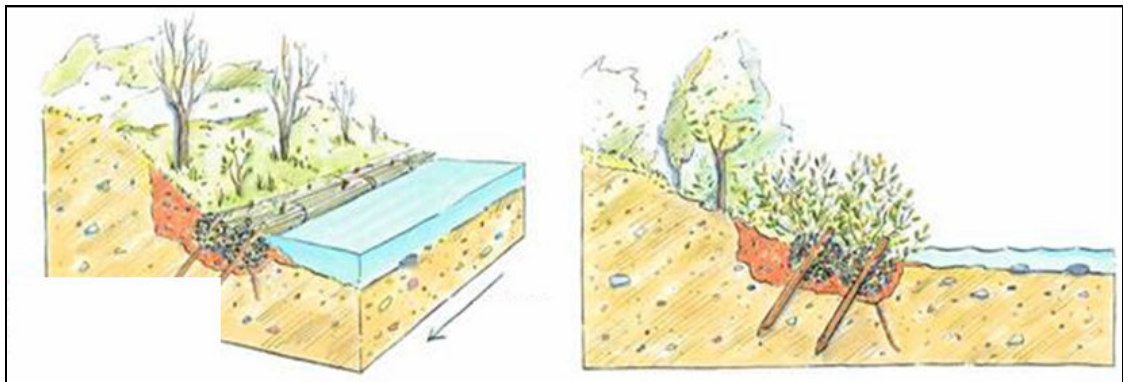
**Tabela 4.5 – Velocidades permissíveis para canais gramados**

Espécie Vegetal		Declividade (%)	Velocidade Permissível (m/s)	
Nome Científico	Nome Comum		Solos resistentes à erosão	Solos não resistentes à erosão
<i>Cynodon dactylon</i>	Seda	0 – 5%	2,44	1,83
		5 – 10%	2,13	1,53
		> 10%	1,83	1,22
<i>Paspalum notadum</i>	Batatais	0 – 5%	2,13	1,53
		5 – 10%	1,83	1,22
		> 10%	1,53	0,91
<i>Axonopus compressus</i>	Jesuíta	0 – 5%	2,13	1,53
		5 – 10%	1,83	1,22
		> 10%	1,53	0,91
<i>Melinis minutiflora</i>	Gordura	0 – 5%	1,07	0,76
<i>Digitária decumbens</i>	Pangola	0 – 5%	1,07	0,76

Fonte: Extraído de Fendrich *et al.*, 1988 *apud* Baptista e Coelho, 2003.



**Figura 4.10** – Desenho esquemático de plantio de brotos junto às margens  
(Fonte: Selles *et al.*, 2001).



**Figura 4.11** – Desenho esquemático de estabilização por meio de faxinas  
(Fonte: Selles *et al.*, 2001).

É importante ressaltar que o uso de vegetação em projetos de engenharia civil requer um conhecimento não apenas de engenharia, mas também de botânica, com informações relativas às propriedades das plantas, sua estrutura, altura e rigidez dos caules, profundidade, densidade e distribuição das raízes, assim como taxa de crescimento, interação com a água e solo, resistência à submersão entre outros. Os estudos podem ser considerados, desta forma, multidisciplinares.

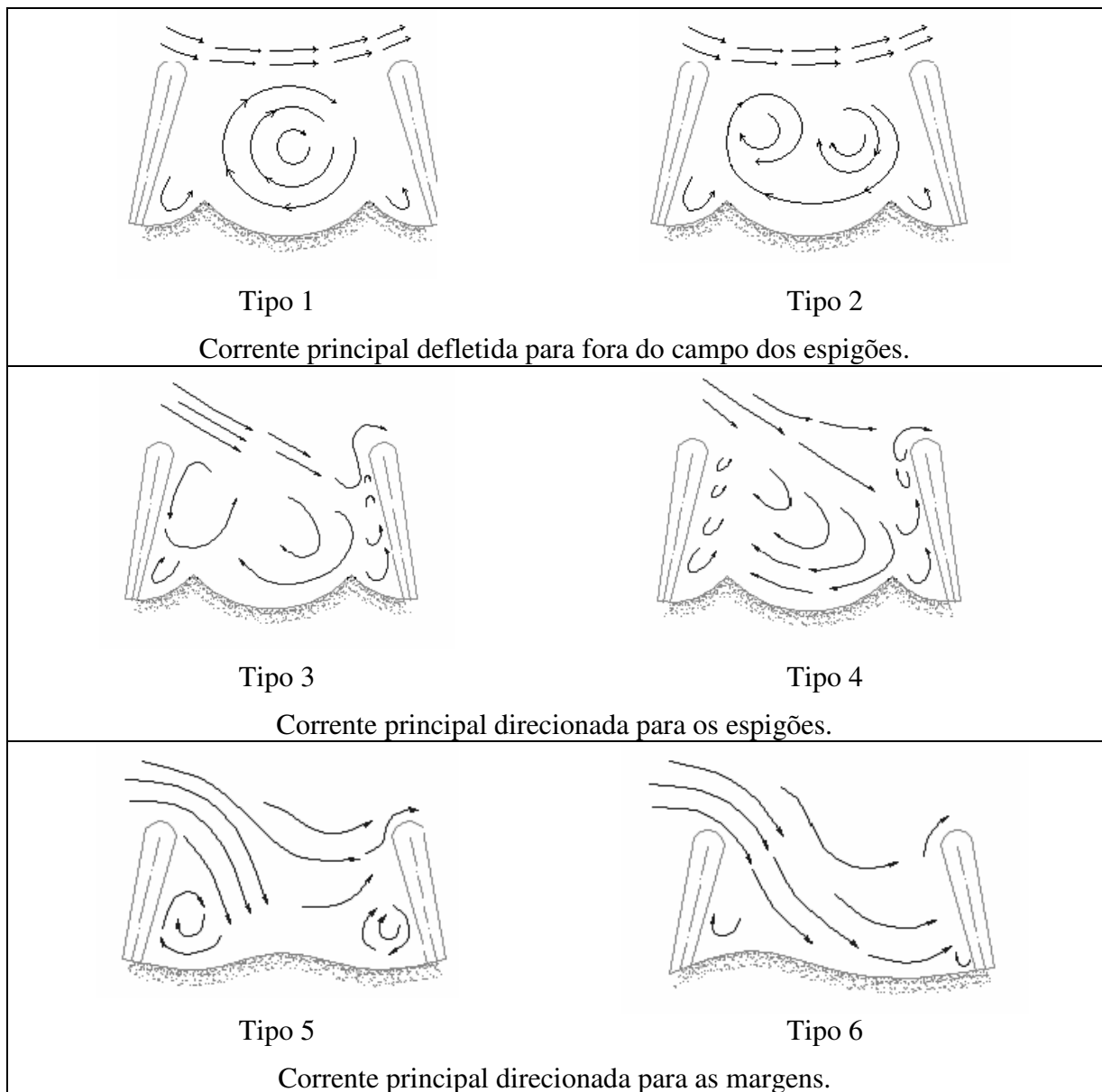
### **Espigões**

Os espigões são estruturas que tem como objetivo direcionar o fluxo de corrente e proteger ou recuperar a margem de um curso de água. Estas estruturas são fixadas na margem e posicionadas transversalmente ao fluxo, criando zonas de baixa velocidade e a formação de vórtices entre as estruturas. A Figura 4.12 apresenta uma foto de espigões no rio Lek, na Holanda.



**Figura 4.12** – Espigões no rio Lek, Holanda.  
Fonte: Geological Survey of Ireland, 2008.

Baseado em modelos de testes, Copeland (1983 *apud* Przedwojski *et al.*, 1995) distinguiu seis tipos de vórtices entre os espigões, como mostrado na Figura 4.13. No primeiro tipo, a corrente principal é defletida para fora do campo dos espigões e um vórtice simples é desenvolvido entre os espigões. Este tipo é desejado para projetos de navegação, uma vez que é mantida uma profundidade contínua do canal. No tipo 2 um segundo vórtice aparece, mas a corrente principal é defletida para fora do campo dos espigões. À medida que o espaçamento entre os espigões aumenta, aparece o tipo 3, no qual a corrente principal é dirigida para o espigão, criando um vórtice bem mais forte, atrás do espigão e uma maior turbulência ao longo da face a montante e na cabeça inferior do espigão. Quando o tipo 4 se desenvolve, perde-se a estabilidade dada ao espigão a montante e uma única forte corrente ocorre. Com o padrão tipo 5 o fluxo divergido pelo espigão a montante é direcionado à margem no campo do espigão. Vórtices formam-se em ambos os lados deste fluxo, dando alguma proteção à margem. À medida que o espaçamento aumenta para o tipo 6, o vórtice a jusante cessa a proteção na margem e a corrente a atinge diretamente.



**Figura 4.13** – Esquema em planta do fluxo entre os espigões (Copeland, 1983 *apud* Przedwojski *et al.*, 1995).

De acordo com Bendegom *et al.* (1979), a utilização de espigões ao invés de estruturas longitudinais ao curso de água somente é justificada economicamente se as distâncias entre os espigões forem grandes, mas suficientes para manter sua função no fluxo principal do rio. Os espigões apresentam melhores resultados se houver um forte vórtice entre cada par de espigões. Isto restringe o comprimento  $L$ , que corresponde à distância entre os espigões, uma vez que a estabilidade de um vórtice é governada pelo fator  $\alpha$ , descrito pela seguinte equação:

$$\alpha = \frac{2 \cdot g \cdot L}{C^2 \cdot h} \quad (4.12)$$

Onde:

$L$  = distância entre os espigões (m);

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

$C$  = fator de resistência ( $m^{1/2} \cdot s^{-1}$ );

$h$  = altura da lâmina d'água, considerando a vazão média no curso de água (m).

O fator  $\alpha$  não deve exceder à unidade e testes laboratoriais indicaram que valores de  $\alpha$  menores ou iguais a 0,6 permitem a formação de fortes vórtices entre os espigões e, conseqüentemente, melhores resultados, sendo recomendado, entretanto, a utilização de valores inferiores na prática (Bendegom *et al.*, 1979).

A equação a seguir, utilizada para a obtenção do fator de resistência  $C$ , corresponde à formulação de Gauckler, datada de 1867 (Baptista *et al.*, 2001):

$$C = \frac{1}{n} \cdot R_h^{1/6} \quad (4.13)$$

Onde:

$C$  = fator de resistência ( $m^{1/2} \cdot s^{-1}$ );

$n$  = coeficiente de Manning;

$R_h$  = raio hidráulico, que corresponde à área molhada dividida pelo perímetro molhado (m).

Contudo, a decisão da distância entre os espigões também envolve um problema econômico, uma vez que quanto maior a distância entre eles, menor o número de espigões.

De acordo com Yossef (2002) o espaçamento entre os espigões é normalmente expresso como um múltiplo do comprimento dos espigões. Richardson (1975 *apud* Yossef, 2002) recomenda um espaçamento de 1,5 a 6 vezes o comprimento do espigão dentro do fluxo, sendo que para navegação, é recomendado um espaçamento de 1,5 a 2 vezes o comprimento dos espigões, enquanto que, para proteção das margens, recomenda-se um espaçamento de 2 a 6 vezes o comprimento dos espigões. Espaçamentos de 10 a 100 vezes o comprimento dos espigões requerem proteção nas margens com rip-rap ou vegetação.

Um conceito geral recomendado por Mamak (1956) e Woloszyn (1974) *apud* Przedwojski (1995) é que a distância entre os espigões ( $L$ ) deve ser aproximadamente igual à largura do rio ( $B$ ) e o comprimento dos espigões ( $L_T$ ).

Verifica-se, nas diversas bibliografias pesquisadas, uma grande variedade de recomendações para o espaçamento dos espigões, não conduzindo a valores convergentes, como pode ser constatado na Tabela 4.6, que apresenta o espaçamento entre os espigões segundo diversos autores (Przedwojski *et al.*, 1995).

**Tabela 4.6** – Espaçamento dos espigões, recomendados por diversos autores.

Autor	Espaçamento recomendado		Tipo de margem	Observação
	L/ L <sub>T</sub>	L/B		
United Nations (1953)	1		Côncava	Prática geral
	1 a 2,5		Convexa	Prática geral
Ahmad (1951)	4,29		Retilínea	
	≅ 5		Curva	
Joglekar (1971)	2 ~ 2,5			Espigões inclinados para montante
US Army (1984a)	2			Rio Mississippi
Mathes (1956)	1,5			
Strom (1962)	3 a 5			
Acheson (1968)	3 a 4			Variável, dependendo da curvatura e declividade do rio.
Altunin (1962)	4		Retilínea	$\alpha > 75^\circ$
	3			Para $0,005 \leq I \leq 0,01$
	2			Para $I \geq 0,01$
Richardson <i>et al.</i>	2 a 6			Para proteção das margens
	3 a 4			Espigões com o topo em T, para canais de navegação.
	1,5 a 2			Canal profundo, para navegação.
Mamak (1956)	2 a 3	1		
Macura (1966)		0,5	Côncava	
		5/4	Convexa	
		¾ a 1	Retilínea	
Jansen <i>et al.</i> (1979)		1 a 2		Em rios contraídos
		0,5 a 1		
Blench <i>et al.</i> (1976)	3,5			
Copeland (1983)	> 3		Côncava	
Akantisz <i>et al.</i> (1983, 1986, 1989)		0,9 a 1		Para $\Phi=45^\circ$ a $50^\circ$ ; R/B =8 a 13,5
		1,1		Para $\Phi=55^\circ$ ; R/B =8
		1,1 a 0,9		Para $\Phi=55^\circ$ ; R/B =13,5
Kovacs <i>et al.</i> (1983)	1 a 2			Rio Danúbio
Mohan e Agraval (1979)	5			Espigões submersos com altura igual a um terço a profundidade.
Maza Alvarez (1989)	5,1 a 6,3		Retilínea	Espigões com a crista inclinada
	2,5 a 4		Curva	Para proteção.

L= distância entre os espigões; L<sub>T</sub>= comprimento dos espigões; B = largura do rio.

Fonte: Przedwojski *et al.*, 1995.

Os espigões podem estar orientados para montante, para jusante ou podem ser normais à corrente. A eficácia de cada tipo é bem diferente, existindo grandes controvérsias sobre as vantagens e inconveniências de se orientar os espigões para montante, jusante ou perpendicularmente às linhas de vazão (Brighetti e Martins, 2001).

A Tabela 4.7 apresenta a inclinação dos espigões em relação à margem recomendado por diversos autores (Przedwojski *et al.*, 1995).

**Tabela 4.7** – Inclinação dos espigões, recomendada por diversos autores.

Autor	Inclinação recomendada	Observação
United Nations (1953)	100° a 120°	Espigões inclinados para montante
Mamak (1956)	100° a 110°	
Joglekar (1971)	100° a 120° 30° a 60°	Objetivo é repelir o fluxo. Objetivo é atrair o fluxo para os espigões.
Macura (1966)	110° 100° 90°	Margem côncava Trecho retilíneo Margem convexa
Copeland (1983)	~ 90°	
Akantisz <i>et al.</i> (1983, 1986, 1989)	65°	
Maza Alvarez (1989)	70°	Espigões inclinados para jusante

Fonte: Przedwojski *et al.*, 1995.

Um dos grandes problemas em projetos de retificação de canais é a determinação do raio máximo admissível da curvatura do rio, assim como o comprimento mínimo da curva e o comprimento de transição entre duas curvas.

O ângulo mínimo de uma curva é determinado pela necessidade de obter um fluxo helicoidal inteiramente desenvolvido, capaz de estabilizar o banco de areia na curvatura interna. Experiências mostraram que um ângulo mínimo de aproximadamente 50° é aceitável, contudo, este valor pode ser menor em função da profundidade do fluxo e da largura do canal. Em alguns casos, pode haver a necessidade de retificação da calha do rio, com pequenos cortes, diminuindo a curvatura do rio (Bendegom *et al.*, 1979).

Quando se trata de uma retificação em canais formados por areias e limos, convém, dentro do possível, que os raios das curvas, medidos até o eixo do rio, atendam aos limites estabelecidos na Equação 4.14 (Brighetti e Martins, 2001), apresentada a seguir.

$$2 \cdot B \leq R \leq 8 \cdot B \quad (4.14)$$

Onde:

$R$  é o raio da curva (m).

$B$  é a largura média do canal (m).

O comprimento de trabalho ( $L_T$ ) do espigão, isto é, a parte que está dentro da corrente, deve atender ao seguinte limite (Brighetti e Martins, 2001 e Yossef, 2002):

$$h \leq L_T \leq \frac{B}{4} \quad (4.15)$$

Onde:

$B$  é a largura média do canal;

$h$  é a altura média, ambos referidos à vazão predominante.

Há uma incerteza no cálculo da altura da crista dos espigões. Por razões econômicas, o nível da crista deve ser o menor possível. Contudo, quando a altura da crista dos espigões é relativamente baixa, a ação helicoidal pode ser enfraquecida com a passagem do fluxo por cima dos espigões. O escoamento por cima dos espigões é menor quando a distância entre a crista do espigão e a planície de inundação é praticamente constante. Desta forma, a altura da crista dos espigões é normalmente abaixo ou no mesmo nível da planície de inundação, sendo a estrutura geralmente galgada quando ocorrem enchentes.

Bendegom *et al.* (1979) coloca que a altura da crista de estruturas que tem como objetivo direcionar o fluxo no rio é determinada pela planície de inundação, desde que, em estágios elevados do rio, as erosões atuais, atrás das estruturas, sejam impedidas. Da mesma forma, Yossef (2002) apresenta que, para proteção das margens, a crista dos espigões deve estar, pelo menos, na altura das margens.

A crista dos espigões normalmente é inclinada para o rio. A declividade no topo dos espigões normalmente é mais acentuada, para permitir uma transição gradual entre o vórtice formado no interior dos espigões e o fluxo principal.

Em alguns casos são construídas bermas nos espigões, normalmente projetadas para facilitar a execução, melhorar a estabilidade ou permitir uma boa transição entre dois tipos de revestimentos.

Por razões econômicas os espigões são, sempre que possível, compostos por materiais do leito do rio ou existentes próximo a ele, podendo, entretanto, ser construídos com os mais diversos materiais como madeira, troncos e ramos de árvores, enrocamento, elementos pré-fabricados de concreto etc. Quando a corrente é forte, o material deve ser composto por rochas ou gabiões.

Os espigões podem ser impermeáveis ou permeáveis. Os espigões impermeáveis podem ser construídos em terra, protegidos por enrocamento ou outro revestimento, bolsas e sacos preenchidos com solo cimento, argamassa e concreto. Os espigões permeáveis são geralmente construídos com enrocamento de blocos de granulometria variada, gabiões, estruturas de madeira com pilares e estacas preenchidas com enrocamento e outros tipos especiais, como gaiolas metálicas.

Contudo, como a aplicação de revestimentos impermeáveis tem apresentado grandes dificuldades com a flutuação do nível da água, normalmente é recomendada a utilização de revestimentos permeáveis (Bendegom *et al.*, 1979).

## **Rochas**

Devido à capacidade de resistir às fortes correntes e ações das ondas, as rochas são e serão, por muitos anos, um dos materiais mais populares usados para proteção das margens e do fundo dos rios (Escarameia, 1998).

O uso da cobertura do solo com rochas possui um amplo alcance de aplicação para proteção contra o impacto direto do fluxo, para a construção de camadas de filtro e sub-camadas reguladoras. As rochas como revestimentos podem ser lançadas aleatoriamente (rip-rap), cuidadosamente colocadas como unidades soltas (blocos de rochas e rochas arrumadas à mão), contidas dentro de caixas (gabiões) ou preenchidas com pasta de cimento (argamassa) e misturas betuminosas.

A seguir são apresentadas a aplicabilidade e propriedades dos enrocamentos e blocos de rochas utilizados como revestimentos de canais.

- Enrocamento ou Rip-Rap

Os enrocamentos ou *rip-rap* consistem no simples revestimento de taludes com rochas lançadas ou arrumadas, com dimensões compatíveis com as velocidades de escoamento. Compreendem um dos mais versáteis tipos de revestimentos, podendo ser especificado para uma larga faixa de vazões e condições do solo.

A estabilidade dos revestimentos com enrocamentos é função de diversos aspectos, tais como a velocidade de escoamento, as condições de turbulência do fluxo, as propriedades das rochas utilizadas, o local no qual o rip-rap é instalado entre outros.

O rip-rap pode ser projetado para promover a proteção tanto das margens como do fundo dos rios, sendo capaz de resistir ao ataque de ondas e fortes correntes, inclusive com elevados níveis de turbulência.

O rip-rap é recomendado para proteção das margens com declividades de 1V:1,5H sem necessidade de proteções adicionais (Escarameia, 1998)

A facilidade de aplicação, que é feito por máquinas e geralmente sem necessidade de compactação, faz o rip-rap próprio para um grande número de situações, incluindo proteções abaixo da água. Entretanto, isto requer cuidados especiais, de modo a evitar a perda de frações de rochas menores. Dado aos seus requerimentos de baixa manutenção, é também apropriado para áreas remotas.

Devido à sua flexibilidade, o rip-rap é também um bom material para proteção contra erosões em transições entre estruturas hidráulicas e terrenos naturais ou entre outros tipos de revestimentos.

Para a utilização de enrocamentos ou rip-rap em cursos de água é extremamente importante o correto dimensionamento do diâmetro dos blocos, de modo a evitar o seu carreamento com o escoamento e garantir a estabilidade da estrutura.

De acordo com Escarameia (1998) existe um grande número de equações de estabilidade que foram desenvolvidas ao longo dos anos (praticamente todas desenvolvidas para rip-rap), sendo que três devem ser destacadas por levarem em consideração a turbulência do fluxo:

- a equação devido à Escarameia e May (1992) é uma forma da equação de Izbash e foi desenvolvida com teste laboratoriais feitos no HR Wallingford, Reino Unido, em rip-rap, blocos de concretos e gabiões tipo manta. Esta é a única equação conhecida onde turbulência é incluída de maneira quantificável;
- a equação de Pilarczyk (1990), resultante do trabalho desenvolvido nos Países Baixos em estabilização de rip-rap e colchões (ambos colchões de rochas e blocos de concretos). Esta incluía vários coeficientes empíricos derivados em parte de testes de protótipos, entre os quais existe o fator de turbulência varia de acordo com o tipo de condição do fluxo.
- a terceira equação faz parte do procedimento de projeto do *U.S. Army Corps of Engineers* e foi desenvolvida e refinada por Maynard ao longo de anos. Este equação foi especificamente desenvolvida para rip-rap seguindo extensos estudos laboratoriais, realizados em diferentes tipos de escala.

No presente trabalho será adotada a primeira equação descrita anteriormente, devido à Escarameia e May (1992). Os critérios do dimensionamento do diâmetro médio das rochas, centrados na referida equação (Equação 4.16), são apresentados a seguir (Escarameia, 1998):

$$D_p = k_s \cdot C_t \cdot \frac{V_b^2}{2 \cdot g \cdot (s-1)} \quad (4.16)$$

Onde:

$D_p$  = diâmetro médio das rochas (m);

$k_s$  = fator de correção granulométrica;

$C_t$  = coeficiente de turbulência do escoamento;

$V_b$  = velocidade de escoamento junto ao leito (m/s);

$s$  = densidade média das rochas;

$g$  = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>).

O fator de correção granulométrica,  $K_s$ , apresenta um valor médio usual de 1,15. A densidade média das rochas é usualmente adotada entre 2,5 e 2,7.

O coeficiente de turbulência,  $C_t$ , é função do nível de turbulência, que pode ser avaliado por meio da Intensidade de Turbulência (IT), apresentada na Tabela 4.8 a seguir.

**Tabela 4.8 – Intensidade de Turbulência**

Situação	Nível de Turbulência	
	Avaliação Qualitativa	Intensidade de Turbulência – IT
Cursos de água retilíneos	Normal	0,12
Bordas de revestimento	Normal	0,20
Aterros de pontes e espigões	Média a alta	0,35 a 0,50
Extremidade de estruturas	Muito alta	0,60

Fonte: Escarameia, 1998.

Assim, o coeficiente de turbulência pode ser calculado pela seguinte equação:

$$C_t = 12,3 \cdot IT - 0,20 \quad (4.17)$$

Na ausência de dados medidos, a velocidade de escoamento junto ao leito  $V_b$  (a aproximadamente 90% da profundidade) pode ser avaliada pelas seguintes equações:

$$IT \leq 0,50: V_b = (1,04 - 1,48 \cdot IT) \cdot U \quad (4.18)$$

$$IT > 0,50: V_b = (1,36 - 1,48 \cdot IT) \cdot U \quad (4.19)$$

Os canais revestidos com enrocamentos apresentam boa inserção ambiental e social, adquirindo um aspecto de canal natural. Entretanto, cuidados devem ser tomados quanto à manutenção e integridade do revestimento, tendo em vista a possibilidade de retenção de resíduos sólidos e crescimento desordenado de vegetação.

- **Blocos de Rochas**

Apesar de menos comuns que os rip-rap, os blocos de rochas são também um dos materiais utilizados para proteção das margens dos rios contra as fortes correntes. De acordo com Escarameia (1998) não há uma definição exata para os “blocos de rochas”, mas normalmente estão relacionadas a rochas que necessitam de máquinas para sua colocação, com peso tipicamente acima de 1000 kgf, correspondente a dimensões de aproximadamente 700 mm.

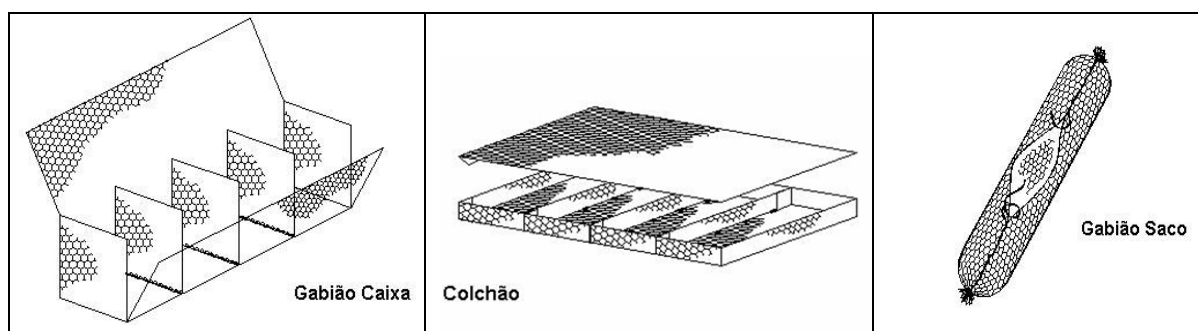
Hidraulicamente os blocos de rochas podem promover uma proteção estável com o forte ataque do fluxo, mas com relativamente baixos níveis de turbulência, uma vez que a porosidade e flexibilidade deste revestimento são baixas.

Os blocos de rochas podem ser atrativos, mas geralmente são uma alternativa mais cara que os gabiões ou o concreto, em situações onde o espaço é limitado e a obtenção das rochas é difícil.

## Gabiões

Os gabiões também se destacam entre os revestimentos de canais amplamente utilizados, consistindo em estruturas com grades metálicas preenchidas com rochas.

Os gabiões podem variar consideravelmente de formato, podendo ser de forma cúbica e retangular, com uma espessura relativamente pequena, ou um formato do tipo “salsicha”. O primeiro tipo é geralmente conhecido como gabião tipo caixa, o segundo como gabião tipo manta ou colchão e o terceiro é conhecido por vários nomes como sacos de gabião ou gabião tipo salsicha. A Figura 4.14 ilustra os referidos tipos de gabiões.



**Figura 4.14** – Desenho esquemático de gabiões (Fonte: Maccaferri, 2007).

O objetivo do desenvolvimento dos gabiões foi a obtenção de um aumento da estabilidade das rochas, quando comparadas às rochas soltas.

Os gabiões são elementos de aplicação simples, não requerendo mão-de-obra especializada. São estruturas altamente permeáveis e drenantes, permitindo o fluxo das águas de percolação, aliviando empuxos hidrostáticos e otimizando assim as seções de tais estruturas. Devido à sua flexibilidade, as estruturas em gabiões podem acompanhar recalques ou acomodações sem perder sua eficiência e função estrutural, ao contrário das estruturas rígidas.

Os arames dos gabiões devem sempre ser revestidos, de forma a evitar a corrosão devido ao contato com a água.

Quando a seção do canal é limitada, ou em locais nos quais a topografia permite somente pequenas declividades, é usual a técnica de recobrimento dos gabiões tipo caixa e colchão com argamassa de cimento e areia. Esta técnica reduz o coeficiente de rugosidade, permitindo maiores velocidades de escoamento e a redução da sedimentação. Esta solução torna a superfície menos permeável, minimiza o crescimento da vegetação e facilita a limpeza.

Quando é necessário um revestimento mais pesado, também pode ser usado o recobrimento dos gabiões com mistura betuminosa.

Na Tabela 4.9 são apresentadas as velocidades críticas e velocidades limites para diferentes espessuras de colchão e gabião tipo caixa, sendo que a velocidade crítica é aquela que provoca a condição de início de movimento nas rochas do revestimento, enquanto que a velocidade limite é a que pode ser suportada pelo revestimento por curtos períodos de tempo, admitindo-se pequenos movimentos das rochas no interior das telas (Maccaferri, 2007).

**Tabela 4.9** – Velocidades Críticas e Limites para Gabiões

Tipo	Espessura (m)	Rochas de Enchimento		Velocidade Crítica (m/s)	Velocidade Limite (m/s)
		Dimensões (mm)	d <sub>50</sub> (m)		
Gabião Colchão	0,17	70 a 100	0,085	3,5	4,2
		70 a 150	0,110	3,8	4,5
	0,23	70 a 100	0,085	3,7	4,5
		70 a 150	0,110	4,1	4,9
	0,30	70 a 120	0,100	4,0	4,7
		100 a 150	0,125	4,3	5,0
Gabião Caixa	0,50	100 a 200	0,150	4,9	5,8
		120 a 250	0,190	5,5	6,4

Fonte: Maccaferri, 2007.

