



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**FRANCISCO GUEDES CAVALCANTE**

**ESTUDO DOS EFEITOS DAS PONTES, RUGOSIDADE E DECLIVIDADE  
LONGITUDINAL NO ESCOAMENTO EM CANAL ARTIFICIAL URBANO  
APLICANDO MODELAGEM COMPUTACIONAL**

**JUAZEIRO DO NORTE**

**2017**

FRANCISCO GUEDES CAVALCANTE

ESTUDO DOS EFEITOS DAS PONTES, RUGOSIDADE E DECLIVIDADE  
LONGITUDINAL NO ESCOAMENTO EM CANAL ARTIFICIAL URBANO  
APLICANDO MODELAGEM COMPUTACIONAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Lacerda Tavares

JUAZEIRO DO NORTE

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

C364e Cavalcante, Francisco Guedes.

Estudo dos efeitos das pontes, rugosidade e declividade longitudinal no escoamento em canal artificial urbano aplicando modelagem computacional / Francisco Guedes Cavalcante. – 2017.

76 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2017.  
Orientação: Prof. Dr. Paulo Roberto Lacerda Tavares.

1. HEC-RAS. 2. Ressalto hidráulico. 3. Inundação. I. Título.

CDD 627

---

FRANCISCO GUEDES CAVALCANTE

ESTUDO DOS EFEITOS DAS PONTES, RUGOSIDADE E DECLIVIDADE  
LONGITUDINAL NO ESCOAMENTO EM CANAL ARTIFICIAL URBANO  
APLICANDO MODELAGEM COMPUTACIONAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em: 30/10/2017

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Paulo Roberto Lacerda Tavares (Orientador)  
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

---

Prof. Marco Aurélio Holanda de Castro, PhD  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Celme Torres Ferreira da Costa  
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

## **AGRADECIMENTOS**

Á Deus, por me conceder existência com saúde e com coragem para enfrentar os diversos desafios que a vida proporciona.

A minha família; pelo incentivo, apoio, carinho e paciência ao longo desta jornada.

Ao professor Dr. Paulo Roberto Lacerda Tavares, que superou o seu papel de orientador, contribuindo com ideias e conduzindo a caminhos nunca antes trilhados.

Aos Professores Dr. Luiz Alberto Ribeiro Mendonça, Dr<sup>a</sup>. Celme Torres Ferreira da Costa, PhD Marco Aurélio Holanda de Castro, Dr. Vicente Helano Feitosa Batista Sobrinho, Dr. Carlos Wagner Oliveira pela compreensão, ensinamentos e incentivos.

A secretaria do programa de pós-graduação em engenharia civil (PÓS DEHA), sempre esteve presente e atuante na solução de qualquer dúvida gerada ao longo desta caminhada.

A todos os servidores da Universidade Federal do Cariri, pelo acolhimento durante esta estadia.

Ao Conselho nacional de desenvolvimento científico e tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa pesquisa.

Obrigado a todos!

## RESUMO

A dissertação apresenta um estudo sobre os efeitos que a rugosidade, a mudança na declividade e a presença das pontes, exercem sobre o escoamento no canal artificial urbano Rio Granjeiro, Crato, Ceará, Brasil. Na realização deste trabalho utilizou-se o *software* HEC-RAS, que apresenta a capacidade de simular escoamento gradualmente variado, bruscamente variado e escoamento através de seções com pontes. Para obter os resultados procurou-se discriminar os efeitos separados de cada uma das singularidades. Para a rugosidade, realizaram-se três simulações, representando três possíveis cenários para a rugosidade dos taludes e do fundo do canal. Para análise dos efeitos da mudança de declividade, comparou-se o escoamento de dois trechos no canal, um trecho de maior declividade com outro de menor declividade. E os efeitos das pontes foram analisados através de duas simulações, em que se compararam as características do escoamento no canal com as pontes inseridas e sem a inserção das pontes. Os resultados mostraram que os efeitos do aumento da rugosidade, apresentam contribuição significativa para a formação do ressalto hidráulico e adicionada à mudança de declividade, provocam a mudança de regime. Os efeitos adversos que as pontes exercem mostraram-se muito dependentes da ação conjunta com o fator de rugosidade. Em termos reais, ficou constatada a dissipação de elevada quantidade de energia, em pontos localizados do canal, explicando o processo de destruição da calha, registrados em fatos históricos de enchentes, como a ocorrida no ano de 2011.

**Palavras-chave:** HEC-RAS. Ressalto hidráulico. Inundação.

## ABSTRACT

The present dissertation introduces a study about the effects that the roughness, the change in the slope and the presence of the bridges, exert on the urban river channel Granjeiro, Crato, Ceará, Brazil. In this work the HEC-RAS *software* was used, which presents the ability to simulate gradually varying, abrupt varied flow and flow through sections with bridges. To obtain the results we tried to discriminate the separate effects of each of the singularities. For the roughness, three simulations were performed, representing three possible roughness scenarios for the slopes and the bottom of the channel. For the analysis of the effects of the change of slope, the flow of two reaches in the channel were compared, a reach of greater slope with extension of 935m and one of lower slope measuring 1305m. And the effects of the bridges were analyzed through two simulations, in which the characteristics of the flow in the channel with the inserted bridges and without the insertion of the bridges were compared. The results showed that the effects of the increase of the roughness, present a significant contribution to the formation of the hydraulic jump and added to the change of slope, provoke the regime change. The adverse effects that the bridges exert were very dependent on the joint action with the roughness factor. In real terms, it was verified the dissipation of a high amount of energy, in localized points of the channel, explaining the process of destruction of the gutter, recorded in historical facts of floods, as occurred in the year of 2011.

**Keywords:** HEC-RAS. Hydraulic jump. Inundation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Classificação dos ressaltos hidráulicos formados em canais íngremes.....	23
Figura 2	– Ilustrações dos escoamentos de baixo fluxo em pontes nas classes a, b e c.....	25
Figura 3	– Interface inicial do software HEC-RAS.....	28
Figura 4	– Janela para entrada de dados de geometria.....	30
Figura 5	– Janela para entrada de dado de escoamento.....	31
Figura 6	– Representação dos termos da equação da energia.....	33
Figura 7	– Representação da ponte e as seções próximas e no interior da ponte.....	37
Figura 8	– Interface de seleção do modelo apropriado.....	45
Figura 9	– Localização da área de modelagem.....	46
Figura 10	– Localização da área da pesquisa.....	47
Figura 11	– Trecho do canal do Rio Granjeiro reformado.....	48
Figura 12	– Trecho do o canal do Rio Granjeiro não reformado.....	49
Figura 13	– Ponte presente no canal Rio Granjeiro (a) e representação da ponte no programa HEC-RAS (b).....	50
Figura 14	– Ponte que apresentam um estreitamento na calha do canal no canal rio granjeiro (a) e representação da ponte no programa HEC-RAS (b).....	50
Figura 15	– Representa lateral do canal rio granjeiro na forma de paredes empedradas.....	51
Figura 16	– A destruição da calha do canal em um dos trechos de paredes empedradas.....	52
Figura 17	– Ilustra o ponto de modificação da rugosidade devido à reforma parcial.....	53

Figura 18 – Representação do canal subdivido em trecho 1 e trecho 2.....	54
Figura 19 – O valor do número da curva (CN) para cada sub-bacia obtido pela caracterização do uso e ocupação da bacia hidrográfica.....	56
Figura 20 – Esquema do modelo da bhg no HEC-HMS.....	57
Figura 21 – Perfil do escoamento do canal rio granjeiro para as condições de rugosidade anterior à reforma (simulação a), escoando uma vazão referente uma precipitação com 50 anos de período de retorno.....	58
Figura 22 – Número de froude para uma vazão correspondente a uma precipitação com tempo de retorno de 50 anos para as condições de rugosidade anterior a reforma do canal (simulação a).....	59
Figura 23 – Destruição no canal e nas áreas vizinhas a ponte da rua Ruy Barbosa (a), e da ponte na rua Nossa Senhora de Fátima (b), na enchente de 2011.....	60
Figura 24 – Perfil do escoamento canal rio granjeiro para condições de rugosidade atuais (simulação b), escoando uma vazão referente a uma precipitação com 50 anos de tempo de retorno.....	61
Figura 25 – Número de froude para uma vazão correspondente a uma precipitação com tempo de retorno de 50 anos para as condições de rugosidade atuais (simulação b).....	61
Figura 26 – Perfil do escoamento canal rio granjeiro para condições de rugosidade simulando uma reforma completa (simulação c) e escoando uma vazão referente a uma precipitação com 50 anos de tempo de retorno.....	62
Figura 27 – Número de froude para uma vazão correspondente a uma precipitação com tempo de retorno de 50 anos para as condições de completa reforma do canal (simulação c).....	62
Figura 28 – Perfil do escoamento para uma vazão correspondente a uma precipitação com tempo de retorno de 50 anos canal com as	

pontes inseridas (a) e canal sem as pontes (b).....	63
Figura 29 – Número de froude para uma vazão correspondente a uma precipitação com tempo de retorno de 50 anos para o canal com as pontes (a), e sem as pontes (b).....	64
Figura 30 – Representa a mudança de declividade com linha dividindo os trechos em que ocorre a mudança de declividade.....	65
Figura 31 – Número de froude para escoamento do canal rio granjeiro para uma vazão correspondente a uma precipitação com tempo de retorno de 50 anos.....	66
Figura 31 – Trecho de ocorrência do ressalto hidráulico no canal do Rio Granjeiro.....	66

## LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Vazões do estudo hidrológico da bacia do Rio Granjeiro.....	57
--	----

## LISTAS DE SÍMBOLOS

$A$	Área ( $m^2$ )
$C_d$	Coefficiente de descarga em fluxo de pressão
$F_e$	Força específica ou Impulsão total ( $m^3$ )
$F_f$	Força externa devido ao atrito, por unidade de peso da água ( $m^3$ )
$g$	Gravidade ( $m/s^2$ )
$H$	Diferença entre a elevação de montante e na crista em vertedor (m)
$h_{L(1,2)}$	Perda de carga hidráulica entre seções (m)
$L$	Comprimento médio entre duas seções transversais
$L$	Largura que funciona como vertedor (m)
$n$	Coefficiente de Manning ( $m^{1/3}s$ )
$Q$	Vazão ( $m^3/s$ )
$q$	Vazão unitária ( $m^3/s.m$ )
$R$	Raio hidráulico ( $m^{2/3}$ )
$S_o$	Declividade de energia (m/m)
$t$	Tempo (s)
$v_1$	Velocidade média (m/s)
$WS$	Elevação da superfície da água (m)
$W_x$	Peso da água na direção do fluxo, por unidade de peso de água ( $m^3$ )
$X$	Distância (m)
$Y$	Profundidade (m)
$\alpha$	Coefficiente de ponderação da velocidade
$\beta$	Coefficiente de momento

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1	Justificativa.....	14
1.2	Objetivos.....	15
1.3	Escopo.....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>17</b>
2.1	Escoamento em rios e canais.....	17
2.2	Tipo de regimes de escoamentos.....	19
2.3	Ressalto hidráulico.....	21
2.4	Escoamento em pontes.....	24
2.5	A macrodrenagem em bacias urbanas.....	26
2.6	Modelagem computacional – Software HEC-RAS.....	27
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>29</b>
3.1	Modelagem hidráulica aplicando o HEC-RAS.....	29
3.2	Características do modelo matemático (HEC-RAS).....	41
3.2.1	<i>Cálculo do perfil da linha d'água – Escoamento Gradualmente Variado.....</i>	<i>32</i>
3.2.2	<i>Cálculo do perfil da linha d'água – Ressalto hidráulico.....</i>	<i>34</i>
3.2.3	<i>Cálculo do perfil da linha d'água - Escoamentos em pontes.....</i>	<i>36</i>
3.3	Estudos de caso: Canal do Rio Granjeiro.....	46
3.3.1	<i>Composição do modelo hidráulico.....</i>	<i>47</i>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>58</b>
4.1	Efeitos da rugosidade.....	58
4.2	Efeito das pontes.....	63
4.3	Efeitos da mudança de declividade.....	64
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>67</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>69</b>
	<b>ANEXO A – SIMULAÇÕES COM PERÍODOS DE RETORNO DE 20 E 100 ANOS.....</b>	<b>73</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A ocorrência dos ressaltos hidráulicos em canais artificiais urbanos pode gerar diversos inconvenientes, decorrentes do fenômeno de transição do escoamento supercrítico para o subcrítico que pode provocar elevada dissipação de energia, elevação do nível da água, ocasionando problemas e prejuízos associados à destruição dos canais e alagamentos das áreas marginais, com elevado risco de produzir danos físicos e materiais à população.

A geração do ressalto hidráulico está interligada a ocorrência de escoamento torrencial (Supercrítico) em contato com uma singularidade, satisfazendo as condições necessárias e suficientes para permitir que a lâmina de água alcance a altura requerida para a transição ao regime fluvial (Subcrítico). Esta singularidade pode ser uma ponte, uma mudança na declividade e/ou uma alteração na rugosidade, um alargamento etc. (PORTO, 2006).

O processo de intensa urbanização tem contribuído com efeitos adversos ao escoamento superficial nas áreas urbanas, principalmente durante eventos de precipitações intensas e a utilização da modelagem hidráulica e hidrológica tem possibilitado a análises de diferentes soluções para a resolução de tais efeitos (FARIA; BARBASSA e SILVEIRA, 2014).

Estudos de modelagem hidráulica em canais artificiais são essenciais para projetos de drenagem urbana, principalmente na proposição de soluções para problemas associados a sistema de drenagem ineficiente, entre os quais, inundações de áreas baixas e erosão das superfícies de canais e de solos podendo causar prejuízos sociais, ambientais e econômicos.

Os programas computacionais de modelagem hidrológica e hidráulica têm ganhado espaço devido à crescente evolução da capacidade de processamento dos *hardwares*, o que tem permitido a utilização mais frequente dessa ferramenta e vêm se tornando uma alternativa cada vez mais interessante (ARAÚJO FILHO; OTA, 2016).

Este trabalho busca referenciar o estudo de ressalto hidráulico, aplicando modelagem computacional, com avaliação de fatores intervenientes à ocorrência do fenômeno em um canal artificial, situado no município do Crato-CE, Brasil.

### **1.1 Justificativa**

Sabe-se que o processo de urbanização altera significativamente os processos de escoamento natural da bacia hidrográfica, com o aumento do volume das águas pluviais escoadas superficialmente, incremento das vazões de pico dos corpos d'água, diminuição da recarga subterrânea, degradação da qualidade da água, geração de sedimentos, entre outros (VILLANUEVA et al, 2011).

No que se refere à gestão de recursos hídricos no Brasil, os novos modelos de gerenciamento dos rios urbanos buscam soluções de drenagem com enfoque integrado, procurando manter o curso d'água em seu leito natural, despoluindo suas águas e revitalizando seu entorno caminhando em direção a uma mudança significativa na política de drenagem, ao deixar para trás um paradigma ultrapassado – o da canalização de rios. (BONTEMPO et al, 2012).

A canalização dos rios como forma de gestão das águas urbanas fundamenta-se numa visão higienista, onde a ideia é afastar os poluentes para locais distantes da cidade, especialmente de suas áreas centrais. Também tem a intenção de combater as enchentes e as inundações. Entretanto, muitas vezes, a canalização pode produzir o efeito contrário, pois a retificação dos cursos d'água direciona e conduz de forma mais intensa o excesso de água a jusante, devido à redução das curvas naturais, o que aumenta a velocidade da água (TUCCI, 2008).

Os projetos de canalização de cursos d'água urbanas, normalmente são desenvolvidos para um determinado cenário de ocupação da bacia a montante, sem considerar a possibilidade de condições futuras de ocupação que podem ultrapassar significativamente as suposições efetuadas por ocasião do projeto provocando transbordamento das calhas e inundações em áreas urbanas (FCTH, 1999).

O entendimento dos fatores que proporciona a ocorrência de inundação em meio urbano é essencial na elaboração de medidas atenuantes aos impactos gerados, e em muitas situações as inundações urbanas estão intimamente ligada à formação de ressalto hidráulico, que promove elevação do nível da água ocasionando o transbordamento da calha dos canais produzindo alagamento nas áreas circunvizinhas.

Constata-se que modelos de urbanização que desconsideram as taxas de impermeabilização e adotam canalizações indiscriminadamente em suas ocupações, são bem mais suscetíveis aos fenômenos de inundação. Considerando que as inundações são sinônimos de prejuízos, de ordem econômica, social e ambiental, estes modos de ocupação possuem custos bem mais elevados do que a adoção de projetos que procuram diminuir a vazão das águas, através de recursos alternativos como a retenção (SILVA; SANTIAGO, 2007).

Em consequências dos inúmeros problemas, incômodos e prejuízos provocados decorrente da canalização de rios em bacias urbanas, este estudo apresenta modelagem computacional com ênfase na análise dos efeitos gerados pelas pontes, mudança de declividade e de rugosidade, na formação do ressalto hidráulico no canal artificial na cidade de Crato, Ceará.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral pesquisa é analisar o escoamento em um canal urbano, avaliando a presença de pontes, a variação de rugosidade das paredes e da declividade longitudinal do canal, com aplicação de modelagem computacional, utilizando o *software* HEC-RAS. Para estudo de caso, foram analisadas simulações na porção artificial do canal do Rio Granjeiro.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Com objetivos específicos pretende:

- Simular o escoamento, para três cenários de rugosidade do canal, cenário antes da destruição da calha do canal no ano de 2011, cenário de condições atuais (reforma parcial no canal) e condições de reforma completa;
- Identificar os efeitos da variação de rugosidade e da influência das pontes sobre a altura d'água no canal;
- Identificar os efeitos da mudança de declividade longitudinal para a formação de ressalto hidráulico no canal;
- Compreender os efeitos destrutivos e de transbordamento por toda extensão do canal.

### **1.3 Escopo**

A dissertação divide-se em seis capítulos. Capítulo 1 corresponde a introdução, onde foi apresentado uma descrição geral da pesquisa, seguida da justificativa para sua realização e dos objetivos propostos no trabalho.

A revisão bibliográfica está no capítulo 2, onde são apresentados conceitos básicos sobre escoamentos e características de ocorrências de ressaltos hidráulicos, bem como os efeitos que as pontes exercem sobre o tipo de escoamento e por fim apresentação de alguns modelos capazes de realizar modelagens hidráulicas em canais.

No capítulo 3, apresenta-se a região de estudo e as características locais que demonstram maior relevância para a ocorrência do ressalto, acrescentando-se os métodos adotados para obtenção dos resultados.

O capítulo 4 apresenta-se os resultados obtidos e discute-se o que forem pertinentes.

Os capítulos 5 e 6 refere-se as considerações finais e as referências bibliográficas adotadas, respectivamente.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Capítulo destinado a fornecer um embasamento teórico sobre o escoamento em rios e canais, assim como as características necessárias e as singularidades que contribuem para formação dos ressaltos hidráulicos, incluindo a descrição de ferramenta computacional aplicada na modelagem hidráulica.

### 2.1 Escoamento de rios e canais

Os escoamentos em rios e canais são os escoamentos que ocorrem em canais de superfície livres e estes canais podem ser classificados como *naturais*, que são os cursos d'água existente na natureza, como as pequenas correntes, córrego, rios, estuários etc. ou *artificiais* de seção aberta ou fechada construído pelo homem, como canais de irrigação, de navegação, aqueduto e galerias etc (PORTO, 2006).