#### **4.6 Considerações Parciais**

No presente capítulo foi apresentada a revisão bibliográfica essencial dos principais temas relacionados à recuperação e revitalização de cursos de água, servindo como base para o desenvolvimento do presente estudo. Foram apresentados os principais conceitos relativos aos escoamentos livres, considerações sobre velocidades admissíveis, tensões de arraste e turbulência em cursos de água, uma revisão sobre morfologia fluvial, sedimentos e

modelagem hidráulica e, por fim, as principais técnicas adotadas para proteção das margens com enfoque na recuperação e revitalização dos rios.

No próximo capítulo será apresentado o desenvolvimento do estudo, que teve como base a avaliação do comportamento hidráulico de um trecho experimental no rio das Velhas, que se encontra em estado de degradação avançado. Com a realização de modelagem hidráulica foram avaliadas a eficiência e aplicabilidade das estruturas de revestimento e contenção das margens propostas para recuperação do referido trecho.

## 5 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

No presente capítulo é apresentado o desenvolvimento do estudo, que tem como base a avaliação de um trecho experimental no rio das Velhas, a jusante da ponte da BR 381.

O trecho foi considerado como uma área experimental em que as diversas técnicas de recuperação estudadas serão implantadas no local, permitindo verificar a real eficiência e aplicabilidade das mesmas.

Como mencionado anteriormente, o estudo consiste em um projeto piloto, desenvolvido em conjunto com o departamento de Botânica do ICB (Instituto de Ciências Biológicas) da UFMG, sendo o primeiro estudo na área de engenharia hidráulica desenvolvido no trecho experimental.

### **5.1 Descrição do Trecho Experimental**

O rio das Velhas é o maior afluente em extensão da bacia do rio São Francisco, com 801 km. Suas nascentes estão localizadas no município de Ouro Preto. Deságua no rio São Francisco na localidade de Barra do Guaicuí, município de Várzea da Palma, Minas Gerais. A região metropolitana de Belo Horizonte, apesar de ocupar apenas 10% da área territorial desta bacia, é a principal responsável pela degradação do rio das Velhas, devido à sua elevada densidade demográfica, processo de urbanização e atividades industriais (Projeto Manuelzão, 2006).

O presente trabalho tem como base estudar um trecho do rio das Velhas a jusante da ponte da BR 381, na divisa das cidades de Belo Horizonte e Sabará, com uma extensão de aproximadamente 500 m.

O trecho é considerado como uma área experimental, no qual as diversas alternativas de revestimento das margens serão implantadas no local, permitindo verificar, na prática, sua real eficiência e aplicabilidade. Algumas estruturas já estão sendo implantadas, conforme será apresentado a seguir.

A Figura 5.1 apresenta a localização regional do trecho em estudo e a Figura 5.2 o mapa hidrográfico da região.

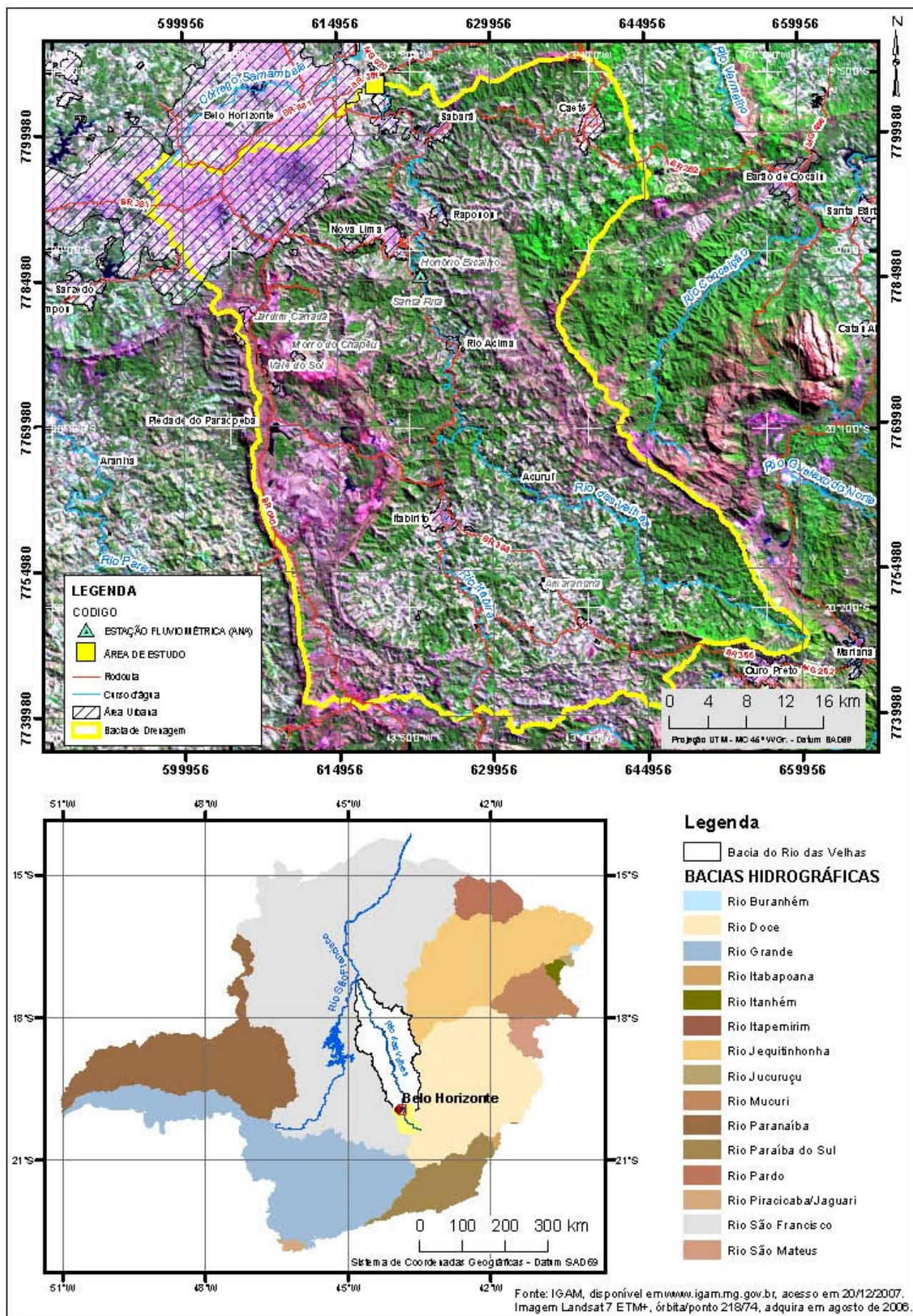


Figura 5.1 – Localização regional do trecho em estudo.

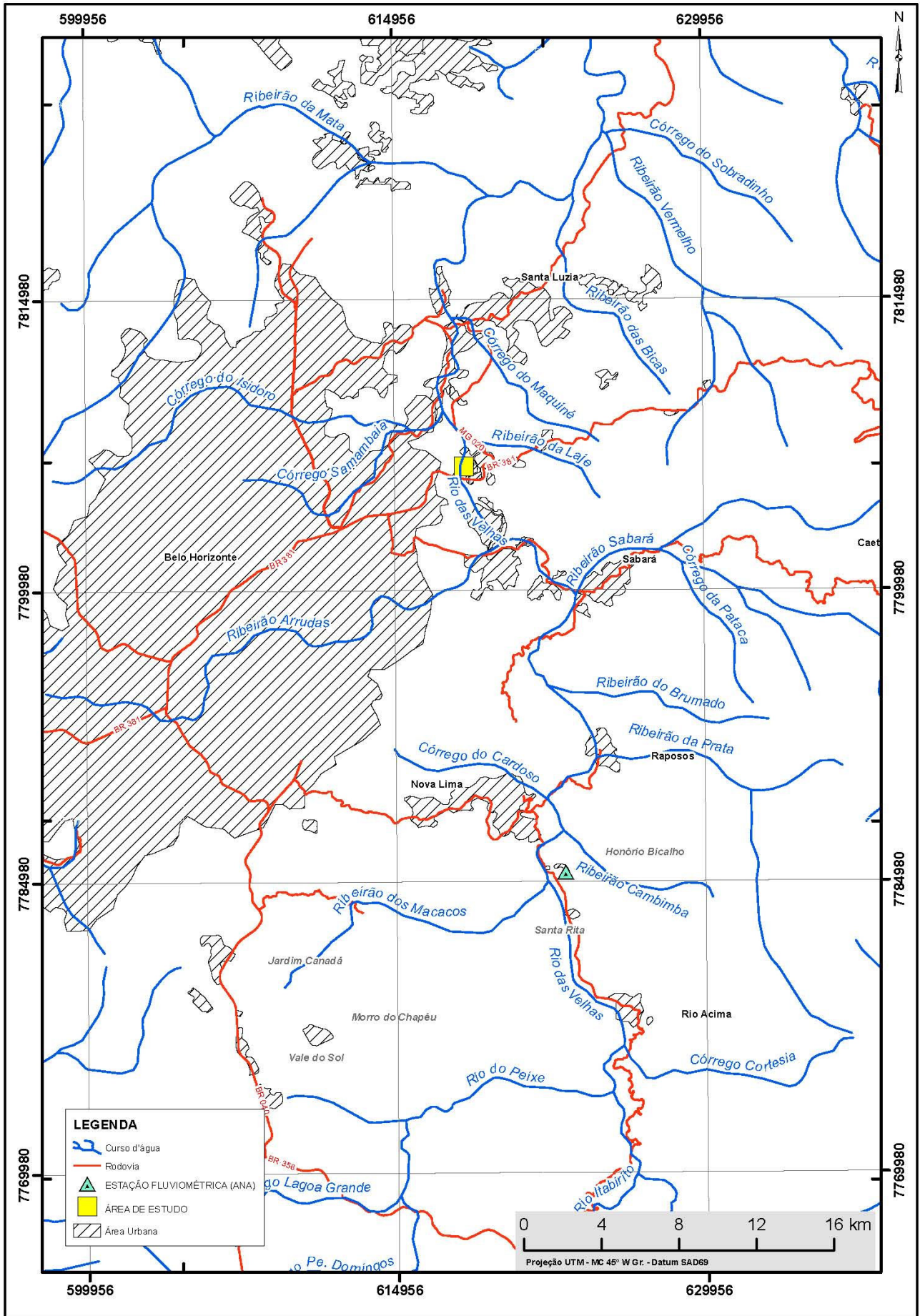


Figura 5.2 – Mapa Hidrográfico da Região em Estudo

O trecho no rio das Velhas, a jusante da ponte da BR 381, foi escolhido como trecho experimental por encontrar-se em estado de degradação avançado, com elevado grau de assoreamento, escavação das margens e deposição de sedimentos.

No local é possível verificar que o curso de água, na busca do equilíbrio, escava uma das margens e deposita sedimentos na outra, causando problemas de erosão, assoreamento e instabilidade das margens. As Figuras 5.3 a 5.6 apresentam fotos do trecho em estudo.



**Figuras 5.3 e 5.4** – Foto de jusante para montante no rio das Velhas, Ponte BR 381 e vista geral do trecho em estudo, respectivamente.



**Figuras 5.5 e 5.6** – Detalhe da erosão na margem esquerda do rio das Velhas e detalhe da deposição de sedimentos na margem direita do rio das Velhas, respectivamente.

As primeiras propostas de intervenção no trecho em estudo, com vistas a recuperação e revitalização do curso de água foram a implantação de revestimentos vegetais e espigões nas margens. A descrição da referida intervenção será apresentada nos itens a seguir.

## **5.2 Levantamento de Dados**

Para o levantamento de dados na região foram realizadas visitas de campo no trecho em estudo para obtenção de informações da geometria das margens e ilhas existentes, além das demais singularidades que possam interferir no regime de escoamento do curso de água.

O levantamento de dados consistiu na obtenção de dados topobatimétricos e medições de vazões no curso de água. Em seguida, foram realizados os estudos hidrológicos, que tiveram como base o trabalho *Regionalização de Vazões da Bacia do Alto São Francisco* (Pinto e Alves, 2003).

### **5.2.1 Dados Topobatimétricos e Medição de Vazões**

O primeiro trabalho de campo no rio das Velhas para levantamento de dados foi realizado no dia 28 de setembro de 2006, junto com uma equipe da CPRM.

Com barcos e equipamentos apropriados, disponibilizados pela CPRM, foi realizada, inicialmente, uma inspeção do local e identificadas singularidades no trecho em estudo.

Em seguida, foram definidas oito seções representativas do local, para levantamento de dados. As seções escolhidas procuraram abranger todas as particularidades do trecho como mudanças de geometria, curva, estreitamentos do rio, erosões, bancos de areia entre outros. As seções foram devidamente identificadas e marcadas com piquetes.

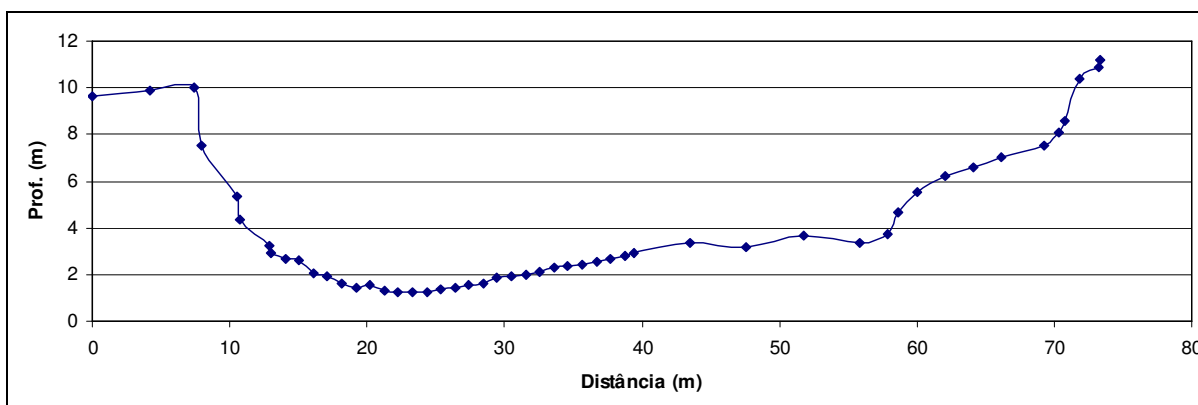
Em cada uma das oito seções, perpendiculares ao leito do rio, foram obtidas a batimetria e realizadas medições de velocidade do curso de água com o molinete. Transversalmente, as medidas foram realizadas a cada 2 metros, aproximadamente, e nas profundidades de 0,20 e 0,80 da altura da lâmina d'água.

Com o auxílio de uma régua limnimétrica, foi constatado que o nível da água, naquele dia, estava subindo na ordem de 1 cm a cada hora (dado verificado com 4 observações).

Nos dias 31 de março e 01 de abril de 2007 foi realizado o segundo trabalho de campo, adotando a mesma metodologia do primeiro. Os trabalhos de batimetria e medição de velocidade também foram realizados pela equipe da CPRM.

Devido à diferença de tempo entre a realização das duas campanhas, as estacas do primeiro trabalho de campo não foram encontradas quando da realização do segundo trabalho de campo. Desta forma, foi adotado como base para os estudos e calibração do modelo hidráulico os resultados e batimetria obtidos no segundo trabalho de campo. Os resultados obtidos no primeiro trabalho de campo serviram para validar o modelo, uma vez que, apesar de não corresponderem às seções exatas, a localização aproximada de suas seções pôde ser estimada.

Além da batimetria e da medição de velocidade, também foi realizado levantamento topográfico da região. O levantamento topográfico compreendeu uma extensão de aproximadamente 500 metros a jusante da ponte da BR 381, nas duas margens do curso de água, com a identificação e cadastramento das diversas singularidades encontradas no trecho. Na Figura 5.7 é apresentada uma seção típica do trecho em estudo.



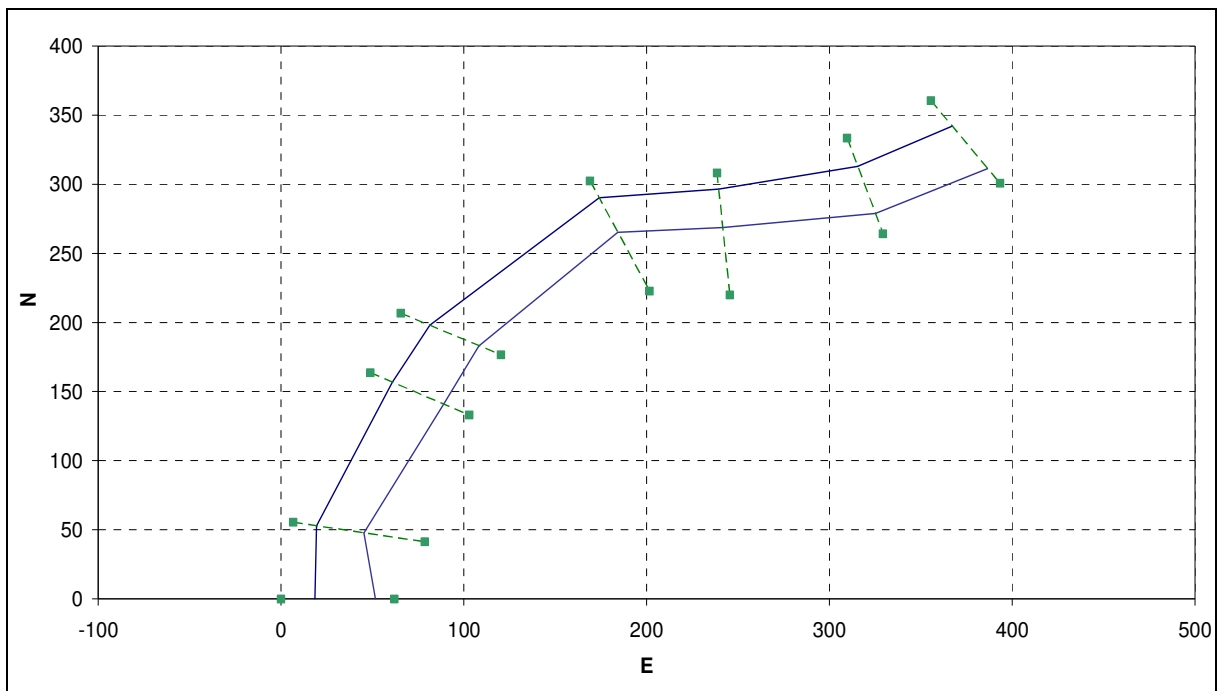
**Figura 5.7** – Seção típica do trecho em estudo.

As Figuras 5.8 e 5.9 apresentam um registro fotográfico do trabalho de campo.



**Figuras 5.8 e 5.9** – Fotos do trabalho de campo para levantamento de dados no rio das Velhas.

A Figura 5.10 apresenta a localização esquemática das oito seções obtidas no levantamento batimétrico, sendo a primeira seção a mais a jusante do rio (S-01) e a oitava seção a mais a montante, próxima à ponte (S-08).



**Figura 5.10** – Localização esquemática das seções batimétricas

A proteção que está sendo implantada na margem direita do curso de água localiza-se próximo às seções 5 e 4 e 3 (Figura 5.10), no trecho em curva. Os espigões, a serem implantados na margem esquerda, também estarão localizados próximos às referidas seções.

Nas Tabelas 5.1 e 5.2 são apresentados um resumo das medições obtidas no primeiro e segundo trabalho de campo, respectivamente.

**Tabela 5.1 – Resumo das medições obtidas no 1º trabalho de campo.**

Seção	Data	Vazão (m³/s)	Área (m²)	Largura (m)	Velocidade (m/s)	Profundidade Média da Seção (m)	Profundidade do N.A. (m)
8	28/9/2006	18,3	36,0	35,0	0,508	1,03	1,60
7	28/9/2006	19,4	21,0	24,5	0,926	0,86	1,51
6	28/9/2006	19,0	32,8	31,0	0,579	1,06	1,58
5	28/9/2006	18,2	27,1	32,3	0,670	0,84	1,32
4	28/9/2006	18,9	32,0	29,0	0,589	1,11	2,74
3	28/9/2006	20,9	44,4	28,0	0,470	1,59	2,20
2	28/9/2006	20,9	21,8	21,5	0,956	1,02	1,50
1	28/9/2006	20,5	37,2	39,1	0,552	0,95	1,54

**Tabela 5.2 – Resumo das medições obtidas no 2º trabalho de campo.**

Seção	Data	Vazão (m³/s)	Área (m²)	Largura (m)	Velocidade (m/s)	Profundidade Média da Seção (m)	Profundidade do N.A. (m)
8	1/4/2007	27,1	43,6	35,0	0,621	1,24	1,65
7	1/4/2007	35,2	30,4	25,6	1,159	1,19	1,70
6	31/3/2007	25,9	39,3	32,0	0,658	1,23	1,67
5	31/3/2007	28,8	36,9	32,1	0,780	1,15	1,70
4	31/3/2007	27,1	40,2	28,0	0,674	1,44	3,26
3	31/3/2007	32,4	62,4	28,6	0,520	2,18	2,90
2	1/4/2007	32,6	36,5	36,0	0,893	1,02	1,77
1	31/3/2007	26,2	38,3	35,6	0,683	1,08	1,88

## 5.2.2 Estudos Hidrológicos

Os estudos hidrológicos tiveram como objetivo a obtenção das vazões de cheia no trecho em estudo. Para tanto, foi utilizado o trabalho *Regionalização de Vazões da Bacia do Alto São Francisco* (Pinto e Alves, 2003), que apresenta a regionalização das vazões médias de longo termo, máximas e mínimas com diferentes durações da bacia do alto São Francisco.

A regionalização das vazões máximas foi realizada através da aplicação do método “index-flood” utilizando momentos-L. Foram utilizadas as vazões máximas por ano hidrológico (outubro a setembro) de 63 estações com mais de 10 anos de observações.

Para cada região homogênea, definida no referido estudo, foram realizadas regressões múltiplas entre a média das séries das vazões máximas, também chamadas de média das vazões de cheia, utilizadas como fator de adimensionalização, com as características físicas e

climáticas levantadas, ou seja, área de drenagem, comprimento do talvegue principal, declividade equivalente e precipitação média anual.

A Equação 5.1, apresentada a seguir, mostra os resultados do modelo de regressão ajustados para a  $Q_{\text{máx med}}$  (média das vazões máximas anuais), para a região na qual está localizado o trecho em estudo (Pinto e Alves, 2003).

$$Q_{\text{máx med}} = 0,7652 \cdot A^{0,7828} \quad (A \geq 175 \text{ km}^2) \quad (5.1)$$

Onde:

$A$  = área de drenagem (km<sup>2</sup>).

Multiplicando a  $Q_{\text{máx med}}$  pelos quantis regionais adimensionalizados apresentados na Tabela 5.3, obtêm-se as vazões máximas de cheia associadas a diversos períodos de retorno.

**Tabela 5.3 – Quantis regionais adimensionalizados**

Tr (anos)									
1,01	2	5	10	20	25	50	100	150	200
0,186	0,929	1,360	1,634	1,891	1,971	2,217	2,458	2,599	2,698

TR (anos): período de retorno.

Fonte: (Pinto e Alves, 2003).

O modelo de regressão ajustado para a vazão média de longo termo ( $Q_{\text{MLT}}$ ) é mostrado na Equação 5.2, referente à região em estudo (Pinto e Alves, 2003).

$$Q_{\text{MLT}} = 0,0212 \cdot A^{0,9733} \quad (A \geq 85 \text{ km}^2) \quad (5.2)$$

Para a área de drenagem de 2.452,5 km<sup>2</sup>, correspondente à área do trecho em estudo, tem-se as seguintes vazões de cheia, apresentadas na Tabela 5.4.

**Tabela 5.4 – Vazões de cheia para o trecho em estudo (m<sup>3</sup>/s)**

$Q_{\text{MLT}}$	Vazões Máximas (m <sup>3</sup> /s) – TR (anos)								
	1,01	2	5	10	20	25	50	100	200
42,2	64,1	320	469	563	651	679	764	847	929

$Q_{\text{MLT}}$  (m<sup>3</sup>/s): vazão média de longo termo; TR (anos): período de retorno.

### 5.3 Intervenção em estudo: revestimento vegetal e espigões

Conforme já mencionado, as diversas alternativas de revitalização e recuperação de cursos de água serão implantadas no local, de forma a permitir a observação de seu desempenho em campo.

A primeira proteção da margem direita foi implantada pela Deflor Bioengenharia e é constituída por solo envelopado verde com base de enrocamento, possibilitando o crescimento da vegetação, além de permitir a proteção da margem dos processos erosivos. As Figuras 5.11 a 5.14 mostram fotos da implantação da referida proteção.



**Figuras 5.11 e 5.12** – Detalhe da implantação da proteção na margem direita do rio das Velhas – Solo envelopado verde com base de enrocamento.



**Figuras 5.13 e 5.14** – Detalhe da implantação da proteção na margem direita do rio das Velhas – Solo envelopado verde com base de enrocamento.

Também na margem direita do curso de água já estão sendo implantadas algumas espécies de vegetação para proteção das margens. Estas espécies serão implantadas em trechos com 15 metros de comprimento, que compreenderão, ao total, 120 metros de plantio. Foram escolhidas diversas espécies vegetais que serão devidamente monitoradas e avaliadas. Este trabalho está sendo coordenado pelo departamento de Botânica do ICB. As espécies escolhidas e a seqüência de plantio estão apresentadas na Figura 5.15.

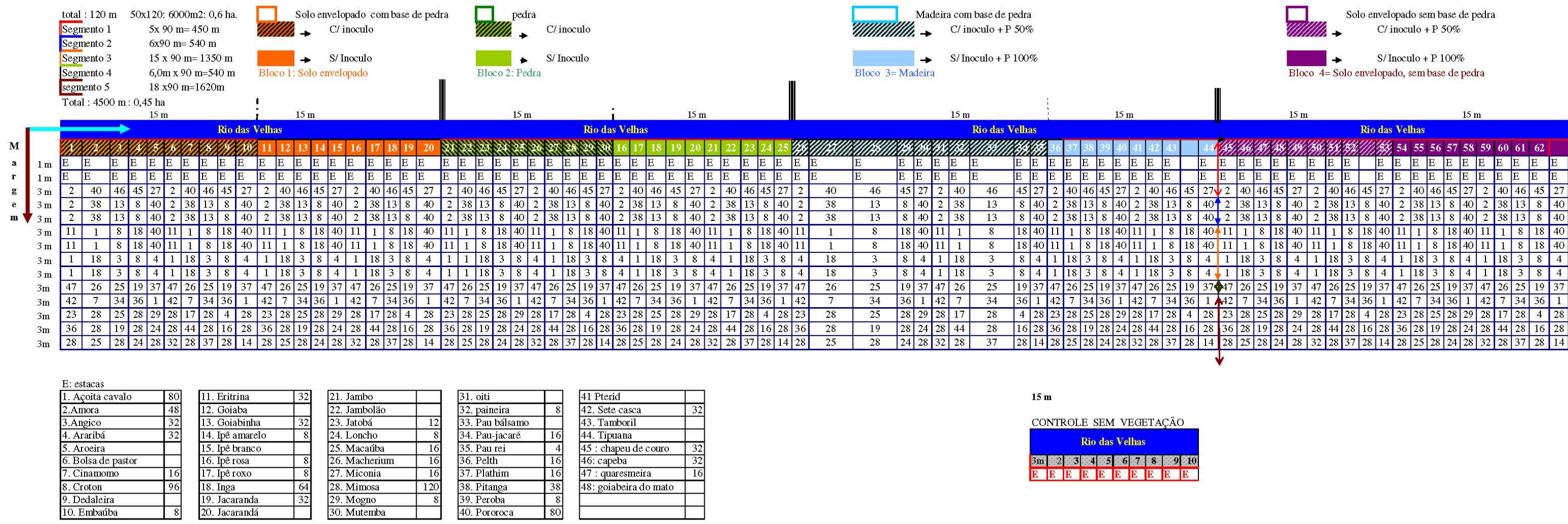


Figura 5.15 - Espécies escolhidas e sequência de plantio.

Com a proteção na margem direita, a solicitação na margem esquerda, cujo processo erosivo já é significativo, será ainda mais evidente.

Desta forma, com o objetivo de conter os processos erosivos e proteger a margem do curso de água foi proposta a implantação de espigões na margem esquerda do curso de água. Assim, a próxima técnica a ser implantada no local são os espigões, cujo dimensionamento está apresentado no item 5.4.2.

## **5.4 Modelagem Hidráulica**

Conforme mencionado anteriormente, foram utilizados dois modelos de simulação do escoamento no trecho em estudo, sendo eles: o modelo bidimensional AquaDyn e o modelo unidimensional HEC-RAS, cujos resultados estão apresentados nos itens a seguir.