A característica hidráulica fundamental do escoamento em rios e canais é que o escoamento se apresenta sempre com uma superfície livre, em contato com a pressão atmosférica, mesmos canalizados em forma de galerias eles são projetados com esta característica, exceto quando, para vazões muito superiores a vazão de projeto, e o escoamento nestas galerias se coloque sob pressão (SILVA, MASCARENHAS e MINGUEZ, 2007).

CHOW (1988) evidencia que o escoamento livre apresenta semelhanças hidráulicas com o escoamento em conduto forçados, mas apesar da similaridade, é muito mais complicado resolver problemas em canais abertos, uma vez que as tubulações de conduto forçados apresentam uma rugosidade bem definida; o escoamento ocorre em seção plena e normalmente circular, enquanto os canais abertos apresentam maiores variações de rugosidade e seções com diferentes formas geométricas.

O escoamento superficial e, em rios e canais, é retratado por duas equações: conservação de massa (equação 01) e quantidade de movimento (equação 02), denominadas também de equações de Saint-Venant.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (01)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gAS_0 - gAS_f \quad (02)$$

Em que:

$A(m^2)$ : Área

$Q(m^3/s)$ : Vazão

$t(s)$ : Tempo

$y(m)$ : Altura da lâmina de água

$S_0$  e  $S_f(m/m)$ : Declividade da linha de energia

$x(m)$ : Comprimento

$q(m^3/s.m)$ : Vazão unitária

$g(m^2/s)$ : Gravidade

Os primeiros termos da equação 02 são denominados termos de inércia, o terceiro refere-se a força de pressão. Os dois termos da direita são termos de gravidade e de atrito.

A aplicação das leis de conservação da massa e quantidade de movimento em um canal permite admitir algumas simplificações, adotadas nas deduções das equações. As simplificações são as seguintes: fluido incompressível e homogêneo, pressão hidrostática na vertical, escoamento unidimensional, variação gradual nas seções transversais, e a declividade da linha de atrito obtido pelo o uso das equações de movimento uniforme como Chezy e Manning (TUCCI, 2001).

O *software* HEC-RAS resolve as equações para o fluxo unidimensional em estado estável e instável, com módulos para transporte de sedimentos e qualidade da água (USACE, 2010).

Para a solução de equações de Saint-Venant, a solução do HEC-RAS é baseada no esquema numérico implícito de quatro pontos, também chamado esquema de caixa. Através deste método, para cada alcance do rio é gerado um sistema de equações, e a solução simultânea permite que a informação de todo o rio afete a solução em qualquer ponto (FERREIRA, FERNANDES e GOMES, 2017).

Conseqüentemente, o intervalo de tempo de simulação pode ser significativamente maior que em esquemas explícitos. As particularidades do método e a discretização das equações de Saint-Venant são apresentadas em USACE (2010b).

## **2.2 Tipos de regimes de escoamentos**

Os escoamentos em canais abertos podem ser classificados em muitos tipos e descritos de várias maneiras.

O escoamento permanente, tendo o tempo como critério, ocorre quando a profundidade do fluxo não varia, mantendo-se constante no intervalo de tempo considerado (CHOW, 1988). Outra maneira de visualizar o tipo de escoamento é analisar o parâmetro velocidade, se esta mantiver invariável no tempo, em módulo, direção e sentido, é uma garantia que os outros parâmetros hidráulicos em uma mesma seção transversal, como profundidade, vazão, área molhada etc., guardam um valor constante e existe entre as diversas seções do canal uma continuidade de vazão (PORTO, 2006).

Chow (1988) classifica o escoamento como não permanente ou variável se a profundidade do fluxo varia com o tempo. Porto (2006) estabelece se a velocidade, em certo ponto, varia com o passar do tempo, não existem uma continuidade de vazão e as características de vazão dependem por sua vez das coordenadas do ponto considerado e do tempo.

O escoamento não permanente é o padrão mais comum na hidráulica fluvial. Estes movimentos, nos quais as grandezas variam no espaço e no tempo apresentando numa mesma seção um período de ascensão seguindo de um período de recessão corresponde a ondas de translação, e entre seus exemplos mais importantes podemos destacar as ondas de cheias, as ondas geradas pelas as

operações em usinas hidrelétricas, as ondas provenientes de acidente ou rupturas de barragens entre outros (SILVA, MASCARENHAS e MINGUEZ, 2007).

Os dois primeiros termos são denominados termos de inércia, o terceiro refere-se à força de pressão. Os dois termos da direita da equação são termos de gravidade e atrito (TUCCI, 2001).

Quando se adota, como critério, o espaço, os escoamentos podem ser classificados em uniformes e não uniformes ou variados.

O escoamento é classificado como uniforme se as velocidades locais entre si são constantes ao longo de uma trajetória; as trajetórias são retilíneas e a linha d'água é paralela ao fundo do canal (PORTO, 2006). Se a profundidade do fluxo for a mesma em cada seção do canal é outra forma de definir o escoamento uniforme (CHOW, 1988).

Quando as trajetórias não são paralelas entre si e os elementos característicos do escoamento variam de uma seção para outra, o escoamento é dito não uniforme ou variado (PORTO, 2006).

O escoamento variado é classificado em dois tipos: Escoamento gradualmente variado e escoamento bruscamente variado. No escoamento gradualmente variado, os elementos característicos da corrente variam de forma lenta e gradual, de seção para seção, são exemplos as curvas de remanso a montante de barragens e a jusante de comportas de fundo. Os escoamentos bruscamente variados caracterizam-se pela elevação brusca da superfície livre associada a um processo de dissipação de energia em um comprimento curto de canal, os ressaltos hidráulicos são exemplos de escoamento bruscamente variado (PORTO, 2006).

### 2.3 Ressalto hidráulico

O ressalto hidráulico é um dos fenômenos mais interessantes e fascinantes da engenharia hidráulica que ocorre na transição de escoamento torrencial para fluvial, fenômeno que apresenta características bifásicas e macroturbulentas, por isso, é largamente utilizado para dissipar energia (PRÁ et al, 2016).

Marques, Drapeau e Verrete (1997) alertam que apesar do ressalto hidráulico ser umas das formas mais tradicionais de dissipação de energia, é também um fenômeno altamente turbulento que gera flutuações de pressão sobre o fundo da bacia, que podem levar à destruição da estrutura de dissipação de energia por diferentes mecanismos, tais como: fadiga, subpressão e cavitação.

A formação do ressalto acontece devido à presença de um escoamento supercrítico em contato com uma estrutura singular ou seção de controle que pode ser uma comporta de regularização, um vertedor, um alargamento ou uma mudança brusca na declividade do leito, uma modificação na rugosidade, a presença de pontes, entre outras (CHOW, 1988).

Chaudhry (2008) destaca que o ressalto hidráulico que se forma em um canal horizontal retangular é referido como um ressalto clássico, sendo classificado de acordo com o número de Froude do escoamento a montante, em quatro formas, cada um dessas formas tem um padrão de fluxo distinto como descrito a seguir.

O ressalto fraco forma-se com um número de Froude entre 1,0 e 2,5 e apresenta uma leve agitação na superfície que resulta em muito pouca dissipação de energia.

Para um número de Froude de 2,5 a 4,5 tem-se um ressalto oscilante, onde o jato na entrada do ressalto oscila de baixo para o topo em um período irregular. A turbulência pode estar perto do fundo do canal em um instante e na superfície da água em um próximo instante, essas oscilações resultam na formação de ondas irregulares, que podem persistir por uma longa distância a jusante do

ponto de formação do ressalto. Eles podem causar danos consideráveis as margens do canal.

O ressalto estacionário forma-se quando o número de Froude se mantém entre 4,5 e 9,0, este ressalto ocorre de forma equilibrada na mesma posição e a dissipação de energia é elevada.

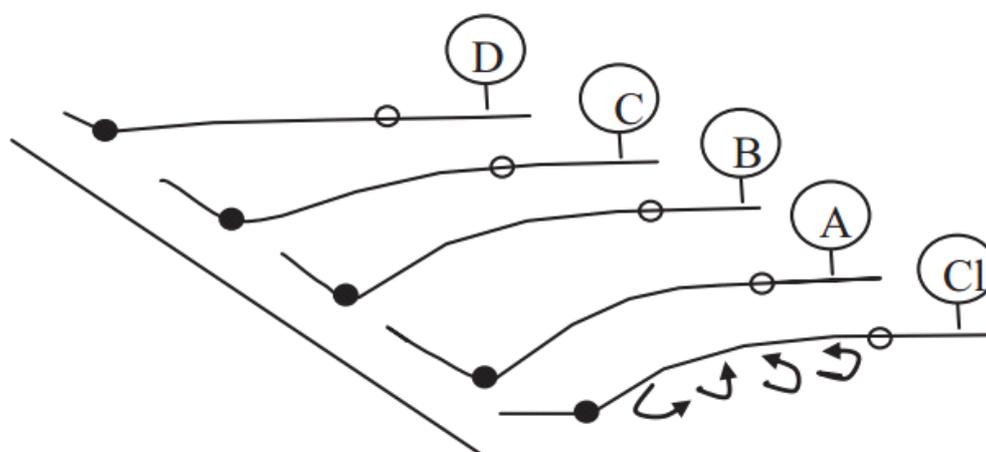
Para o número de Froude superior a 9,0, tem-se um ressalto forte. Neste caso, a diferença entre as profundidades conjugadas é grande e a taxa de dissipação energia é extrema. Porto (2006) recomenda que os ressaltos fortes não devem ser utilizados como forma de dissipar energia devido aos efeitos colaterais sobre as estruturas de dissipação, como processos abrasivos ou mesmo cavitação.

Por suas características e sua relevância na hidráulica, os ressaltos tem sido estudado desde os primeiros anos do século passado, mas muitas características do ressalto hidráulico ainda requerem uma investigação adicional, por exemplo, efeitos da declividade, processo de arrasto, efeito da rugosidade do leito nas profundidades do conjugado, etc. (PALERMO e PAGLIARA, 2017).

### **2.3.1 Efeitos da declividade**

Os ressaltos hidráulicos formados em canais íngremes podem ser classificados em quatro tipos (Figura 1): A-Jump, se o ressalto tem formação no início do aclave; B-Jump, se o ressalto ocorrer sobre parte do aclave; C-Jump, se o final do ressalto coincidir com o início do aclave e D-Jump, se o ressalto iniciar e terminar sobre a parte inclinada do canal (KATEB; DEBABECHE; RIGUET, 2015).

Figura 1 – Classificação dos ressaltos hidráulicos formados em canais íngremes.



Fonte: Kateb, Debabeche e Riguet (2015)

Henderson (1966) evidencia que, nos ressaltos que se formam em uma inclinação íngreme, a questão do comprimento do ressalto torna-se importante, pois a equação do momento deve agora incluir o peso da água contida no próprio ressalto. Carollo, Ferro e Pampalone (2012) ao pesquisar os efeitos da declividade sobre a formação dos ressaltos, propuseram uma nova equação para o cálculo do comprimento de ressalto produzido em canais rugoso e em ressalto do tipo B-Jump. Bejestan e Shokrian (2015), seguindo a mesma linha de pesquisa, desenvolveram uma expressão matemática para a relação de profundidade alternada de B-Jump em leito inclinado.

### **2.3.2 Efeitos da Rugosidade**

Chaudhry (2008) destaca o efeito que a rugosidade assume nos escoamento em canais livre, uma vez que a componente do peso da água na direção à jusante provoca aceleração do fluxo (leito natural), enquanto que o esforço de cisalhamento devido à rugosidade presente nas paredes do canal oferece resistência ao fluxo. Dependendo da resultante dessas forças de aceleração e desaceleração, o fluxo pode acelerar ou desacelerar. Se a força resistiva é maior do que a componente do peso, a velocidade do fluxo diminui e, para satisfazer a equação de continuidade, a profundidade do fluxo aumenta.

Ead e Rajaratnam (2002) realizaram experimentos com canais de paredes rugosas, onde concluíram que a profundidade da água necessária para formação de um ressalto hidráulico era sensivelmente menor que a profundidade em canais de paredes lisas. Além disso, o comprimento do ressalto era cerca de metade daqueles em paredes lisas e o esforço de cisalhamento do leito e nas paredes rugosas era cerca de 10 vezes maior do que o esforço em paredes lisas.

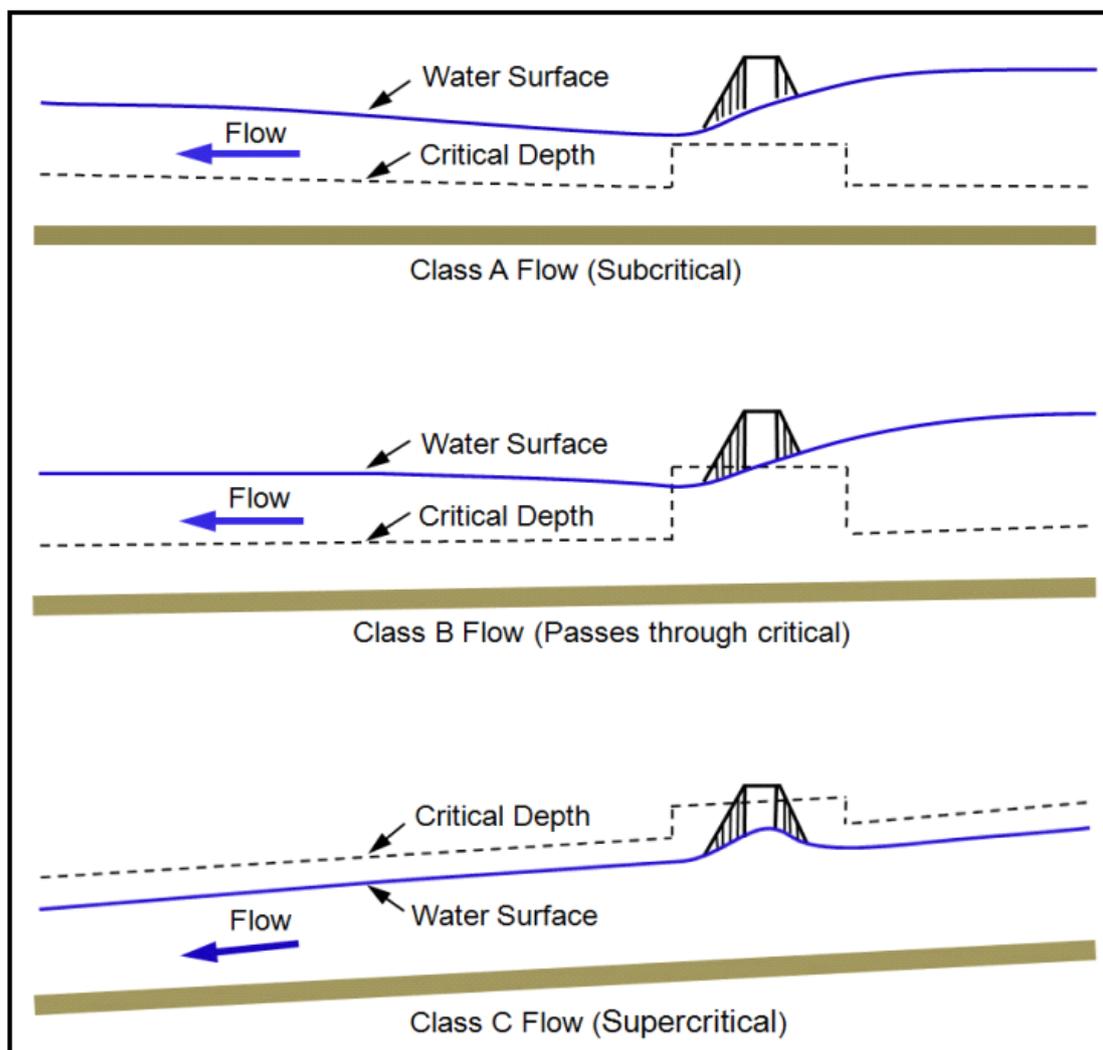
Carollo, Ferro e Pampalone (2007) realizaram uma investigação experimental sobre a formação dos ressaltos hidráulicos em canais de paredes rugosas, onde testaram positivamente a confiabilidade de uma nova solução da equação de momento, para a relação de profundidade sequencial em função do número de Froude e a relação entre a altura de rugosidade e a profundidade de fluxo supercrítico a montante.

## **2.4 Escoamento em pontes**

A ponte ao ser inserida em um rio, normalmente constitui um estreitamento do canal natural e um obstáculo ao fluxo, isto resulta em uma perda de energia com a contração e mais significativamente com a expansão para largura do canal completo. Para fornecer energia necessária, a fim de superar a perda de energia, o nível da água se eleva a montante, formando-se o remanso (HAMILL,1999).

Os escoamentos em pontes podem ser classificados em escoamento de baixo fluxo, onde a lâmina da água não atinge a parte superior da ponte e pode ser subdividido em classes A, B, e C, em que: a classe A representa o escoamento fluvial a montante e a jusante da ponte; a classe B escoamento fluvial a montante e a jusante, mas sendo supercrítico na passagem da ponte e a classe C onde o escoamento é sempre supercrítico. A Figura 2 ilustra as classes citadas (USACE, 2010).

Figura 2 – Ilustrações dos escoamentos de baixo fluxo em pontes nas classes A, B e C.



Fonte: USACE (2010a)

O fluxo em muitas ocasiões pode ocorrer sobre a estrutura da ponte, onde todo o corpo da ponte fica submerso e esta passaria a funcionar como uma barragem vertendo. E ainda existe uma terceira forma de escoamento em que o fluxo atinge a parte inferior da estrutura da ponte e esta passaria a funcionar hidráulicamente como um orifício, semelhante a um bueiro (FHWA, 2012).

Atabay e Seckin (2009) estudaram o desempenho de seis métodos que são usados nos *softwares* ISIS e HEC-RAS para cálculo de escoamento através de pontes. Os métodos avaliados foram o método da energia (HEC 2002), o método do momento (HEC 2002), o método WSPRO, método de Yarnell's presentes no HEC-RAS. E os métodos USBPR, e o da ponte de arco contido no ISIS. Onde concluíram

que o método de energia e o método de momento, no HEC-RAS, são os mais precisos para calcular o fluxo em torno das vias navegáveis em pontes.

## **2.5 A macrodrenagem em bacias urbanas**

O problema das cheias urbanas é um dos principais desafios da atualidade, especialmente em grandes cidades de países em desenvolvimento, onde, entre outras coisas, os recursos são escassos, a pressão social é maior e a industrialização rápida e tardia nem sempre foi acompanhada pela infraestrutura que seria necessária para este desenvolvimento (REZENDE, MIGUEZ e VERÓL; 2013). A necessidade do entendimento dos processos ocorridos no escoamento pluvial e as implicações do processo de urbanização no seu funcionamento são de relevada importância para o planejamento sustentável de bacias urbanas (GARCIA e PAIVA, 2006).

Na medida em que a população impermeabiliza o solo e acelera o escoamento através de condutos e canais a quantidade de água que chega ao mesmo tempo no sistema de drenagem aumenta produzindo inundações mais frequentes do que as que existiam quando a superfície era permeável e o escoamento se dava pela calha natural (TUCCI,2003).

Há uma necessidade evidente de incorporação de ferramentas para planificação de ações preventivas e corretivas da drenagem urbana, de maneira integrada na bacia hidrográfica (MELLER e PAIVA, 2007). Uma das ferramentas que possibilita a análise de diferentes soluções é a modelagem hidráulica e hidrológica, mesmo diante da necessidade de dados de boa qualidade e de origem confiável, o que ainda é escasso no Brasil, pois o monitoramento de bacias está longe do ideal (FARIA, BABASSA e SILVEIRA; 2014).

Neto, Batista e Coutinho (2016) recorreram a simulação hidrológico-hidráulica, utilizando os modelos HEC-HMS e HEC-RAS para o desenvolvimento e geração de mapa de indicadores de perigo e áreas inundáveis no município de Ipojuca/PE.

Abreu, Sobrinha e Brandão (2017), analisaram a influência da distribuição temporal das chuvas em eventos hidrológicos extremos na bacia do Córrego do Gregório (São Carlos, São Paulo), adotando períodos de retorno de 25, 50 e 100 anos, seguindo as diretrizes do método de Huff 1º quartil e o método dos blocos alternados e simulando as áreas de inundação, com o software HEC-GeoRAS, apresentando resultados relevantes.

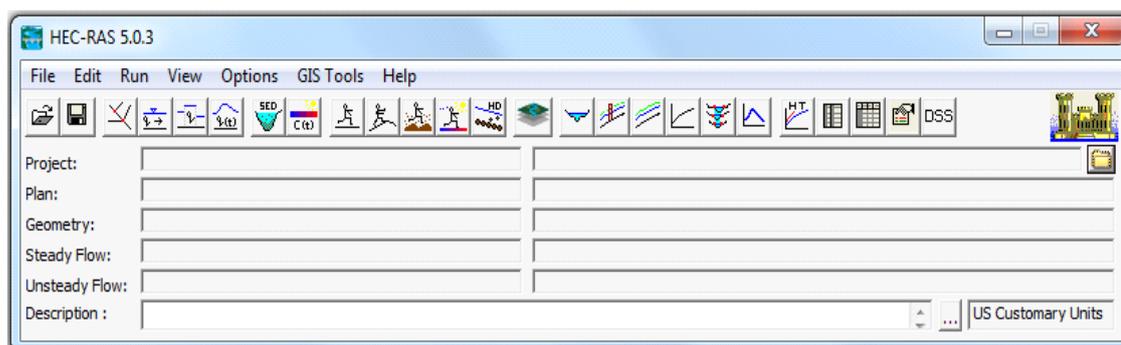
## 2.6 Modelagem computacional - Software HEC RAS

Os programas computacionais de modelagem hidrológica e hidráulica têm ganhado espaço devido à crescente evolução da capacidade de processamento dos *hardwares*, o que tem permitido a utilização mais frequente dessa ferramenta e vêm se tornando uma alternativa cada vez mais interessante (ARAÚJO FILHO; OTA, 2016).

Existem várias ferramentas computacionais para modelagem hidráulica de rios e canais, LISFLOOD-FP desenvolvido pela Universidade de Bristol (Reino Unido) para simulação de inundações uni-bi-dimesnional, WSPRO desenvolvido pela Federal Highway Administration (FHWA, 1998) que apresenta componentes para o calculo do fluxo em pontes, o FLO-2D que realiza simulação 2D e estima o fluxo máximo de profundidade através dos elementos de grade, em condições de fluxo estáveis e não estáveis e o programa *Hydrologic Enginnering Center's River Analisys System* – HEC-RAS desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers.

O HEC-RAS tornou-se um *software* bem difundido por diversos fatores, podendo-se destacar a facilidade de uso, com relação aos aspectos interativos e à aplicação prática com menor quantidade de inclusão de dados. A Figura 3 apresenta a interface do programa HEC-RAS.

Figura 3 – Interface inicial do Software HEC-RAS



O HEC-RAS permite o cálculo hidráulico de escoamento unidimensional, em regime permanente e não permanente, para canais naturais e artificiais. Os cálculos podem ser realizados em regimes subcríticos, supercrítico e misto, onde poderão ocorrer mudanças do regime torrencial para fluvial ou de fluvial para torrencial, além da capacidade do cálculo hidráulico do escoamento em pontes, devido à incorporação dos recursos E431 (USGS 1976) e do WSPRO (FHWA 1998) que possuem componentes especificamente formulados para a análise do fluxo através das aberturas em pontes (USACE, 2010b).

As aplicações do HEC-RAS como ferramenta para estudos de escoamento em canais naturais ou artificiais são várias, entre as quais podemos citar Cabral, Campos e Silveira (2016) que utilizaram uma integração entre HEC-RAS e HEC-HMS com um SIG, para obter informações a cerca da área de inundação provocada pela cheia do Rio Granjeiro, Crato, Ceará.

Fernandez, Mourato e Moreira (2013) utilizaram o HEC-RAS em comparação com LISFLOOD-FP, na delimitação de zonas inundáveis, no rio Lis, Portugal. Oliveira et al (2016) utilizou o HEC-RAS para determinar o limite da faixa de inundação para o parque linear do córrego macambira em Goiânia. Calçada *et al.* (2003), recorreram ao HEC-RAS para proceder a delimitação de áreas inundáveis em Timor Leste. Rao e Hromadka II (2016) utilizaram o modelo HEC-RAS e o WSPG em modelagem numérica de escoamento rapidamente variado.

### 3 METODOLOGIA

O processo metodológico empregado no trabalho está apresentado em duas partes. Na primeira parte, são apresentados os métodos de cálculo utilizados pelo HEC-RAS para solução do escoamento em canais. Na segunda parte da metodologia, tem-se a descrição do estudo de caso.

#### 3.1 Modelagem hidráulica aplicando o HEC-RAS

Algumas suposições simplificadoras se encontram nas expressões analíticas para utilização do programa. Segundo OLIVEIRA (2005), destacam-se:

- O escoamento é unidimensional, isto é, características como vazão e níveis de água apenas se alteram no sentido longitudinal do escoamento, e nas seções transversais a distribuição de velocidade é considerada como sendo uniforme e a curvatura da superfície livre horizontal;
- O escoamento é gradualmente variado, onde a curvatura da superfície livre é pequena, o que possibilita dispensar as acelerações verticais e a equação da energia usada, fundamenta-se na proposição de que há uma distribuição uniforme da pressão hidrostática em cada seção transversal;
- As perdas de energia por atrito são determinadas através da expressão empírica de Manning;
- O valor de coeficiente de Manning utilizado característico da rugosidade da parede do canal será o mesmo para todo o canal principal;
- As perdas por expansão e contração possuirão o mesmo valor em todo o trecho em estudo;
- Os efeitos dos ventos e os efeitos termodinâmicos sobre a superfície livre são desconsiderados;
- O fluido é homogêneo e incompressível, o que implica que a densidade do mesmo é considerada constante no espaço e no tempo.

A execução de um modelo no HEC-RAS baseia-se na combinação de dois módulos de entrada de dados, para compor um plano de simulação. Os

módulos de entrada de dados, conforme descritos a seguir, são: (a) Dados de Geometria e (b) Dados de Escoamento.

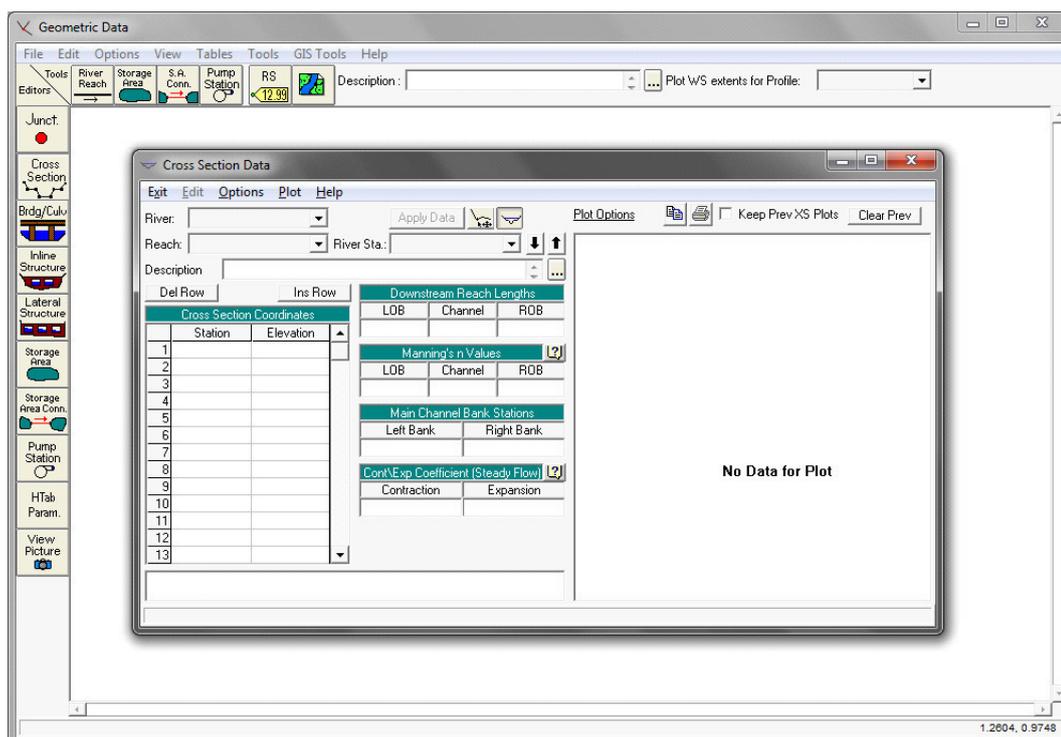
#### (a) Dados de Geometria

Diagrama esquemático do curso d'água (desenho da bacia do trecho estudado, numerado em ordem crescente de jusante para montante);

- Dados topográficos das seções transversais (perfis transversais);
- Distância entre as seções transversais;
- Indicação das margens nas seções transversais
- Indicação do coeficiente de Manning do leito e das margens nas seções transversais
- Indicação de coeficientes de contração e expansão.

Destaca-se que pontes, bueiros, barragens e outros elementos de mesma natureza da estrutura hidráulica, têm entrada no modelo como dados de geometria, Figura 4.

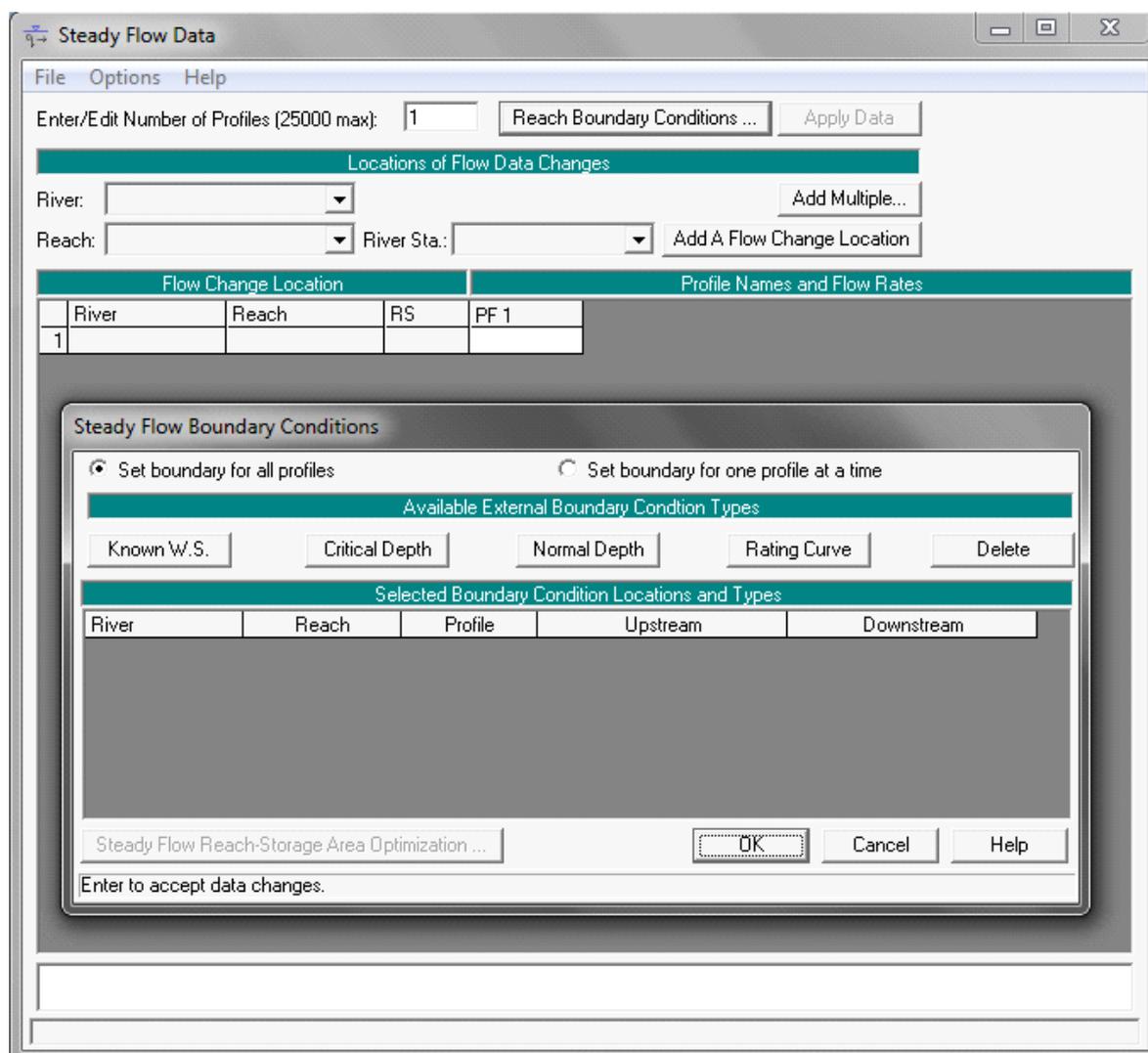
Figura 4 – Janela para entrada de dados de geometria



## (b) Dados de Escoamento

- Escolha do regime de escoamento: permanente, não permanente;
- Condições de Contorno;
- Informações sobre vazões máximas de entrada nos trechos.

Figura 5 – Janela para entrada de dado de escoamento



### 3.2 Características do modelo matemático (HEC-RAS)

Para a modelagem do escoamento analisado no trabalho, levou-se em consideração o escoamento gradualmente variado, que ocorrem em trechos retilíneos: o escoamento bruscamente variado, os ressaltos hidráulicos, que

acontecem em locais pontuais devido à presença de singularidades e o escoamento em torno e em contato com as pontes. A seguir serão apresentados às características do modelo matemático inserido no software HEC-RAS que possibilita a simulação.

### **3.2.1 Cálculo do perfil da linha d'água – Escoamento Gradualmente Variado**

Na utilização do HEC-RAS para a situação de escoamento permanente e gradualmente variado, as equações da energia e da continuidade são empregadas em um processo iterativo para o cálculo do perfil da linha da água. A equação da energia está apresentada a seguir (TAVARES, 2005):

$$WS_2 + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} = WS_1 + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} + h_{L(1,2)} \quad (03)$$

Em que, para duas seções transversais consecutivas, tem-se:

$WS_1, WS_2$  (m): Elevações da superfície da água;

$\alpha_1, \alpha_2$ : Coeficiente de ponderação das velocidades;

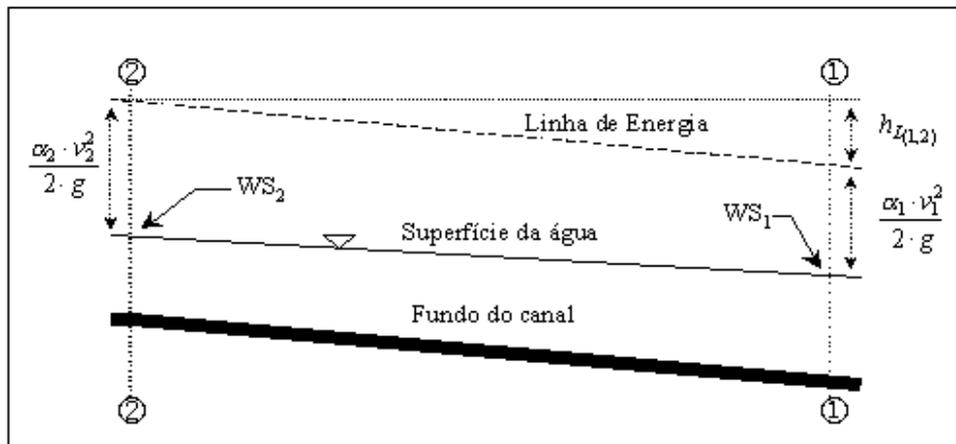
$v_1, v_2$  (m/s): Velocidades médias;

$g$  (m/s<sup>2</sup>): Aceleração da gravidade;

$h_{L(1,2)}$  (m): Perda de carga hidráulica entre as seções;

Os termos da equação da energia estão representados na Figura 06:

Figura 6 – Representação dos termos da Equação da Energia



Fonte: TAVARES (2005)

A perda de carga hidráulica entre as duas seções transversais é composta de perdas por fricção e perdas por contração ou expansão. A equação para as perdas de carga é a seguinte (TAVARES, 2005):

$$h_{L(1,2)} = L \cdot \overline{S_f} + C \cdot \left| \frac{\alpha_2 v_2^2}{2 \cdot g} - \frac{\alpha_1 v_1^2}{2 \cdot g} \right| \quad (02)$$

Em que, para duas seções transversais consecutivas:

$L$  (m): Comprimento médio do trecho entre duas seções transversais;

$\overline{S_f}$  (m/m): Declividade média da linha de energia entre duas seções transversais;

$C$ : Coeficiente de perda por contração ou expansão.

A declividade da linha de energia em cada seção transversal é calculada, a partir da equação de Manning, pela seguinte expressão:

$$S_f = \left( \frac{n \cdot Q}{k \cdot A \cdot R^{2/3}} \right)^2 \quad (03)$$

Em que, para uma dada seção:

$n$  ( $m^{1/3}s$ ): Coeficiente de Manning;

$A$  ( $m^2$ ): Área de escoamento;

$Q$  ( $m^3/s$ ): Vazão;

$R$  (m): Raio hidráulico. Corresponde a razão entre área molhada e perímetro molhado da seção;

$k$  : Para o Sistema de Unidades Inglês seu valor é 1,486 e para o SI seu valor é 1.

A altura de elevação desconhecida ( $WS_2$ ) é determinada por uma solução iterativa das Equações (01) e (02). O procedimento computacional básico é descrito a seguir:

**Passo 1** – Estabelecem-se as condições limite de jusante, se o escoamento for subcrítico; ou as condições limite de montante se o escoamento for supercrítico. As condições limite incluem a altura de elevação inicial, a vazão e seção transversal de início;

**Passo 2** – Considerando o caso de escoamento subcrítico, uma altura de superfície da água é estimada na próxima seção transversal (Seção 2) a montante da condição limite (Seção 1);

**Passo 3** – Baseado no valor estimado da elevação de superfície da água determina-se a correspondente carga cinética;

**Passo 4** – Com os valores do passo 3, calcula-se o valor e se resolve a Equação (02), obtendo  $h_{L(1,2)}$ ;

**Passo 5** – Com os valores dos passos 3 e 4, resolve-se a Equação (01), obtendo  $WS_2$ ;

**Passo 6** – Compara-se o valor de  $WS_2$  obtido com o valor estimado no passo 2;

**Passo 7** – Repetem-se os passos 2 a 6 até que seja atingida a tolerância exigida.

Assim, determina-se a altura da linha de água em cada seção do trecho estudado partindo do nível da seção de jusante (escoamento fluvial) ou de montante (escoamento torrencial), dando forma ao perfil superficial do escoamento.