### **5.4.1 Modelo Bidimensional: AQUADYN**

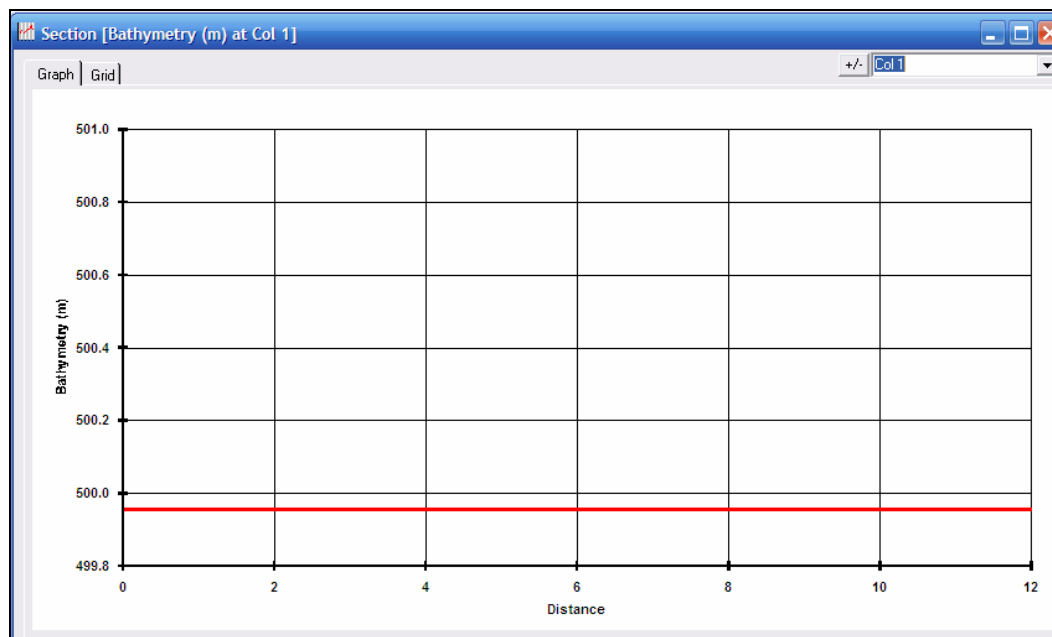
Para a modelagem hidráulica bidimensional do presente trabalho foi utilizado o software *AquaDyn* da *Hydrosoft Energy Inc.* A licença para utilização do modelo foi adquirida pelo Departamento de Engenharia Hidráulica da UFMG em 2002.

O modelo utiliza o Método dos Elementos Finitos para a solução das equações de Saint-Venant, disponibilizando como parâmetros de calibração a viscosidade artificial e o coeficiente de turbulência (AquaDyn, 2000).

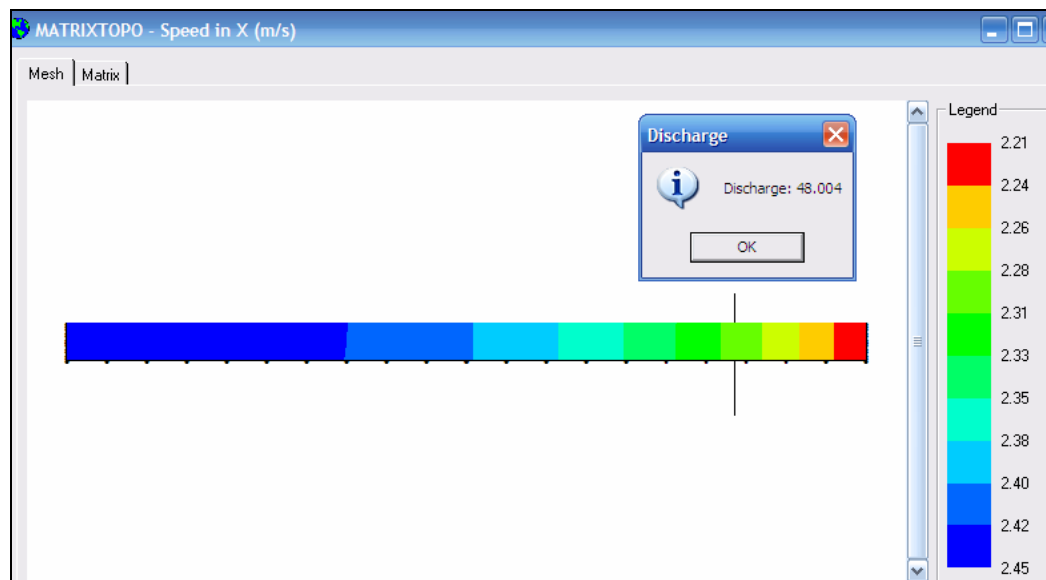
O Método dos Elementos Finitos (MEF) baseia-se na divisão do domínio em pequenos elementos que podem ser lineares, triangulares, retangulares e até mesmo cúbicos, dentre outras formas. As funções que determinam os valores das incógnitas do problema são aproximadas dentro de cada elemento, fornecendo resultados aproximados nos nós de cada um deles. O MEF tem a capacidade de definir uma malha de elementos com geometria capaz de se adequar melhor aos contornos do problema físico, e também, da grande quantidade de funções de aproximação que podem ser utilizadas para melhorar a adaptação do método ao problema físico em questão (Santos, 2003).

Inicialmente foram realizados testes simplificados com o modelo bidimensional, de forma a obter um maior conhecimento das funções, equações e interfaces do programa, permitindo uma melhor análise crítica dos resultados.

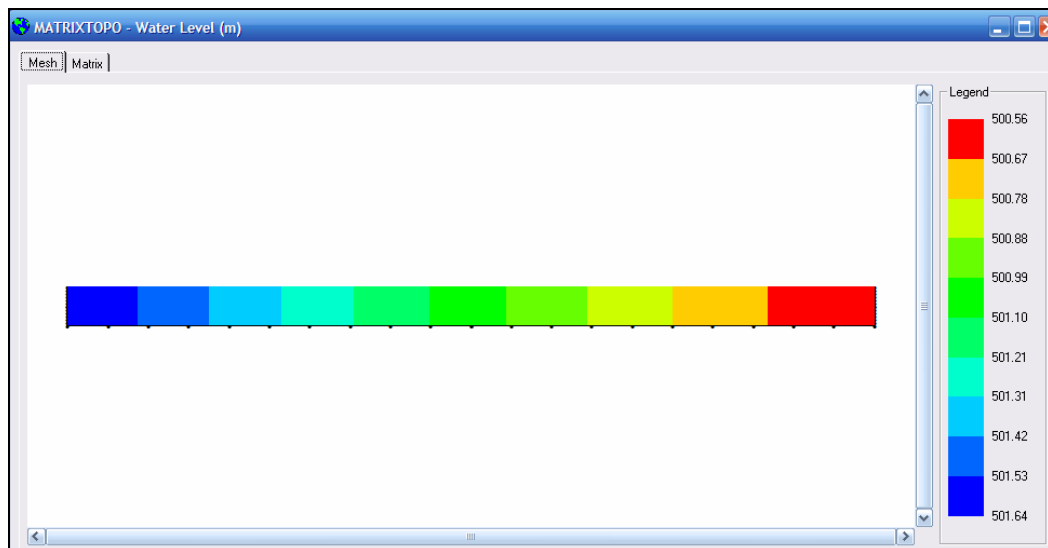
Foi realizada uma tentativa considerando canal retangular, com 12 metros de base, coeficiente de rugosidade de Manning igual a 0,040 e declividade longitudinal de 0,005 m/m. As condições de contorno foram: vazão de 48 m<sup>3</sup>/s na seção a montante e profundidade do nível d'água na seção a jusante igual a 1,81 m. Nas Figuras 5.16, 5.17 e 5.18 são apresentados, respectivamente, a seção considerada, os resultados obtidos para a velocidade e a elevação do nível d'água.



**Figura 5.16** – Seção retangular inserida no AquaDyn.



**Figura 5.17** – Velocidade – Seção retangular.



**Figura 5.18** – Elevação do nível d'água – Seção retangular.

Analisando os resultados obtidos para a seção retangular foi possível verificar que houve uma variação na profundidade do nível d'água, de 1,64 m no trecho inicial a 1,81 m no trecho final e também uma variação na velocidade, de 2,45 m/s a 2,21 m/s. Esta variação deve-se à simplificação adotada pelo programa, que considera o raio hidráulico igual à profundidade.

Uma nova simulação foi realizada com a seção retangular, para uma vazão inferior, em que o raio hidráulico é aproximadamente igual à profundidade. Os resultados obtidos foram satisfatórios.

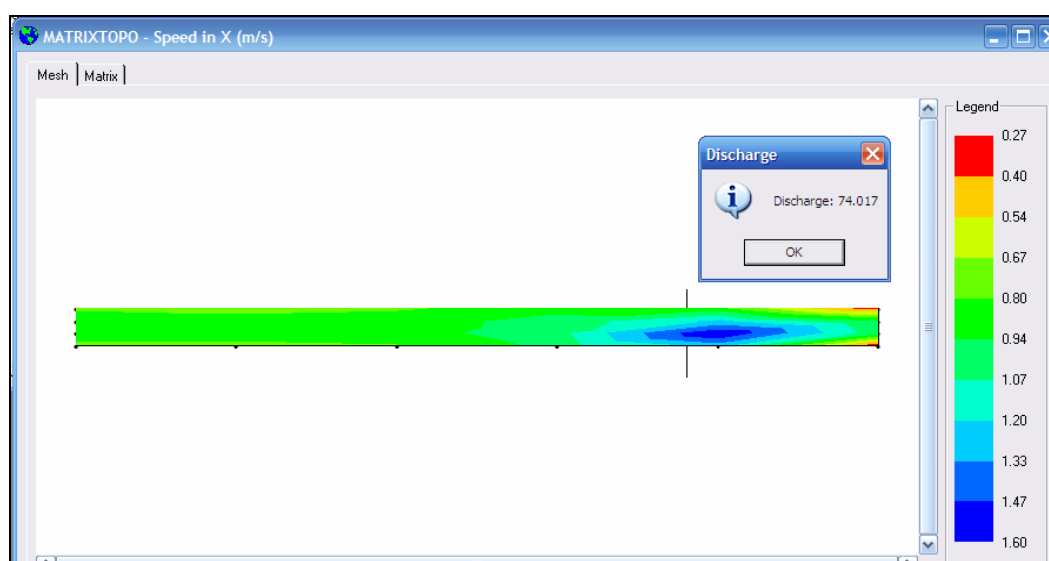
Em seguida, partiu-se para a simulação de um canal trapezoidal, considerando as seguintes condições de contorno:

- Seção trapezoidal regular, com 4 metros de base, 7 metros de altura e 60° de inclinação dos taludes;
- Vazão no trecho a montante:  $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- Declividade longitudinal do canal:  $i = 0,005 \text{ m/m}$ ;
- Comprimento total do canal: 250 m;
- Coeficiente de rugosidade de Manning: 0,040 para todas as seções;
- Profundidade da lâmina da água no trecho a jusante:  $H = 3,28 \text{ m}$ .

Com os dados inseridos no programa, foi realizada a simulação do escoamento no referido trecho. Analisando os resultados obtidos foi verificado que houve uma variação significativa da vazão ao longo do canal. Com isto, ocorreu também uma variação significativa da velocidade e lâmina d'água.

O coeficiente de calibração do modelo foi modificado para tentar solucionar o problema, sem sucesso. Os dados de entrada, unidades e equações adotadas pelo programa também foram verificados, mas não foi obtida uma resposta para a variação da vazão no trecho.

A Figura 5.19 apresenta o resultado de velocidade obtido na simulação da seção trapezoidal.



**Figura 5.19** – Resultado obtido na simulação: velocidade.

Após diversas tentativas, o suporte técnico do programa foi contactado e questionado quanto às dúvidas encontradas. Uma das sugestões sugeridas pelo suporte foi que a malha de elementos finitos fosse mais discretizada, em elementos menores. Foi também indicado que, para cursos de água naturais, o coeficiente de viscosidade deveria ser próximo a  $1 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Ainda assim, os problemas permaneceram. O suporte técnico sugeriu, então, entrar com dados de profundidade do nível d'água na seção a montante e jusante do trecho, como condições de contorno. Também não foi obtido êxito.

Diversas novas tentativas foram realizadas, com outras vazões, seções e condições de contorno e os resultados obtidos não foram aceitáveis. As simulações realizadas em seções

trapezoidais ou irregulares não atendiam às equações básicas da engenharia hidráulica: Equação da Continuidade e, simultaneamente, à Equação de Manning.

Foi solicitado ao suporte técnico que enviassem exemplos de simulações realizadas com seções irregulares, mas nenhum dos exemplos recebidos atendia ao solicitado.

Desta forma, pode-se concluir que, para seções retangulares, o programa é válido desde que possa ser assumida a hipótese de raio hidráulico aproximadamente igual à profundidade como, por exemplo, em canais muito largos com baixas lâminas d'água.

Entretanto, para seções trapezoidais ou irregulares não foi possível obter resultados satisfatórios e o suporte técnico não apontou soluções para o problema. As diferenças observadas em todos os casos foram significativas e inadmissíveis.

Assim, para o estudo desenvolvido na presente dissertação não foi possível a utilização do modelo AquaDyn, passando-se para a simulação unidimensional.

É importante destacar que, quando o Aquadyn foi testado, as seções batimétricas do trecho em estudo ainda não estavam disponíveis. Desta forma, os testes foram realizados com seções que não possuíam uma representação direta com o caso em estudo. Cabe ressaltar, entretanto, que o programa AquaDyn não realiza interpolações entre seções e a entrada de dados no modelo é bastante complexa, principalmente se adotadas seções irregulares.

#### **5.4.2 Modelo Unidimensional: HEC-RAS**

O HEC-RAS (River Analysis System) é um software de distribuição gratuita que permite executar cálculos hidráulicos em cursos de água, com utilização de modelagem unidimensional e pseudo-bidimensional, em regimes permanente e não-permanente, além da simulação do transporte de sedimentos.

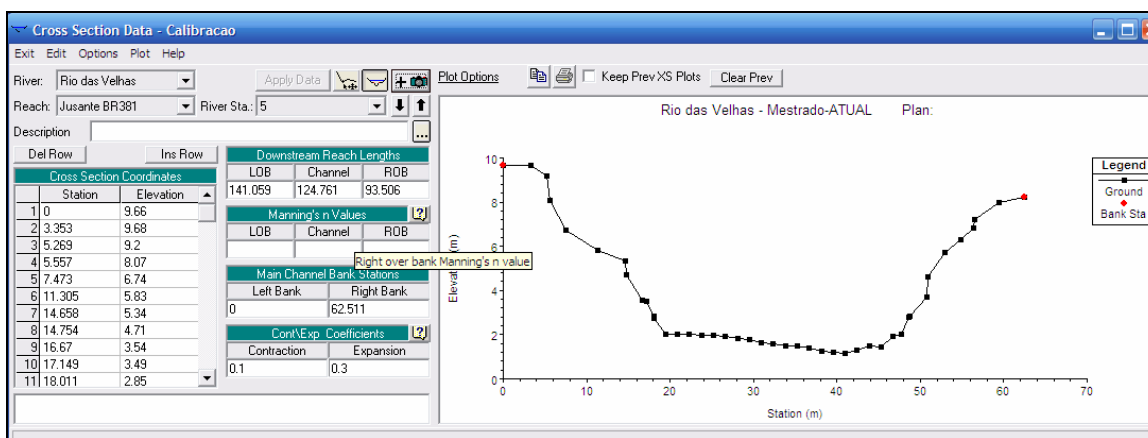
Desenvolvido pelo *U.S. Army Corps of Engineers*, o HEC-RAS é um modelo usual de simulação de escoamentos em cursos de água. No presente trabalho foi utilizada a versão 4.0 Beta do HEC-RAS.

Com os dados de batimetria e topografia inseridos no HEC-RAS foi realizada a simulação do escoamento no trecho em estudo. O modelo foi calibrado de acordo com os dados obtidos no

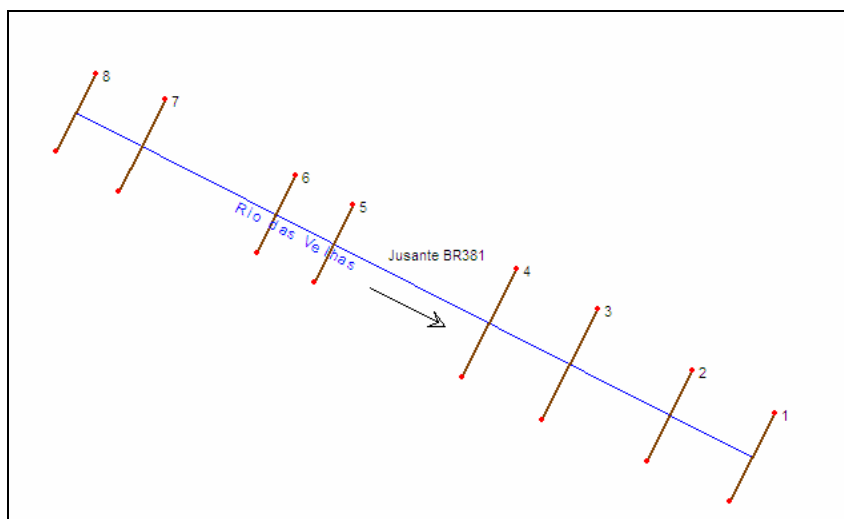
segundo trabalho de campo. A seguir são apresentados os resultados da calibração do modelo hidráulico, a simulação realizada para a situação atual, o dimensionamento dos espigões e a simulação realizada para a situação modificada, considerando a implantação de revestimentos vegetais e espigões.

- **Calibração do Modelo Hidráulico**

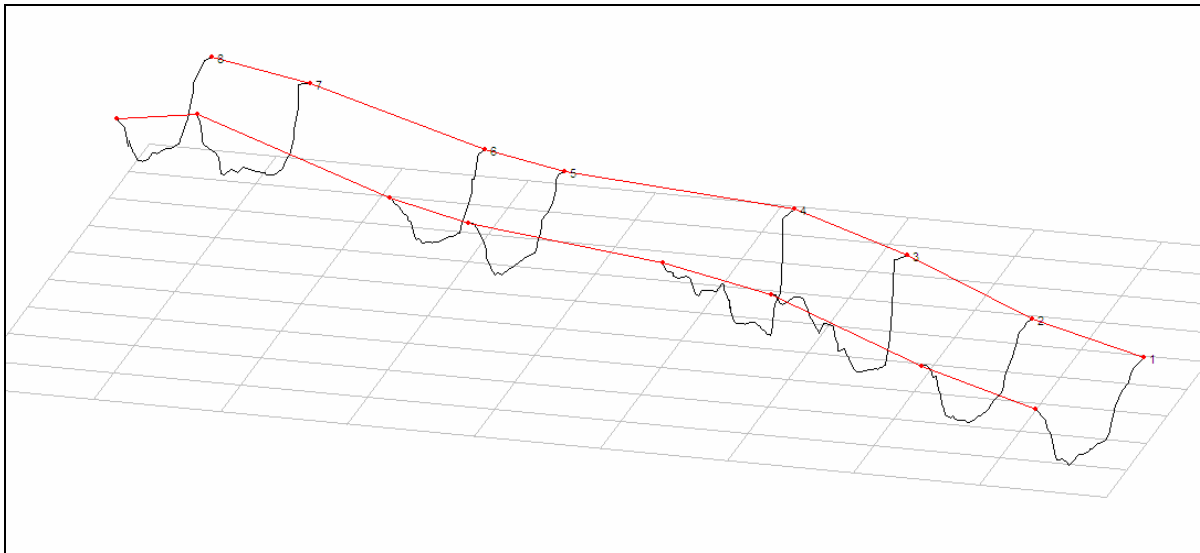
As oito seções obtidas no trabalho de campo foram inseridas no HEC-RAS conforme ilustrado nas Figuras 5.20 a 5.22. Salienta-se que a curva do trecho foi considerada quando da entrada de dados no modelo.



**Figura 5.20** – Entrada de dados no HEC-RAS – Seção típica.



**Figura 5.21** – Visualização das oito seções inseridas no HEC-RAS.



**Figura 5.22** – Visualização das oito seções inseridas no HEC-RAS – Perspectiva.

A calibração do modelo HEC-RAS foi realizada variando e ajustando o coeficiente de rugosidade de Manning de forma a obter valores de profundidade do nível d'água nas seções o mais próximo possível dos valores obtidos em campo.

Conforme já mencionado, a calibração baseou-se nos dados obtidos na segunda campanha de campo. Como a segunda campanha foi realizada em dois dias (dias 31/03/2007 e 01/04/2007) foram realizadas, inicialmente, duas calibrações do modelo. A primeira considerou a vazão média obtida no dia 31, correspondente a 28,1 m<sup>3</sup>/s e permitiu a calibração das seções 6, 5, 4, 3 e 1, cujas medições foram realizadas no dia 31/03. A segunda calibração considerou a vazão média obtida no dia 01, igual a 31,6 m<sup>3</sup>/s e permitiu a calibração das seções 8, 7 e 2. Foi admitida uma margem de erro de 5 cm entre a profundidade medida em campo e a profundidade obtida com a modelagem.

É importante destacar que, de acordo com os dados disponibilizados no site da ANA para a Estação Sabará (código 1943006), localizada próxima à área de estudo, não foi registrada precipitação entre os dias 31 de março e 01 de abril de 2007, sendo o último evento de chuva registrado no dia 21/03/2007. De acordo com os dados da Estação Fluviométrica Honório Bicalho (código 41199998), localizada no rio das Velhas, a montante do trecho em estudo, não houve uma variação significativa de vazão diária nos dias 31 de março e 01 de abril de 2007, correspondendo a valores de 19,8 m<sup>3</sup>/s e 20,8 m<sup>3</sup>/s, respectivamente.

As Tabelas 5.5 e 5.6 apresentam os resultados obtidos referentes à primeira etapa de calibração.

**Tabela 5.5 – Calibração das seções obtidas no dia 31/03 –  $Q_{\text{média}}=28,1 \text{ m}^3/\text{s}$ .**

Seção	Profundidade do N.A. (m) HEC-RAS	Coef. de Rugosidade de Manning	Profundidade do N.A. (m) – trab. de campo	Diferença (m)
8	1,67	0,028	1,65	
7	1,68	0,028	1,70	
6	1,70	0,028	1,67	0,03
5	1,72	0,028	1,70	0,03
4	3,26	0,04	3,26	0
3	2,91	0,04	2,90	0,03
2	1,77	0,038	1,77	
1	1,83	0,057	1,88	-0,05

Hachura: destaque para as seções de interesse.

**Tabela 5.6 – Calibração das seções obtidas no dia 01/04 –  $Q_{\text{média}}=31,6 \text{ m}^3/\text{s}$ .**

Seção	Profundidade do N.A. (m) HEC-RAS	Coef. de Rugosidade de Manning	Profundidade do N.A. (m) – trab. de campo	Diferença (m)
8	1,65	0,012	1,65	0
7	1,67	0,012	1,70	-0,3
6	1,73	0,028	1,67	
5	1,74	0,028	1,70	
4	3,28	0,04	3,26	
3	2,92	0,038	2,90	
2	1,77	0,038	1,77	0
1	1,83	0,05	1,88	

Hachura: destaque para as seções de interesse.

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que o coeficiente de rugosidade encontrado para as primeiras seções (seções 8 e 7 – Tabela 5.5) foi muito baixo, correspondendo a rugosidade semelhante à de canais de concreto. Entretanto, a vazão efetivamente calculada na primeira seção corresponde a  $27,1 \text{ m}^3/\text{s}$  (Tabela 5.2), o que pode indicar que, para atingir a profundidade de 1,65 m, considerando a vazão média no dia ( $31,6 \text{ m}^3/\text{s}$ ), foi necessário reduzir os valores do coeficiente de rugosidade.

Após a primeira etapa de calibração, foi realizada uma segunda etapa, considerando a vazão média obtida nas 8 seções, igual a  $29,4 \text{ m}^3/\text{s}$  e tendo como base os coeficientes de rugosidade de Manning encontrados na primeira etapa da calibração. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.7.

**Tabela 5.7** – Calibração considerando a vazão média –  $Q_{\text{média}}=29,4 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Seção	Profundidade do N.A. (m) HEC-RAS	Coef. de Rugosidade de Manning	Profundidade do N.A. (m) – trab. de campo	Diferença (m)
8	1,67	0,024	1,65	0,02
7	1,68	0,029	1,70	-0,02
6	1,69	0,024	1,67	0,02
5	1,71	0,024	1,70	0,01
4	3,27	0,033	3,26	0,01
3	2,92	0,033	2,90	0,02
2	1,79	0,033	1,77	0,02
1	1,86	0,057	1,88	-0,02

Com vistas a validação dos resultados, foi realizada uma simulação com a vazão média obtida no primeiro trabalho de campo, igual a  $19,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Os resultados estão apresentados na Tabela 5.8. Ressalta-se que as seções 3 e 4 foram descartadas da presente comparação devido à diferença na conformação da calha observada nos dois trabalhos de campo.

**Tabela 5.8** – Validação do modelo, considerando a vazão média da 1ª. Campanha –  $Q_{\text{média}}=19,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Seção	Profundidade do N.A. (m) HEC-RAS	Coef. de Rugosidade de Manning	Profundidade do N.A. (m) – trab. de campo	Diferença (m)
8	1,40	0,024	1,60	-0,20
7	1,41	0,029	1,51	-0,10
6	1,42	0,024	1,58	-0,16
5	1,44	0,024	1,32	0,12
2	1,53	0,033	1,50	0,03
1	1,62	0,057	1,54	0,08

Analisando os resultados obtidos na Tabela 5.8, verifica-se que a diferença encontrada nas primeiras seções foi significativa, indicando que os coeficientes de rugosidade ora apresentados podem estar subavaliados. Entretanto, optou-se no presente trabalho pela manutenção dos valores encontrados.

- **Modelagem da Situação Atual**

Com o modelo calibrado foi realizada a simulação da situação atual do trecho em estudo, considerando as vazões obtidas nos estudos hidrológicos para períodos de retorno de 2, 5, 10 e 50 anos e a vazão média de longo termo.

Ressalta-se que a calibração do modelo foi realizada para a calha principal, cujos valores do coeficiente de rugosidade de Manning estão apresentados na Tabela 5.8. Para as margens direita e esquerda do curso de água foram adotados valores de rugosidade de Manning obtidos em literatura (Chow, 1959), de acordo com a tipologia do solo observada no local.

Em praticamente todo o trecho, a margem esquerda do curso de água é caracterizada por solo exposto, sujeito à erosão, com crescimento de vegetação rasteira de pequeno porte, como pode ser verificado nas Figuras 5.23 e 5.24. Apenas na parte superior da margem podem ser verificadas árvores e arbustos. Desta forma, para a margem esquerda, foi adotado o coeficiente de rugosidade de Manning igual a 0,045.



**Figuras 5.23 e 5.24** – Detalhes da margem esquerda do rio das Velhas.

Já a margem direita apresenta, no trecho inicial, deposição de sedimentos, seguido por crescimento de vegetação sem controle (Figura 5.25). Nestas seções foi adotado coeficiente de rugosidade de Manning igual a 0,040. No trecho final, pode-se verificar presença de rochas, com vegetação relativamente abundante, de pequeno a médio porte (Figura 5.26). Neste local foi adotado coeficiente de rugosidade igual a 0,050.



**Figuras 5.25 e 5.26** – Detalhes da margem direita do rio das Velhas.

A Tabela 5.9 apresenta os resultados da simulação para as 8 seções do rio das Velhas.