### **3.2.2 Cálculo do perfil da linha d'água – Ressalto hidráulico**

A equação da *força específica* ou, segundo outros autores, como *impulsão total* (equação 04) é utilizada no HEC RAS para determinar o tipo de escoamento, assim como descrever a ocorrência dos ressaltos hidráulicos. (USACE, 2010b)

$$Fe = \frac{Q^2 \beta}{gA} + Ay \quad (04)$$

Em que:

$Fe$  (m<sup>3</sup>): Força específica;

$A$  (m<sup>2</sup>): Área de fluxo na qual há movimento;

$\beta$ : coeficiente de momento;

$Q$  (m<sup>3</sup>/s): vazão;

$y$  (m): profundidade da superfície da água para o centróide da área;

$g$  (m<sup>2</sup>/s): Gravidade.

Os cálculos de regime de fluxo misto para análise de fluxo estável no HEC-RAS são realizados da seguinte forma (USACE, 2010b):

**Passo 1** – Primeiro, um perfil subcrítico da superfície da água é calculado começando de uma condição de limite conhecida a jusante. Durante os cálculos subcríticos, todo local onde se localiza a profundidade crítica, o programa sinaliza como ponto padrão para análise posterior.

**Passo 2** – Em seguida, o programa inicia um cálculo de perfil supercrítico iniciando a montante. O programa começa com uma condição de limite de montante especificada pelo usuário. Se a condição de limite é supercrítica, o programa verifica se tem uma força específica maior do que a superfície de água subcrítica previamente calculada neste local. Se a condição de contorno supercrítico tem uma força específica maior, então esta condição é adotada para controlar o escoamento e o programa começará a calcular um perfil supercrítico a partir desta seção. Se a resposta subcrítica tiver uma força específica maior, então o programa começa a

pesquisar a jusante para encontrar um local onde tenha assumido uma profundidade crítica na execução subcrítica. Quando uma profundidade crítica está localizada, o programa usa-a como uma condição de contorno para iniciar um cálculo de perfil supercrítico.

**Passo 3** – O programa calcula um perfil supercrítico na direção à jusante até atingir uma seção transversal que tem tanto uma resposta subcrítica válida como uma resposta supercrítica. Quando isso ocorre, o programa calcula a força específica de ambas as elevações da superfície da água. Qualquer resposta que tenha maior força específica é considerada solução correta. Se a resposta supercrítica tem uma força específica maior, o programa continua fazendo cálculos supercríticos na direção à jusante e comparando a força específica das duas soluções. Quando o programa atinge uma seção transversal cuja resposta subcrítica tem uma força específica maior do que a resposta supercrítica, o programa assume que ocorreu um ressalto hidráulico entre essa seção e a seção transversal anterior.

**Passo 4** – O programa então vai para a local seguinte a jusante que apresenta uma resposta de profundidade crítica e continua o processo.

### ***3.2.3 Cálculo do perfil da linha d'água - escoamentos em pontes***

O escoamento em pontes subdivide-se em duas partes, em escoamento de baixo fluxo, onde a lâmina da água não atinge a plataforma da ponte, e escoamento de alto fluxo onde a lâmina de água atinge e/ou sobrepõe tabuleiro da ponte (USACE, 2010b).

#### *(a) Escoamento de baixo fluxo*

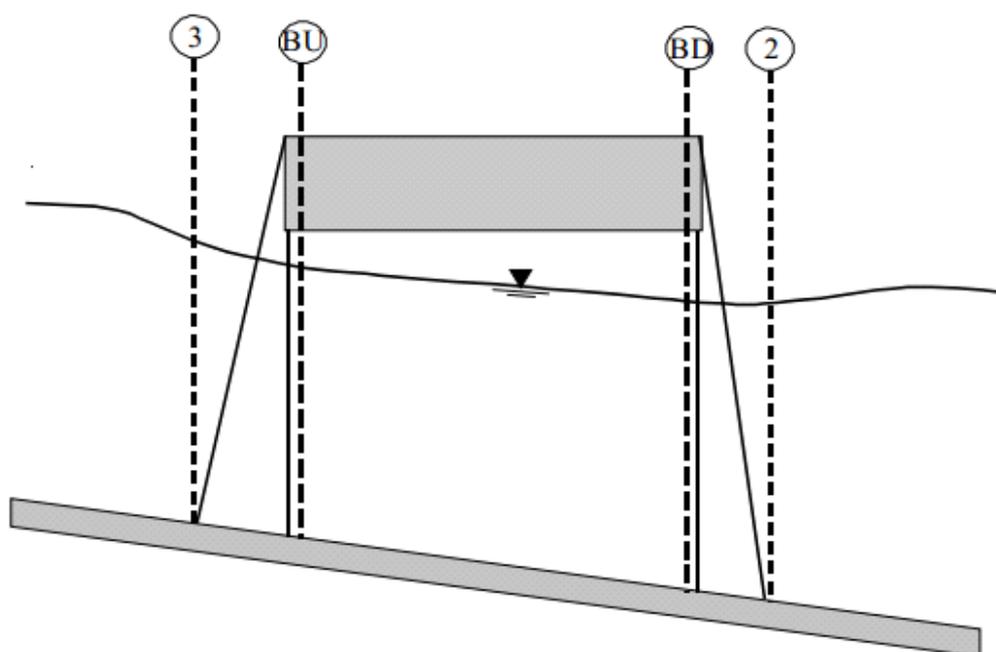
Para o escoamento de baixo fluxo, o HEC-RAS fornece quatro metodologias que podem ser selecionada pelo usuário, que são: equação da energia, método do momento, equação de Yarnell e o método FHWA WSPRO, onde o usuário deve selecionar o método apropriado para a descrição do escoamento. A escolha do método deve levar em consideração se escoamento é Classe A (escoamento fluvial a montante e a jusante da ponte), Classe B (escoamento fluvial

a montante e a jusante da ponte, mas é supercrítico na passagem da ponte) e Classe C (escoamento é sempre supercrítico).

– Método da energia

O método baseado na energia trata uma ponte da mesma maneira que uma seção transversal natural do rio, exceto a área abaixo da ponte onde a superfície da água é subtraída da área total, e aumenta o perímetro molhado em contato com a estrutura da ponte. Conforme descrito anteriormente, o programa formula duas seções cruzadas dentro da ponte, combinando as informações básicas das seções 2 e 3 com a geometria da ponte. Conforme mostrado na Figura 07, para fins de discussão, essas seções transversais serão referidas como seções BD (abaixo da ponte) e BU (Acima da ponte).

Figura 7 – Representação da ponte e as seções próximas e no interior da ponte



Fonte: USACE (2010b)

A sequência de cálculos começa com um cálculo do passo padrão a jusante da ponte (seção 2) para o interior da ponte (seção BD). Em seguida o programa executa um passo padrão através da ponte (da seção BD para seção BU). O último cálculo é sair da ponte (a partir de seção BU para a seção 3). O método

baseado na energia requer valores de Manning para perdas por atrito e os coeficientes de contração e de expansão para cálculos das perdas de transição.

– Método do momento

Conforme o USACE (2010b) o método momento baseia-se no calculo do equilíbrio do momento entre a seção transversal 2 e a seção transversal 3. O equilíbrio do momento é realizado em três etapas. A primeira etapa é realizar o calculo do balanço do momento da seção transversal 2 para a seção transversal BD dentro da ponte.

A equação 05, é utilizada para o calculo do equilíbrio de momento:

$$A_{BD}Y_{BD} + \frac{\beta_{BD}Q_{BD}^2}{gA_{BD}} = A_2Y_2 + \frac{\beta_2Q_2^2}{gA_2} - A_{PBD}Y_{PBD} + F_f - W_x \quad (05)$$

Em que:

$A_2, A_{BD}$  (m<sup>2</sup>): Área de fluxo ativo na seção 2 e BD, respectivamente;

$A_{PBD}$  (m<sup>2</sup>): Área obstruída do cais no lado a jusante;

$Y_2, Y_{BD}$  (m): Distância vertical da superfície da água ao centro de Gravidade da área de fluxo A2 e ABD, respectivamente;

$Y_{PBD}$  (m): Distância vertical da superfície da água ao centro Gravidade da área do cais molhado no lado a jusante;

$\beta_2, \beta_{BD}$  : Coeficientes de ponderação da velocidade para o impulso equação;

$Q_2, Q_{BD}$  (m<sup>3</sup>/s): Vazão;

$g$  (m/s<sup>2</sup>): Aceleração da gravidade;

$F_f$  (m<sup>3</sup>): Força externa devido ao atrito, por unidade de peso de água;

$W_x$  (m<sup>3</sup>): Força devido ao peso da água na direção de Fluxo, por unidade de peso de água.

A segunda etapa é calcular o balanço do momento da seção BD até a seção BU, calculado através da equação 06:

$$A_{BU}Y_{BU} + \frac{\beta_{BU}Q_{BU}^2}{gA_{BU}} = A_{BD}Y_{BD} + \frac{\beta_{BD}Q_{BD}^2}{gA_{BD}} + F_f - W_x \quad (06)$$

A etapa é o cálculo do balanço do momento da seção BU para a seção 3, calculado através da equação 07 :

$$A_3Y_3 + \frac{\beta_3Q_3^2}{gA_3} = A_{BU}Y_{BU} + \frac{\beta_{BU}Q_{BU}^2}{gA_{BU}} + A_{PBU}Y_{PBU} \frac{1}{2} C_D \frac{\beta_{PBU}Q_3^2}{gA_3^2} + F_f - W_x \quad (07)$$

Em que:

$C_D$  : Coeficiente de fluxo em torno dos pilares.

O método do momento requer o uso de coeficientes de rugosidade para a estimativa da força de atrito e do coeficiente de arrasto para a força de resistência nos pilares. O coeficiente de arrasto é utilizado para estimar a força devido o movimento da água em torno dos pilares, a separação do fluxo e o peso resultante que ocorre para jusante. O coeficiente varia de acordo com a forma do pilar.

– Equação de Yarnell

A equação de Yarnell (equação 08) é uma equação empírica usada para prever a mudança na superfície da água de jusante para montante da ponte. A equação é baseada em aproximadamente 2600 experimentos de laboratório em que os pesquisadores variaram a forma dos pilares, a largura, o comprimento, o ângulo e a taxa de fluxo. Contudo, o método de Yarnell só deve ser usado em pontes em que a maior parte das perdas de energia está associada aos pilares.

$$H_{2-1} = 2K(K + 10\omega - 0.6)(\alpha + 15\alpha^4) \frac{V^2}{2g} \quad (08)$$

Em que:

$H_{2-1}$  (m): elevação da superfície da água entre as seções 3 a 2;

$K$  : Coeficiente de Yarnell;

$\omega$  : Relação entre a velocidade e a profundidade;

$\alpha$  : Área obstruída pelos pilares dividida pelo área total desobstruída na seção 2;

$v$  (m/s): Velocidade média;

$g$  (m/s<sup>2</sup>): Gravidade.

– Método FHWA WSPRO

Os cálculos hidráulicos de baixo fluxo realizado pelo WSPRO, programa de computador da Administração Federal de Rodovia (FHWA), foi adaptado como opção para sistemas hidráulicos de baixo fluxo no HEC-RAS. O WSPRO teve a metodologia ligeiramente modificada para se encaixar no conceito HEC-RAS de locais de seção transversal ao redor e através de uma ponte. O método WSPRO calcula o perfil da superfície da água através de uma ponte resolvendo a equação de energia (USACE, 2010b).

*(b) Escoamento de alto fluxo*

O programa HEC-RAS tem a capacidade de calcular fluxos elevados (fluxos que entram em contato com parte superior da ponte) pela equação de energia (método do passo padrão) ou usando equações hidráulicas separadas para pressão e descargas. Conforme USACE (2010b) as duas metodologias são explicadas a seguir.

- Método da energia

O método baseado em energia é aplicado a fluxos elevados da mesma maneira que é aplicado a fluxos baixos. Os cálculos baseiam-se no balanceamento da equação da energia em três etapas através da ponte. As perdas de energia são baseadas em perdas por atrito (fricção) e por transição de contração e expansão.

- Método de fluxo de pressão e descarga

A segunda metodologia para o cálculo de fluxos elevados é o uso de equações hidráulicas separadas para calcular o fluxo como pressão e descarga ou vazão.

O fluxo de pressão ocorre quando o escoamento entra em contato com a parte baixa do tabuleiro da ponte, se o fluxo entra em contato com o lado a montante da ponte, ocorre um remanso e o fluxo em orifício é estabelecido. O programa lidará com dois casos de fluxo de orifício; primeiro é quando apenas o lado a montante da ponte está em contato com a água e o cálculo é realizado por meio da equação 08; e o segundo é quando a abertura da ponte está fluindo completamente cheia. O programa HEC-RAS selecionará automaticamente a equação apropriada, dependendo da situação de fluxo (FHWA, 2012).

$$Q = C_d A_{BU} \sqrt{2g} \left[ Y_3 - \frac{Z}{2} + \frac{a_3 V^2_3}{2g} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (08)$$

Em que:

$Q$  (m<sup>3</sup>/s): Descarga total através da abertura da ponte;

$C_d$  : Coeficientes de descarga para fluxo de pressão;

$A_{BU}$  (m<sup>2</sup>): Área líquida da abertura da ponte na seção BU;

$Y_3$  (m): Profundidade hidráulica na seção 3;

$Z$  (m): Distância vertical da plataforma máxima da ponte até a elevação média do leito do rio na seção BU.

O coeficiente de descarga  $C_d$  pode variar de acordo com a profundidade da água a montante. Os valores para  $C_d$  variam de 0,27 a 0,5, com um valor típico de 0,5 comumente usados na prática. O usuário pode inserir um valor fixo para esse coeficiente ou o programa computará um com base na quantidade que a entrada está submersa.

Quando ambos os lados a montante e a jusante da ponte estão submersos, é utilizada a equação (09) de orifício de fluxo completo.

$$Q = CA\sqrt{2gH} \quad (09)$$

Em que:

$C$  : Coeficiente de descarga para pressão totalmente submersa fluxo. O valor típico de  $C$  é 0,8;

$H$  (m): A diferença entre a elevação do gradiente de energia a montante e a elevação da superfície da água a jusante;

$A$  (m<sup>2</sup>): Área líquida da abertura da ponte.

No entanto se o fluxo cobre toda a extensão da ponte assemelhando a um vertedor, deve utilizar a seguinte expressão;

$$Q = CLH^{\frac{3}{2}} \quad (10)$$

Em que:

$Q$  (m<sup>3</sup>/s): Descarga total vertendo;

$C$  (m<sup>1/2</sup>/s): Coeficiente de descarga do vertedor;

$L$  (m): Largura da ponte que funciona como vertedor;

$H$  (m): Diferença entre elevação a montante e na crista.

Em condições de fluxo livre, o coeficiente de descarga  $C$  varia 1,38 - 1,71 em valores de unidade.

(c) Selecionando o modelo apropriado para modelagem das pontes

Existem várias opções disponíveis para o usuário selecionar o método apropriado para calcular o perfil da superfície da água através de uma ponte. Para o fluxo onde superfície da água escoar abaixo plataforma da ponte, o usuário pode selecionar qualquer um ou todos os quatro métodos disponíveis. Para fluxos elevados, onde o escoamento entra em contato com a plataforma da ponte o usuário deve escolher entre o método baseado na energia ou o da pressão e a abordagem do fluxo do vertedouro. A discussão a seguir fornece diretrizes básicas para selecionar os métodos apropriados para várias situações.

– Escoamento de baixo fluxo

Para o escoamento que não tem contato com a plataforma da ponte os métodos energia e do balanço do momento são fisicamente os mais indicados. Ambos os métodos representam perdas por fricção e por mudanças na geometria através da ponte. O método da energia representa perdas adicionais devido a transições de fluxo e turbulência através do uso de perdas de contração e expansão. No entanto, o método da energia não contabiliza perdas associadas com a forma dos pilares. O método do momento representa perdas adicionais devido ao arrasto do pilar.

O método WSPRO FHWA foi originalmente desenvolvido para a ponte de cruzamentos que consistem em vastas planícies de inundação com vegetação bem extensiva. O método é uma solução baseada em energia com alguns atributos empíricos (a equação de perda de expansão no método WSPRO utiliza um coeficiente de descarga empírica).

A equação de Yarnell tem sua aplicação limitada, pois o usuário deve garantir que o problema está dentro do alcance dos dados que o método foi desenvolvido.

Os exemplos a seguir são alguns casos típicos em que os vários métodos de baixo fluxo podem ser usados:

(1). Nos casos em que os pilares da ponte representam pequena obstrução ao fluxo e perdas por fricção, o método baseado na energia, o método do momento e o WSPRO apresentará as melhores respostas.

(2). Nos casos em que as perdas por fricção são predominantes, o método do momento deve ser o mais aplicável. Mas os métodos de energia e WSPRO podem ser usados.

(3). Sempre que o fluxo passa pela profundidade crítica no interior da ponte, o método do momento e o método da energia são capazes de modelar esse tipo de transição de fluxo. A equação de Yarnell e o método WSPRO são aplicados apenas para fluxo subcrítico.

(4). Para o fluxo supercrítico, tanto o método da energia quanto o do momento pode ser usado. O método do momento é o mais indicado para locais que têm uma quantidade substancial de pilares devido às perdas por impacto e de arrasto. A equação de Yarnell e o WSPRO são aplicáveis apenas a fluxo subcrítico.

(5). Para as pontes em que os pilares são o contribuinte dominante para perdas de energia e a mudança na superfície da água, o método do momento e/ou a equação de Yarnell seria mais aplicável. No entanto, a equação de Yarnell é aplicável somente à classe A de baixo fluxo.

(6). Para bueiros longos em condições de baixo fluxo, o método da energia é a abordagem mais adequada.

– escoamento de alto fluxo

Nos escoamentos em que o fluxo entra em contato com a parte superior da plataforma da ponte, o programa possui dois métodos disponíveis para o usuário selecionar: o método do fluxo de pressão e descarga e o método da energia. Os exemplos a seguir são alguns casos típicos em que os métodos de escoamento em alto fluxo podem ser usados.

(1). Quando a plataforma da ponte apresenta uma pequena obstrução ao fluxo e a abertura da ponte não está atuando como um orifício pressurizado, o método baseado na energia deve ser usado.

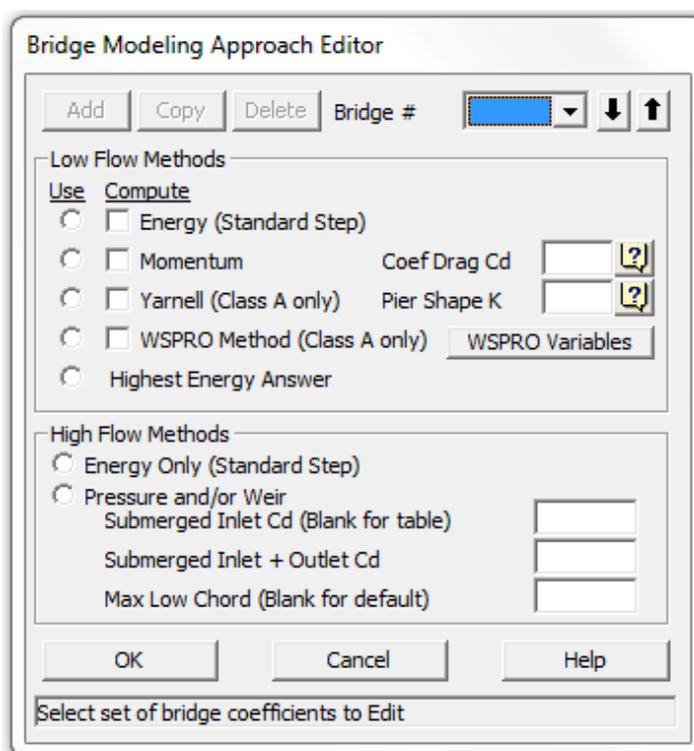
(2). Quando a abertura da ponte e o aterro produz grande obstrução, criando um represamento devido à constrição do fluxo, método da pressão e descarga é o mais indicado.

(3). Quando a ponte e/ou o aterro é superado, e a água passa por cima da ponte, mas não apresentando uma submersão elevada, o método da pressão e do vertedor deve ser usado. O programa muda automaticamente do método da pressão e descarga para o método da energia, quando a ponte atinge 95% de submersão em relação à jusante.

(4). Quando a ponte estiver com elevada submersão o método baseado em energia é o mais aconselhável.

Para o escoamento em baixo fluxo e para o escoamento de alto fluxo adotou-se o método da energia, por representar melhor o escoamento em relação às pontes, uma vez que as pontes do Canal Rio Granjeiro não apresentam pilares, a Figura 8 mostra a aba de seleção de modelo apropriado para modelagem de escoamento com pontes.

Figura 8 – Interface de seleção do modelo apropriado

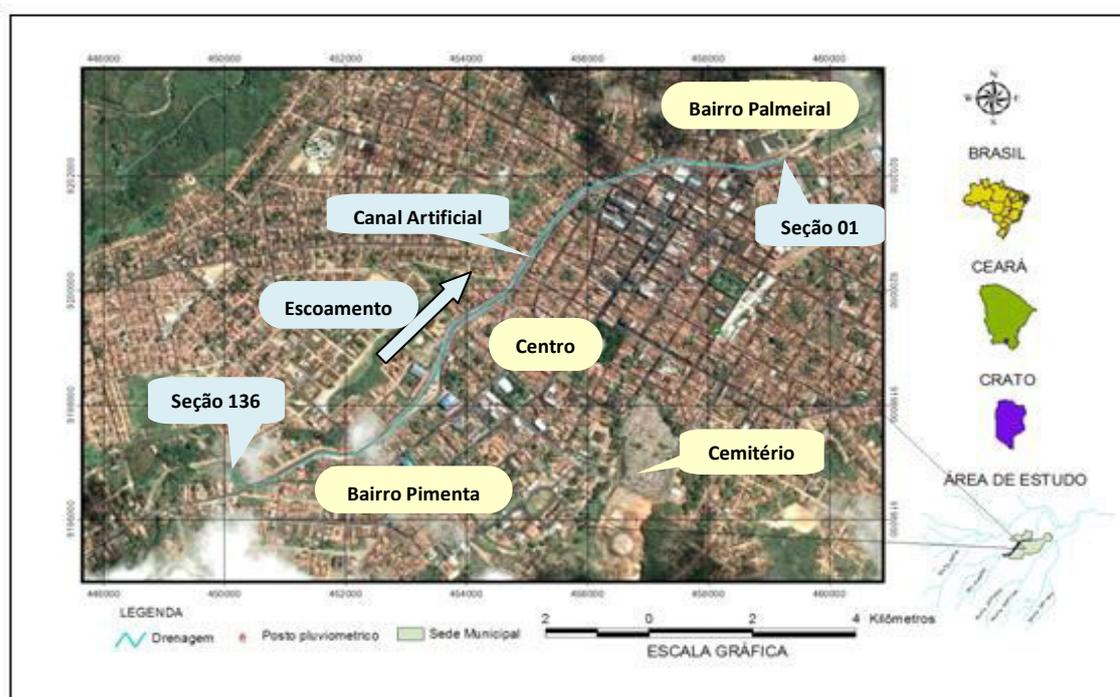


### 3.3 Estudos de caso: Canal do Rio Granjeiro

#### 3.3.1 Área de Estudo

A área com aplicação do estudo se delimita a todo o trecho em que houve a fixação das margens do canal através de concreto. Esse trecho consiste no trecho em que o Rio Granjeiro passa pelo meio urbano do município de Crato-CE, abrangendo parte do bairro Pimenta, o bairro do Centro e pequena parte do bairro Palmeiral, como se mostra a Figura 9.

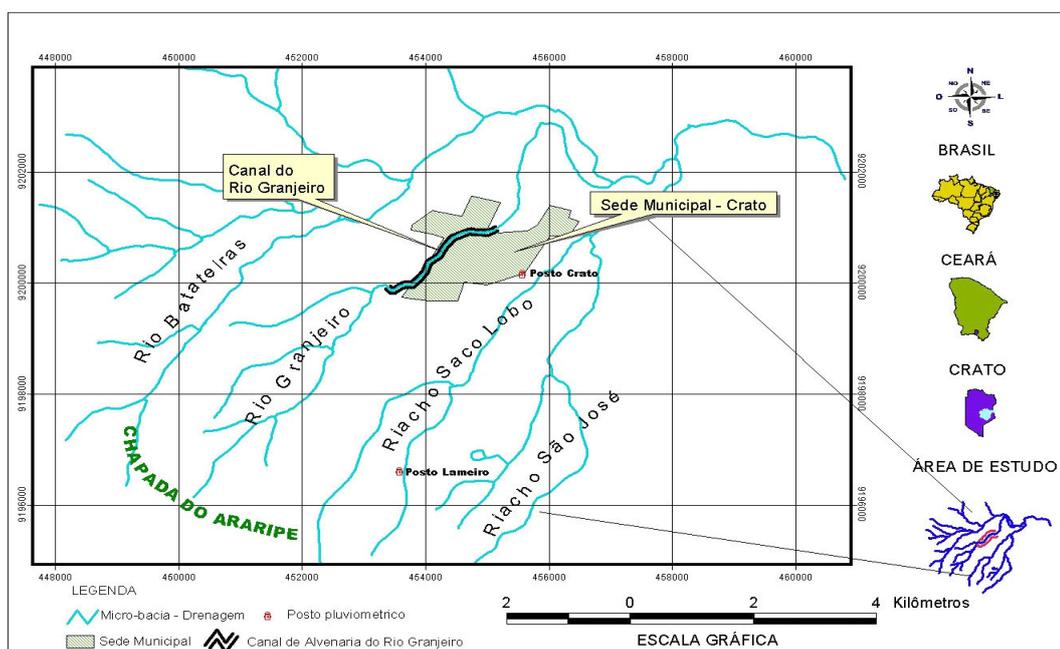
Figura 9 – Localização da área de modelagem



Fonte: Silva (2013).

O canal estudado pode ser localizado pelas coordenadas planas no DATUM SIRGAS 2000 UTM's E-453378 N 9199841 com altitude ortométrica de 459.43 metros, conforme a Figura 10 (SILVA, 2013).

Figura 10 – Localização da área da pesquisa.



Fonte: Silva (2013)

Segundo dados do IBGE (2017) o município de Crato apresenta estimativa populacional de 130.604 habitantes para o ano de 2017, sendo distribuídos 83,11 % na zona urbana e 16,89% na zona rural. Na zona urbana presença três tipos de áreas de riscos que demanda drenagem urbana especial: (i) áreas urbanas com formação de grotões, ravinhas e processos erosivos crônicos; (ii) áreas em taludes e encostas sujeitas a deslizamento; (iii) áreas sem infraestrutura de drenagem.

### 3.3.2 Composição do modelo hidráulico

#### (a) Definição da geometria

Os dados morfométricos da bacia hidrográfica e do canal em estudo foram obtidos através do ArcGIS 9.3 integrada com a extensão HEC-GeoRAS e o apoio do *software* GPS TrackMaker Pro (SILVA, 2013). Além disso, foram lançadas sobre o traçado discretizado pelo HEC-RAS 136 seções transversais, com dados de campo, obtidos de levantamento geodésico concedido pelo Departamento de Arquitetura e Engenharia do Ceará (DAE-CE). As 136 seções foram enumeradas em ordem decrescente, de montante para jusante, sendo que, da seção 1 (ponto mais a

jusante) até a seção 41 compreende o trecho não reformado com 1305m, identificado como trecho 1 e que possui declividade de 0,0061 m/m. O trecho 2 compreende o comprimento da seção 41 até a seção 136 (mais a montante), totalizando 935m, com declividade de 0,0268 m/m.

*(b) Reforma do canal*

Com os estragos no leito do canal devido à cheia do ano de 2010 foi necessário realizar sua reconstrução ao longo do primeiro quilômetro (Figuras 11). Neste trecho concentraram-se os maiores estragos, evidenciando a necessidade de estabilização e recomposição dos taludes erodidos.

Figura 11 – Trecho do canal do Rio Granjeiro reformado.



No trecho 2 de 1305m não houve reforma e o canal permaneceu com as mesmas condições estruturais. Atualmente o trecho 2 apresenta taludes revestido de concreto com características regulares e no fundo do canal trechos lamoso com pedregulho e vegetação rasteira, Figura 12.

Figura 12 – Trecho do o canal do Rio Granjeiro não reformado.



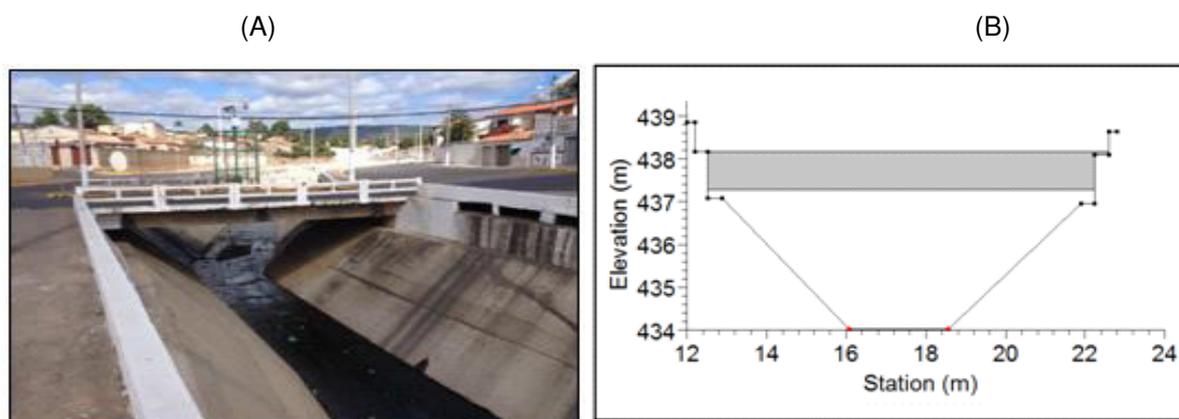
*(c) Inserção das pontes*

O canal do Rio Granjeiro apresenta transições graduais, por isto adotou-se o coeficiente de expansão de 0,3 e de contração 0,1, respectivamente. Para os coeficientes *US embankment SS* e *DS embankment SS*, que representa a inclinação do aterro a montante e a jusante da ponte respectivamente, adotou-se zero, devido ao fato que as pontes do canal Rio Granjeiro não apresentam aterro sobre o leito do canal. Com a relação a *max submergence*, adotou-se 0,95, que representa o valor percentual de submersão máxima em relação a plataforma da ponte que ao ser atingido o programa muda automaticamente do método calculo de pressão e descarga para o método da energia.

O canal do Rio Granjeiro apresenta ao longo da sua extensão 7 pontes, classificadas, conforme Vitorio (2006), em ponte na forma de vigas simplesmente apoiada, que corresponde a um sistema estrutural estaticamente determinado, podendo ter seção constante ou variável e são muito utilizadas para vencer um vão com um único trampo. É observável que as pontes implantadas no canal Rio

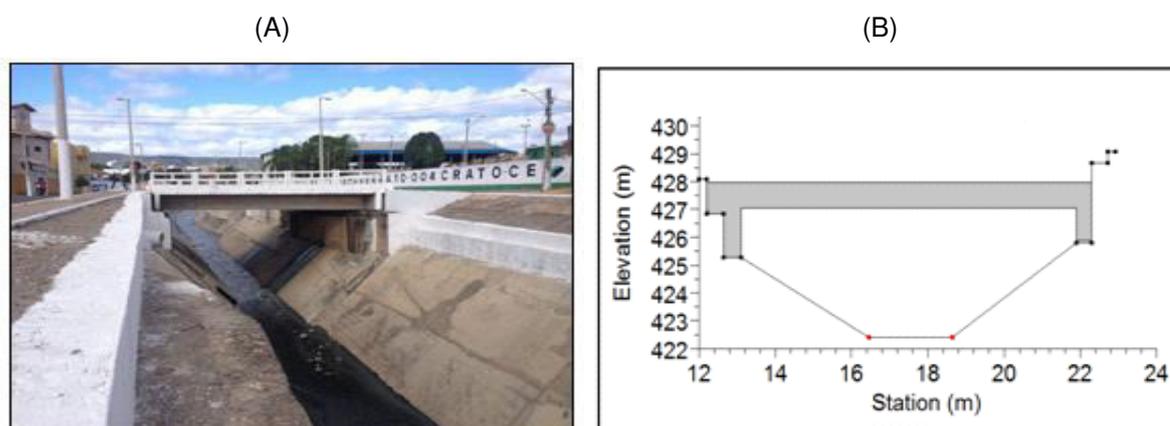
Granjeiro não apresentam estreitamentos laterais significativos sobre o leito do canal. Figura 13A, a inserção da ponte no HEC-RAS esta ilustrada na Figura 13B.

Figura 13 – Ponte presente no canal Rio Granjeiro (A) e Representação da ponte no programa HEC-RAS (B).



A Figura 14A e a Figura 14B ilustra a seção de uma ponte que apresentou um pequeno estreitamento na calha do canal.

Figura 14 – Ponte que apresentam um estreitamento na calha do canal no canal Rio Granjeiro (A) e Representação da ponte no programa HEC-RAS (B).



#### (d) Simulações HEC-RAS – Efeito da rugosidade e da presença das pontes

Para análise do efeito da rugosidade e da presença das pontes foram realizadas quatro simulações com variáveis números de Manning. A primeira simulação de rugosidade representa o canal com as condições de asperezas que o

canal possuía antes da enchente de 2011; a segunda simulação representa as condições de rugosidade atuais (ano de 2017) e a terceira simulação representa as características rugosas que o canal poderia vir a possuir, no caso de uma reforma em toda a extensão. Nestas três primeiras simulações, considerou-se a presença das pontes. A quarta simulação consistiu na avaliação da condição atual do canal e sem a presença das pontes. As quatro simulações estão detalhadas a seguir

### ➤ **Simulação A**

Antes da reforma parcial, o canal do Rio Granjeiro apresentava uma rugosidade diferente da atual, em determinados trechos da parede do canal existia uma camada de pedra incrustada nas laterais do canal, possivelmente, com finalidade de reduzir a velocidade e aumentar a dissipação de energia do escoamento, Figura 15.

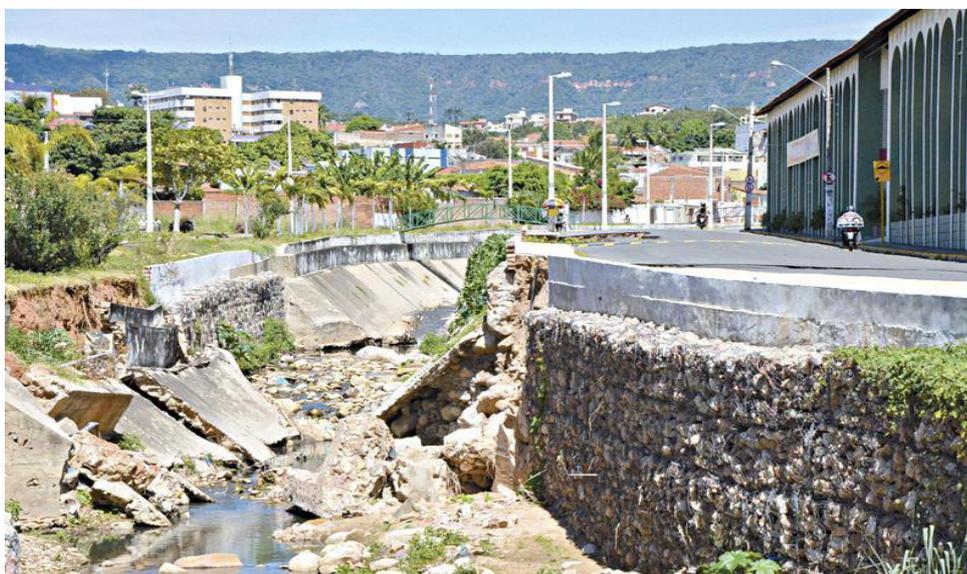
Figura 15 – Representa lateral do canal Rio Granjeiro na forma de paredes empedradas.



A enchente de 2011 deixou um rastro amplo de destruição, principalmente no trecho de maior declividade do canal, mas alguns locais pontuais sofreram os impactos de forma mais significativa e esta simulação busca analisar se a presença de trecho com maiores rugosidades contribuíram para tais impactos, pois ao simular

as condições atuais do canal, não se observa a presença de nenhum fenômeno hidráulico que promova tal destruição figura 16.

Figura 16 – A destruição da calha do canal em um dos trechos de paredes empedradas.



Na simulação A, para análise do efeito de rugosidade em conjunto com a presença das pontes, adotou-se um número de Manning de  $0,028 \text{ m}^{1/3}\text{s}$  para as laterais do canal em dois trechos em que os taludes eram formados com paredes empedradas e para o fundo do canal nestes trechos adotou-se  $0,014 \text{ m}^{1/3}\text{s}$ . O primeiro trecho vai da seção 86.4 a seção 83, com 33 metros de comprimento, localiza-se próximo à ponte da Rua Nossa Senhora de Fátima. O segundo trecho da seção 56 a seção 53 com 28 metros de comprimento, próximo à ponte da Rua Ruy Barbosa, no sentido de montante para jusante. Para o restante do canal adotou-se  $0,014 \text{ m}^{1/3}\text{s}$  tanto para o fundo como para as laterais.

### ➤ **Simulação B**

A simulação B busca representar o escoamento nas condições atuais de rugosidade e com a presença das pontes, na forma em que se encontra o canal, ano de 2017. Houve uma reforma parcial no canal, em que foram reconstituídas as seções correspondentes aos primeiros 935 metros (Figura 17).