**Tabela 5.9 – Resultados da Simulação do HEC-RAS – Situação Atual**

Seção	Vazão (m³/s)	Prof. N.A. (m)	Vel. Média (m/s)	Coef. Rugosidade Manning			Tensão de Cisalhamento (N/m²)			
				Canal	M.E.	M.D.	Canal	M.E.	M.D.	
8	TR 2	320	5,01	1,82	0,024	0,045	0,04	13,0	4,17	3,52
8	TR5	469	6,05	2,07	0,024	0,045	0,04	16,7	5,83	4,86
8	TR10	563	6,61	2,22	0,024	0,045	0,04	18,9	6,31	6,21
8	TR50	764	7,62	2,49	0,024	0,045	0,04	23,6	6,58	8,69
8	Q <sub>MLT</sub>	42,2	1,97	0,82	0,024			3,31		
7	TR 2	320	5,06	1,77	0,029	0,045	0,04	21,6	6,55	12,0
7	TR5	469	6,11	1,95	0,029	0,045	0,04	25,4	7,85	13,1
7	TR10	563	6,68	2,05	0,029	0,045	0,04	27,7	8,87	14,7
7	TR50	764	7,71	2,25	0,029	0,045	0,04	32,5	10,8	18,5
7	Q <sub>MLT</sub>	42,2	1,97	1,23	0,029		0,04	11,9		0,43
6	TR 2	320	5,07	1,86	0,024	0,045	0,04	13,3	2,70	3,40
6	TR5	469	6,10	2,11	0,024	0,045	0,04	17,0	3,24	4,85
6	TR10	563	6,65	2,24	0,024	0,045	0,04	19,2	4,07	6,03
6	TR50	764	7,65	2,49	0,024	0,045	0,04	23,7	5,78	8,53
6	Q <sub>MLT</sub>	42,2	1,99	0,84	0,024			3,53		
5	TR 2	320	5,06	2,03	0,024	0,045	0,04	16,0	3,49	2,16
5	TR5	469	6,07	2,27	0,024	0,045	0,04	20,3	5,76	4,24
5	TR10	563	6,62	2,40	0,024	0,045	0,04	22,8	7,30	4,92
5	TR50	764	7,60	2,64	0,024	0,045	0,04	28,0	10,5	6,69
5	Q <sub>MLT</sub>	42,2	2,01	0,94	0,024			4,47		
4	TR 2	320	6,55	2,20	0,033	0,045	0,04	33,9	4,56	7,58
4	TR5	469	7,53	2,55	0,033	0,045	0,04	44,6	6,25	7,32
4	TR10	563	8,07	2,66	0,033	0,045	0,04	50,3	7,43	7,38
4	TR50	764	9,06	2,84	0,033	0,045	0,04	59,8	9,19	15,2
4	Q <sub>MLT</sub>	42,2	3,54	0,91	0,033			7,67		
3	TR 2	320	6,21	1,84	0,033	0,045	0,04	23,6	2,30	8,1
3	TR5	469	7,21	2,18	0,033	0,045	0,04	32,6	3,87	7,5
3	TR10	563	7,74	2,33	0,033	0,045	0,04	37,8	4,71	9,6
3	TR50	764	8,72	2,60	0,033	0,045	0,04	47,7	6,30	15,2
3	Q <sub>MLT</sub>	42,2	3,20	0,61	0,033			3,02		
2	TR 2	320	5,07	1,86	0,033	0,045	0,04	24,8	5,14	6,28
2	TR5	469	6,07	2,11	0,033	0,045	0,04	31,2	8,35	9,50
2	TR10	563	6,61	2,25	0,033	0,045	0,04	35,0	9,58	8,94
2	TR50	764	7,60	2,50	0,033	0,045	0,04	42,6	13,9	11,9
2	Q <sub>MLT</sub>	42,2	2,06	0,91	0,033			8,26		
1	TR 2	320	5,15	1,87	0,057	0,045	0,05	73,0	15,6	15,9
1	TR5	469	6,15	2,12	0,057	0,045	0,05	90,3	20,5	23,5
1	TR10	563	6,70	2,24	0,057	0,045	0,05	99,6	24,7	24,9
1	TR50	764	7,70	2,45	0,057	0,045	0,05	117	35,5	31,1
1	Q <sub>MLT</sub>	42,2	2,13	0,88	0,057			22,7		

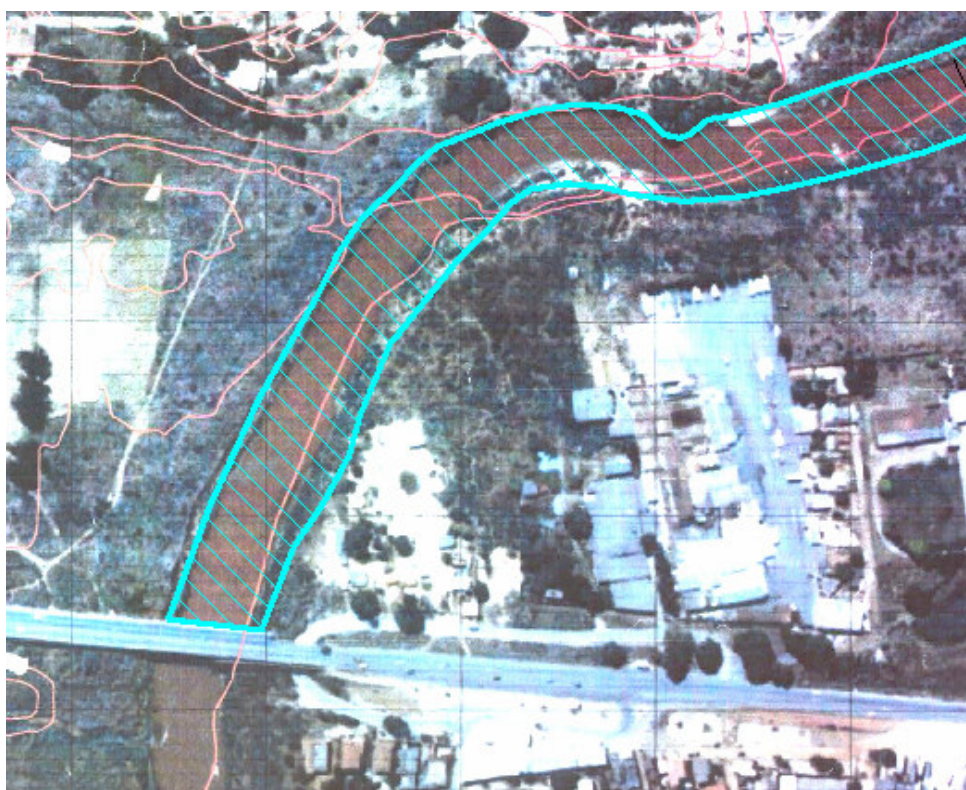
M.D. – Margem Direita; M.E – Margem Esquerda.

Como pode ser visto na Tabela 5.9, com exceção da vazão média de longo termo, cuja velocidade é da ordem de 1 m/s, a velocidade obtida no canal para as demais vazões avaliadas é sempre próxima ou superior a 2 m/s.

Conforme visto na literatura (Christofolletti, 1981), pode-se considerar que a vazão que efetivamente molda a calha de um rio é a vazão com período de retorno em torno de 2 anos. Como pode ser visto na Tabela 5.9, as velocidades do canal para a referida cheia chegam a valores próximos a 2m/s, sendo ainda superiores no trecho em curva, correspondente às seções 5, com velocidade igual a 2,04 m/s e seção 4 com velocidade igual a 2,20 m/s.

Isto confirma a atual situação do rio das Velhas no trecho em estudo, que apresenta elevado grau de erosão das margens, principalmente no trecho em curva.

Na Figura 5.27 é apresentada a mancha de inundação para a vazão correspondente a 2 anos de período de retorno, obtida com a simulação do HEC-RAS.



**Figura 5.27** – Mancha de inundação para a vazão de 2 anos de período de retorno.

- **Dimensionamento dos Espigões**

Conforme dito anteriormente, os espigões são estruturas que têm como objetivo direcionar o fluxo de corrente e proteger ou recuperar a margem de um curso de água. Com este objetivo, foram dimensionados espigões para a margem esquerda da área em estudo, no trecho em curva. Neste local estão sendo implantados revestimentos vegetais na margem direita do rio das Velhas.

As Figuras 5.28 e 5.29 mostram fotos do local proposto para implantação dos espigões, na margem esquerda.



**Figuras 5.28 e 5.29** – Margem esquerda do rio das Velhas: local proposto para implantação de espigões – Fotos 1 e 2.

O dimensionamento dos espigões foi realizado considerando a vazão de período de retorno de 2 anos, uma vez que esta corresponde à vazão que efetivamente molda a calha do rio.

De acordo com a Equação 4.15, apresentada anteriormente, tem-se que o comprimento de trabalho ( $L_T$ ) dos espigões deve ser maior ou igual à altura média do canal e menor ou igual à largura média do canal dividida por quatro. Desta forma, considerando os resultados obtidos na seção 5 para a vazão de 2 anos de período de retorno, apresentados na Tabela 5.9, tem-se que o  $L_T$  do trecho em estudo deve ser maior que 5 m e inferior a 10 m, uma vez que a altura média do canal obtida foi de 5 metros e a largura média de 40 metros. Foi adotado o valor de 5 metros de  $L_T$ .

Utilizando a equação a seguir, já apresentada anteriormente (Equação 4.12), e considerando o valor de  $\alpha$  igual a 0,40, tem-se que:

$$\alpha = \frac{2 \cdot g \cdot L}{C^2 \cdot h}$$

- Fator de Resistência:  $C = 27 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{-1}$ , utilizando a Equação 4.13, também apresentada anteriormente, considerando coeficiente de rugosidade de Manning igual a 0,045 e raio hidráulico igual a 3,22 m;
- $h = 1,99$ , correspondente à altura da lâmina d'água para a vazão média de longo termo;
- Distância entre os espigões:  $L = 30 \text{ m}$ .

A distância entre os espigões obtida também atende à recomendação de Richardson (1975 *apud* Yossef, 2002), na qual a distância entre os espigões, com o objetivo de proteção das margens, deve ser de 2 a 6 vezes o comprimento ( $L_T$ ) dos espigões.

O raio de curvatura no local onde os espigões serão implantados é de aproximadamente 230 m e a largura média do rio para período de retorno de 2 anos é de 40 m, atendendo à Equação 4.14, apresentada anteriormente.

A altura dos espigões deverá ser próxima à altura da planície de inundação, isto é, aproximadamente 3,5 metros.

Os espigões serão constituídos por enrocamentos, também denominados rip-rap, que compreendem rochas lançadas ou arrumadas, obtidas próximas ao local de implantação. De acordo com a Equação 4.16, apresentada anteriormente, o diâmetro médio das rochas deverá ser de 0,34 metros. A espessura dos enrocamentos deve ser correspondente a 1,5 vezes o diâmetro máximo das rochas ou 2 vezes o diâmetro médio. O talude admissível corresponde ao ângulo de repouso natural do material, ou seja, entre 35 e 42°, conduzindo a valores de  $z$  da ordem de 1,5 (Baptista *et al.*, 2001).

Desta forma, foi proposta a implantação de 5 espigões na margem esquerda do rio das Velhas, com espaçamento de 30 metros entre eles, comprimento de trabalho (perpendicular ao eixo do rio) de 5 metros e 3,5 metros de altura. Os espigões serão compostos por enrocamento, com diâmetro médio das rochas de 0,34 metros. A Figura 5.30 apresenta a localização esquemática para implantação dos espigões no trecho em estudo.



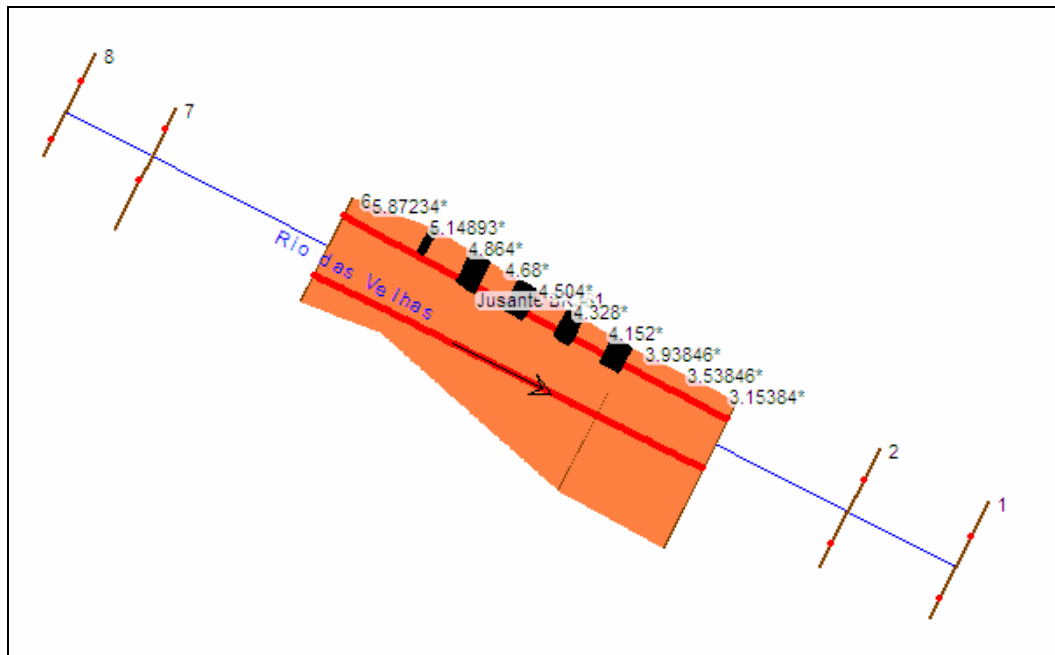
**Figura 5.30** – Localização esquemática da implantação dos espigões.

- **Modelagem da Situação Modificada**

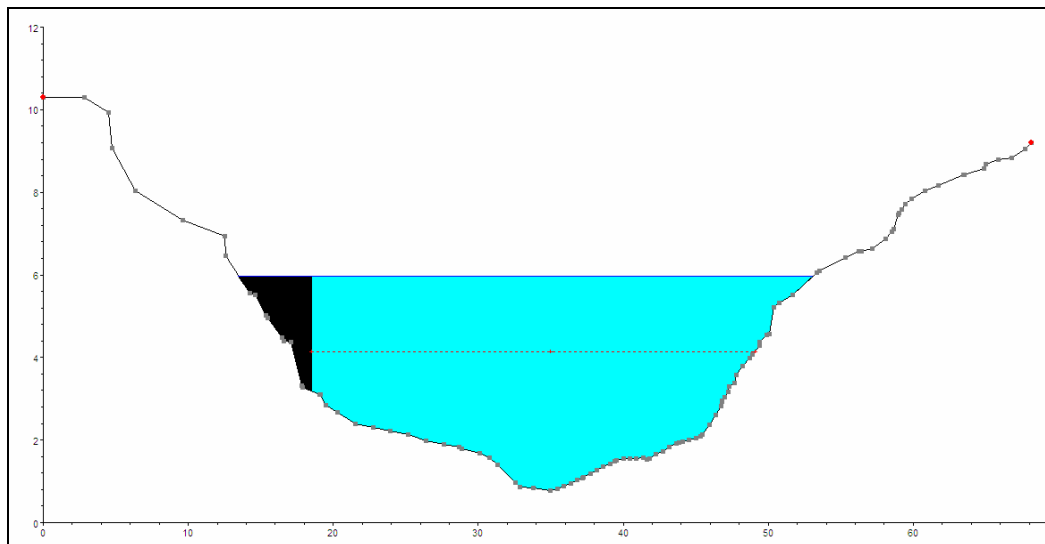
O presente item tem como objetivo apresentar a modelagem realizada com o HEC-RAS para a situação modificada do trecho em estudo, compreendendo revestimento vegetal na margem direita e espigões na margem esquerda, próximos às seções 5 e 4 (S-05 e S-04 da Figura 5.10).

Para o revestimento vegetal na margem direita foi adotado o valor do coeficiente de rugosidade de Manning igual a 0,035 (Chow, 1959; Baptista e Coelho, 2001).

Entre as seções 6 e 3 do HEC-RAS foram realizadas interpolações com espaçamentos a cada 1 metro. Foram criadas cinco obstruções a cada 30 metros, representando os espigões na margem esquerda, como indicado nas Figuras 5.31 e 5.32.

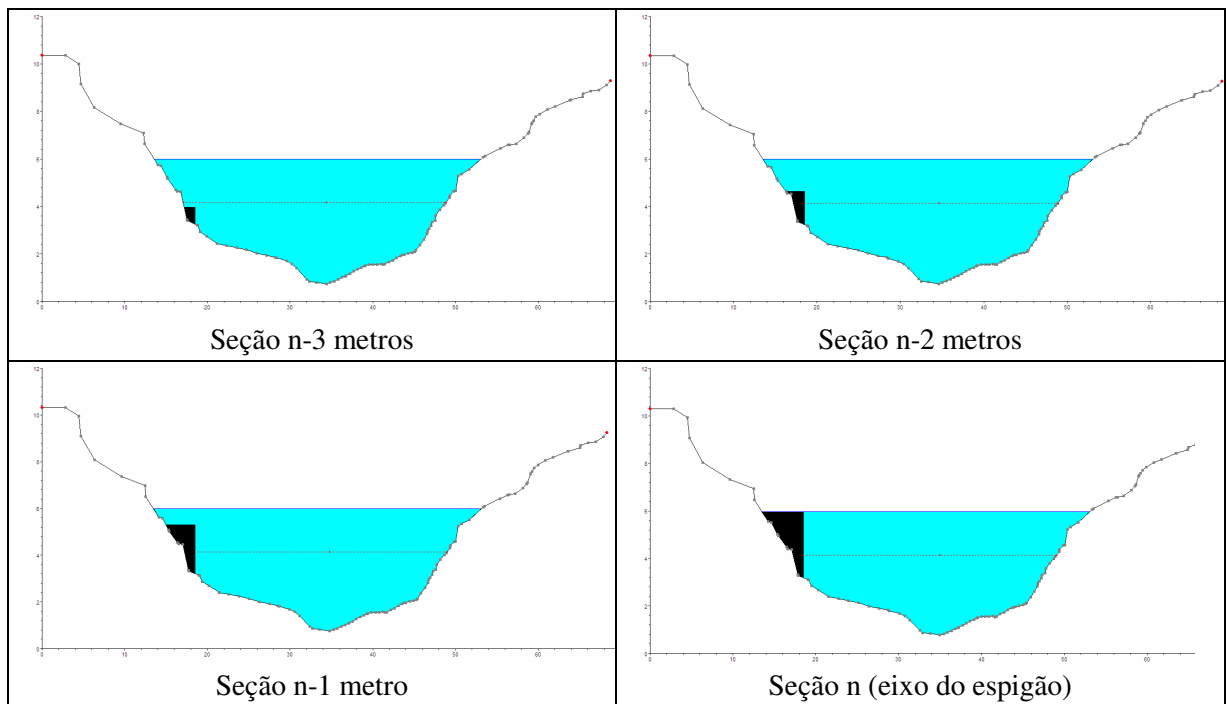


**Figura 5.31** – Geometria do HEC-RAS – Espigões na margem esquerda do rio das Velhas.



**Figura 5.32** – Figura esquemática de um espigão inserido no HEC-RAS.

Como os espigões apresentam uma inclinação mínima de repouso das pedras de 1H:1,5V, foram inseridas obstruções nas seções paralelas, com alturas crescentes, de montante para jusante, de forma a representar a referida inclinação, como ilustrado na Figura 5.33. Ressalte-se que o mesmo procedimento foi adotado para jusante, com alturas decrescentes.



**Figura 5.33** – Figura esquemática do espigão no HEC-RAS com alturas crescentes.

Na Tabela 5.10 são apresentados os resultados da simulação da situação modificada para as 8 seções do trecho em estudo.

**Tabela 5.10 – Resultados da Simulação do HEC-RAS – Situação Modificada**

Seção	Vazão (m³/s)	Prof. N.A. (m)	Vel. Média (m/s)	Coef. Rugosidade Manning			Tensão de Cisalhamento (N/m²)			
				Canal	M.E.	M.D	Canal	M.E.	M.D	
8	TR 2	320	5,09	1,79	0,024	0,045	0,04	12,5	4,04	3,37
8	TR5	469	6,12	2,04	0,024	0,045	0,04	16,1	5,67	4,79
8	TR10	563	6,67	2,19	0,024	0,045	0,04	18,4	6,00	6,11
8	TR50	764	7,66	2,47	0,024	0,045	0,04	23,2	6,47	8,58
8	Q <sub>MLT</sub>	42,2	1,97	0,82	0,024			3,30		
7	TR 2	320	5,14	1,73	0,029	0,045	0,04	20,6	6,26	11,4
7	TR5	469	6,19	1,91	0,029	0,045	0,04	24,5	7,57	12,6
7	TR10	563	6,75	2,02	0,029	0,045	0,04	26,8	8,63	14,3
7	TR50	764	7,76	2,23	0,029	0,045	0,04	31,9	10,6	18,2
7	Q <sub>MLT</sub>	42,2	1,97	1,23	0,029		0,04	11,9		0,43
6	TR 2	320	5,15	1,83	0,024	0,045	0,04	12,8	2,61	3,30
6	TR5	469	6,17	2,08	0,024	0,045	0,04	16,4	3,18	4,71
6	TR10	563	6,72	2,21	0,024	0,045	0,04	18,7	4,01	5,91
6	TR50	764	7,70	2,46	0,024	0,045	0,04	23,3	5,69	8,45
6	Q <sub>MLT</sub>	42,2	1,99	0,84	0,024			3,52		
5	TR 2	320	5,13	2,02	0,024	0,045	0,04	15,4	4,55	2,14
5	TR5	469	6,14	2,26	0,024	0,045	0,04	19,8	4,60	4,14
5	TR10	563	6,68	2,39	0,024	0,045	0,04	22,4	6,09	4,86
5	TR50	764	7,64	2,64	0,024	0,045	0,04	27,9	9,17	6,75
5	Q <sub>MLT</sub>	42,2	2,01	0,94	0,024			4,46		
4	TR 2	320	6,54	2,21	0,033	0,045	0,035	34,3	4,69	7,79
4	TR5	469	7,52	2,57	0,033	0,045	0,035	45,0	6,41	7,71
4	TR10	563	8,05	2,68	0,033	0,045	0,035	50,7	7,59	7,42
4	TR50	764	9,03	2,86	0,033	0,045	0,035	59,7	9,31	15,3
4	Q <sub>MLT</sub>	42,2	3,54	0,91	0,033			7,86		
3	TR 2	320	6,21	1,85	0,033	0,045	0,04	23,7	2,30	8,15
3	TR5	469	7,19	2,19	0,033	0,045	0,04	32,9	3,89	7,68
3	TR10	563	7,72	2,34	0,033	0,045	0,04	38,2	4,75	9,62
3	TR50	764	8,68	2,62	0,033	0,045	0,04	48,4	6,39	15,3
3	Q <sub>MLT</sub>	42,2	3,20	0,61	0,033			3,02		
2	TR 2	320	5,06	1,86	0,033	0,045	0,04	24,9	5,15	6,30
2	TR5	469	6,05	2,12	0,033	0,045	0,04	31,4	8,40	9,57
2	TR10	563	6,58	2,26	0,033	0,045	0,04	35,4	9,68	9,01
2	TR50	764	7,56	2,52	0,033	0,045	0,04	43,3	14,1	12,1
2	Q <sub>MLT</sub>	42,2	2,06	0,91	0,033			8,26		
1	TR 2	320	5,14	1,87	0,057	0,045	0,04	72,9	15,6	15,8
1	TR5	469	6,14	2,13	0,057	0,045	0,04	90,0	20,5	23,5
1	TR10	563	6,67	2,25	0,057	0,045	0,04	99,2	24,4	24,8
1	TR50	764	7,66	2,47	0,057	0,045	0,04	116	35,1	30,6
1	Q <sub>MLT</sub>	42,2	2,13	0,88	0,057			22,7		

M.D. – Margem Direita; M.E – Margem Esquerda.

De forma a obter uma configuração que proporcionasse maior redução dos processos erosivos na margem esquerda do curso de água, em especial no trecho em curva, foram realizadas novas simulações, deslocando os espigões para jusante.

A Tabela 5.11 apresenta os resultados obtidos para as 8 seções do trecho em estudo com o deslocamento do primeiro espigão para jusante (situação modificada 02). Os resultados com o deslocamento do primeiro e segundo espigão para jusante estão apresentados na Tabela 5.12 (situação modificada 03). Ressalta-se que foi mantido o espaçamento calculado entre os espigões, igual a 30 metros.

**Tabela 5.11 – Resultados da Simulação do HEC-RAS – Situação Modificada – 02**

Seção	Vazão (m³/s)	Prof. N.A. (m)	Vel. Média (m/s)	Coef. Rugosidade Manning			Tensão de Cisalhamento (N/m²)			
				Canal	M.E.	M.D	Canal	M.E.	M.D	
8	TR 2	320	5,10	1,78	0,024	0,045	0,04	12,4	4,01	3,31
8	TR5	469	6,14	2,03	0,024	0,045	0,04	16,0	5,63	4,77
8	TR10	563	6,69	2,18	0,024	0,045	0,04	18,2	5,93	6,08
8	TR50	764	7,68	2,46	0,024	0,045	0,04	23,1	6,44	8,54
8	Q <sub>MLT</sub>	42,2	1,97	0,81	0,024			3,30		
7	TR 2	320	5,16	1,72	0,029	0,045	0,04	20,3	6,18	11,2
7	TR5	469	6,20	1,91	0,029	0,045	0,04	24,2	7,51	12,4
7	TR10	563	6,76	2,01	0,029	0,045	0,04	26,6	8,57	14,2
7	TR50	764	7,77	2,22	0,029	0,045	0,04	31,8	10,6	18,1
7	Q <sub>MLT</sub>	42,2	1,97	1,23	0,029		0,04	11,9		0,43
6	TR 2	320	5,17	1,82	0,024	0,045	0,04	12,7	2,59	3,28
6	TR5	469	6,19	2,07	0,024	0,045	0,04	16,3	3,16	4,67
6	TR10	563	6,74	2,20	0,024	0,045	0,04	18,5	3,99	5,86
6	TR50	764	7,71	2,46	0,024	0,045	0,04	23,2	5,66	8,42
6	Q <sub>MLT</sub>	42,2	1,99	0,84	0,024			3,52		
5	TR 2	320	5,16	1,97	0,024	0,045	0,04	15,1	3,37	2,12
5	TR5	469	6,17	2,22	0,024	0,045	0,04	19,3	5,64	4,05
5	TR10	563	6,71	2,36	0,024	0,045	0,04	21,9	7,13	4,76
5	TR50	764	7,67	2,61	0,024	0,045	0,04	27,3	10,3	6,66
5	Q <sub>MLT</sub>	42,2	2,01	0,94	0,024			4,45		
4	TR 2	320	6,56	2,19	0,033	0,045	0,035	33,8	4,64	7,7
4	TR5	469	7,54	2,55	0,033	0,045	0,035	44,5	6,34	7,3
4	TR10	563	8,07	2,66	0,033	0,045	0,035	50,1	7,52	7,5
4	TR50	764	9,05	2,85	0,033	0,045	0,035	59,1	9,22	15,23
4	Q <sub>MLT</sub>	42,2	3,54	0,91	0,033			7,84		
3	TR 2	320	6,21	1,85	0,033	0,045	0,04	23,7	2,30	8,15
3	TR5	469	7,19	2,19	0,033	0,045	0,04	32,9	3,89	7,68
3	TR10	563	7,72	2,34	0,033	0,045	0,04	38,2	4,75	9,62
3	TR50	764	8,68	2,62	0,033	0,045	0,04	48,4	6,39	15,3
3	Q <sub>MLT</sub>	42,2	3,20	0,61	0,033			3,02		
2	TR 2	320	5,06	1,86	0,033	0,045	0,04	24,9	5,15	6,30
2	TR5	469	6,05	2,12	0,033	0,045	0,04	31,4	8,40	9,57
2	TR10	563	6,58	2,26	0,033	0,045	0,04	35,4	9,68	9,01
2	TR50	764	7,56	2,52	0,033	0,045	0,04	43,3	14,1	12,14
2	Q <sub>MLT</sub>	42,2	2,06	0,91	0,033			8,26		
1	TR 2	320	5,14	1,87	0,057	0,045	0,04	72,9	15,6	15,8
1	TR5	469	6,14	2,13	0,057	0,045	0,04	90,0	20,5	23,5
1	TR10	563	6,67	2,25	0,057	0,045	0,04	99,2	24,4	24,8
1	TR50	764	7,66	2,47	0,057	0,045	0,04	116	35,1	30,6
1	Q <sub>MLT</sub>	42,2	2,13	0,88	0,057			22,7		

M.D. – Margem Direita; M.E – Margem Esquerda.

**Tabela 5.12 – Resultados da Simulação do HEC-RAS – Situação Modificada – 03**

Seção	Vazão (m³/s)	Prof. N.A. (m)	Vel. Média (m/s)	Coef. Rugosidade Manning			Tensão de Cisalhamento (N/m²)			
				Canal	M.E.	M.D	Canal	M.E.	M.D	
8	TR 2	320	5,11	1,78	0,024	0,045	0,04	12,4	4,01	3,31
8	TR5	469	6,14	2,03	0,024	0,045	0,04	16,0	5,63	4,77
8	TR10	563	6,69	2,18	0,024	0,045	0,04	18,3	5,94	6,08
8	TR50	764	7,67	2,46	0,024	0,045	0,04	23,1	6,45	8,55
8	Q <sub>MLT</sub>	42,2	1,97	0,81	0,024			3,30		
7	TR 2	320	5,16	1,72	0,029	0,045	0,04	20,3	6,18	11,2
7	TR5	469	6,20	1,91	0,029	0,045	0,04	24,3	7,51	12,4
7	TR10	563	6,76	2,01	0,029	0,045	0,04	26,7	8,58	14,2
7	TR50	764	7,77	2,22	0,029	0,045	0,04	31,8	10,6	18,2
7	Q <sub>MLT</sub>	42,2	1,98	1,23	0,029		0,04	11,9		0,44
6	TR 2	320	5,17	1,82	0,024	0,045	0,04	12,7	2,59	3,27
6	TR5	469	6,19	2,07	0,024	0,045	0,04	16,3	3,16	4,67
6	TR10	563	6,74	2,20	0,024	0,045	0,04	18,5	3,99	5,87
6	TR50	764	7,71	2,46	0,024	0,045	0,04	23,2	5,67	8,43
6	Q <sub>MLT</sub>	42,2	1,99	0,84	0,024			3,51		
5	TR 2	320	5,16	1,97	0,024	0,045	0,04	15,1	3,37	2,12
5	TR5	469	6,17	2,22	0,024	0,045	0,04	19,3	5,64	4,06
5	TR10	563	6,70	2,36	0,024	0,045	0,04	22,0	7,13	4,77
5	TR50	764	7,67	2,61	0,024	0,045	0,04	27,3	10,3	6,66
5	Q <sub>MLT</sub>	42,2	2,01	0,94	0,024			4,50		
4	TR 2	320	6,58	2,18	0,033	0,045	0,035	33,5	4,60	7,62
4	TR5	469	7,56	2,54	0,033	0,045	0,035	44,1	6,29	6,99
4	TR10	563	8,09	2,65	0,033	0,045	0,035	49,7	7,47	7,55
4	TR50	764	9,07	2,84	0,033	0,045	0,035	58,7	9,16	15,2
4	Q <sub>MLT</sub>	42,2	3,54	0,91	0,033			7,82		
3	TR 2	320	6,21	1,85	0,033	0,045	0,04	23,7	2,30	8,15
3	TR5	469	7,19	2,19	0,033	0,045	0,04	32,9	3,89	7,68
3	TR10	563	7,72	2,34	0,033	0,045	0,04	38,2	4,75	9,62
3	TR50	764	8,68	2,62	0,033	0,045	0,04	48,4	6,39	15,27
3	Q <sub>MLT</sub>	42,2	3,20	0,61	0,033			3,02		
2	TR 2	320	5,06	1,86	0,033	0,045	0,04	24,9	5,15	6,3
2	TR5	469	6,05	2,12	0,033	0,045	0,04	31,4	8,4	9,57
2	TR10	563	6,58	2,26	0,033	0,045	0,04	35,4	9,68	9,01
2	TR50	764	7,56	2,52	0,033	0,045	0,04	43,3	14,1	12,1
2	Q <sub>MLT</sub>	42,2	2,06	0,91	0,033			8,26		
1	TR 2	320	5,14	1,87	0,057	0,045	0,04	72,9	15,6	15,8
1	TR5	469	6,14	2,13	0,057	0,045	0,04	90,0	20,5	23,5
1	TR10	563	6,67	2,25	0,057	0,045	0,04	99,2	24,4	24,8
1	TR50	764	7,66	2,47	0,057	0,045	0,04	116	35,1	30,6
1	Q <sub>MLT</sub>	42,2	2,13	0,88	0,057			22,7		

M.D. – Margem Direita; M.E – Margem Esquerda.

- **Modelagem Sedimentológica**

A estação Honório Bicalho, localizada no rio das Velhas a montante do trecho em estudo, como pode ser verificado na Figura 5.1, possui medição sedimentológica desde 1981. As informações básicas da referida estação estão apresentadas na Tabela 5.13.

**Tabela 5.13** – Informações Básicas da Estação Honório Bicalho.

Código	41199998
Nome	HONÓRIO BICALHO – MONTANTE
Bacia	RIO SÃO FRANCISCO (4)
Sub-bacia	RIOS SÃO FRANCISCO, DAS VELHAS (41)
Rio	RIO DAS VELHAS
Estado	MINAS GERAIS
Município	NOVA LIMA
Responsável	ANA
Operadora	CPRM
Latitude	-20:1:26
Longitude	-43:49:22
Altitude (m)	721
Área de Drenagem (km <sup>2</sup> )	1642

De acordo com o Diagnóstico do Fluxo de Sedimentos em Suspensão na Bacia do Rio São Francisco (2001) tem-se, para a estação Honório Bicalho, os valores apresentados na Tabela 5.14.

**Tabela 5.14** – Análise dos Parâmetros – Estação Honório Bicalho

Parâmetro	MLT	1986 - 1999
Q <sub>ss</sub> (t/dia)	1.514	1.215
Q <sub>ss</sub> (t/ano)	552.505	443.590
Área de drenagem (km <sup>2</sup> )	1.642	1.642
Q <sub>ss</sub> específico (t/km <sup>2</sup> .ano)	336	270
Q (m <sup>3</sup> /s)	30,5	29,4
C <sub>ss</sub> (mg/L)	575	479

MLT = média de longo termo; Q<sub>ss</sub> = descarga sólida em suspensão; C<sub>ss</sub> = concentração de sólidos em suspensão.

Para a avaliação sedimentológica do trecho em estudo foi realizada uma tentativa com o modelo HEC-RAS versão 4.0 Beta.

Para simulação de sedimentos no modelo é necessário admitir limites de erodibilidade nas seções, indicar a graduação do material constante das margens e do leito do rio, a curva-chave dos sedimentos entre outros.

Devido à falta de monitoramento sedimentológico e o não conhecimento das características específicas no trecho em estudo, diversas simplificações deveriam ser adotadas para a simulação. Como a maioria dos dados solicitados não estão disponíveis, seria necessário sua inferência. Desta forma, optou-se pela não realização da modelagem sedimentológica no âmbito do presente estudo.

Recomenda-se a realização de monitoramento sedimentológico no trecho e avaliação das características e granulometria do solo na região, de forma a permitir a realização de um estudo mais amplo e consistente do comportamento dos sedimentos na região.

## 6 ANÁLISE E DISCUSSÃO

No capítulo anterior foi apresentada a simulação do escoamento no trecho em estudo considerando a situação atual e a situação modificada, que compreende a implantação de revestimento vegetal na margem direita e espigões na margem esquerda.

Para realização das referidas simulações foi feita, inicialmente, a calibração do modelo HEC-RAS, ajustando o coeficiente de rugosidade de Manning no canal. Para a calibração foram utilizados os dados obtidos na segunda campanha de campo. Os dados obtidos na primeira campanha foram adotados com vistas a validar a calibração.

Como mencionado anteriormente, a calibração indicou que os coeficientes de rugosidade encontrados estão, provavelmente, subavaliados. Entretanto, optou-se no presente trabalho pela manutenção dos mesmos já que eles estão coerentes com a campanha realizada. Caso sejam realizadas novas campanhas de campo os valores ora apresentados deverão ser reavaliados.

A simulação da situação atual confirmou as características observadas no trecho em estudo do rio das Velhas, que apresenta elevado grau de erosão nas margens, principalmente no trecho em curva. Para a vazão com período de retorno de 2 anos foram obtidas velocidades no canal sempre próximas ou superiores a 2 m/s, em especial no trecho em curva. Para vazões com períodos de retorno superiores estes valores foram ainda maiores.

Para a realização da simulação da situação modificada foram inseridos no programa cinco espigões na margem esquerda do curso de água e considerada a implantação de revestimentos vegetais na margem direita, com modificação no coeficiente de rugosidade de Manning no trecho. Foram também realizadas mais duas simulações com o deslocamento dos espigões para jusante, de forma a obter uma otimização da localização dos espigões.

Nas Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3 estão apresentadas comparações dos resultados obtidos nas simulações da situação atual e situações modificadas, para as 8 seções do trecho em estudo. No Apêndice 1 estão apresentados os resultados obtidos para a vazão com 2 anos de período de retorno destacando, além das 8 seções, as seções interpoladas. Foram comparados os valores de profundidade do nível d'água, velocidade média no canal e tensões de

cisalhamento, apresentando a diferença observada entre as simulações e a porcentagem correspondente.

Destaca-se que na seção 5 está localizado o eixo de um dos espigões.

Nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 são apresentados diagramas para melhor visualização dos resultados obtidos, relativos ao percentual de redução da tensão de cisalhamento nas margens e no centro do canal, conforme as simulações da situação atual e situações modificadas. Para a referida comparação foi considerada a vazão com período de retorno de 2 anos.

**Tabela 6.1** – Tabela comparativa entre a simulação da situação atual e situação modificada.

Seção	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Profundidade do N.A. (m)		Vel. Média (m/s)		Tensão de Cisalhamento (N/m <sup>2</sup> )						
						Canal		M.E.		M.D.		
						Dif.	%	Dif.	%	Dif.	%	Dif.
8	TR 2	320	-0,08	-2%	0,03	2%	0,50	4%	0,13	3%	0,15	4%
8	TR5	469	-0,07	-1%	0,03	1%	0,54	3%	0,16	3%	0,07	1%
8	TR10	563	-0,06	-1%	0,03	1%	0,50	3%	0,31	5%	0,10	2%
8	TR50	764	-0,04	-1%	0,02	1%	0,39	2%	0,11	2%	0,11	1%
8	Q <sub>MLT</sub>	42,2	0	0%	0	0%	0,01	0%	0			
7	TR 2	320	-0,08	-2%	0,04	2%	0,98	5%	0,29	4%	0,60	5%
7	TR5	469	-0,08	-1%	0,04	2%	0,94	4%	0,28	4%	0,56	4%
7	TR10	563	-0,07	-1%	0,03	1%	0,85	3%	0,24	3%	0,39	3%
7	TR50	764	-0,05	-1%	0,02	1%	0,61	2%	0,20	2%	0,30	2%
7	Q <sub>MLT</sub>	42,2	0	0%	0	0%	0,03	0%	0			
6	TR 2	320	-0,08	-2%	0,03	2%	0,54	4%	0,09	3%	0,10	3%
6	TR5	469	-0,07	-1%	0,03	1%	0,58	3%	0,06	2%	0,14	3%
6	TR10	563	-0,07	-1%	0,03	1%	0,56	3%	0,06	1%	0,12	2%
6	TR50	764	-0,05	-1%	0,03	1%	0,42	2%	0,09	2%	0,08	1%
6	Q <sub>MLT</sub>	42,2	0	0%	0	0%	0,01	0%	0			
5	TR 2	320	-0,07	-1%	0,01	0%	0,59	4%	-1,06	-30%	0,02	1%
5	TR5	469	-0,07	-1%	0,01	0%	0,49	2%	1,16	20%	0,10	2%
5	TR10	563	-0,06	-1%	0,01	0%	0,40	2%	1,21	17%	0,06	1%
5	TR50	764	-0,04	-1%	0	0%	0,13	0%	1,30	12%	-0,06	-1%
5	Q <sub>MLT</sub>	42,2	0	0%	0	0%	0,01	0%	0			
4	TR 2	320	0,01	0%	-0,01	0%	-0,35	-1%	-0,13	-3%	-0,21	-3%
4	TR5	469	0,01	0%	-0,02	-1%	-0,41	-1%	-0,16	-3%	-0,39	-5%
4	TR10	563	0,02	0%	-0,02	-1%	-0,34	-1%	-0,16	-2%	-0,04	-1%
4	TR50	764	0,03	0%	-0,02	-1%	0,16	0%	-0,12	-1%	-0,05	0%
4	Q <sub>MLT</sub>	42,2	0	0%	0	0%	-0,19	-2%	0			
3	TR 2	320	0	0%	-0,01	-1%	-0,09	0%	0	0%	-0,02	0%
3	TR5	469	0,02	0%	-0,01	0%	-0,25	-1%	-0,02	-1%	-0,14	-2%
3	TR10	563	0,02	0%	-0,01	0%	-0,38	-1%	-0,04	-1%	-0,02	0%
3	TR50	764	0,04	0%	-0,02	-1%	-0,72	-2%	-0,09	-1%	-0,12	-1%
3	Q <sub>MLT</sub>	42,2	0	0%	0	0%	0	0%	0			
2	TR 2	320	0,01	0%	0	0%	-0,12	0%	-0,01	0%	-0,02	0%
2	TR5	469	0,02	0%	-0,01	0%	-0,28	-1%	-0,05	-1%	-0,07	-1%
2	TR10	563	0,03	0%	-0,01	0%	-0,41	-1%	-0,10	-1%	-0,07	-1%
2	TR50	764	0,04	1%	-0,02	-1%	-0,70	-2%	-0,19	-1%	-0,25	-2%
2	Q <sub>MLT</sub>	42,2	0	0%	0	0%	0	0%	0			
1	TR 2	320	0,01	0%	0	0%	0,13	0%	0,06	0%	0,08	1%
1	TR5	469	0,01	0%	-0,01	0%	0,30	0%	0,04	0%	0,01	0%
1	TR10	563	0,03	0%	-0,01	0%	0,39	0%	0,27	1%	0,09	0%
1	TR50	764	0,04	1%	-0,02	-1%	0,65	1%	0,40	1%	0,52	2%
1	Q <sub>MLT</sub>	42,2	0	0%	0	0%	0	0%	0			

M.D. – Margem Direita; M.E. – Margem Esquerda; Dif.: diferença entre situação atual e situação modificada.

**Tabela 6.2** – Tabela comparativa entre a simulação da situação atual e situação modificada-02.

Seção	Vazão (m³/s)	Profundidade do N.A. (m)		Vel. Média (m/s)		Tensão de Cisalhamento (N/m²)						
						Canal		M.E.		M.D.		
		Dif.	%	Dif.	%	Dif.	%	Dif.	%	Dif.	%	
8	TR 2	320	-0,09	-2%	0,04	2%	0,63	5%	0,16	4%	0,21	6%
8	TR5	469	-0,09	-1%	0,04	2%	0,67	4%	0,20	3%	0,09	2%
8	TR10	563	-0,08	-1%	0,04	2%	0,63	3%	0,38	6%	0,13	2%
8	TR50	764	-0,06	-1%	0,03	1%	0,50	2%	0,14	2%	0,15	2%
8	Q <sub>MLT</sub>	42,2	0	0%	0,01	1%	0,01	0%	0			
7	TR 2	320	-0,10	-2%	0,05	3%	1,22	6%	0,37	6%	0,75	6%
7	TR5	469	-0,09	-1%	0,04	2%	1,17	5%	0,34	4%	0,70	5%
7	TR10	563	-0,08	-1%	0,04	2%	1,06	4%	0,30	3%	0,48	3%
7	TR50	764	-0,06	-1%	0,03	1%	0,78	2%	0,25	2%	0,38	2%
7	Q <sub>MLT</sub>	42,2	0	0%	0	0%	0,05	0%	0			
6	TR 2	320	-0,10	-2%	0,04	2%	0,68	5%	0,11	4%	0,12	4%
6	TR5	469	-0,09	-1%	0,04	2%	0,72	4%	0,08	2%	0,18	4%
6	TR10	563	-0,09	-1%	0,04	2%	0,70	4%	0,08	2%	0,17	3%
6	TR50	764	-0,06	-1%	0,03	1%	0,55	2%	0,12	2%	0,11	1%
6	Q <sub>MLT</sub>	42,2	0	0%	0	0%	0,01	0%	0			
5	TR 2	320	-0,10	-2%	0,06	3%	0,85	5%	0,12	3%	0,04	2%
5	TR5	469	-0,10	-2%	0,05	2%	0,91	4%	0,12	2%	0,19	4%
5	TR10	563	-0,09	-1%	0,04	2%	0,88	4%	0,17	2%	0,16	3%
5	TR50	764	-0,07	-1%	0,03	1%	0,70	2%	0,18	2%	0,03	0%
5	Q <sub>MLT</sub>	42,2	0	0%	0	0%	0,02	0%	0			
4	TR 2	320	-0,01	0%	0,01	0%	0,09	0%	-0,08	-2%	-0,12	-2%
4	TR5	469	-0,01	0%	0	0%	0,11	0%	-0,09	-1%	0,02	0%
4	TR10	563	0	0%	0	0%	0,24	0%	-0,09	-1%	-0,12	-2%
4	TR50	764	0,01	0%	-0,01	0%	0,74	1%	-0,03	0%	-0,02	0%
4	Q <sub>MLT</sub>	42,2	0	0%	0	0%	-0,17	-2%	0			
3	TR 2	320	0	0%	-0,01	-1%	-0,09	0%	0	0%	-0,02	0%
3	TR5	469	0,02	0%	-0,01	0%	-0,25	-1%	-0,02	-1%	-0,14	-2%
3	TR10	563	0,02	0%	-0,01	0%	-0,38	-1%	-0,04	-1%	-0,02	0%
3	TR50	764	0,04	0%	-0,02	-1%	-0,72	-2%	-0,09	-1%	-0,12	-1%
3	Q <sub>MLT</sub>	42,2	0	0%	0	0%	0	0%	0			
2	TR 2	320	0,01	0%	0	0%	-0,12	0%	-0,01	0%	-0,02	0%
2	TR5	469	0,02	0%	-0,01	0%	-0,28	-1%	-0,05	-1%	-0,07	-1%
2	TR10	563	0,03	0%	-0,01	0%	-0,41	-1%	-0,10	-1%	-0,07	-1%
2	TR50	764	0,04	1%	-0,02	-1%	-0,70	-2%	-0,19	-1%	-0,25	-2%
2	Q <sub>MLT</sub>	42,2	0	0%	0	0%	0	0%	0			
1	TR 2	320	0,01	0%	0	0%	0,13	0%	0,06	0%	0,08	1%
1	TR5	469	0,01	0%	-0,01	0%	0,30	0%	0,04	0%	0,01	0%
1	TR10	563	0,03	0%	-0,01	0%	0,39	0%	0,27	1%	0,09	0%
1	TR50	764	0,04	1%	-0,02	-1%	0,65	1%	0,40	1%	0,52	2%
1	Q <sub>MLT</sub>	42,2	0	0%	0	0%	0	0%	0			

M.D. – Margem Direita; M.E. – Margem Esquerda; Dif.: diferença entre situação atual e situação modificada.

**Tabela 6.3** – Tabela comparativa entre a simulação da situação atual e situação modificada-03.

Seção	Vazão (m³/s)	Profundidade do N.A. (m)		Vel. Média (m/s)		Tensão de Cisalhamento (N/m²)						
						Canal		M.E.		M.D.		
						Dif.	%	Dif.	%	Dif.	%	Dif.
8	TR 2	320	-0,10	-2%	0,04	2%	0,63	5%	0,16	4%	0,21	6%
8	TR5	469	-0,09	-1%	0,04	2%	0,66	4%	0,20	3%	0,09	2%
8	TR10	563	-0,08	-1%	0,04	2%	0,61	3%	0,37	6%	0,13	2%
8	TR50	764	-0,05	-1%	0,03	1%	0,48	2%	0,13	2%	0,14	2%
8	Q <sub>MLT</sub>	42,2	0	0%	0,01	1%	0,01	0%	0			
7	TR 2	320	-0,10	-2%	0,05	3%	1,23	6%	0,37	6%	0,75	6%
7	TR5	469	-0,09	-1%	0,04	2%	1,16	5%	0,34	4%	0,69	5%
7	TR10	563	-0,08	-1%	0,04	2%	1,03	4%	0,29	3%	0,47	3%
7	TR50	764	-0,06	-1%	0,03	1%	0,74	2%	0,24	2%	0,36	2%
7	Q <sub>MLT</sub>	42,2	-0,01	-1%	0	0%	0,06	1%	0			
6	TR 2	320	-0,10	-2%	0,04	2%	0,68	5%	0,11	4%	0,13	4%
6	TR5	469	-0,09	-1%	0,04	2%	0,72	4%	0,08	2%	0,18	4%
6	TR10	563	-0,09	-1%	0,04	2%	0,68	4%	0,08	2%	0,16	3%
6	TR50	764	-0,06	-1%	0,03	1%	0,52	2%	0,11	2%	0,10	1%
6	Q <sub>MLT</sub>	42,2	0	0%	0	0%	0,02	1%	0			
5	TR 2	320	-0,10	-2%	0,06	3%	0,86	5%	0,12	3%	0,04	2%
5	TR5	469	-0,10	-2%	0,05	2%	0,91	4%	0,12	2%	0,18	4%
5	TR10	563	-0,08	-1%	0,04	2%	0,86	4%	0,17	2%	0,15	3%
5	TR50	764	-0,07	-1%	0,03	1%	0,67	2%	0,17	2%	0,03	0%
5	Q <sub>MLT</sub>	42,2	0	0%	0	0%	0,02	0%	0			
4	TR 2	320	-0,03	0%	0,02	1%	0,45	1%	-0,04	-1%	-0,04	-1%
4	TR5	469	-0,03	0%	0,01	0%	0,52	1%	-0,04	-1%	0,33	5%
4	TR10	563	-0,02	0%	0,01	0%	0,68	1%	-0,04	-1%	-0,17	-2%
4	TR50	764	-0,01	0%	0	0%	1,17	2%	0,03	0%	-0,01	0%
4	Q <sub>MLT</sub>	42,2	0	0%	0	0%	-0,15	-2%	0			
3	TR 2	320	0	0%	-0,01	-1%	-0,09	0%	0	0%	-0,02	0%
3	TR5	469	0,02	0%	-0,01	0%	-0,25	-1%	-0,02	-1%	-0,14	-2%
3	TR10	563	0,02	0%	-0,01	0%	-0,38	-1%	-0,04	-1%	-0,02	0%
3	TR50	764	0,04	0%	-0,02	-1%	-0,72	-2%	-0,09	-1%	-0,12	-1%
3	Q <sub>MLT</sub>	42,2	0	0%	0	0%	0	0%	0			
2	TR 2	320	0,01	0%	0	0%	-0,12	0%	-0,01	0%	-0,02	0%
2	TR5	469	0,02	0%	-0,01	0%	-0,28	-1%	-0,05	-1%	-0,07	-1%
2	TR10	563	0,03	0%	-0,01	0%	-0,41	-1%	-0,10	-1%	-0,07	-1%
2	TR50	764	0,04	1%	-0,02	-1%	-0,70	-2%	-0,19	-1%	-0,25	-2%
2	Q <sub>MLT</sub>	42,2	0	0%	0	0%	0	0%	0			
1	TR 2	320	0,01	0%	0	0%	0,13	0%	0,06	0%	0,08	1%
1	TR5	469	0,01	0%	-0,01	0%	0,30	0%	0,04	0%	0,01	0%
1	TR10	563	0,03	0%	-0,01	0%	0,39	0%	0,27	1%	0,09	0%
1	TR50	764	0,04	1%	-0,02	-1%	0,65	1%	0,40	1%	0,52	2%
1	Q <sub>MLT</sub>	42,2	0	0%	0	0%	0	0%	0			

M.D. – Margem Direita; M.E. – Margem Esquerda; Dif.: diferença entre situação atual e situação modificada.

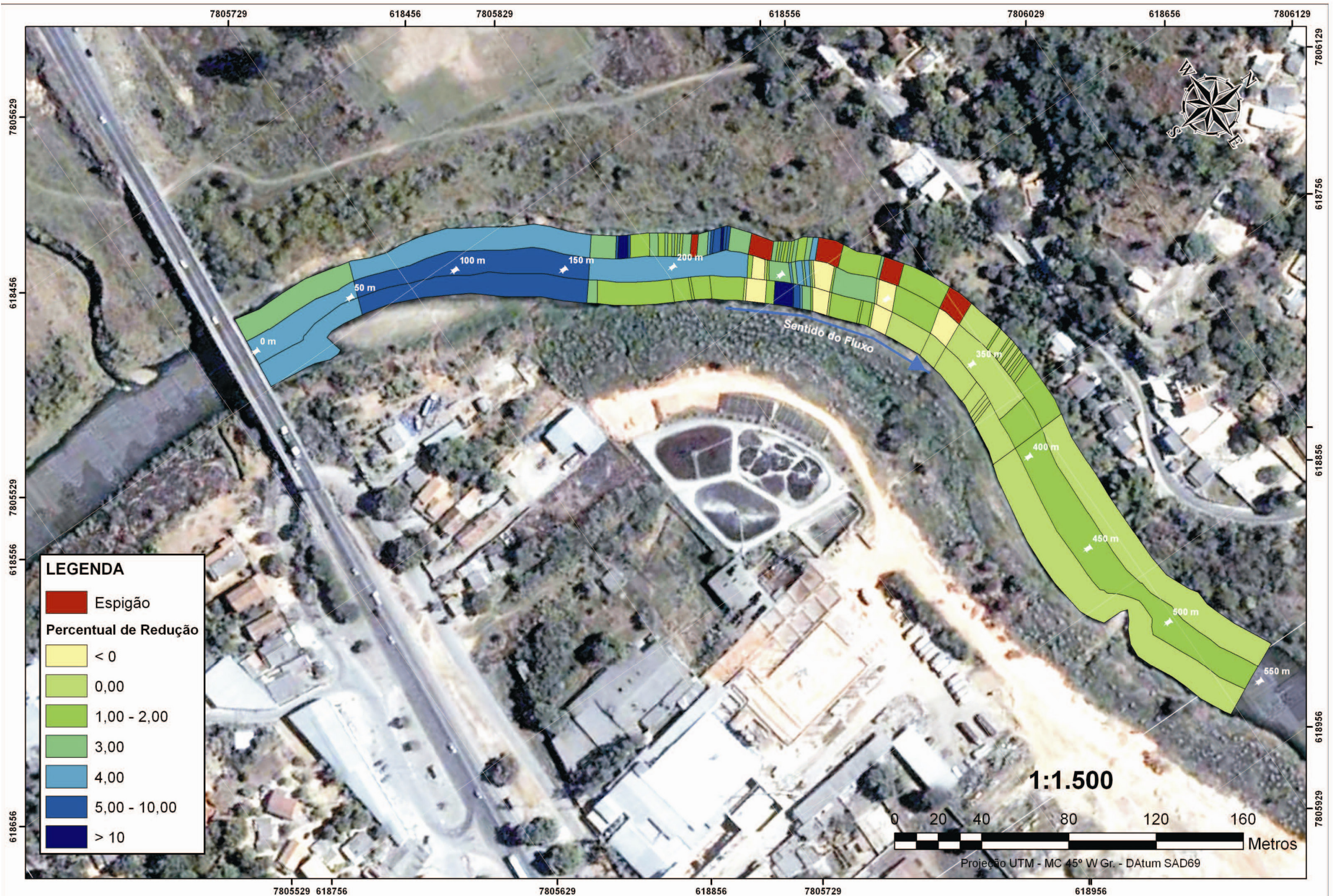


Figura 6.1 - Percentual de redução das tensões de cisalhamento - situação atual x situação modificada.

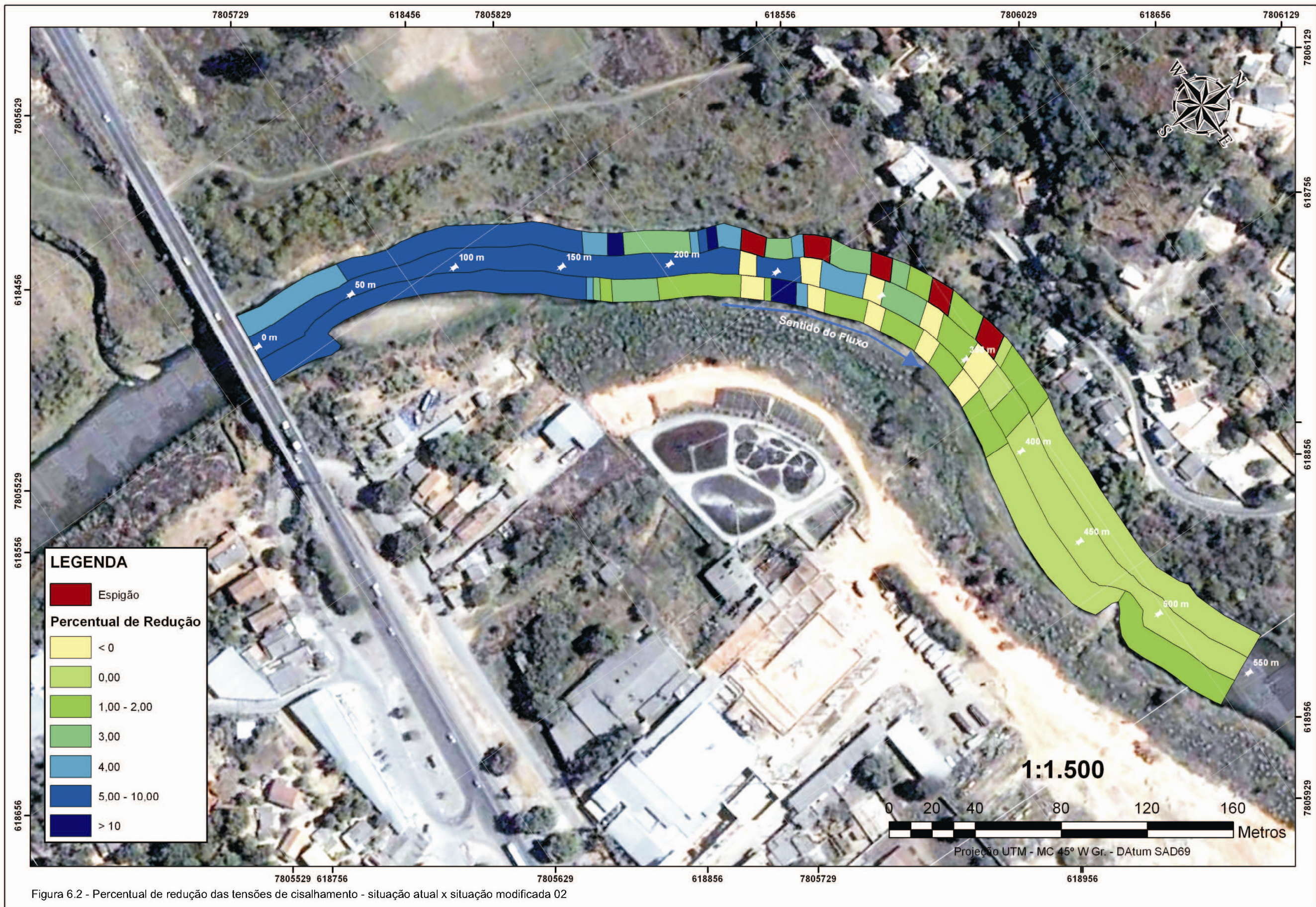


Figura 6.2 - Percentual de redução das tensões de cisalhamento - situação atual x situação modificada 02

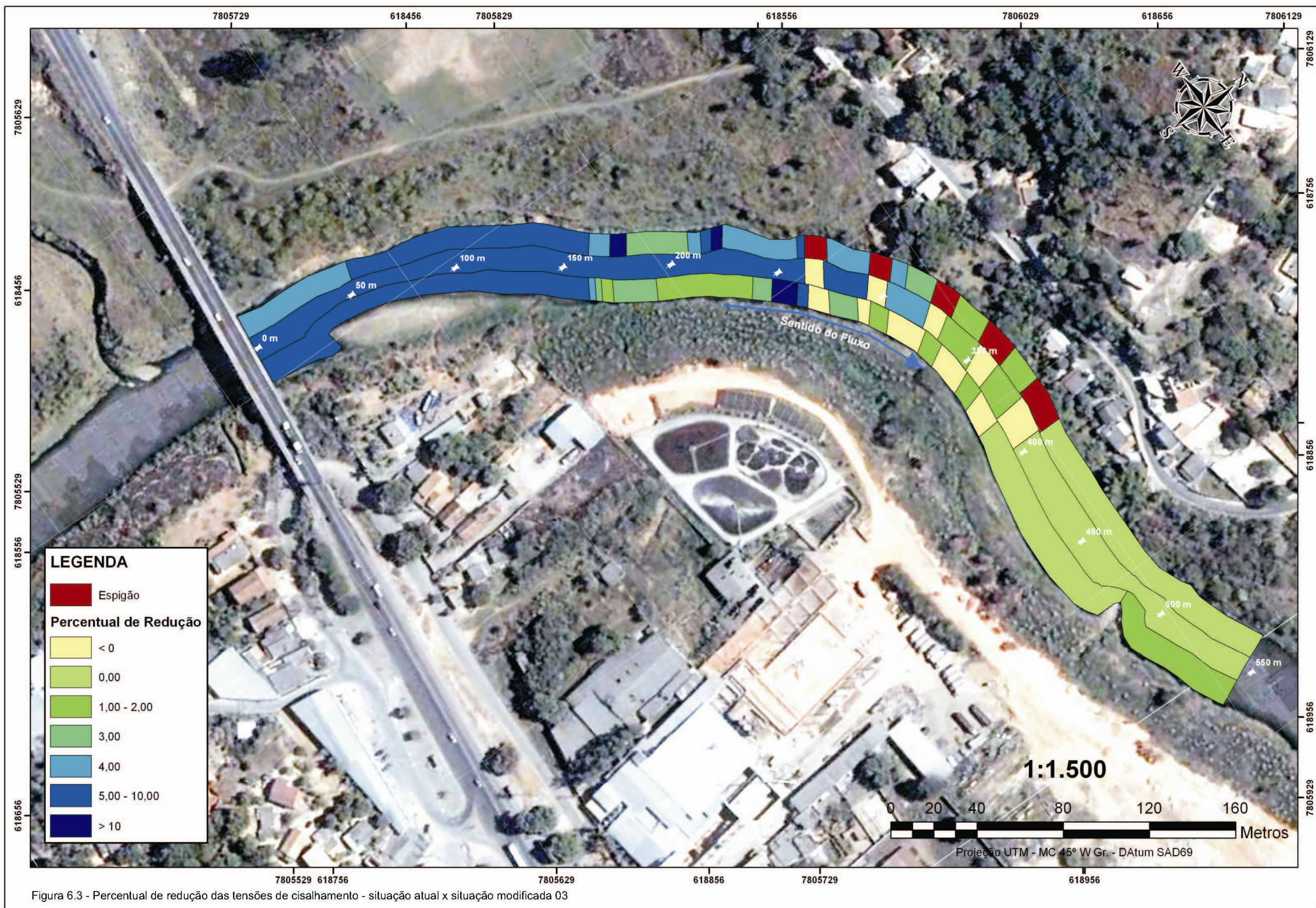


Figura 6.3 - Percentual de redução das tensões de cisalhamento - situação atual x situação modificada 03

Analisando as Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3, pode-se verificar que houve um ligeiro aumento na profundidade do nível da água com a implantação dos espigões, o que era de se esperar, uma vez que os espigões promovem uma obstrução no curso de água.