Figura 17 – Ilustra o ponto de modificação da rugosidade devido à reforma parcial



Nesta simulação adotou-se o número de Manning de  $0,013 \text{ m}^{1/3}\text{s}$  para as laterais e o fundo, nas seções correspondentes aos 935 metros recém reformado e para restante do canal com comprimento de 1305m. Adotou-se  $0,016 \text{ m}^{1/3}\text{s}$  para as laterais que corresponde a revestimento de concreto em condições regulares e para fundo do canal adotou-se  $0,025 \text{ m}^{1/3}\text{s}$ , aplicado em canais curvilíneos, lamosos e com presença de pedregulho.

#### ➤ **Simulação C**

Para esta simulação considerou-se que o canal estaria completamente reformado, por este motivo a simulação realizou-se com número de Manning de  $0,013 \text{ m}^{1/3}\text{s}$  para todas as seções do canal, tanto para os taludes como para o fundo do canal.

#### ➤ **Simulação D**

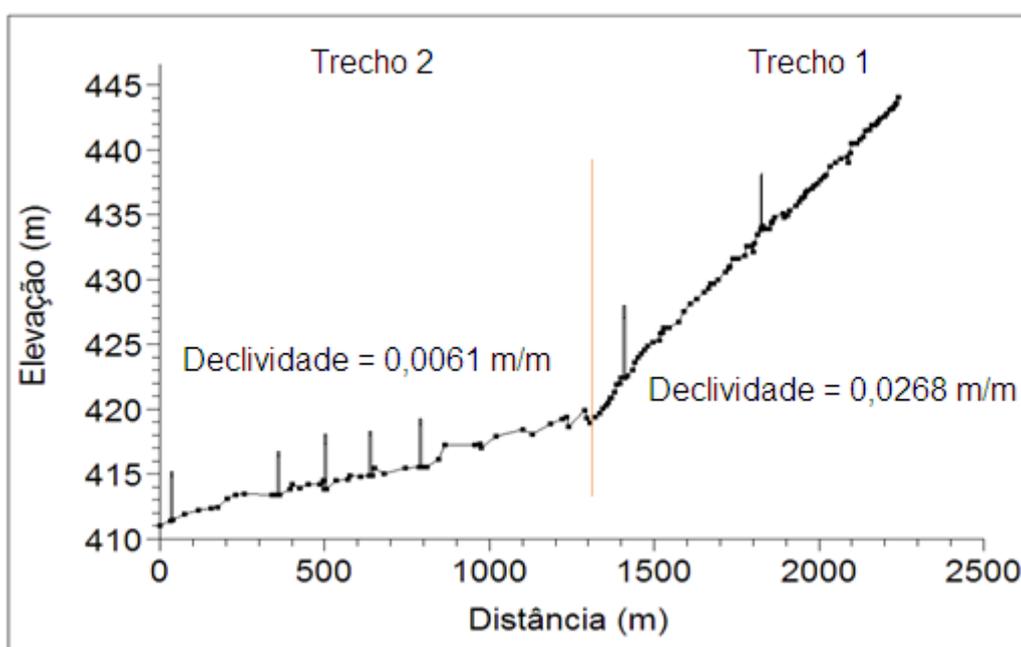
Para a simulação D considerou-se que o canal estaria livre das pontes e com as condições de rugosidade referente à situação atual do canal, por este motivo adotou número de Manning de  $0,013 \text{ m}^{1/3}\text{s}$  (taludes e fundo do canal) para os 935m

reformados, e  $0,016 \text{ m}^{1/3}\text{s}$  para os taludes e  $0,025 \text{ m}^{1/3}\text{s}$  para o fundo do canal, no 1305m restante.

(e) *Simulação HEC-RAS – Efeitos da mudança de declividade*

Considerando as declividades longitudinais, o canal foi dividido em dois trechos. O trecho 1 compreende a parte reformada e corresponde ao comprimento da seção 41 até a seção 136 (mais a montante), totalizando 935m, com declividade de  $0,0268 \text{ m/m}$ . O trecho 2 possui comprimento de 1.305m, declividade de  $0,0061 \text{ m/m}$ , estando entre a seção 1 (ponto mais a jusante) e a seção 41. A análise dos efeitos da variação da declividade foi realizada para a Simulação (B), considerando que esta é a situação atual (ano de 2017) de funcionamento do canal (Figura 18).

Figura 18 – Representação do canal subdivido em trecho 1 e trecho 2.



### 3.3.3 Dados hidráulicos de entrada no modelo

A vazão afluente ao canal foi obtida pelo *software* HEC-HMS através do método do SCS (USDA,1986). No método SCS a geração do escoamento superficial direto é determinada a partir da precipitação acumulada em um evento específico e da retenção potencial do solo (Equações 11 e 12).

$$P_e = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}, \text{ se } P > 0,2S \quad (11)$$

$$S = \frac{25.400}{CN} - 254 \quad (12)$$

Em que:

$P_e$  é a precipitação efetiva, ou escoamento superficial (mm);

$P$  é a precipitação acumulada de um evento (mm);

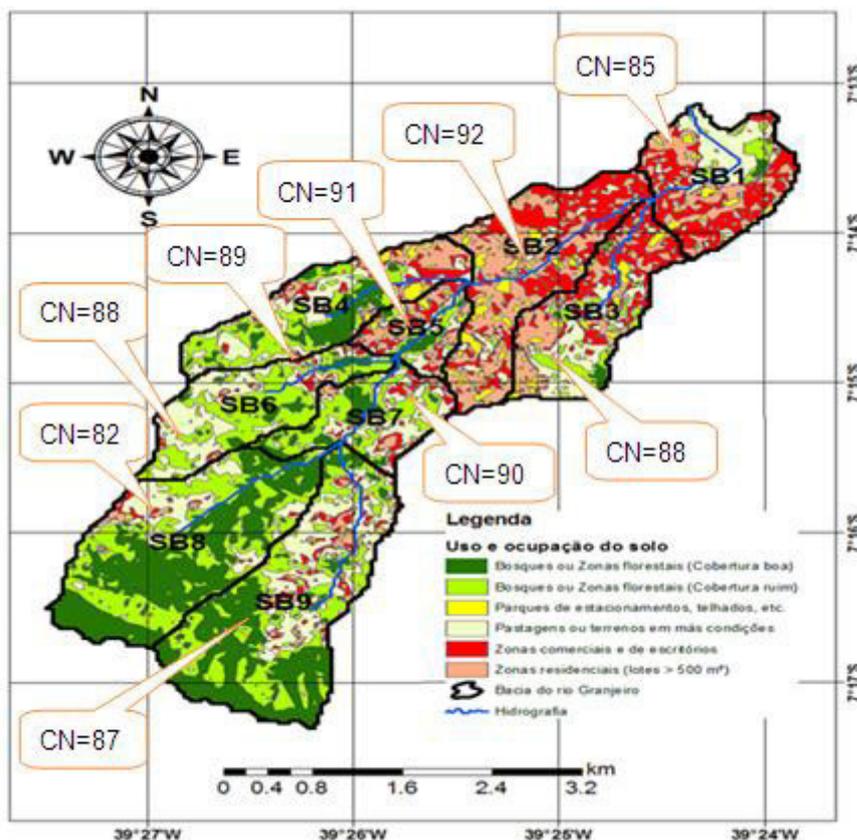
$S$  é a retenção potencial do solo (mm);

CN é chamado de *Curve Number* (adimensional).

O valor do CN médio foi obtido pela caracterização do uso e ocupação da bacia hidrográfica (Figura 19). Para a modelagem da vazão, adotaram-se as seguintes considerações: (i) evento de chuva com período de retorno de 50 anos; (ii) distribuição espacial uniforme da precipitação por toda a bacia; (iii) distribuição temporal da precipitação pelo método do hietograma dos blocos alternados; (iv) chuva máxima estimada pela equação de chuvas intensas do município do Crato e (v) duração do evento igual ao tempo de concentração da bacia. O tempo de simulação foi de 4 horas e verificação dos dados a cada dois minutos, sem considerar armazenamento no rio. A caracterização e o estudo hidrológico da bacia do Rio Granjeiro foram realizados por Moreira (2013).

Seguindo a metodologia, a vazão afluyente ao canal nos trechos selecionados (trecho 1 e 2) para o período de retorno de 50 anos foi de 256,3 m³/s. O valor do período de retorno adotado é muito usado para projeto de drenagem em áreas urbanas residenciais e comerciais como é o caso da área de estudo.

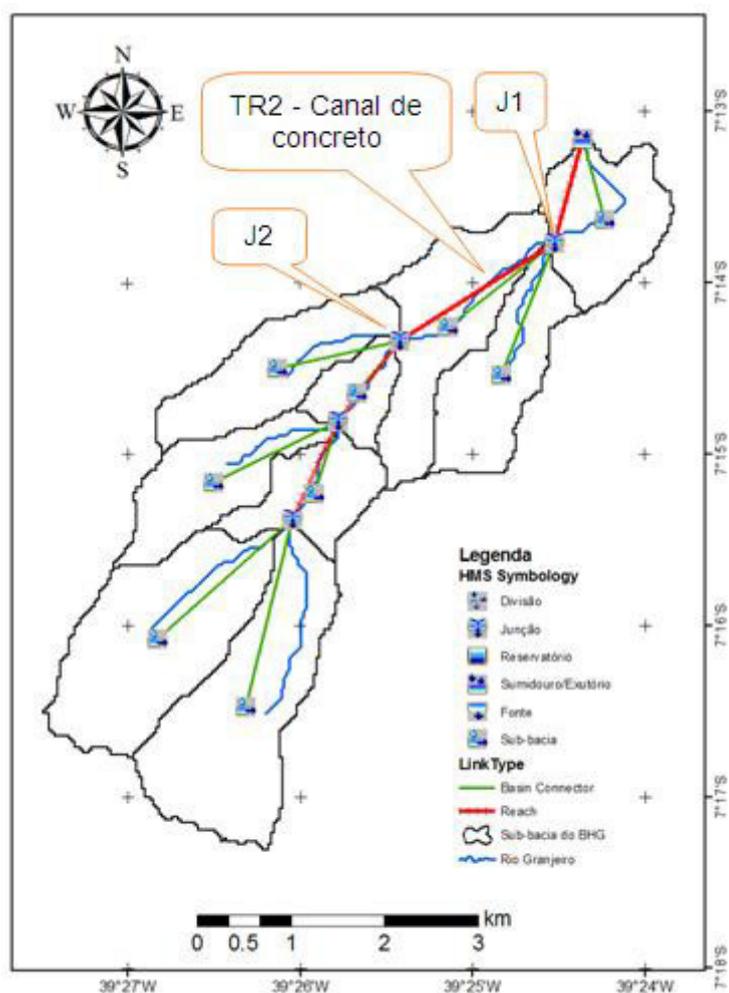
Figura 19 – O valor do Número da Curva (CN) para cada sub-bacia obtido pela caracterização do uso e ocupação da bacia hidrográfica



Fonte: Moreira (2013).

Para a elaboração da modelagem hidráulica nesse estudo considerou-se as vazões calculadas a partir do modelo hidrológico proposto no estudo acima citado, para isto, a sub-bacia SB2, apresenta um canal construído em concreto e alvenaria, que tem a intenção de canalizar as águas pluviais até a região posterior ao centro do município. Esta sub-bacia apresenta área bastante povoada e com impermeabilização alta (69,82 %) e encontra-se definida entre as junções J1 e J2, (Figura 20) onde o escoamento superficial é captado pelo trecho do rio TR2 (canal de concreto), provenientes dos bairros centrais, como Pimenta e Centro, além de partes do Alto do Seminário, Caixa D'água, Sossego e Granjeiro (MOREIRA, 2013).

Figura 20 - Esquema do modelo da BHG no HEC HMS



Fonte: Moreira (2013)

(a) Definição das vazões para o modelo hidráulico

A partir do estudo hidrológico de precipitações máximas na bacia hidrográfica do Rio Granjeiro obtiveram-se as estimativas de vazões máximas para entrada na modelagem hidráulica. As vazões advindas do estudo de chuvas intensas para os períodos de retorno de 20, 50 e 100 anos se encontram na Tabela 01.

Tabela 1 – Vazões do estudo hidrológico da bacia do rio granjeiro

Tr – 20 anos	Tr – 50 anos	Tr – 100 anos
232,8 m <sup>3</sup> /s	256,3 m <sup>3</sup> /s	274,4 m <sup>3</sup> /s

Fonte: Moreira (2013).

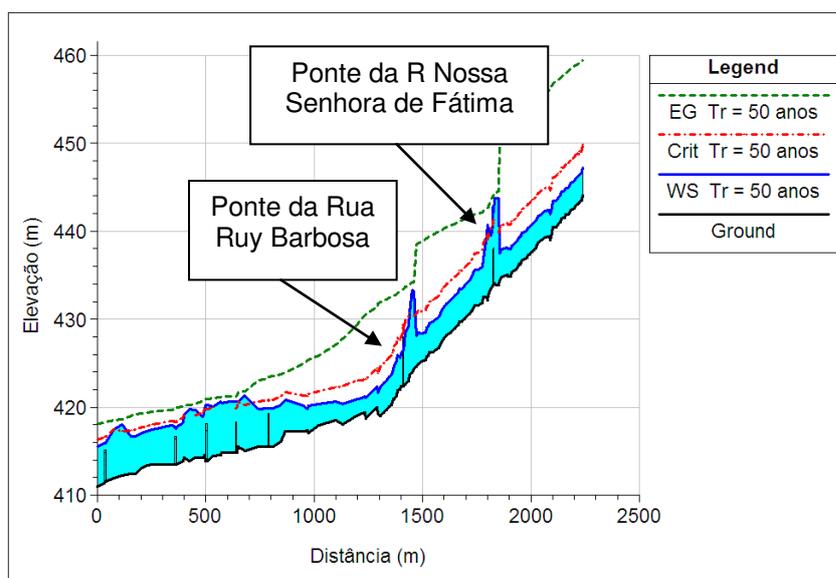
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e as discussões estão apresentados destacando as características observadas nas simulações, considerando os efeitos da variação de rugosidade, da presença das pontes e da variação da declividade longitudinal.

### 4.1 Efeitos da rugosidade

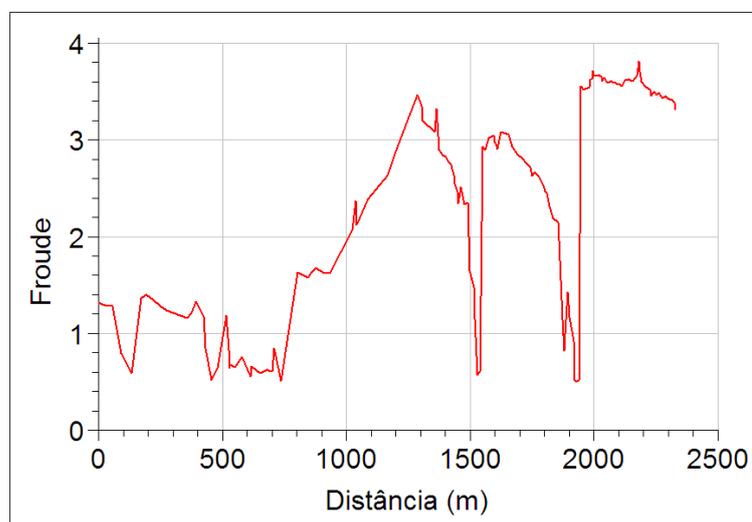
A simulação A confirma que o aumento na rugosidade devido à presença de trechos com paredes empedradas aumenta a resistência ao escoamento, fazendo com que a água eleve e alcance a plataforma das pontes, como pode ser vistos no perfil do escoamento, na figura 21. É importante notar que nas proximidades destes pontos estão localizadas as pontes da Rua Nossa Senhora de Fátima e a ponte da Rua Ruy Barbosa, que foram os locais que sofreram os impactos mais significativos de destruição da calha do canal durante de enchente 2011. A água que escoava em regime supercrítico ao entrar em contato com a ponte gerou um escoamento de altas turbulências e uma elevada dissipação de energia (linha verde).

Figura 21 – Perfil do escoamento do canal Rio Granjeiro para as condições de rugosidade anterior à reforma (Simulação A), escoando uma vazão referente uma precipitação com 50 anos de período de retorno.



Analisando o número de Froude, figura 22, percebeu-se que o escoamento ao entrar em contato com os taludes de maiores rugosidade e com as pontes, o fluxo oscila entre os regimes torrencial e fluvial, provocando uma grande perda de energia no escoamento. As pontes passaram a funcionar como estruturas de dissipação de energia por impactos, fazendo com que a água eleve-se transbordando a calha do canal e devido as suas características erosivas, água transbordada provocou um processo de erosão de fora pra dentro da calha do canal, resultando na destruição da calha, nestes dois pontos em particular, ponte Nossa Senhora de Fátima e ponte Ruy Barbosa. A comprovação exata desta hipótese ocorreria através de um estudo geotécnico. Outra hipótese menos aceitável é que a calha do canal rompeu devido às esforços e impulsos provocados pelo o escoamento, esforços de dentro para a fora da calha do canal. No caso do canal Rio Granjeiro os taludes de maiores rugosidade foram implantados com objetivo de dissipar energia e reduzir a velocidade do fluxo, contudo não foram capazes de prever os efeitos adversos e/ou decorrentes do escoamento supercrítico, resultando na destruição da calha do canal. Uma observação importante está relacionada ao escoamento montante das seções de maiores rugosidade e das pontes; para estas seções, o escoamento apresenta um número Froude na faixa de 2,5 a 4,5 que, seguindo as orientações de Chaudhry (2008), a presença de estrutura de dissipação de energia para esta faixa de número de Froude deve ser evitada em decorrência do ressalto oscilante que se formará.

Figura 22 – Número de Froude para uma vazão correspondente a uma precipitação com tempo de retorno de 50 anos para as condições de rugosidade anterior a reforma do canal (simulação A)



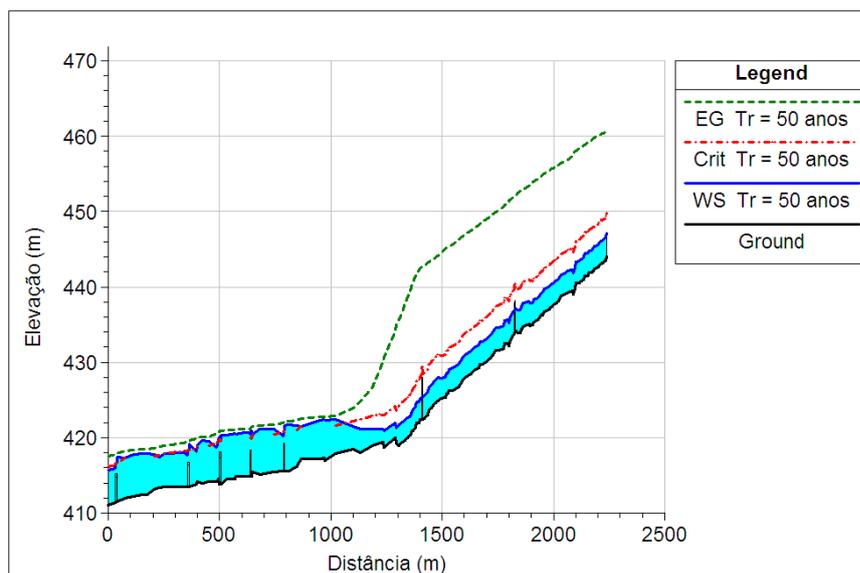
As Figuras 23A e 23B, ilustram a destruição provocada nos pontos próximos às pontes da Rua Ruy Barbosa e da Rua Nossa Senhora de Fátima, onde a combinação das singularidades, rugosidade elevada e a as pontes, contribuíram significativamente para o agravamento da destruição na calha do canal e nas áreas circunvizinhas.

Figura 23 – Destruição no canal e nas áreas vizinhas a ponte da Rua Ruy Barbosa (A), e da ponte na Rua Bossa Senhora de Fátima (B), na enchente de 2011.



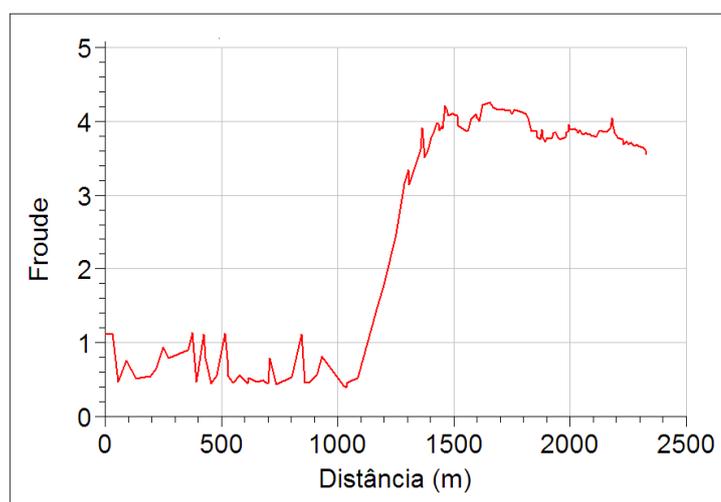
A simulação B busca avaliar a rugosidade com as condições em que o canal encontra-se atualmente (ano de 2017). Observa-se na figura 24, que o fato de haver uma modificação na rugosidade do canal, com a retirada do trecho de parede empedrada e uma redução da aspereza, o perfil do escoamento para o primeiro trecho do canal ocorre completamente supercrítico e a lâmina de água não entra em contato com a plataforma da ponte, mas se verifica que após passar pela mudança de declividade ocorre a geração de um ressalto hidráulico que inicia na seção 36 e o canal transborda a partir da seção 33.

Figura 24 – Perfil do escoamento canal Rio Granjeiro para condições de rugosidade atuais (Simulação B), escoando uma vazão referente a uma precipitação com 50 anos de tempo de retorno.



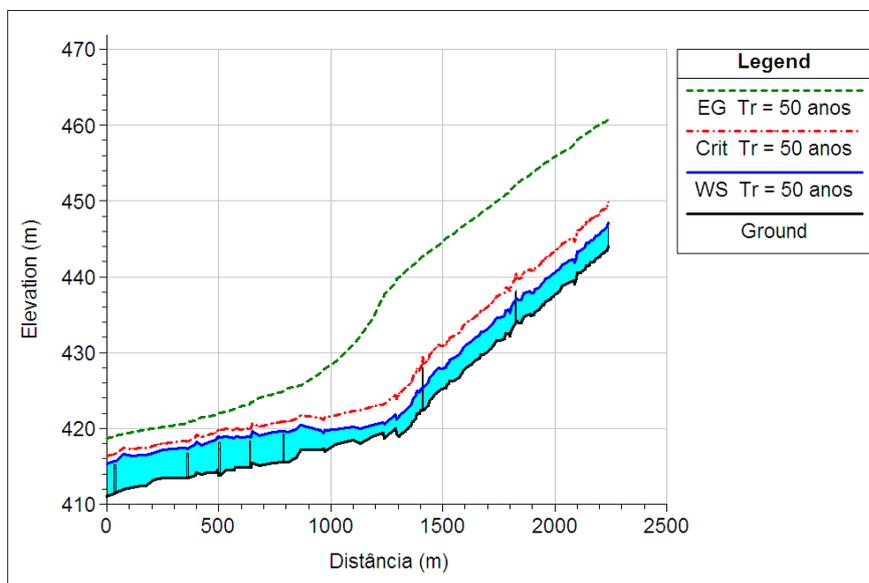
O número de Froude, Figura 25, corrobora a percepção da ocorrência de um ressalto hidráulico no trecho de menor declive do canal, e verifica-se que o escoamento apresenta oscilações entre torrencial e fluvial.

Figura 25 – Número de Froude para uma vazão correspondente a uma precipitação com tempo de retorno de 50 anos para as condições de rugosidade atuais (simulação B)



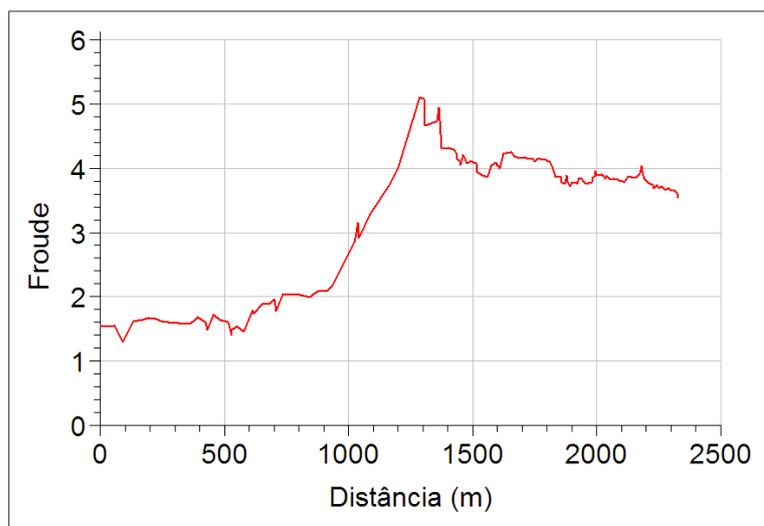
A simulação C busca reproduzir um cenário em que toda a extensão do canal seja reformada. O perfil do escoamento, figura 26, indica que a lâmina de água eleva-se a ponto do canal transbordar, mas não o suficiente para mudança de regime no escoamento, que prevalece como supercrítico.

Figura 26 – Perfil do escoamento canal Rio granjeiro para condições de rugosidade simulando uma reforma completa (Simulação C) e escoando uma vazão referente a uma precipitação com 50 anos de tempo de retorno.



Percebe-se que ao visualizar o número de Froude, Figura 27, que não ocorre mudança de regime e o escoamento prevalece em toda a extensão do canal com regime supercrítico.

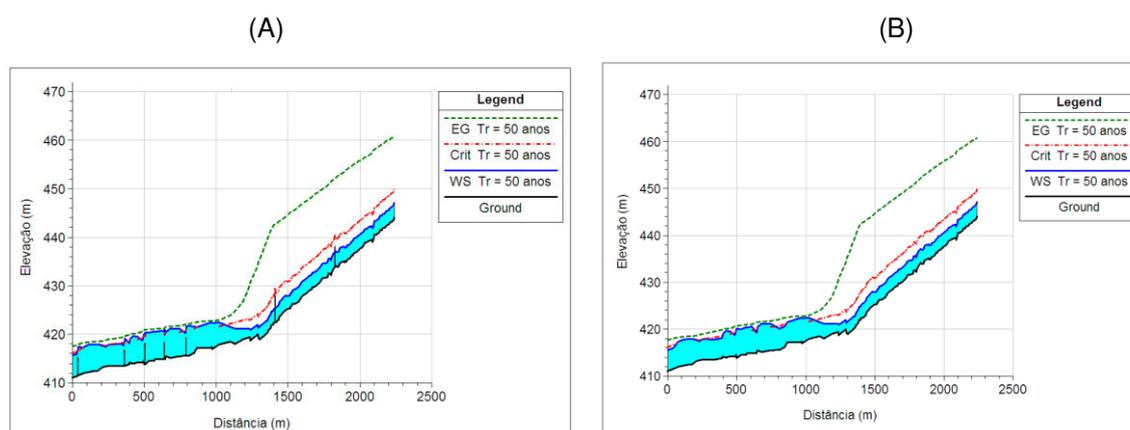
Figura 27 – Número de Froude para uma vazão correspondente a uma precipitação com tempo de retorno de 50 anos para as condições de completa reforma do canal (simulação C)



## 4.2 Efeito das pontes

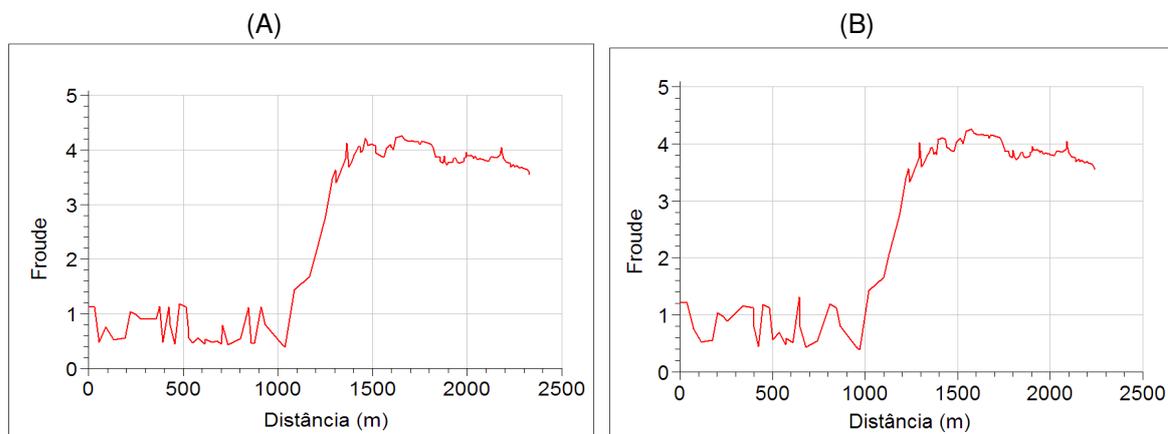
A análise do efeito que a ponte exerce sobre o escoamento foi realizada através da comparação das simulações (B) e (D) com e sem pontes inseridas no canal, figura 28A, representa o perfil do escoamento com as pontes inseridas no canal, a figura 28B, representa o perfil do escoamento sem a presença de pontes. As simulações mostraram que a presença das pontes apresenta pouca alteração na lâmina de água, tanto no primeiro trecho do canal, em que escoamento é supercrítico e não atinge a plataforma da ponte, quanto no segundo trecho, onde ocorre à formação de um ressalto hidráulico e o transbordamento do canal e a partir deste ponto todas as pontes a jusante fica submersa na lâmina de água.

Figura 28 – Perfil do escoamento para uma vazão correspondente a uma precipitação com tempo de retorno de 50 anos canal com as pontes inseridas (A) e canal sem as pontes (B).



A comparação dos números de Froude entre as simulações do canal rio Granjeiro com as pontes inseridas, figura 29A, e sem as pontes, figura 29B, reforça a percepção da pouca influência que a presença das pontes representa no escoamento, para as condições atuais de rugosidade. Esta constatação fica explicada pela pequena interferência, em termos de contração e expansão das seções, que as pontes provocam no canal e pelo regime supercrítico característico, ou seja, enquanto a água flui abaixo da cota inferior da longarina da ponte, não há interferência no escoamento, mas, caso outro processo de dissipação de energia atue e a água atinja a cota inferior da ponte, a estrutura passa a funcionar como um ponto localizado de dissipação de energia, agravando o processo destrutivo, conforme constatado na Simulação (A).

Figura 29 – Número de Froude para uma vazão correspondente a uma precipitação com tempo de retorno de 50 anos para o canal com as pontes (A), e sem as pontes (B).

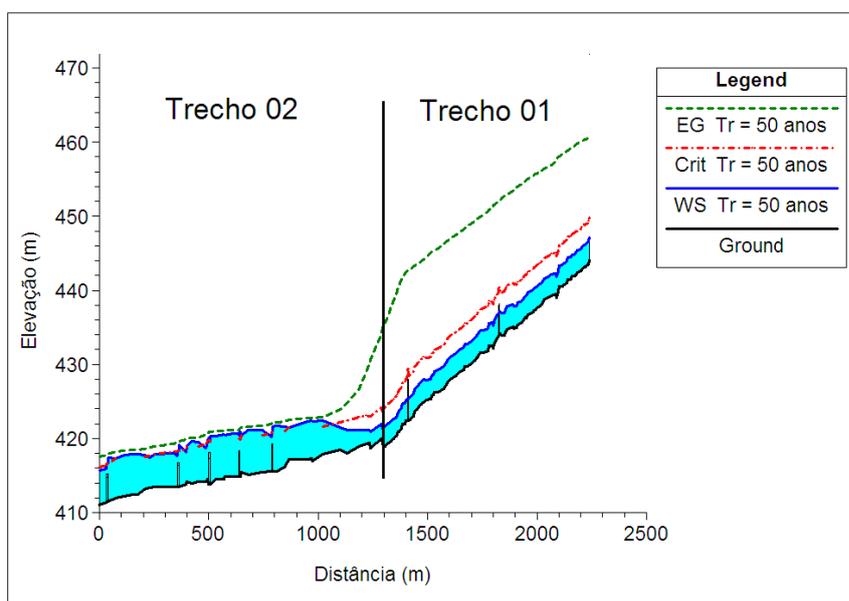


### 4.3 Efeitos da mudança de declividade

Como o canal apresenta dois trechos com diferentes declividade, figura 30, o escoamento em cada um dos trechos apresenta características bem distintas, considerando as condições atuais de rugosidade do canal, no trecho 1 o escoamento se processa totalmente em regime supercrítico, com elevada linha de energia e a lâmina d'água se mantém interior da calha do canal. No trecho 2, de menor declividade, o escoamento processa-se em regime fluvial e a elevação da lâmina de água contribui para alagamento áreas cada vez maiores.

Portanto, fica bem caracterizada a formação do ressalto hidráulico no trecho 2. Para a classificação do tipo de ressalto hidráulico formado, avaliou-se a localização da ocorrência em relação aos trechos em declive. Ficou constatado que o ressalto hidráulico ocorre apenas no trecho 02, em declive, sendo, portanto, classificado como ressalto do tipo D-Jump (Figura 30). Esta ocorrência caracteriza a concentração do fenômeno num comprimento relativamente pequeno do canal, favorecendo um processo destrutivo bem localizado.

Figura 30 – Representa a mudança de declividade com linha dividindo os trechos em que ocorre a mudança de declividade.



Outro resultado que corrobora a característica estacionária do ressalto hidráulico são os valores do número de Froude superiores a 4,5 nas seções a montante da elevação da linha d'água onde o escoamento é supercrítico, conforme apresentados na Figura 31. Esta situação representa, na prática, um elevado potencial de dissipação de energia numa extensão pequena de canal e que provoca danos consideráveis à estrutura dessa parte artificial e urbana do rio Granjeiro como pode ser observado na figura 32 que mostra o trecho destruído do canal, após o evento de chuva intensa ocorrido em janeiro de 2011, correspondente às seções de ocorrência do ressalto.

Figura 31- Número de Froude para escoamento do canal rio Granjeiro para uma vazão correspondente a uma precipitação com tempo de retorno de 50 anos.

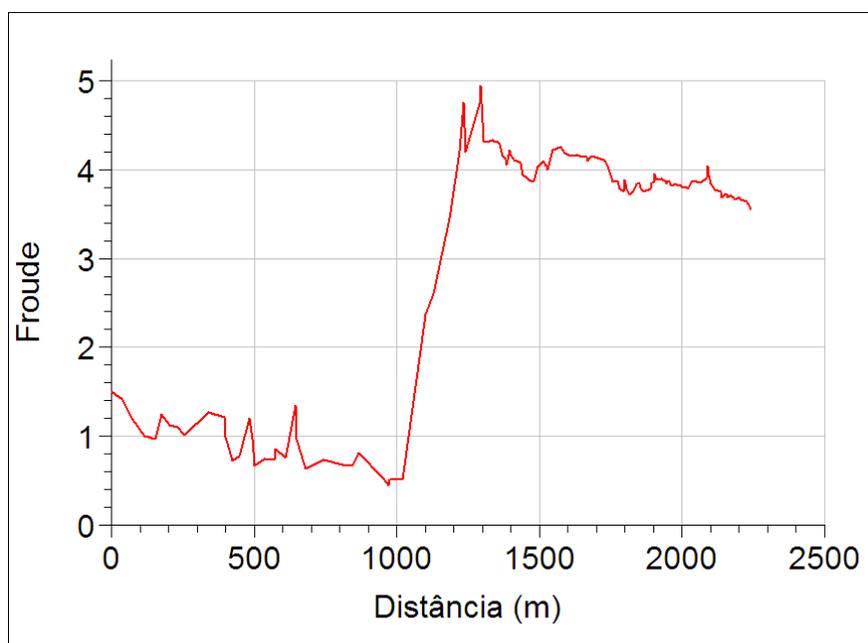


Figura 32 – Trecho de ocorrência do ressalto hidráulico no canal do rio Granjeiro



Fonte: Silva (2013)

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados mostram que, em todas as simulações realizadas, ocorrerá transbordamento em alguma parte do canal. A elevação da rugosidade das seções do trecho 1, favorece a ocorrência de processos de dissipação de energia, a elevação da lamina d'água, que atinge a plataforma da ponte provocando transbordamento da calha do canal e grande turbulência no escoamento, que resultaram na destruição da calha do canal.

Percebe-se que a manutenção do trecho 2 do canal sem reforma favorece a formação de um ressalto hidráulico, contribuindo para o alagamento de áreas mais extensas, devido a grande elevação que o nível da água atinge em um escoamento fluvial. Neste sentido, ainda, mesmo em caso de reforma completa na calha do canal, os problemas de transbordamento não serão evitados. A análise mostrou que a redução da rugosidade do fundo do canal no trecho de menor declividade com o uso do concreto como revestimento, deslocará o ressalto para uma posição 340 m a jusante do local que ocorre nas condições atuais e, apesar da intervenção construtiva citada, a dissipação da energia continuará a ocorrer na parte urbana do canal e ainda representará potenciais prejuízos a população.

As simulações com as pontes para as condições atuais de rugosidade não apresenta efeitos significativos na modificação das características do escoamento e também não apresenta contribuições significativas para o alagamento do centro da cidade de Crato, Ceará. Contudo, na prática, as pontes apresentam efeitos que não foram analisados, como obstrução do leito do canal, devido ao arrasto de árvores, entulho e resíduos sólidos urbanos que são lançados inadequadamente no canal, evidenciando a necessidade de estudo mais aprofundada, como a análise destas obstruções e dos sedimentos grosseiros que são arrastados da parte natural do rio pra dentro do canal artificial.

Com relação aos efeitos proporcionados pela mudança de declividade percebe-se uma contribuição significativa para a alteração do regime de escoamento torrencial (trecho 1) para fluvial (trecho 2), uma vez que a redução da declividade do

canal atua diminuindo a componente da força de gravidade na direção do escoamento, reduzindo a velocidade do fluxo e elevando a lamina de água.