Já em relação à velocidade média do canal, pode-se verificar uma redução da velocidade com a implantação dos espigões. Entretanto, esta redução não é significativa, sendo o valor máximo da ordem de 0,06 m/s, correspondendo a um decréscimo de 3% na velocidade. Isto indica que os espigões provocam pouca interferência no regime de escoamento do curso de água.

A tensão de cisalhamento nas margens também apresenta uma redução com a implantação dos espigões, indicando que haverá uma melhora no processo de erosão das margens do curso de água.

Na Figura 6.1 pode-se verificar que houve uma redução da ordem de 10% na tensão de cisalhamento da margem esquerda entre os dois primeiros pares de espigões. Entre os demais espigões também foi verificada uma redução da tensão de cisalhamento na margem esquerda, mas esta redução diminuiu gradativamente entre cada par de espigões.

Com o deslocamento dos espigões para jusante houve uma redução ainda maior das tensões de cisalhamento nas margens, como pode ser verificado nas Figuras 6.2 e 6.3.

Apesar de os espigões estarem localizados na margem esquerda, também foi verificada, na margem direita, uma redução da tensão de cisalhamento. Entretanto, esta redução é inferior à redução verificada na margem oposta, na qual os espigões estão implantados, com exceção da região entre o segundo e o terceiro espigão, onde se verifica uma redução significativa da tensão de cisalhamento na margem direita.

Uma outra observação importante que pode ser notada é que o percentual de redução da tensão de cisalhamento nas margens foi mais significativo para a vazão com período de retorno de 2 anos, reduzindo com o aumento das vazões. Isto era esperado, uma vez que os espigões foram dimensionados para a vazão de 2 anos de período de retorno e, para vazões superiores, os mesmos serão galgados, reduzindo sua eficiência.

No trecho em que foi considerada a implantação de revestimento vegetal nas margens, correspondente às seções próximas à seção 4, foi verificada pouca redução na velocidade média do canal. Para a vazão com período de retorno de 2 anos, a velocidade no local obtida foi de aproximadamente 2,20 m/s, o que representa uma velocidade elevada para a maioria dos revestimentos vegetais.

Os resultados obtidos com a simulação das situações modificadas e a comparação com a situação atual indicaram que os espigões promovem uma melhora nas condições do curso de água, com redução da velocidade e tensões de cisalhamento.

Entretanto, as reduções observadas, tanto na velocidade como nas tensões de cisalhamento das margens foram reduzidas. É importante ressaltar, contudo, que existem diversas incertezas no presente trabalho, relacionadas principalmente aos coeficientes de rugosidade adotados, medidas de campo que foram realizadas apenas para períodos de estiagem e utilização de modelagem unidimensional.

Uma resposta mais conclusiva sobre a real eficiência dos espigões só poderá ser obtida com a utilização de modelagem bidimensional e observações de campo. Novas campanhas de monitoramento também são importantes para permitir uma melhor calibração dos modelos hidráulicos adotados e uma melhor quantificação dos resultados.

Como mencionado, as velocidades obtidas na margem direita, no local onde estão sendo implantadas as espécies vegetais, também apresentaram uma redução pouco significativa, podendo levar a problemas de durabilidade do revestimento, em especial após as estações chuvosas. Neste local também é importante a realização de novas campanhas de campo de forma a calibrar o coeficiente de rugosidade de Manning para as espécies vegetais, além da realização de modelagem bidimensional.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O tema revitalização ou recuperação de cursos de água é amplo e ainda pouco explorado com foco em estudos científicos. O presente trabalho apresentou os resultados do primeiro estudo na área de engenharia hidráulica desenvolvido no trecho experimental do rio das Velhas, na divisa das cidades de Belo Horizonte e Sabará.

O trecho encontra-se em estado avançado de degradação, podendo-se verificar erosões, instabilidade das margens e deposição de sedimentos. O trecho foi considerado como uma área experimental em que as diversas técnicas de recuperação estudadas serão implantadas no local, permitindo verificar, em escala real, a eficiência e aplicabilidade das mesmas, além de permitir a calibração dos modelos matemáticos utilizados.

O objetivo inicial do trabalho consistia na realização de modelagem hidráulica bidimensional do trecho em estudo. Entretanto, devido a problemas com o software adotado, não foi possível, no presente trabalho, a apresentação de resultados com a utilização de modelagem bidimensional. Desta forma, foram apresentados os resultados obtidos com a modelagem hidráulica unidimensional e dimensionamento e modelagem de espigões para proteção das margens, com a utilização do modelo unidimensional HEC-RAS.

Outro objetivo inicial consistia em realizar a modelagem sedimentológica do trecho em estudo. Entretanto, face às dificuldades inerentes à obtenção de dados e à complexidade para obtenção de resultados consistentes no prazo da dissertação, optou-se apenas pela recomendação de desenvolvimento de um estudo específico ulterior, juntamente com modelagem hidráulica bidimensional.

Para o dimensionamento dos espigões foram utilizadas algumas referências consagradas. Entretanto, foi verificado que não existe uma consistência plena entre diversas referências consultadas, conduzindo a resultados pouco convergentes.

De acordo com as simulações realizadas no HEC-RAS os espigões irão cumprir sua função de proteção das margens, com a criação de zonas de baixa velocidade, redução das tensões de cisalhamento e representando baixa interferência no escoamento. Apesar das reduções observadas terem sido pouco significativas, foi possível verificar que há uma grande sensibilidade quanto à localização, espaçamento e dimensionamento dos espigões na sua real

eficiência. Este fato enseja a continuidade do estudo, que deve ser voltada para um refinamento dos resultados obtidos com o uso de um modelo bidimensional.

Espera-se que a implantação dos espigões no trecho experimental, acompanhados por campanhas fluviométricas e observações de campo, possam fornecer subsídios mais conclusivos para o dimensionamento deste tipo de obra, que certamente tem um papel a representar no sentido de recuperação dos cursos de água brasileiros.

A redução da velocidade na margem direita, no local onde serão implantados os revestimentos vegetais também foi pouco significativa, sendo que as velocidades médias superam os valores limites usualmente encontrados na bibliografia, indicando que poderá haver problemas de durabilidade do revestimento.

A simulação unidimensional adotada no presente estudo não permitiu uma fiel descrição do desempenho dos espigões. Para uma melhor análise do trecho em estudo recomenda-se, como complementação do trabalho, simulação hidráulica com a utilização de modelagem bidimensional, seguidas por novas medidas de campo, em especial em condições de cheias mais expressivas, o que permitirá a calibração do coeficiente de rugosidade de Manning nas margens. As medidas de campo deverão contar com campanhas sedimentométricas, o que permitirá a realização de modelagem dos sedimentos na região e avaliação do comportamento do leito fluvial com a implantação das diversas estruturas de revestimento.

Por fim, recomenda-se também o acompanhamento do desempenho das intervenções ao longo do tempo. A observação do desempenho em campo, em confronto com as características locais de escoamento possibilitará uma melhor avaliação e utilização das técnicas adotadas.

A observação do desempenho em campo, acoplada com a modelagem bidimensional, subsidiada com novas medidas de campo permitirá a adoção de critérios mais seguros para dimensionamento de espigões e outras técnicas de revestimentos das margens, com a obtenção de dados mais concretos para subsidiar os estudos.

Finalmente, espera-se que os resultados obtidos com esta pesquisa venham contribuir para uma utilização racional das técnicas de engenharia ambiental utilizadas em projetos de revitalização de cursos de água.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA – Agência Nacional de Águas. *Hidroweb*. Disponível em [www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br). Acesso em 2006, 2007 e 2008.

BABAHEYAN-KOOPAEI, D.; ERVINE, D.A.; CARLING, P.A.; CAO Z. Velocity and Turbulence Measurements for Two Overbank Flow Events in River Severn. *Journal of Hydraulic Engineering*. p. 891-900, 2002.

BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P.; CIRILO, J. A.; MASCARENHAS, F. C. B.; CANALI, G. V.; CABRAL, J. J. S. P.; AZEVEDO, J. R. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L. *Hidráulica Aplicada*. Porto Alegre: ABRH, 2001. 621 p.

BAPTISTA, M. B.; COELHO, M.M.L.P. *Fundamentos de Engenharia Hidráulica*, Ed. UFMG, 2003.

BAPTISTA, M. B.; VON SPERLING, M. *Morfologia Fluvial*. In: VON SPERLING, M. *Estudos de Modelagem de Qualidade da Água de Rios*. Belo Horizonte: DESA – UFMG, 2007. p. 139-183.

BENDEGOM, J; ZENEN B.V. *Principles of River Engineering*. London: Pitman, 1979. 481 p.

BRASIL – Lei nº. 4.771, de 15 de setembro de 1965. Institui o Código Florestal.

BRASIL – Lei nº. 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

BRIGHETTI, G.; MARTINS J. R. S. – *Obras Fluviais*, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, 2001.

BROOKES, A.; SHIELDS JR, F. D. *River Channel Restoration*. England: John Wiley & Sons Ltd., 1996. 433 p.

CARVALHO, N. O. *Hidrossedimentologia Prática*. Rio de Janeiro: CPRM, 1994. 372 p.

CASTILHO, A. P., *Avaliação da Aplicabilidade do Método Simplificado de Colby na Estimativa da Descarga Sólida Total em Cursos D'Água. Estudo de Caso: Sub-bacia 40 – Região do Alto São Francisco*. 1998. 146 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1998.

CHANSON H. *Environmental Hydraulics of Open Channel Flows*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. 430 p.

CHOW, V.T. – *Open Channel Hydraulics*. Nova York: Mc Graw-Hill Book Company, 1959. 680 p.

CHRISTOFOLETTI, A. – *Geomorfologia Fluvial*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1981. 313 p.

Convenção sobre Diversidade Biológica – Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, Rio de Janeiro, 1992.

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING AFDELING WEG- & WATERBOUWKUNDE  
Disponível em: < <http://awww.rug.ac.be/opticrest/html/photogallery.html>>. Acesso em 06 de janeiro de 2008.

ENVIRONMENTAL MODELING RESEARCH LABORATORY. *SMS Tutorials – Version 9.0*. Brigham Young University – Environmental Modeling Research Laboratory, 2005.

ESCARAMEIA, M. – *River and Channel Revetments – A Design Manual*. London: Thomas Telford Publications, 1998. 245 p.

FISRWG. *Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices – The Federal Interagency Stream Restoration Working Group*, 2001.

FLOW SCIENCE – *FLOW 3D* – Disponível em [www.flow3d.com](http://www.flow3d.com).

GEOLOGICAL SURVEY OF IRELAND – Department of Communications, Energy and Natural Resources. Acesso em fevereiro de 2008. Disponível em: <http://www.gsi.ie/Education/European+Landscapes/Netherlands.htm>.

HIDROSOFT ENERGIE INC. – *AquaDyn 3.1 Tutorial*, Hydro-Québec CapiTech Inc., 2000.

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. *Imagem Landsat*. Disponível em: [www.igam.mg.gov.br](http://www.igam.mg.gov.br). Acesso em 20 de dezembro de 2007.

JULIEN, P. Y. *River Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 434 p.

LIMA, J. E. F. W.; SANTOS, P. M. C.; CHAVES, A. G. M.; SCILEWSKI, L. R. *Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia do Rio São Francisco*. Planaltina, DF: ANEEL, 2001. 108 p.

MACCAFERRI – Disponível em [www.maccaferri.com.br](http://www.maccaferri.com.br). Acesso em Outubro de 2007.

MMA. Ministério do Meio Ambiente – *Revitalização da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco – Conceito de Revitalização*, Disponível em [www.mma.gov.br](http://www.mma.gov.br). Acesso em Setembro de 2006.

PINTO, E. J. A.; ALVES, M. M. S. “*Regionalização de Vazões da Bacia do Alto São Francisco*”. In: Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba, 2003.

PNRH. Plano Nacional de Recursos Hídricos – Ministério do Meio Ambiente – MMA, Secretaria de Recursos Hídricos, 2006.

PROJETO MANUELZÃO – Disponível em [www.manuelzao.ufmg.br](http://www.manuelzao.ufmg.br). Acesso em Outubro de 2006.

PRZEDWOJSKI, B.; BLAZEJEWSKI R.; PILARCZYK, K. W. *River Training Techniques – Fundamentals, Design and Applications*. Netherlands: A.A. Balkema, 1995. 625 p.

RILEY, A. L., *Restoring Streams in Cities: A Guide for Planners, Policymakers, and Citizens*. Washington DC: Island Press, 1998. 423 p.

SANTOS, J. A. C. *Modelagem Matemática Bidimensional do Escoamento em Confluência de Canais*. 2003. 65 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

SELLES, I. M.; Riker, F.; RIOS, J. P.; BINDER, W. *Revitalização de Rios – Orientação Técnica*. Rio de Janeiro: SEMADS – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2001. 78p.

SILVA, R. C. V.; MASCARENHAS, F. C. B.; MIGUEZ, M. G. *Hidráulica Fluvial – Volume I*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2003. 304 p.

SILVA, R. C. V.; JÚNIOR G. W. *Hidráulica Fluvial – Volume II*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2005. 255 p.

STRASSER, M. A.; NETTO, A. R.; SILVA, Rui Carlos Vieira da; MASCARENHAS, Flavio Cesar Borba. Estudo da variação do coeficiente de rugosidade de Manning em rios da bacia Amazônica por meio de modelagem hidrodinâmica. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa. Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005. v. 1.

U.S.Army Corps of Engineers – HEC-RAS: *River Analysis System*. Disponível em [www.hec.usace.army.mil](http://www.hec.usace.army.mil).

VIDE, J.P.M., *Ingeniería Fluvial*. Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 1997. 291 p.

YANG, C. T. – *Sediment Transport – Theory and Practice*. Belfast: Mc Graw-Hill, 1996. 396 p.

YOSSEF, M. F. M. “*The Effect of Groynes on Rivers*”. Delft University of Technology, 51 p, 2002.

## APÊNDICE 1

**Tabela 1** – Tabela comparativa entre a simulação da situação atual e situação modificada – TR 2 anos

Seção	Profundidade		Vel. Média		Tensão de Cisalhamento (N/m <sup>2</sup> )					
	N.A. (m)		(m/s)		Canal		M.E.		M.D.	
8	-0,08	-2%	0,03	2%	0,50	4%	0,13	3%	0,15	4%
7	-0,08	-2%	0,04	2%	0,98	5%	0,29	4%	0,60	5%
6	-0,08	-2%	0,03	2%	0,54	4%	0,09	3%	0,10	3%
5.97872*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,55	4%	0,09	3%	0,10	3%
5.95744*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,56	4%	0,09	3%	0,10	3%
5.93617*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,55	4%	0,09	3%	0,09	3%
5.91489*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,56	4%	0,09	3%	0,08	2%
5.89361*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,56	4%	0,10	3%	0,06	2%
5.87234*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,57	4%	0,09	3%	0,06	2%
5.85106*	-0,08	-2%	0,03	2%	0,56	4%	0,10	3%	0,05	2%
5.82978*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,57	4%	0,10	3%	0,05	2%
5.80851*	-0,08	-2%	0,03	2%	0,57	4%	0,10	3%	0,06	2%
5.78723*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,58	4%	0,10	3%	0,06	2%
5.76595*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,58	4%	0,10	3%	0,07	2%
5.74468*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,58	4%	0,31	10%	0,08	3%
5.72340*	-0,07	-1%	0,04	2%	0,58	4%	0,66	20%	0,07	2%
5.70212*	-0,07	-1%	0,04	2%	0,59	4%	0,88	27%	0,07	2%
5.68085*	-0,07	-1%	0,04	2%	0,59	4%	0,84	26%	0,07	2%
5.65957*	-0,07	-1%	0,04	2%	0,59	4%	0,52	18%	0,07	2%
5.63829*	-0,07	-1%	0,04	2%	0,59	4%	0,30	11%	0,07	2%
5.61702*	-0,07	-1%	0,04	2%	0,60	4%	0,14	5%	0,07	2%
5.59574*	-0,07	-1%	0,04	2%	0,60	4%	0,05	2%	0,07	2%
5.57446*	-0,07	-1%	0,04	2%	0,60	4%	0,06	2%	0,07	2%
5.55319*	-0,07	-1%	0,04	2%	0,61	4%	0,06	2%	0,06	2%
5.53191*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,61	4%	0,06	2%	0,07	2%
5.51063*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,61	4%	0,06	2%	0,07	2%
5.48936*	-0,08	-2%	0,05	3%	0,62	4%	0,07	2%	0,07	2%
5.46808*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,61	4%	0,07	2%	0,06	2%
5.44680*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,62	4%	0,07	2%	0,07	2%
5.42553*	-0,08	-2%	0,05	3%	0,63	4%	0,07	2%	0,06	2%
5.40425*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,63	4%	0,08	3%	0,06	2%
5.38297*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,63	4%	0,08	3%	0,05	2%
5.36170*	-0,08	-2%	0,05	3%	0,63	4%	0,08	3%	0,05	2%
5.34042*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,64	4%	0,08	3%	0,06	2%
5.31914*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,64	4%	0,07	2%	0,05	2%
5.29787*	-0,08	-2%	0,05	3%	0,65	4%	0,07	2%	0,04	2%
5.27659*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,64	4%	0,07	2%	0,04	2%
5.25531*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,64	4%	0,08	3%	0,04	2%
5.23404*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,65	4%	0,08	2%	0,04	2%

Seção	Profundidade		Vel. Média		Tensão de Cisalhamento (N/m <sup>2</sup> )					
	N.A. (m)		(m/s)		Canal		M.E.		M.D.	
5.21276*	-0,08	-2%	0,05	2%	0,65	4%	0,08	2%	0,03	1%
5.19149*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,66	4%	0,09	3%	0,03	1%
5.17021*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,66	4%	0,08	2%	0,03	1%
5.14893*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,66	4%	0,09	3%	0,03	1%
5.12766*	-0,08	-2%	0,05	2%	0,66	4%	0,08	2%	0,03	1%
5.10638*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,67	4%	0,09	3%	0,03	1%
5.08510*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,67	4%	0,09	3%	0,03	1%
5.06383*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,68	4%	0,09	3%	0,03	1%
5.04255*	-0,08	-2%	0,05	2%	0,68	4%	0,09	3%	0,04	2%
5.02127*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,67	4%	0,25	7%	0,03	1%
5	-0,07	-1%	0,01	0%	0,59	4%	-1,06	-30%	0,02	1%
4.992*	-0,08	-2%	0,05	2%	0,67	4%	0,24	7%	0,03	1%
4.984*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,69	4%	0,09	3%	0,03	1%
4.976*	-0,08	-2%	0,05	2%	0,69	4%	0,11	3%	0,03	1%
4.968*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,69	4%	0,11	3%	0,03	1%
4.96*	-0,07	-1%	0,05	2%	0,69	4%	0,11	3%	0,03	1%
4.952*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,69	4%	0,12	3%	0,03	1%
4.944*	-0,08	-2%	0,05	2%	0,76	4%	0,14	4%	0,03	1%
4.936*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,77	4%	0,18	5%	0,04	2%
4.928*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,77	4%	0,27	7%	0,04	2%
4.92*	-0,08	-2%	0,05	2%	0,77	4%	0,32	8%	0,04	2%
4.912*	-0,07	-1%	0,04	2%	0,77	4%	0,38	9%	0,04	2%
4.904*	-0,08	-2%	0,05	2%	0,77	4%	0,44	10%	0,04	2%
4.896*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,77	4%	0,50	11%	0,04	2%
4.888*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,78	4%	0,51	10%	0,04	2%
4.88*	-0,08	-2%	0,05	2%	0,77	4%	0,26	5%	0,04	2%
4.872*	-0,08	-2%	0,05	2%	0,78	4%	0,17	3%	0,04	2%
4.864*	-0,07	-1%	0,04	2%	0,78	4%	0,17	3%	0,05	2%
4.856*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,78	4%	0,17	3%	0,04	2%
4.848*	-0,08	-2%	0,05	2%	0,79	4%	0,17	3%	0,04	2%
4.84*	-0,08	-2%	0,05	2%	0,79	4%	0,16	3%	0,04	2%
4.832*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,85	4%	0,18	3%	0,05	2%
4.824*	-0,08	-2%	0,04	2%	0,86	4%	0,18	3%	0,05	2%
4.816*	-0,08	-2%	0,05	2%	0,87	4%	0,18	3%	0,05	2%
4.808*	-0,08	-1%	0,04	2%	0,87	4%	0,18	3%	0,05	2%
4.8*	-0,08	-1%	0,04	2%	0,72	4%	0,08	2%	-0,01	0%
4.792*	-0,08	-1%	0,03	1%	0,29	1%	-0,15	-3%	-0,12	-4%
4.784*	-0,07	-1%	0	0%	-0,41	-2%	-0,24	-5%	-0,29	-11%
4.776*	-0,06	-1%	-0,05	-2%	-1,28	-6%	0,36	7%	-0,50	-19%
4.768*	-0,04	-1%	-0,10	-5%	-2,29	-11%	1,90	37%	-0,74	-28%
4.76*	-0,03	-1%	-0,15	-7%	-3,31	-16%	5,05	99%	-0,98	-36%
4.752*	-0,04	-1%	-0,10	-5%	-2,49	-12%	1,86	36%	-0,76	-28%
4.744*	-0,05	-1%	-0,06	-3%	-1,61	-8%	0,25	5%	-0,55	-21%

Seção	Profundidade		Vel. Média		Tensão de Cisalhamento (N/m <sup>2</sup> )					
	N.A. (m)		(m/s)		Canal		M.E.		M.D.	
4.736*	-0,06	-1%	-0,02	-1%	-0,77	-4%	-0,37	-7%	-0,33	-12%
4.728*	-0,06	-1%	0,01	0%	-0,03	0%	-0,23	-5%	-0,14	-5%
4.72*	-0,06	-1%	0,03	1%	0,54	2%	0,01	0%	-0,02	-1%
4.712*	-0,06	-1%	0,04	2%	0,77	3%	0,14	3%	0,05	2%
4.704*	-0,06	-1%	0,03	1%	0,77	3%	0,14	3%	0,05	2%
4.696*	-0,07	-1%	0,03	1%	0,77	3%	0,13	2%	0,05	2%
4.688*	-0,07	-1%	0,04	2%	0,77	3%	0,14	3%	0,54	16%
4.68*	-0,06	-1%	0,04	2%	0,77	3%	0,13	2%	0,68	19%
4.672*	-0,06	-1%	0,04	2%	0,77	3%	0,13	2%	0,73	21%
4.664*	-0,06	-1%	0,03	1%	0,78	3%	0,13	2%	0,79	22%
4.656*	-0,06	-1%	0,04	2%	0,78	3%	0,13	3%	0,87	24%
4.648*	-0,07	-1%	0,04	2%	0,78	3%	0,12	2%	0,96	25%
4.64*	-0,06	-1%	0,04	2%	0,78	3%	0,13	3%	0,74	19%
4.632*	-0,06	-1%	0,04	2%	0,79	4%	0,13	3%	0,44	11%
4.624*	-0,06	-1%	0,03	1%	0,78	3%	0,12	2%	0,42	10%
4.616*	-0,06	-1%	0,03	1%	0,78	3%	0,12	2%	0,35	9%
4.608*	-0,07	-1%	0,04	2%	0,85	4%	0,12	2%	0,30	7%
4.6*	-0,07	-1%	0,04	2%	0,85	4%	0,13	2%	0,17	4%
4.592*	-0,06	-1%	0,04	2%	0,85	4%	0,15	3%	0,13	3%
4.584*	-0,06	-1%	0,04	2%	0,85	3%	0,18	3%	0,14	3%
4.576*	-0,06	-1%	0,03	1%	0,86	4%	0,20	4%	0,15	3%
4.568*	-0,07	-1%	0,03	1%	0,86	4%	0,22	4%	0,14	3%
4.56*	-0,07	-1%	0,04	2%	0,77	3%	0,19	4%	0,11	2%
4.552*	-0,05	-1%	0,01	0%	0,06	0%	-0,10	-2%	-0,14	-3%
4.544*	-0,05	-1%	-0,02	-1%	-1,00	-4%	-0,49	-9%	-0,51	-11%
4.536*	-0,04	-1%	-0,07	-3%	-2,33	-10%	-0,08	-2%	-0,97	-20%
4.528*	-0,02	0%	-0,13	-6%	-3,85	-16%	1,25	24%	-1,52	-32%
4.52*	-0,01	0%	-0,2	-9%	-5,50	-22%	5,11	96%	-2,14	-44%
4.512*	-0,01	0%	-0,15	-7%	-4,10	-17%	1,17	22%	-1,63	-34%
4.504*	-0,02	0%	-0,09	-4%	-2,73	-11%	-0,24	-5%	-1,14	-24%
4.496*	-0,03	-1%	-0,04	-2%	-1,52	-6%	-0,69	-12%	-0,74	-14%
4.488*	-0,04	-1%	0	0%	-0,33	-1%	-0,22	-4%	-0,31	-6%
4.48*	-0,05	-1%	0,03	1%	0,63	2%	0,11	2%	0,02	0%
4.472*	-0,04	-1%	0,03	1%	0,68	3%	0,11	2%	0,03	1%
4.464*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,68	3%	0,11	2%	0,04	1%
4.456*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,68	3%	0,11	2%	0,03	1%
4.448*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,68	3%	0,11	2%	0,03	1%
4.44*	-0,05	-1%	0,02	1%	0,69	3%	0,11	2%	0,03	1%
4.432*	-0,05	-1%	0,02	1%	0,69	3%	0,11	2%	0,03	1%
4.424*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,69	3%	0,11	2%	0,03	1%
4.416*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,68	3%	0,10	2%	0,05	1%
4.408*	-0,04	-1%	0,03	1%	0,69	3%	0,10	2%	0,05	1%
4.4*	-0,05	-1%	0,03	1%	0,69	3%	0,10	2%	0,07	1%

Seção	Profundidade		Vel. Média		Tensão de Cisalhamento (N/m <sup>2</sup> )					
	N.A. (m)		(m/s)		Canal		M.E.		M.D.	
4.392*	-0,05	-1%	0,03	1%	0,69	3%	0,10	2%	0,07	1%
4.384*	-0,04	-1%	0,03	1%	0,74	3%	0,11	2%	0,08	1%
4.376*	-0,04	-1%	0,03	1%	0,75	3%	0,11	2%	0,08	1%
4.368*	-0,04	-1%	0,03	1%	0,75	3%	0,10	2%	0,08	1%
4.36*	-0,05	-1%	0,02	1%	0,75	3%	0,11	2%	0,09	2%
4.352*	-0,05	-1%	0,02	1%	0,76	3%	0,10	2%	0,08	1%
4.344*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,75	3%	0,10	2%	0,08	1%
4.336*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,75	3%	0,11	2%	0,08	1%
4.328*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,75	3%	0,12	2%	0,08	1%
4.32*	-0,05	-1%	0,02	1%	0,76	3%	0,13	3%	0,09	2%
4.312*	-0,03	0%	0	0%	0,04	0%	-0,12	-2%	-0,19	-3%
4.304*	-0,03	0%	-0,04	-2%	-1,34	-5%	-0,70	-14%	-0,67	-11%
4.296*	-0,01	0%	-0,09	-4%	-3,04	-11%	-0,65	-13%	-1,28	-22%
4.288*	0	0%	-0,15	-7%	-5,03	-18%	0,81	16%	-1,99	-34%
4.28*	0,01	0%	-0,23	-10%	-7,20	-25%	4,94	99%	-2,78	-47%
4.272*	0,01	0%	-0,16	-7%	-5,70	-19%	0,80	15%	-2,21	-35%
4.264*	0	0%	-0,11	-5%	-3,74	-12%	-0,85	-16%	-1,49	-24%
4.25600*	-0,01	0%	-0,06	-3%	-1,95	-6%	-0,87	-17%	-0,83	-13%
4.248*	-0,02	0%	-0,01	0%	-0,42	-1%	-0,20	-4%	-0,27	-4%
4.24*	-0,02	0%	0,01	0%	0,40	1%	0,07	1%	0,05	1%
4.232*	-0,01	0%	0,01	0%	0,41	1%	0,07	1%	0,06	1%
4.224*	-0,02	0%	0,01	0%	0,40	1%	0,07	1%	0,05	1%
4.21600*	-0,02	0%	0,01	0%	0,41	1%	0,07	1%	0,06	1%
4.20800*	-0,02	0%	0,01	0%	0,40	1%	0,07	1%	0,05	1%
4.20000*	-0,02	0%	0,01	0%	0,40	1%	0,07	1%	0,06	1%
4.192*	-0,01	0%	0,01	0%	0,40	1%	0,07	1%	0,06	1%
4.184*	-0,02	0%	0,01	0%	0,41	1%	0,07	1%	0,06	1%
4.17600*	-0,02	0%	0,01	0%	0,40	1%	0,05	1%	0,06	1%
4.16800*	-0,02	0%	0,01	0%	0,41	1%	0,06	1%	0,06	1%
4.16000*	-0,01	0%	0,01	0%	0,44	1%	0,07	1%	0,06	1%
4.152*	-0,02	0%	0,01	0%	0,44	1%	0,06	1%	0,06	1%
4.14400*	-0,02	0%	0,01	0%	0,44	1%	0,06	1%	0,06	1%
4.13600*	-0,02	0%	0,01	0%	0,45	1%	0,06	1%	0,06	1%
4.12800*	-0,02	0%	0,01	0%	0,44	1%	0,06	1%	0,06	1%
4.12000*	-0,01	0%	0,01	0%	0,44	1%	0,06	1%	0,06	1%
4.11200*	-0,02	0%	0,01	0%	0,44	1%	0,06	1%	0,06	1%
4.10400*	-0,02	0%	0,01	0%	0,44	1%	0,06	1%	0,07	1%
4.09600*	-0,02	0%	0,01	0%	0,44	1%	0,06	1%	0,07	1%
4.08800*	-0,02	0%	0,01	0%	0,45	1%	0,05	1%	0,07	1%
4.08000*	-0,01	0%	0,02	1%	0,45	1%	0,06	1%	0,08	1%
4.07200*	-0,01	0%	-0,01	0%	-0,26	-1%	-0,16	-3%	-0,23	-3%
4.06400*	-0,01	0%	-0,05	-2%	-1,96	-6%	-0,87	-19%	-0,88	-13%
4.05600*	0,01	0%	-0,11	-5%	-4,03	-13%	-1,22	-27%	-1,69	-24%

Seção	Profundidade		Vel. Média		Tensão de Cisalhamento (N/m <sup>2</sup> )					
	N.A. (m)		(m/s)		Canal		M.E.		M.D.	
4.04800*	0,03	0%	-0,17	-8%	-6,87	-20%	0,16	3%	-2,83	-38%
4.04000*	0,05	1%	-0,24	-11%	-8,12	-24%	4,79	100%	-2,40	-32%
4.03200*	0,03	0%	-0,18	-8%	-7,35	-22%	0,06	1%	-3,04	-41%
4.02400*	0,02	0%	-0,12	-5%	-5,05	-15%	-1,49	-32%	-2,11	-28%
4.01600*	0,01	0%	-0,07	-3%	-2,98	-9%	-1,11	-24%	-1,28	-17%
4.00800*	0,01	0%	-0,03	-1%	-1,24	-4%	-0,35	-8%	-0,59	-8%
4	0,01	0%	-0,01	0%	-0,35	-1%	-0,13	-3%	-0,21	-3%
3.98461*	0	0%	0	0%	0,01	0%	0,00	0%	0	0%
3.96923*	0,01	0%	-0,01	0%	0,01	0%	0,00	0%	0,01	0%
3.95384*	0	0%	0	0%	0,02	0%	0,00	0%	0,02	0%
3.93846*	0,01	0%	-0,01	0%	0,02	0%	0,01	0%	0,02	0%
3.92307*	0	0%	0	0%	0,03	0%	0,01	0%	0,02	0%
3.90769*	0,01	0%	-0,01	0%	0,03	0%	0,01	0%	0,02	0%
3.89230*	0,01	0%	0	0%	0,02	0%	0,01	0%	0,02	0%
3.87692*	0,01	0%	0	0%	0,03	0%	0,01	0%	0,02	0%
3.86153*	0,01	0%	0	0%	0,03	0%	0,01	0%	0,01	0%
3.84615*	0,01	0%	0	0%	0,03	0%	0,01	0%	0,02	0%
3.83076*	0,01	0%	-0,01	0%	0,03	0%	0,01	0%	0,02	0%
3.81538*	0	0%	0	0%	0,04	0%	0,01	0%	0,02	0%
3.8*	0,01	0%	-0,01	0%	0,04	0%	0,01	0%	0,02	0%
3.78461*	0	0%	0	0%	0,05	0%	0,01	0%	0,02	0%
3.76923*	0,01	0%	0	0%	0,05	0%	0,01	0%	0,03	0%
3.75384*	0	0%	0	0%	0,04	0%	0,01	0%	0,02	0%
3.73846*	0,01	0%	0	0%	0,05	0%	0,01	0%	0,02	0%
3.72307*	0	0%	-0,01	0%	0,05	0%	0,02	1%	0,02	0%
3.70769*	0,01	0%	0	0%	0,06	0%	0,01	0%	0,02	0%
3.69230*	0	0%	-0,01	0%	0,06	0%	0,01	0%	0,03	0%
3.67692*	0,01	0%	0	0%	0,06	0%	0,01	0%	0,02	0%
3.66153*	0	0%	-0,01	0%	0,07	0%	0,01	0%	0,03	0%
3.64615*	0,01	0%	0	0%	0,07	0%	0,01	0%	0,04	1%
3.63076*	0	0%	0	0%	0,07	0%	0,01	0%	0,04	1%
3.61538*	0,01	0%	0	0%	0,08	0%	0,02	1%	0,04	1%
3.6*	0	0%	0	0%	0,08	0%	0,01	0%	0,04	1%
3.58461*	0,01	0%	-0,01	0%	0,09	0%	0,01	0%	0,04	1%
3.56923*	0	0%	0	0%	0,08	0%	0,02	1%	0,04	1%
3.55384*	0,01	0%	-0,01	0%	0,09	0%	0,01	0%	0,04	1%
3.53846*	0	0%	0	0%	0,09	0%	0,01	0%	0,03	0%
3.52307*	0,01	0%	-0,01	0%	0,10	0%	0,02	1%	0,03	0%
3.50769*	0	0%	0	0%	0,10	0%	0,01	0%	0,04	1%
3.49230*	0,01	0%	0	0%	0,10	0%	0,01	0%	0,04	1%
3.47692*	0,01	0%	0	0%	0,10	0%	0,02	1%	0,03	0%
3.46153*	0,01	0%	0	0%	0,10	0%	0,01	0%	0,04	1%
3.44615*	0	0%	0	0%	0,11	0%	0,02	1%	0,04	1%

Seção	Profundidade N.A. (m)		Vel. Média (m/s)		Tensão de Cisalhamento (N/m <sup>2</sup> )					
					Canal		M.E.		M.D.	
3.43076*	0,01	0%	0	0%	0,11	0%	0,02	1%	0,04	1%
3.41538*	0,01	0%	-0,01	-1%	0,12	0%	0,02	1%	0,04	1%
3.4*	0,01	0%	0	0%	0,12	0%	0,01	0%	0,04	1%
3.38461*	0,01	0%	-0,01	-1%	0,12	0%	0,02	1%	0,04	1%
3.36923*	0,01	0%	0	0%	0,12	0%	0,02	1%	0,04	1%
3.35384*	0,01	0%	-0,01	-1%	0,13	0%	0,02	1%	0,05	1%
3.33846*	0,01	0%	0	0%	0,13	0%	0,02	1%	0,05	1%
3.32307*	0,01	0%	0	0%	0,13	0%	0,02	1%	0,05	1%
3.30769*	0,01	0%	0	0%	0,14	1%	0,02	1%	0,05	1%
3.29230*	0,01	0%	0	0%	0,14	1%	0,02	1%	0,05	1%
3.27692*	0	0%	0	0%	0,15	1%	0,02	1%	0,05	1%
3.26153*	0,01	0%	0	0%	0,15	1%	0,02	1%	0,05	1%
3.24615*	0,01	0%	0	0%	0,16	1%	0,02	1%	0,06	1%
3.23076*	0,01	0%	0	0%	0,16	1%	0,02	1%	0,06	1%
3.21538*	0	0%	-0,01	-1%	0,16	1%	0,02	1%	0,06	1%
3.2*	0,01	0%	0	0%	0,16	1%	0,03	1%	0,06	1%
3.18461*	0	0%	-0,01	-1%	0,16	1%	0,02	1%	0,06	1%
3.16923*	0,01	0%	0	0%	0,17	1%	0,02	1%	0,06	1%
3.15384*	0	0%	-0,01	-1%	0,18	1%	0,02	1%	0,06	1%
3.13846*	0,01	0%	0	0%	0,18	1%	0,02	1%	0,07	1%
3.12307*	0	0%	-0,01	-1%	0,18	1%	0,02	1%	0,07	1%
3.10769*	0,01	0%	0	0%	0,18	1%	0,02	1%	0,06	1%
3.09230*	0	0%	-0,01	-1%	0,19	1%	0,02	1%	0,07	1%
3.07692*	0,01	0%	0	0%	-0,09	0%	-0,01	0%	-0,02	0%
3.06153*	0	0%	-0,01	-1%	-0,10	0%	0,00	0%	-0,03	0%
3.04615*	0,01	0%	0	0%	-0,09	0%	0,00	0%	-0,02	0%
3.03076*	0	0%	-0,01	-1%	-0,09	0%	-0,01	0%	-0,03	0%
3.01538*	0,01	0%	0	0%	-0,09	0%	-0,01	0%	-0,02	0%
3	0	0%	-0,01	-1%	-0,09	0%	0,00	0%	-0,02	0%
2	0,01	0%	0	0%	-0,12	0%	-0,01	0%	-0,02	0%
1	0,01	0%	0	0%	0,13	0%	0,06	0%	0,08	1%

\* Seções interpoladas;

Hachuras: localização dos espigões.

**Tabela 2** – Tabela comparativa entre a simulação da situação atual e situação modificada 02 – TR 2 anos

Seção	Profundidade		Vel. Média		Tensão de Cisalhamento (N/m <sup>2</sup> )					
	N.A. (m)		(m/s)		Canal		M.E.		M.D.	
8	-0,09	-2%	0,04	2%	0,63	5%	0,16	4%	0,21	6%
7	-0,1	-2%	0,05	3%	1,22	6%	0,37	6%	0,75	6%
6	-0,1	-2%	0,04	2%	0,68	5%	0,11	4%	0,12	4%
5.97872*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,69	5%	0,11	4%	0,12	4%
5.95744*	-0,1	-2%	0,04	2%	0,69	5%	0,12	4%	0,12	4%
5.93617*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,69	5%	0,11	4%	0,11	3%
5.91489*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,69	5%	0,11	4%	0,11	3%
5.89361*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,70	5%	0,12	4%	0,09	3%
5.87234*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,70	5%	0,12	4%	0,08	2%
5.85106*	-0,1	-2%	0,04	2%	0,70	5%	0,13	4%	0,07	2%
5.82978*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,70	5%	0,12	4%	0,07	2%
5.80851*	-0,1	-2%	0,04	2%	0,71	5%	0,12	4%	0,07	2%
5.78723*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,72	5%	0,13	4%	0,08	2%
5.76595*	-0,09	-2%	0,05	3%	0,72	5%	0,25	8%	0,08	3%
5.74468*	-0,09	-2%	0,05	3%	0,72	5%	0,65	20%	0,09	3%
5.72340*	-0,09	-2%	0,05	3%	0,72	5%	0,90	28%	0,09	3%
5.70212*	-0,09	-2%	0,05	3%	0,73	5%	0,96	29%	0,09	3%
5.68085*	-0,09	-2%	0,05	3%	0,73	5%	0,85	26%	0,09	3%
5.65957*	-0,09	-2%	0,05	3%	0,73	5%	0,53	18%	0,09	3%
5.63829*	-0,09	-2%	0,05	3%	0,74	5%	0,31	11%	0,09	3%
5.61702*	-0,09	-2%	0,05	3%	0,74	5%	0,15	6%	0,09	3%
5.59574*	-0,09	-2%	0,05	3%	0,75	5%	0,06	2%	0,08	3%
5.57446*	-0,09	-2%	0,05	3%	0,75	5%	0,07	3%	0,09	3%
5.55319*	-0,09	-2%	0,05	3%	0,75	5%	0,07	3%	0,08	3%
5.53191*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,76	5%	0,08	3%	0,08	3%
5.51063*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,76	5%	0,08	3%	0,09	3%
5.48936*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,77	5%	0,08	3%	0,08	3%
5.46808*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,77	5%	0,09	3%	0,08	3%
5.44680*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,77	5%	0,09	3%	0,08	3%
5.42553*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,78	5%	0,09	3%	0,08	3%
5.40425*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,78	5%	0,10	3%	0,07	3%
5.38297*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,79	5%	0,10	3%	0,07	3%
5.36170*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,79	5%	0,10	3%	0,06	2%
5.34042*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,79	5%	0,09	3%	0,07	3%
5.31914*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,79	5%	0,09	3%	0,06	2%
5.29787*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,80	5%	0,09	3%	0,05	2%
5.27659*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,80	5%	0,09	3%	0,05	2%
5.25531*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,80	5%	0,10	3%	0,05	2%
5.23404*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,81	5%	0,10	3%	0,05	2%

Seção	Profundidade		Vel. Média		Tensão de Cisalhamento (N/m <sup>2</sup> )					
	N.A. (m)		(m/s)		Canal		M.E.		M.D.	
5.21276*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,81	5%	0,10	3%	0,04	2%
5.19149*	-0,1	-2%	0,05	2%	0,82	5%	0,11	3%	0,04	2%
5.17021*	-0,1	-2%	0,05	2%	0,82	5%	0,10	3%	0,03	1%
5.14893*	-0,1	-2%	0,05	2%	0,82	5%	0,11	3%	0,03	1%
5.12766*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,83	5%	0,10	3%	0,04	2%
5.10638*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,84	5%	0,11	3%	0,04	2%
5.08510*	-0,1	-2%	0,05	2%	0,84	5%	0,11	3%	0,03	1%
5.06383*	-0,1	-2%	0,05	2%	0,84	5%	0,11	3%	0,04	2%
5.04255*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,84	5%	0,11	3%	0,04	2%
5.02127*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,85	5%	0,12	3%	0,04	2%
5	-0,1	-2%	0,06	3%	0,85	5%	0,12	3%	0,04	2%
4.992*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,85	5%	0,12	3%	0,04	2%
4.984*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,86	5%	0,12	3%	0,04	2%
4.976*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,86	5%	0,13	4%	0,04	2%
4.968*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,87	5%	0,13	4%	0,04	2%
4.96*	-0,09	-2%	0,06	3%	0,87	5%	0,14	4%	0,04	2%
4.952*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,87	5%	0,15	4%	0,04	2%
4.944*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,95	5%	0,17	5%	0,04	2%
4.936*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,96	5%	0,21	6%	0,05	2%
4.928*	-0,1	-2%	0,05	2%	0,96	5%	0,31	8%	0,05	2%
4.92*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,96	5%	0,40	10%	0,05	2%
4.912*	-0,09	-2%	0,05	2%	0,96	5%	0,46	11%	0,05	2%
4.904*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,96	5%	0,54	12%	0,05	2%
4.896*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,97	5%	0,61	13%	0,05	2%
4.888*	-0,1	-2%	0,05	2%	0,97	5%	0,64	13%	0,05	2%
4.88*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,97	5%	0,41	8%	0,05	2%
4.872*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,98	5%	0,21	4%	0,05	2%
4.864*	-0,1	-2%	0,05	2%	0,97	5%	0,21	4%	0,06	2%
4.856*	-0,1	-2%	0,05	2%	0,98	5%	0,21	4%	0,05	2%
4.848*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,99	5%	0,21	4%	0,05	2%
4.84*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,99	5%	0,21	4%	0,05	2%
4.832*	-0,1	-2%	0,05	2%	1,07	5%	0,23	4%	0,06	2%
4.824*	-0,1	-2%	0,05	2%	1,08	5%	0,22	4%	0,06	2%
4.816*	-0,1	-2%	0,06	3%	1,08	5%	0,22	4%	0,06	2%
4.808*	-0,1	-2%	0,06	3%	1,09	5%	0,22	4%	0,06	2%
4.8*	-0,1	-2%	0,05	2%	0,94	5%	0,13	2%	0,01	0%
4.792*	-0,1	-2%	0,04	2%	0,52	3%	-0,10	-2%	-0,11	-4%
4.784*	-0,09	-2%	0,01	0%	-0,17	-1%	-0,19	-4%	-0,27	-10%
4.776*	-0,08	-1%	-0,03	-1%	-1,02	-5%	0,38	7%	-0,49	-18%
4.768*	-0,06	-1%	-0,09	-4%	-2,01	-10%	1,87	36%	-0,72	-27%
4.76*	-0,06	-1%	-0,14	-7%	-3,02	-15%	4,92	96%	-0,96	-36%
4.752*	-0,06	-1%	-0,09	-4%	-2,21	-11%	1,83	36%	-0,74	-28%
4.744*	-0,07	-1%	-0,05	-2%	-1,34	-7%	0,27	5%	-0,53	-20%

Seção	Profundidade		Vel. Média		Tensão de Cisalhamento (N/m <sup>2</sup> )					
	N.A. (m)		(m/s)		Canal		M.E.		M.D.	
4.736*	-0,08	-1%	-0,01	0%	-0,51	-3%	-0,32	-6%	-0,31	-12%
4.728*	-0,08	-1%	0,03	1%	0,21	1%	-0,19	-4%	-0,13	-5%
4.72*	-0,08	-1%	0,04	2%	0,79	4%	0,06	1%	0	0%
4.712*	-0,08	-1%	0,05	2%	1,02	5%	0,18	3%	0,07	2%
4.704*	-0,09	-2%	0,05	2%	1,02	5%	0,18	3%	0,07	2%
4.696*	-0,09	-2%	0,04	2%	1,02	5%	0,18	3%	0,07	2%
4.688*	-0,09	-2%	0,05	2%	1,02	5%	0,18	3%	0,55	16%
4.68*	-0,08	-1%	0,05	2%	1,02	5%	0,17	3%	0,69	20%
4.672*	-0,08	-1%	0,05	2%	1,03	5%	0,17	3%	0,75	21%
4.664*	-0,08	-1%	0,05	2%	1,03	5%	0,17	3%	0,81	22%
4.656*	-0,09	-2%	0,05	2%	1,03	5%	0,17	3%	0,88	24%
4.648*	-0,09	-2%	0,05	2%	1,03	5%	0,17	3%	0,98	26%
4.64*	-0,08	-1%	0,05	2%	1,03	5%	0,17	3%	1,07	28%
4.632*	-0,08	-1%	0,05	2%	1,04	5%	0,17	3%	1,19	30%
4.624*	-0,08	-1%	0,05	2%	1,04	5%	0,16	3%	0,96	24%
4.616*	-0,08	-1%	0,04	2%	1,04	5%	0,16	3%	0,66	16%
4.608*	-0,09	-2%	0,05	2%	1,12	5%	0,17	3%	0,48	11%
4.6*	-0,09	-2%	0,05	2%	1,12	5%	0,17	3%	0,39	9%
4.592*	-0,08	-1%	0,05	2%	1,13	5%	0,19	4%	0,28	6%
4.584*	-0,08	-1%	0,05	2%	1,13	5%	0,22	4%	0,18	4%
4.576*	-0,08	-1%	0,05	2%	1,13	5%	0,24	4%	0,19	4%
4.568*	-0,09	-2%	0,04	2%	1,14	5%	0,26	5%	0,19	4%
4.56*	-0,09	-2%	0,05	2%	1,05	4%	0,25	5%	0,16	3%
4.552*	-0,07	-1%	0,03	1%	0,35	1%	-0,02	0%	-0,08	-2%
4.544*	-0,07	-1%	-0,01	0%	-0,69	-3%	-0,40	-8%	-0,44	-9%
4.536*	-0,06	-1%	-0,06	-3%	-1,99	-8%	-0,01	0%	-0,9	-19%
4.528*	-0,05	-1%	-0,12	-5%	-3,48	-14%	1,25	24%	-1,44	-30%
4.52*	-0,03	-1%	-0,19	-9%	-5,09	-21%	4,93	93%	-2,08	-43%
4.512*	-0,03	-1%	-0,13	-6%	-3,72	-15%	1,17	22%	-1,59	-33%
4.504*	-0,04	-1%	-0,08	-4%	-2,38	-10%	-0,17	-3%	-1,12	-23%
4.496*	-0,05	-1%	-0,02	-1%	-1,17	-4%	-0,59	-10%	-0,72	-14%
4.488*	-0,06	-1%	0,01	0%	0,00	0%	-0,13	-2%	-0,29	-6%
4.48*	-0,07	-1%	0,04	2%	0,95	4%	0,19	3%	0,03	1%
4.472*	-0,06	-1%	0,04	2%	0,99	4%	0,20	4%	0,05	1%
4.464*	-0,06	-1%	0,04	2%	0,99	4%	0,17	3%	0,05	1%
4.456*	-0,06	-1%	0,04	2%	1,00	4%	0,17	3%	0,04	1%
4.448*	-0,06	-1%	0,03	1%	1,00	4%	0,16	3%	0,05	1%
4.44*	-0,07	-1%	0,03	1%	1,00	4%	0,16	3%	0,04	1%
4.432*	-0,07	-1%	0,03	1%	1,01	4%	0,16	3%	0,04	1%
4.424*	-0,06	-1%	0,03	1%	1,01	4%	0,16	3%	0,04	1%
4.416*	-0,06	-1%	0,03	1%	1,00	4%	0,15	3%	0,06	1%
4.408*	-0,07	-1%	0,04	2%	1,01	4%	0,15	3%	0,06	1%
4.4*	-0,07	-1%	0,04	2%	1,01	4%	0,15	3%	0,08	2%

Seção	Profundidade		Vel. Média		Tensão de Cisalhamento (N/m <sup>2</sup> )					
	N.A. (m)		(m/s)		Canal		M.E.		M.D.	
4.392*	-0,07	-1%	0,04	2%	1,01	4%	0,15	3%	0,09	2%
4.384*	-0,06	-1%	0,04	2%	1,08	4%	0,15	3%	0,11	2%
4.376*	-0,06	-1%	0,04	2%	1,09	4%	0,16	3%	0,11	2%
4.368*	-0,07	-1%	0,04	2%	1,09	4%	0,15	3%	0,12	2%
4.36*	-0,07	-1%	0,04	2%	1,09	4%	0,16	3%	0,12	2%
4.352*	-0,07	-1%	0,04	2%	1,10	4%	0,14	3%	0,12	2%
4.344*	-0,06	-1%	0,04	2%	1,09	4%	0,15	3%	0,12	2%
4.336*	-0,06	-1%	0,04	2%	1,09	4%	0,15	3%	0,12	2%
4.328*	-0,07	-1%	0,04	2%	1,09	4%	0,16	3%	0,12	2%
4.32*	-0,07	-1%	0,04	2%	1,10	4%	0,17	3%	0,13	2%
4.312*	-0,06	-1%	0,02	1%	0,40	1%	-0,06	-1%	-0,15	-3%
4.304*	-0,05	-1%	-0,03	-1%	-0,96	-3%	-0,63	-12%	-0,63	-11%
4.296*	-0,04	-1%	-0,08	-4%	-2,62	-9%	-0,59	-12%	-1,23	-21%
4.288*	-0,02	0%	-0,14	-6%	-4,57	-16%	0,80	16%	-1,93	-33%
4.28*	-0,01	0%	-0,21	-10%	-6,70	-23%	4,71	95%	-2,71	-46%
4.272*	-0,01	0%	-0,15	-7%	-5,20	-17%	0,79	15%	-2,14	-34%
4.264*	-0,02	0%	-0,09	-4%	-3,27	-11%	-0,78	-15%	-1,43	-23%
4.25600*	-0,03	0%	-0,04	-2%	-1,53	-5%	-0,78	-15%	-0,78	-12%
4.248*	-0,04	-1%	0	0%	-0,02	0%	-0,13	-3%	-0,23	-4%
4.24*	-0,05	-1%	0,02	1%	0,78	3%	0,14	3%	0,09	1%
4.232*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,79	3%	0,14	3%	0,1	2%
4.224*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,78	3%	0,14	3%	0,09	1%
4.21600*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,79	3%	0,13	3%	0,1	2%
4.20800*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,78	3%	0,13	3%	0,1	2%
4.20000*	-0,05	-1%	0,02	1%	0,78	3%	0,13	3%	0,1	2%
4.192*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,78	3%	0,13	3%	0,1	2%
4.184*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,79	3%	0,13	3%	0,1	2%
4.17600*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,78	3%	0,12	2%	0,1	2%
4.16800*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,79	3%	0,11	2%	0,1	2%
4.16000*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,84	3%	0,12	2%	0,1	1%
4.152*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,84	3%	0,11	2%	0,1	1%
4.14400*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,85	3%	0,12	2%	0,1	1%
4.13600*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,85	3%	0,12	2%	0,11	2%
4.12800*	-0,05	-1%	0,02	1%	0,84	3%	0,12	2%	0,11	2%
4.12000*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,85	3%	0,11	2%	0,11	2%
4.11200*	-0,04	-1%	0,03	1%	0,84	3%	0,12	2%	0,11	2%
4.10400*	-0,04	-1%	0,03	1%	0,84	3%	0,11	2%	0,11	2%
4.09600*	-0,04	-1%	0,03	1%	0,85	3%	0,11	2%	0,12	2%
4.08800*	-0,05	-1%	0,03	1%	0,85	3%	0,10	2%	0,12	2%
4.08000*	-0,04	-1%	0,03	1%	0,85	3%	0,11	2%	0,13	2%
4.07200*	-0,04	-1%	0	0%	0,15	0%	-0,11	-2%	-0,16	-2%
4.06400*	-0,03	0%	-0,04	-2%	-1,51	-5%	-0,80	-17%	-0,79	-11%
4.05600*	-0,02	0%	-0,09	-4%	-3,54	-11%	-1,16	-25%	-1,59	-23%

Seção	Profundidade N.A. (m)		Vel. Média (m/s)		Tensão de Cisalhamento (N/m <sup>2</sup> )					
					Canal		M.E.		M.D.	
4.04800*	0,01	0%	-0,16	-7%	-6,29	-18%	0,15	3%	-2,7	-36%
4.04000*	0,02	0%	-0,23	-10%	-7,61	-22%	4,79	100%	-2,3	-31%
4.03200*	0,01	0%	-0,17	-8%	-6,77	-20%	0,04	1%	-2,9	-39%
4.02400*	0	0%	-0,11	-5%	-4,52	-13%	-1,43	-30%	-1,99	-26%
4.01600*	-0,01	0%	-0,06	-3%	-2,49	-7%	-1,04	-22%	-1,17	-16%
4.00800*	-0,01	0%	-0,01	0%	-0,78	-2%	-0,30	-7%	-0,49	-6%
4	-0,01	0%	0,01	0%	0,09	0%	-0,08	-2%	-0,12	-2%
3.98461*	-0,02	0%	0,01	0%	0,44	1%	0,05	1%	0,09	1%
3.96923*	-0,01	0%	0	0%	0,44	1%	0,05	1%	0,07	1%
3.95384*	-0,02	0%	0,01	0%	0,44	1%	0,05	1%	0,07	1%
3.93846*	-0,01	0%	0,01	0%	0,44	1%	0,05	1%	0,06	1%
3.92307*	-0,02	0%	0,01	0%	0,44	1%	0,05	1%	0,06	1%
3.90769*	-0,01	0%	0,01	0%	0,44	1%	0,05	1%	0,06	1%
3.89230*	-0,02	0%	0,01	0%	0,43	1%	0,05	1%	0,06	1%
3.87692*	-0,01	0%	0,01	0%	0,44	1%	0,05	1%	0,08	1%
3.86153*	-0,02	0%	0,01	0%	0,44	1%	0,05	1%	0,07	1%
3.84615*	-0,01	0%	0,01	0%	0,43	1%	0,05	1%	0,08	1%
3.83076*	-0,02	0%	0	0%	0,43	1%	0,05	1%	0,08	1%
3.81538*	-0,02	0%	0,01	0%	0,43	1%	0,04	1%	0,08	1%
3.8*	-0,02	0%	0,01	0%	0,43	1%	0,05	1%	0,08	1%
3.78461*	-0,02	0%	0,01	0%	0,44	1%	0,05	1%	0,08	1%
3.76923*	-0,02	0%	0,01	0%	0,43	1%	0,04	1%	0,08	1%
3.75384*	-0,02	0%	0,01	0%	0,43	1%	0,04	1%	0,08	1%
3.73846*	-0,02	0%	0,01	0%	0,43	1%	0,04	1%	0,08	1%
3.72307*	-0,02	0%	0	0%	0,43	1%	0,05	1%	0,08	1%
3.70769*	-0,02	0%	0,01	0%	0,25	1%	-0,02	-1%	-0,05	-1%
3.69230*	-0,02	0%	-0,02	-1%	-0,52	-2%	-0,20	-5%	-0,43	-6%
3.67692*	0	0%	-0,04	-2%	-1,79	-6%	-0,47	-13%	-1	-13%
3.66153*	0	0%	-0,09	-4%	-3,41	-11%	-0,97	-27%	-1,73	-23%
3.64615*	0,02	0%	-0,13	-6%	-5,30	-18%	-1,51	-43%	-2,62	-34%
3.63076*	0,03	0%	-0,19	-9%	-7,40	-25%	-0,56	-16%	-3,66	-47%
3.61538*	0,05	1%	-0,25	-12%	-8,23	-28%	3,48	100%	-3,02	-39%
3.6*	0,03	0%	-0,19	-9%	-7,42	-25%	-0,56	-16%	-3,72	-48%
3.58461*	0,03	0%	-0,15	-7%	-5,43	-19%	-1,49	-44%	-2,74	-35%
3.56923*	0,02	0%	-0,1	-5%	-3,70	-13%	-0,93	-28%	-1,88	-24%
3.55384*	0,02	0%	-0,06	-3%	-2,26	-8%	-0,51	-15%	-1,2	-15%
3.53846*	0,01	0%	-0,03	-1%	-1,15	-4%	-0,28	-9%	-0,68	-9%
3.52307*	0,01	0%	-0,01	0%	-0,34	-1%	-0,10	-3%	-0,26	-3%
3.50769*	0	0%	0	0%	0,10	0%	0,01	0%	0,04	1%
3.49230*	0,01	0%	0	0%	0,10	0%	0,01	0%	0,04	1%
3.47692*	0,01	0%	0	0%	0,10	0%	0,02	1%	0,03	0%
3.46153*	0,01	0%	0	0%	0,10	0%	0,01	0%	0,04	1%
3.44615*	0	0%	0	0%	0,11	0%	0,02	1%	0,04	1%

Seção	Profundidade N.A. (m)		Vel. Média (m/s)		Tensão de Cisalhamento (N/m <sup>2</sup> )					
					Canal		M.E.		M.D.	
3.43076*	0,01	0%	0	0%	0,11	0%	0,02	1%	0,04	1%
3.41538*	0,01	0%	-0,01	-1%	0,12	0%	0,02	1%	0,04	1%
3.4*	0,01	0%	0	0%	0,12	0%	0,01	0%	0,04	1%
3.38461*	0,01	0%	-0,01	-1%	0,12	0%	0,02	1%	0,04	1%
3.36923*	0,01	0%	0	0%	0,12	0%	0,02	1%	0,04	1%
3.35384*	0,01	0%	-0,01	-1%	0,13	0%	0,02	1%	0,05	1%
3.33846*	0,01	0%	0	0%	0,13	0%	0,02	1%	0,05	1%
3.32307*	0,01	0%	0	0%	0,13	0%	0,02	1%	0,05	1%
3.30769*	0,01	0%	0	0%	0,14	1%	0,02	1%	0,05	1%
3.29230*	0,01	0%	0	0%	0,14	1%	0,02	1%	0,05	1%
3.27692*	0	0%	0	0%	0,15	1%	0,02	1%	0,05	1%
3.26153*	0,01	0%	0	0%	0,15	1%	0,02	1%	0,05	1%
3.24615*	0,01	0%	0	0%	0,16	1%	0,02	1%	0,06	1%
3.23076*	0,01	0%	0	0%	0,16	1%	0,02	1%	0,06	1%
3.21538*	0	0%	-0,01	-1%	0,16	1%	0,02	1%	0,06	1%
3.2*	0,01	0%	0	0%	0,16	1%	0,03	1%	0,06	1%
3.18461*	0	0%	-0,01	-1%	0,16	1%	0,02	1%	0,06	1%
3.16923*	0,01	0%	0	0%	0,17	1%	0,02	1%	0,06	1%
3.15384*	0	0%	-0,01	-1%	0,18	1%	0,02	1%	0,06	1%
3.13846*	0,01	0%	0	0%	0,18	1%	0,02	1%	0,07	1%
3.12307*	0	0%	-0,01	-1%	0,18	1%	0,02	1%	0,07	1%
3.10769*	0,01	0%	0	0%	0,18	1%	0,02	1%	0,06	1%
3.09230*	0	0%	-0,01	-1%	0,19	1%	0,02	1%	0,07	1%
3.07692*	0,01	0%	0	0%	-0,09	0%	-0,01	0%	-0,02	0%
3.06153*	0	0%	-0,01	-1%	-0,10	0%	0,00	0%	-0,03	0%
3.04615*	0,01	0%	0	0%	-0,09	0%	0,00	0%	-0,02	0%
3.03076*	0	0%	-0,01	-1%	-0,09	0%	-0,01	0%	-0,03	0%
3.01538*	0,01	0%	0	0%	-0,09	0%	-0,01	0%	-0,02	0%
3	0	0%	-0,01	-1%	-0,09	0%	0,00	0%	-0,02	0%
2	0,01	0%	0	0%	-0,12	0%	-0,01	0%	-0,02	0%
1	0,01	0%	0	0%	0,13	0%	0,06	0%	0,08	1%

\* Seções interpoladas;

Hachuras: localização dos espigões.

**Tabela 3** – Tabela comparativa entre a simulação da situação atual e situação modificada 03 – TR 2 anos

Seção	Profundidade		Vel. Média		Tensão de Cisalhamento (N/m <sup>2</sup> )					
	N.A. (m)		(m/s)		Canal		M.E.		M.D.	
8	-0,1	-2%	0,04	2%	0,63	5%	0,16	4%	0,21	6%
7	-0,1	-2%	0,05	3%	1,23	6%	0,37	6%	0,75	6%
6	-0,1	-2%	0,04	2%	0,68	5%	0,11	4%	0,13	4%
5.97872*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,69	5%	0,11	4%	0,13	4%
5.95744*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,70	5%	0,12	4%	0,12	4%
5.93617*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,69	5%	0,11	4%	0,11	3%
5.91489*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,70	5%	0,11	4%	0,11	3%
5.89361*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,70	5%	0,12	4%	0,09	3%
5.87234*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,71	5%	0,12	4%	0,08	2%
5.85106*	-0,1	-2%	0,04	2%	0,71	5%	0,13	4%	0,07	2%
5.82978*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,71	5%	0,12	4%	0,07	2%
5.80851*	-0,1	-2%	0,04	2%	0,72	5%	0,12	4%	0,07	2%
5.78723*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,72	5%	0,13	4%	0,08	2%
5.76595*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,73	5%	0,27	8%	0,08	3%
5.74468*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,72	5%	0,66	20%	0,09	3%
5.72340*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,73	5%	0,91	28%	0,09	3%
5.70212*	-0,09	-2%	0,05	3%	0,73	5%	0,96	29%	0,09	3%
5.68085*	-0,09	-2%	0,05	3%	0,74	5%	0,85	26%	0,09	3%
5.65957*	-0,09	-2%	0,05	3%	0,74	5%	0,53	18%	0,09	3%
5.63829*	-0,09	-2%	0,05	3%	0,74	5%	0,31	11%	0,09	3%
5.61702*	-0,09	-2%	0,05	3%	0,75	5%	0,15	6%	0,09	3%
5.59574*	-0,09	-2%	0,05	3%	0,76	5%	0,06	2%	0,08	3%
5.57446*	-0,09	-2%	0,05	3%	0,75	5%	0,07	3%	0,09	3%
5.55319*	-0,09	-2%	0,05	3%	0,76	5%	0,07	3%	0,08	3%
5.53191*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,77	5%	0,08	3%	0,08	3%
5.51063*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,77	5%	0,08	3%	0,09	3%
5.48936*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,77	5%	0,08	3%	0,08	3%
5.46808*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,77	5%	0,09	3%	0,08	3%
5.44680*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,78	5%	0,09	3%	0,08	3%
5.42553*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,79	5%	0,09	3%	0,08	3%
5.40425*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,78	5%	0,10	3%	0,07	3%
5.38297*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,79	5%	0,10	3%	0,07	3%
5.36170*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,79	5%	0,10	3%	0,06	2%
5.34042*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,80	5%	0,09	3%	0,07	3%
5.31914*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,80	5%	0,09	3%	0,06	2%
5.29787*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,81	5%	0,09	3%	0,06	2%
5.27659*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,81	5%	0,09	3%	0,05	2%
5.25531*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,81	5%	0,10	3%	0,05	2%
5.23404*	-0,1	-2%	0,05	3%	0,82	5%	0,10	3%	0,05	2%

Seção	Profundidade N.A. (m)		Vel. Média (m/s)		Tensão de Cisalhamento (N/m <sup>2</sup> )					
					Canal		M.E.		M.D.	
5.21276*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,82	5%	0,10	3%	0,04	2%
5.19149*	-0,1	-2%	0,05	2%	0,83	5%	0,11	3%	0,04	2%
5.17021*	-0,1	-2%	0,05	2%	0,83	5%	0,10	3%	0,03	1%
5.14893*	-0,1	-2%	0,05	2%	0,83	5%	0,11	3%	0,03	1%
5.12766*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,83	5%	0,10	3%	0,04	2%
5.10638*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,84	5%	0,11	3%	0,04	2%
5.08510*	-0,1	-2%	0,05	2%	0,85	5%	0,11	3%	0,03	1%
5.06383*	-0,1	-2%	0,05	2%	0,85	5%	0,11	3%	0,04	2%
5.04255*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,85	5%	0,11	3%	0,04	2%
5.02127*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,85	5%	0,12	3%	0,04	2%
5	-0,1	-2%	0,06	3%	0,86	5%	0,12	3%	0,04	2%
4.992*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,86	5%	0,13	4%	0,04	2%
4.984*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,87	5%	0,12	3%	0,04	2%
4.976*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,87	5%	0,13	4%	0,04	2%
4.968*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,87	5%	0,14	4%	0,04	2%
4.96*	-0,09	-2%	0,06	3%	0,87	5%	0,14	4%	0,04	2%
4.952*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,88	5%	0,15	4%	0,04	2%
4.944*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,95	5%	0,17	5%	0,04	2%
4.936*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,96	5%	0,22	6%	0,05	2%
4.928*	-0,1	-2%	0,05	2%	0,96	5%	0,31	8%	0,05	2%
4.92*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,96	5%	0,40	10%	0,05	2%
4.912*	-0,1	-2%	0,05	2%	0,97	5%	0,46	11%	0,05	2%
4.904*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,97	5%	0,54	12%	0,05	2%
4.896*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,97	5%	0,61	13%	0,05	2%
4.888*	-0,1	-2%	0,05	2%	0,98	5%	0,64	13%	0,05	2%
4.88*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,98	5%	0,41	8%	0,05	2%
4.872*	-0,1	-2%	0,06	3%	0,98	5%	0,21	4%	0,05	2%
4.864*	-0,1	-2%	0,05	2%	0,98	5%	0,21	4%	0,06	2%
4.856*	-0,1	-2%	0,05	2%	0,99	5%	0,22	4%	0,05	2%
4.848*	-0,1	-2%	0,06	3%	1,00	5%	0,21	4%	0,05	2%
4.84*	-0,1	-2%	0,06	3%	1,00	5%	0,21	4%	0,05	2%
4.832*	-0,1	-2%	0,05	2%	1,08	5%	0,23	4%	0,06	2%
4.824*	-0,11	-2%	0,05	2%	1,09	5%	0,22	4%	0,06	2%
4.816*	-0,1	-2%	0,06	3%	1,09	5%	0,22	4%	0,06	2%
4.808*	-0,1	-2%	0,06	3%	1,10	6%	0,23	4%	0,06	2%
4.8*	-0,1	-2%	0,05	2%	1,10	6%	0,23	4%	0,06	2%
4.792*	-0,1	-2%	0,06	3%	1,10	5%	0,22	4%	0,06	2%
4.784*	-0,1	-2%	0,06	3%	1,10	5%	0,22	4%	0,07	3%
4.776*	-0,11	-2%	0,06	3%	1,11	6%	0,22	4%	0,06	2%
4.768*	-0,1	-2%	0,05	2%	1,11	6%	0,22	4%	0,06	2%
4.76*	-0,1	-2%	0,06	3%	1,11	5%	0,22	4%	0,07	3%
4.752*	-0,1	-2%	0,06	3%	1,12	6%	0,22	4%	0,07	3%
4.744*	-0,1	-2%	0,06	3%	1,12	6%	0,21	4%	0,06	2%

Seção	Profundidade N.A. (m)		Vel. Média (m/s)		Tensão de Cisalhamento (N/m <sup>2</sup> )					
					Canal		M.E.		M.D.	
4.736*	-0,1	-2%	0,06	3%	1,12	6%	0,21	4%	0,07	3%
4.728*	-0,11	-2%	0,06	3%	1,13	6%	0,21	4%	0,08	3%
4.72*	-0,1	-2%	0,06	3%	1,22	6%	0,22	4%	0,08	3%
4.712*	-0,1	-2%	0,06	3%	1,23	6%	0,22	4%	0,08	3%
4.704*	-0,1	-2%	0,06	3%	1,23	6%	0,22	4%	0,08	3%
4.696*	-0,1	-2%	0,05	2%	1,23	6%	0,21	4%	0,08	3%
4.688*	-0,11	-2%	0,06	3%	1,23	6%	0,22	4%	0,57	17%
4.68*	-0,1	-2%	0,06	3%	1,23	6%	0,21	4%	0,71	20%
4.672*	-0,1	-2%	0,06	3%	1,24	6%	0,21	4%	0,76	21%
4.664*	-0,1	-2%	0,06	3%	1,24	6%	0,21	4%	0,82	23%
4.656*	-0,1	-2%	0,06	3%	1,24	6%	0,20	4%	0,9	24%
4.648*	-0,11	-2%	0,06	3%	1,24	6%	0,20	4%	0,99	26%
4.64*	-0,1	-2%	0,06	3%	1,25	6%	0,21	4%	1,08	28%
4.632*	-0,1	-2%	0,06	3%	1,25	6%	0,20	4%	1,21	30%
4.624*	-0,1	-2%	0,06	3%	1,25	6%	0,20	4%	1,27	31%
4.616*	-0,1	-2%	0,05	2%	1,25	6%	0,20	4%	1,2	29%
4.608*	-0,11	-2%	0,06	3%	1,35	6%	0,20	4%	1,04	24%
4.6*	-0,11	-2%	0,06	3%	1,35	6%	0,20	4%	0,77	17%
4.592*	-0,1	-2%	0,06	3%	1,36	6%	0,22	4%	0,47	10%
4.584*	-0,1	-2%	0,06	3%	1,36	6%	0,25	5%	0,35	8%
4.576*	-0,1	-2%	0,06	3%	1,37	6%	0,27	5%	0,23	5%
4.568*	-0,1	-2%	0,05	2%	1,37	6%	0,30	6%	0,23	5%
4.56*	-0,11	-2%	0,06	3%	1,28	5%	0,28	5%	0,19	4%
4.552*	-0,09	-2%	0,04	2%	0,60	2%	0,04	1%	-0,04	-1%
4.544*	-0,09	-2%	0	0%	-0,43	-2%	-0,33	-6%	-0,39	-8%
4.536*	-0,08	-1%	-0,05	-2%	-1,71	-7%	0,04	1%	-0,84	-18%
4.528*	-0,06	-1%	-0,11	-5%	-3,17	-13%	1,26	24%	-1,37	-29%
4.52*	-0,05	-1%	-0,18	-8%	-4,76	-19%	4,79	90%	-2	-42%
4.512*	-0,05	-1%	-0,12	-5%	-3,41	-14%	1,18	22%	-1,52	-32%
4.504*	-0,06	-1%	-0,07	-3%	-2,08	-8%	-0,11	-2%	-1,06	-22%
4.496*	-0,07	-1%	-0,01	0%	-0,88	-3%	-0,51	-9%	-0,68	-13%
4.488*	-0,08	-1%	0,02	1%	0,28	1%	-0,06	-1%	-0,28	-5%
4.48*	-0,09	-2%	0,05	2%	1,21	5%	0,26	5%	0,04	1%
4.472*	-0,08	-1%	0,05	2%	1,25	5%	0,26	5%	0,06	1%
4.464*	-0,08	-1%	0,05	2%	1,25	5%	0,24	4%	0,06	1%
4.456*	-0,08	-1%	0,05	2%	1,26	5%	0,23	4%	0,05	1%
4.448*	-0,08	-1%	0,04	2%	1,26	5%	0,21	4%	0,06	1%
4.44*	-0,09	-2%	0,04	2%	1,27	5%	0,20	4%	0,05	1%
4.432*	-0,09	-2%	0,04	2%	1,27	5%	0,20	4%	0,05	1%
4.424*	-0,08	-1%	0,04	2%	1,27	5%	0,20	4%	0,05	1%
4.416*	-0,08	-1%	0,04	2%	1,27	5%	0,19	4%	0,07	1%
4.408*	-0,08	-1%	0,05	2%	1,27	5%	0,19	4%	0,07	1%
4.4*	-0,09	-2%	0,05	2%	1,28	5%	0,19	4%	0,09	2%

Seção	Profundidade		Vel. Média		Tensão de Cisalhamento (N/m <sup>2</sup> )					
	N.A. (m)		(m/s)		Canal		M.E.		M.D.	
4.392*	-0,09	-2%	0,05	2%	1,27	5%	0,19	4%	0,1	2%
4.384*	-0,08	-1%	0,05	2%	1,37	5%	0,19	3%	0,12	2%
4.376*	-0,08	-1%	0,05	2%	1,37	5%	0,20	4%	0,13	2%
4.368*	-0,08	-1%	0,05	2%	1,37	5%	0,19	4%	0,15	3%
4.36*	-0,09	-2%	0,05	2%	1,37	5%	0,19	4%	0,16	3%
4.352*	-0,09	-1%	0,05	2%	1,38	5%	0,18	3%	0,15	3%
4.344*	-0,08	-1%	0,05	2%	1,37	5%	0,18	3%	0,15	3%
4.336*	-0,08	-1%	0,05	2%	1,37	5%	0,19	4%	0,15	3%
4.328*	-0,08	-1%	0,05	2%	1,38	5%	0,20	4%	0,15	3%
4.32*	-0,09	-1%	0,05	2%	1,38	5%	0,21	4%	0,16	3%
4.312*	-0,07	-1%	0,03	1%	0,69	2%	-0,01	0%	-0,12	-2%
4.304*	-0,07	-1%	-0,01	0%	-0,64	-2%	-0,57	-11%	-0,59	-10%
4.296*	-0,06	-1%	-0,07	-3%	-2,28	-8%	-0,55	-11%	-1,18	-20%
4.288*	-0,04	-1%	-0,13	-6%	-4,19	-15%	0,79	16%	-1,87	-32%
4.28*	-0,03	0%	-0,2	-9%	-6,28	-22%	4,52	91%	-2,65	-45%
4.272*	-0,03	0%	-0,14	-6%	-4,78	-16%	0,78	15%	-2,08	-33%
4.264*	-0,04	-1%	-0,08	-4%	-2,89	-9%	-0,72	-14%	-1,38	-22%
4.25600*	-0,05	-1%	-0,03	-1%	-1,17	-4%	-0,72	-14%	-0,74	-12%
4.248*	-0,06	-1%	0,01	0%	0,30	1%	-0,08	-2%	-0,19	-3%
4.24*	-0,06	-1%	0,03	1%	1,10	4%	0,19	4%	0,13	2%
4.232*	-0,06	-1%	0,03	1%	1,10	4%	0,19	4%	0,13	2%
4.224*	-0,06	-1%	0,03	1%	1,09	4%	0,19	4%	0,13	2%
4.21600*	-0,06	-1%	0,03	1%	1,10	4%	0,19	4%	0,14	2%
4.20800*	-0,06	-1%	0,03	1%	1,10	4%	0,18	4%	0,13	2%
4.20000*	-0,06	-1%	0,03	1%	1,10	4%	0,19	4%	0,13	2%
4.192*	-0,06	-1%	0,03	1%	1,09	4%	0,18	4%	0,13	2%
4.184*	-0,06	-1%	0,03	1%	1,10	4%	0,19	4%	0,14	2%
4.17600*	-0,06	-1%	0,03	1%	1,10	4%	0,17	3%	0,13	2%
4.16800*	-0,06	-1%	0,03	1%	1,10	4%	0,17	3%	0,14	2%
4.16000*	-0,06	-1%	0,03	1%	1,18	4%	0,17	3%	0,14	2%
4.152*	-0,06	-1%	0,03	1%	1,17	4%	0,16	3%	0,14	2%
4.14400*	-0,06	-1%	0,03	1%	1,18	4%	0,16	3%	0,14	2%
4.13600*	-0,06	-1%	0,03	1%	1,18	4%	0,16	3%	0,14	2%
4.12800*	-0,06	-1%	0,03	1%	1,18	4%	0,16	3%	0,15	2%
4.12000*	-0,06	-1%	0,04	2%	1,18	4%	0,15	3%	0,15	2%
4.11200*	-0,06	-1%	0,04	2%	1,17	4%	0,16	3%	0,15	2%
4.10400*	-0,06	-1%	0,04	2%	1,17	4%	0,15	3%	0,15	2%
4.09600*	-0,06	-1%	0,04	2%	1,18	4%	0,16	3%	0,15	2%
4.08800*	-0,07	-1%	0,04	2%	1,18	4%	0,15	3%	0,16	2%
4.08000*	-0,06	-1%	0,04	2%	1,18	4%	0,15	3%	0,17	2%
4.07200*	-0,06	-1%	0,01	0%	0,49	2%	-0,06	-1%	-0,12	-2%
4.06400*	-0,05	-1%	-0,03	-1%	-1,14	-4%	-0,75	-16%	-0,73	-10%
4.05600*	-0,04	-1%	-0,08	-4%	-3,14	-10%	-1,11	-24%	-1,5	-21%

Seção	Profundidade N.A. (m)		Vel. Média (m/s)		Tensão de Cisalhamento (N/m <sup>2</sup> )					
					Canal		M.E.		M.D.	
4.04800*	-0,01	0%	-0,14	-6%	-5,81	-17%	0,14	3%	-2,59	-35%
4.04000*	0	0%	-0,22	-10%	-8,60	-25%	4,75	99%	-3,74	-50%
4.03200*	-0,01	0%	-0,15	-7%	-6,28	-18%	0,03	1%	-2,78	-37%
4.02400*	-0,02	0%	-0,1	-5%	-4,07	-12%	-1,38	-29%	-1,88	-25%
4.01600*	-0,03	0%	-0,04	-2%	-2,08	-6%	-0,99	-21%	-1,08	-14%
4.00800*	-0,03	0%	0	0%	-0,40	-1%	-0,26	-6%	-0,41	-5%
4	-0,03	0%	0,02	1%	0,45	1%	-0,04	-1%	-0,04	-1%
3.98461*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,80	2%	0,09	2%	0,16	2%
3.96923*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,80	2%	0,08	2%	0,13	2%
3.95384*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,79	2%	0,09	2%	0,11	1%
3.93846*	-0,03	0%	0,02	1%	0,79	2%	0,09	2%	0,1	1%
3.92307*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,79	2%	0,09	2%	0,09	1%
3.90769*	-0,03	0%	0,02	1%	0,79	2%	0,09	2%	0,09	1%
3.89230*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,78	2%	0,09	2%	0,1	1%
3.87692*	-0,03	0%	0,02	1%	0,78	2%	0,08	2%	0,12	2%
3.86153*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,78	2%	0,08	2%	0,12	2%
3.84615*	-0,03	0%	0,02	1%	0,77	2%	0,08	2%	0,13	2%
3.83076*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,77	2%	0,08	2%	0,13	2%
3.81538*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,76	2%	0,08	2%	0,13	2%
3.8*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,76	2%	0,08	2%	0,13	2%
3.78461*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,77	2%	0,08	2%	0,13	2%
3.76923*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,76	2%	0,07	2%	0,13	2%
3.75384*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,75	2%	0,07	2%	0,13	2%
3.73846*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,75	2%	0,07	2%	0,13	2%
3.72307*	-0,04	-1%	0,01	0%	0,75	2%	0,07	2%	0,13	2%
3.70769*	-0,04	-1%	0,02	1%	0,57	2%	0,01	0%	0	0%
3.69230*	-0,04	-1%	-0,01	0%	-0,19	-1%	-0,18	-5%	-0,38	-5%
3.67692*	-0,02	0%	-0,03	-1%	-1,44	-5%	-0,44	-12%	-0,94	-12%
3.66153*	-0,02	0%	-0,08	-4%	-3,04	-10%	-0,94	-26%	-1,67	-22%
3.64615*	0	0%	-0,12	-6%	-4,89	-16%	-1,48	-42%	-2,58	-33%
3.63076*	0,01	0%	-0,18	-9%	-6,96	-24%	-0,58	-17%	-3,61	-47%
3.61538*	0,02	0%	-0,23	-11%	-7,84	-27%	3,48	100%	-3	-39%
3.6*	0,01	0%	-0,18	-9%	-6,99	-24%	-0,58	-17%	-3,66	-47%
3.58461*	0,01	0%	-0,13	-6%	-5,03	-17%	-1,45	-43%	-2,69	-34%
3.56923*	0	0%	-0,09	-4%	-3,34	-12%	-0,90	-27%	-1,83	-23%
3.55384*	0	0%	-0,05	-2%	-1,93	-7%	-0,48	-14%	-1,16	-15%
3.53846*	-0,01	0%	-0,02	-1%	-0,83	-3%	-0,26	-8%	-0,61	-8%
3.52307*	-0,01	0%	0	0%	-0,04	0%	-0,08	-2%	-0,2	-3%
3.50769*	-0,02	0%	0,01	0%	0,39	1%	0,03	1%	0,09	1%
3.49230*	-0,01	0%	0,01	0%	0,39	1%	0,03	1%	0,1	1%
3.47692*	-0,02	0%	0,01	0%	0,39	1%	0,04	1%	0,09	1%
3.46153*	-0,01	0%	0,01	1%	0,39	1%	0,03	1%	0,1	1%
3.44615*	-0,02	0%	0,01	1%	0,40	1%	0,03	1%	0,09	1%

Seção	Profundidade		Vel. Média		Tensão de Cisalhamento (N/m <sup>2</sup> )					
	N.A. (m)		(m/s)		Canal		M.E.		M.D.	
3.43076*	-0,01	0%	0,01	1%	0,39	1%	0,04	1%	0,09	1%
3.41538*	-0,01	0%	0	0%	0,40	1%	0,04	1%	0,1	1%
3.4*	-0,01	0%	0,01	1%	0,40	1%	0,03	1%	0,09	1%
3.38461*	-0,02	0%	0	0%	0,40	1%	0,03	1%	0,1	1%
3.36923*	-0,01	0%	0,01	1%	0,40	1%	0,03	1%	0,1	1%
3.35384*	-0,01	0%	0	0%	0,40	1%	0,03	1%	0,1	1%
3.33846*	-0,01	0%	0,01	1%	0,40	2%	0,03	1%	0,1	1%
3.32307*	-0,01	0%	0	0%	0,40	2%	0,03	1%	0,1	1%
3.30769*	-0,01	0%	0,01	1%	0,41	2%	0,03	1%	0,11	1%
3.29230*	-0,01	0%	0,01	1%	0,41	2%	0,03	1%	0,11	1%
3.27692*	-0,02	0%	0,01	1%	0,39	1%	0,02	1%	0,08	1%
3.26153*	-0,01	0%	0	0%	0,00	0%	-0,07	-3%	-0,19	-2%
3.24615*	0	0%	-0,02	-1%	-0,71	-3%	-0,21	-8%	-0,62	-8%
3.23076*	0	0%	-0,05	-3%	-1,62	-6%	-0,38	-14%	-1,13	-14%
3.21538*	0	0%	-0,08	-4%	-2,72	-11%	-0,57	-22%	-1,74	-22%
3.2*	0,01	0%	-0,11	-6%	-3,98	-16%	-0,78	-30%	-2,44	-30%
3.18461*	0,01	0%	-0,16	-8%	-5,43	-22%	-1,33	-51%	-3,38	-42%
3.16923*	0,03	0%	-0,2	-11%	-7,04	-28%	-0,73	-29%	-4,45	-55%
3.15384*	0,04	1%	-0,25	-13%	-7,64	-31%	2,54	100%	-3,71	-46%
3.13846*	0,03	0%	-0,2	-11%	-6,99	-28%	-0,72	-29%	-4,46	-55%
3.12307*	0,02	0%	-0,16	-9%	-5,39	-22%	-1,28	-51%	-3,41	-42%
3.10769*	0,02	0%	-0,12	-6%	-4,01	-16%	-0,76	-31%	-2,52	-31%
3.09230*	0,01	0%	-0,09	-5%	-2,86	-12%	-0,55	-23%	-1,86	-23%
3.07692*	0,02	0%	-0,06	-3%	-2,22	-9%	-0,42	-17%	-1,42	-18%
3.06153*	0,01	0%	-0,04	-2%	-1,42	-6%	-0,27	-11%	-0,95	-12%
3.04615*	0,01	0%	-0,02	-1%	-0,77	-3%	-0,15	-6%	-0,55	-7%
3.03076*	0	0%	-0,01	-1%	-0,32	-1%	-0,07	-3%	-0,24	-3%
3.01538*	0,01	0%	0	0%	-0,11	0%	-0,01	0%	-0,04	0%
3	0	0%	-0,01	-1%	-0,09	0%	0,00	0%	-0,02	0%
2	0,01	0%	0	0%	-0,12	0%	-0,01	0%	-0,02	0%
1	0,01	0%	0	0%	0,13	0%	0,06	0%	0,08	1%

\* Seções interpoladas;

Hachuras: localização dos espigões.