A proposição de solução estrutural que visa minimizar o transbordamento do canal, como a implantação de bacia de retenção, deve ser acompanhada de medidas não estruturais, como aumento de áreas permeáveis, a fim de reduzir as contribuições superficiais na sub-bacia em que o canal está inserido. Outras medidas, para minimizar os prejuízos decorrentes das inundações, tais como seguros contra inundações e sistemas de alerta antecipados poderiam ser adotadas em curto prazo.

Acredita-se que os conhecimentos teóricos e operacionais, desenvolvidos neste trabalho, possam servir de princípio para estudos futuros, em que esteja presente a aplicação de outros métodos, não empregados aqui, possibilitando, aperfeiçoar e melhorar a qualidade dos resultados. Dentre as possibilidades de estudo possíveis pode ser realizada a calibração do modelo através de medidas reais de vazão e assim determinar o valor real do número de Manning das paredes do canal.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, F.G.; SOBRINHA, L. A.; BRANDÃO, J.L.B. Análise da distribuição temporal das chuvas em eventos hidrológicos extremos. **Eng.Sanit. Ambiental.**, v.22, n.2, p.239-250, mar/abr. 2017.
- ARAÚJO FILHO, M.F.; OTA, J.J. Modelagem computacional tridimensional de um vertedouro de baixa queda. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 360-376, abr/jun. 2016.
- ATABAY, S.; SECKIN, G. Prediction of afflux on undistorted scale bridge model. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v.36, n. 6, p.1051-1058, mar. 2009.
- BEJESTAN, M.S.; SHOKRIAN, M. Mathematical Expression for the B-Jump Sequent Depth Ratio on Sloping Bed. **Journal of Civil Engineering**, v. 19, n.3, p. 790-795, 2015.
- BONTEMPO, V.L.; OLIVIER, C.; MOREIRA, C.W.S.; OLIBEIRA, G. Gestão de águas urbanas em Belo Horizonte: avanços e retrocessos. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v.9, n.1, p.5-16, jan./jun. 2012.
- CABRAL, S.L.; CAMPOS, J.N.B.; SILVEIRA, C.S. Integração do sig, hec/hms e hec/ras no mapeamento de área de inundação urbana: aplicação à bacia do rio granjeiro-CE. **Geociências**, São Paulo, v. 35, n. 1, p.90-101, 2016.
- CALÇADA, M.; PORTELA, M.; MATOS, J. Análise de Cheias e Delimitação de Zonas Inundáveis em Timor-Leste: Abordagem por Modelação Geográfica. In: 7º Congresso da Água, Portugal, 2003.
- CAROLLO, F.G.G.; FERRO, V.; PAMPALONE, V. Hydraulic Jumps on Rough Beds. **Journal of hydraulic engineering**, v.133, n.9, set. 2007.
- CAROLLO, F.G.G.; FERRO, V.; PAMPALONE, V. New expression of the hydraulic jump roller length. **Journal of hydraulic engineering**, v. 138, n.11, p.995-999, nov. 2012.
- CHAUDHRY, M.H. **Open Channel Flow**. 2. ed. New York: Springer, 2008.
- CHOW, V.T. **Open Channel Hydraulics**. New York: Mc GRAW-HILL, 1988.
- EAD, S.A.; RAJARATNAM, N. Hydraulic Jumps on Corrugated Beds. **Journal of hydraulic engineering**, v.128, n.7, jul. 2002.
- FARIA, N.O.; BARBASSA, A.P.; SILVEIRA, A. Monitoramento, Modelagem e Simulação de Cenários para a Bacia do Córrego Barbado - Cuiabá/MT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.19, n.1, p.165-176, jan/mar. 2014.
- Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica. **Diretrizes Básicas para Projetos de Drenagem Urbana no Município de São Paulo**. São Paulo, 1999.

FERNADEZ, P.; MOURATO, S.; MORREIRA, M. Comparação dos modelos hec-ras e lsflood-fp na delimitação de zonas inundáveis. **Revista Recursos Hídricos**, v.34, n.1, p.63-73, 2013.

FERREIRA, D.M.; FERNANDES, C.V.S.; GOMES, J. Verification of Saint-Venant equations solution based on the lax diffusive method for flow routing in natural channels. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.22, 2017. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 10 ago. 2017.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Hydraulic Design of Safe Bridges**. Washington DC, 2012. 280p.

GARCIA, J.I.B.; PAIVA, E.M.C.D. Monitoramento Hidrológico e Modelagem da Drenagem Urbana da Bacia do Arroio Cancela – RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.11 n.4, p. 99-108, dez. 2006.

HAMILL, L. **Bridge hydraulics**. Londres: E&Fn spon, 1999.

HENDERSON, F.M. **Open Channel Flow**. New York: Macmillan Publishing, 1966.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. **Cidades**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/crato/pesquisa/30/30051>>. Acesso: 10 de out. 2017.

KATEB, S.; DEBABECHE, M.; RIGUET, F. Hydraulic jump in a sloped trapezoidal channel. **Energy Procedia**, v. 74, p.251-257, 2015.

MARQUES, M.G.; DRAPEAU, J.; VERRETE, J.L. Flutuação de pressão em um ressalto hidráulico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.2, n.2, p. 45-52, dez. 1997.

MELLER, A.; PAIVA, E.M.C.D. Simulação Hidrodinâmica 1D de Inundações em Sistema de Drenagem Urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.12, n.2, p. 81-92, abr/jun. 2007.

MOREIRA, A. A.C. **Modelagem Hidrológica da Bacia do Rio Granjeiro – Crato – CE Composição do Cenário Atual e Simulações de Uso e Ocupação do Solo**. Dissertação - Msc. Engenharia Civil, Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, 2013.

NETO, R.A.N.; BATISTA, L.F.D.R.; COUTINHO, R.Q. Metodologias para Geração de Mapa de Indicadores de Perigo e Áreas Inundáveis: Município de Ipojuca/PE. **Revista Brasileira Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n.2, jun. 2016.

OLIVEIRA, F.A. et al. Determinação do limite da faixa de inundação com uso do HEC-RAS para o parque linear do córrego macambira em Goiânia. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v.11, n.1, p.57-66, 2016.

OLIVEIRA, R.A.F. **Propagação de Ondas de Despacho e Controle de Inundações da bacia do Paraíba do Sul**. Dissertação - Msc. Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PALERMO, M.; PAGLIARA, S. D-jump in rough sloping channels at low Froude numbers. **Journal of Hydro-environment Research**, v.14, p.150-156, 2017.

PORTO, R.M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos:EESC-USP, 2006.

PRÁ, M.D.; PRIEBE, P. DOS S.; TEIXEIRA, E. D.; MARQUES, M. G. Avaliação das Flutuações de Pressão em Ressalto Hidráulico pela Dissociação de Esforços. **Revista Brasileira Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n.1, p.222-231, 2016.

RAO, P.; HROMADKA II, T. V. Numerical modeling of rapidly varying flows using HECRAS and WSPG models. **SpringerPlus**, v.5, n.662, 2016.

REZENDE, O.M.; MINGUEZ, M.G.; VERÓL, A.P. Manejo de Águas Urbanas e sua Relação com o Desenvolvimento Urbano em Bases Sustentáveis integradas — Estudo de Caso dos Rios Pilar-Calombé, em Duque de Caxias/RJ. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.18, n.2, p.149-163, jun. 2013.

RIBEIRO, C.B.M.; LIMA, R.N.S. Simulação de inundações urbanas a partir da integração de técnicas de geoprocessamento à modelagem hidráulica e hidrológica. **Revista de Geografia**, v. 2, n.1, p.1-9, 2011.

SILVA, C.S.; SANTIAGO, A. Urbanização e inundação: conflitos e possibilidades. **Paisagem Ambiente: ensaios**, São Paulo, n. 24, p. 327-334, 2007.

SILVA, R.C.V.; MASCARENHAS, F.C.B.; MINGUEZ, M.G. **Hidráulica Fluvial**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2007.

SILVA, T.A. **Modelagem Hidráulica Do Canal Do Rio Granjeiro, Crato-CE, Utilizando O Programa Computacional HEC-RAS**. 2013. 55 f.: Dissertação (mestrado) – Universidade federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Juazeiro do Norte, 2013.

TAVARES, P.R.L. **Modelagem hidrológica e hidráulica associada a sistemas de informações geográficas para identificação de planícies de inundação e simulação do perfil d'água em um trecho do rio Maranguapinho**. 2005. 113 f.: Dissertação (mestrado) – Universidade federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza, 2005.

TUCCI, C.E.M. Águas urbanas. **Estudos avançados**, São Paulo, v.22, n.63, 2008.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2 ed. Porto Alegre: ABRH, 2001.

TUCCI, C.E.M.; BERTONI, J.C. **Inundações e drenagem urbanas**. In: TUCCI, C.E.M.; BERTONI, J.C. (Org.). **Inundações urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: ABRH, 2003.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual, version 4.1.** Davis, 2010b. 411p.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS River Analysis System: User's Manual, version 4.1.** Davis, 2010a. 766p.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Urban Hydrology for Small Watersheds.** 2.ed. Washington,1986.

VILLANUEVA, A.O.N.; TASSI, R.; ALLASIA, D.G.; BEMFICA, D.; TUCCI,C.E.M. Gestão da drenagem urbana, da formulação à implementação. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v.8, n.1, p. 5-18, jan./jun, 2011.

**ANEXO A – SIMULAÇÕES COM PERÍODOS DE RETORNO DE 20 E 100 ANOS**

Figura 01 – Perfil do escoamento do canal Rio granjeiro para as condições de rugosidade anterior à reforma (Simulação A), escoando uma vazão referente uma precipitação com 100 anos de período de retorno.

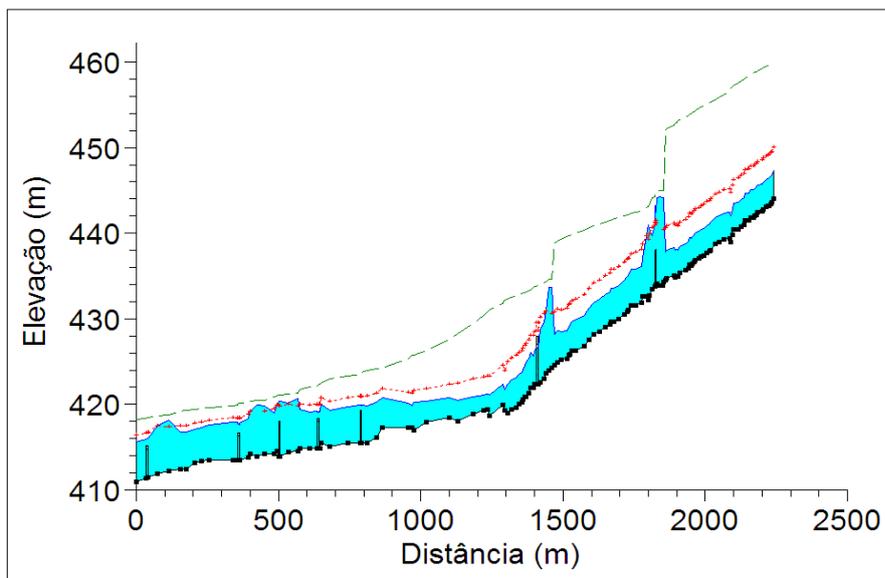


Figura 02 – Perfil do escoamento do canal Rio granjeiro para as condições de rugosidade anterior à reforma (Simulação A), escoando uma vazão referente a uma precipitação com 20 anos de período de retorno.

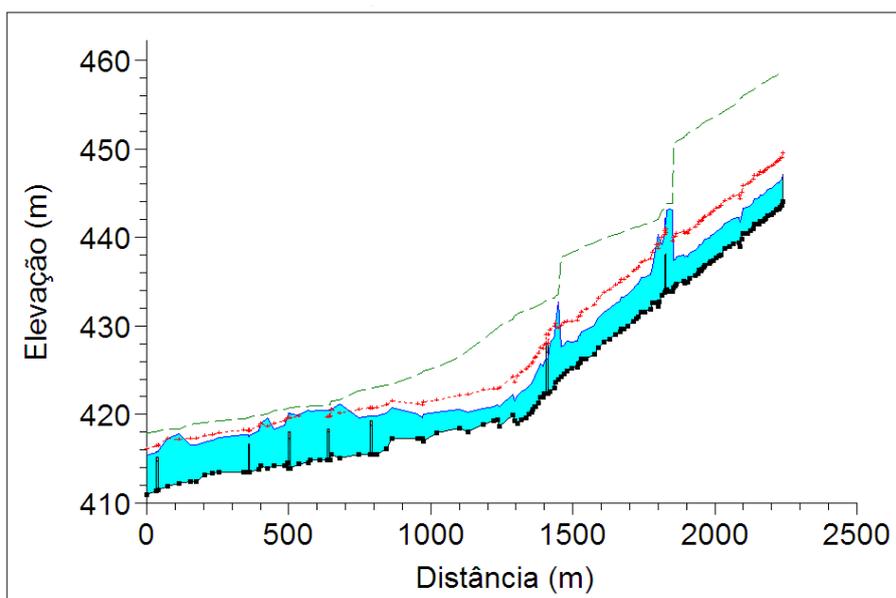


Figura 03 – Perfil do escoamento Rio granjeiro para condições de rugosidade atuais (Simulação B), escoando uma vazão referente a uma precipitação com 100 anos de tempo de retorno.

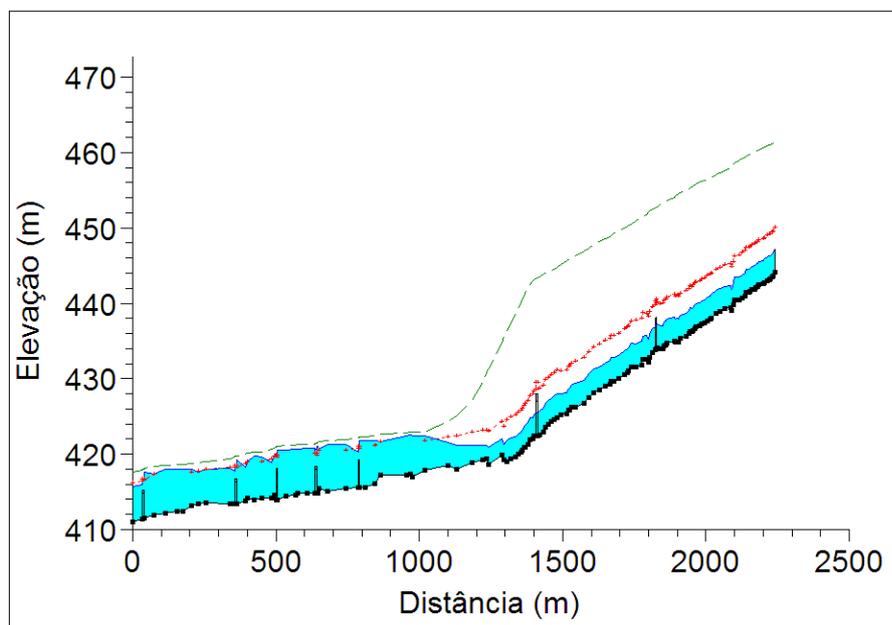


Figura 04 – Perfil do escoamento Rio granjeiro para condições de rugosidade atuais (Simulação B), escoando uma vazão referente a uma precipitação com 20 anos de tempo de retorno.

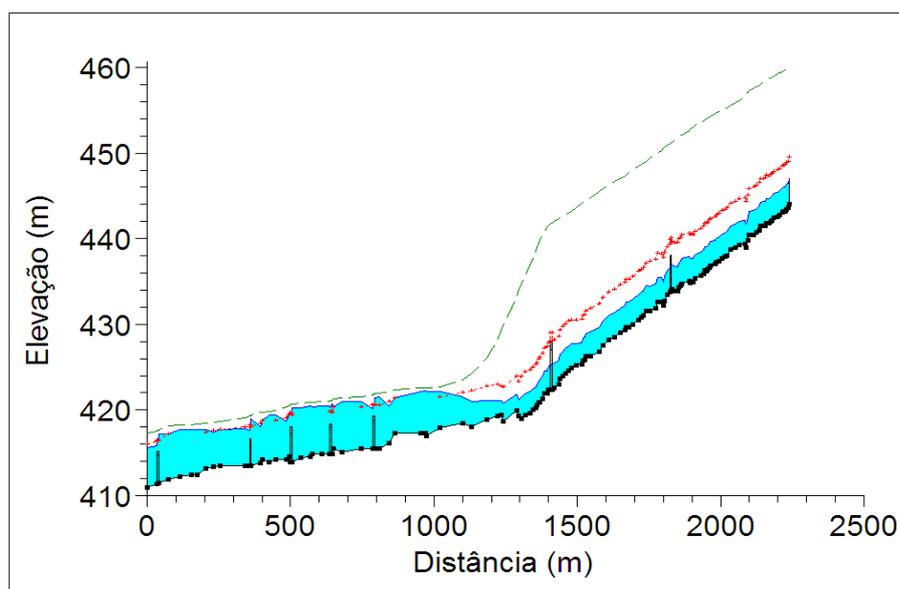


Figura 05 – Perfil do escoamento canal Rio granjeiro para condições de rugosidade simulando uma reforma completa (Simulação C) e escoando uma vazão referente a uma precipitação com 100 anos de tempo de retorno.

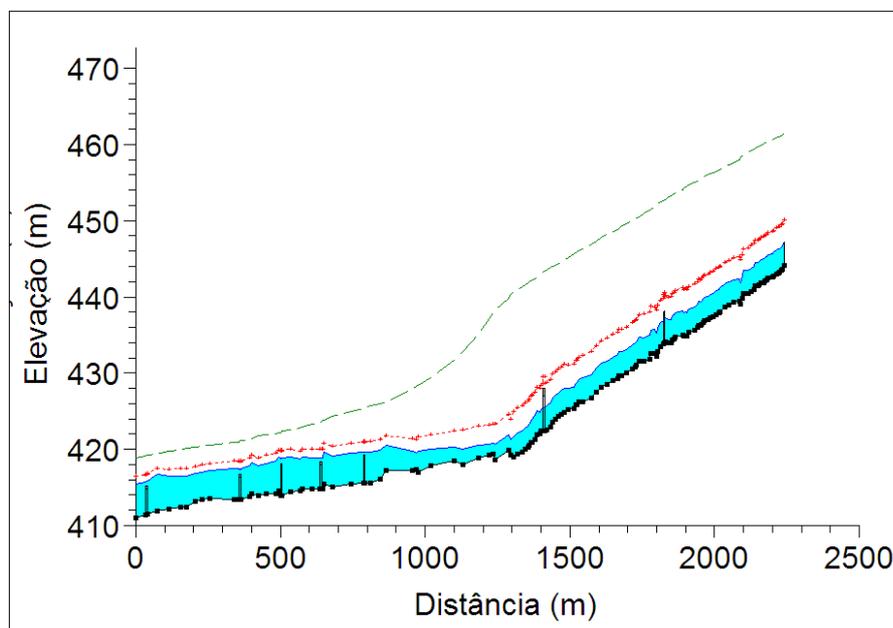


Figura 06 – Perfil do escoamento canal Rio granjeiro para condições de rugosidade simulando uma reforma completa (Simulação C) e escoando uma vazão referente a uma precipitação com 20 anos de tempo de retorno

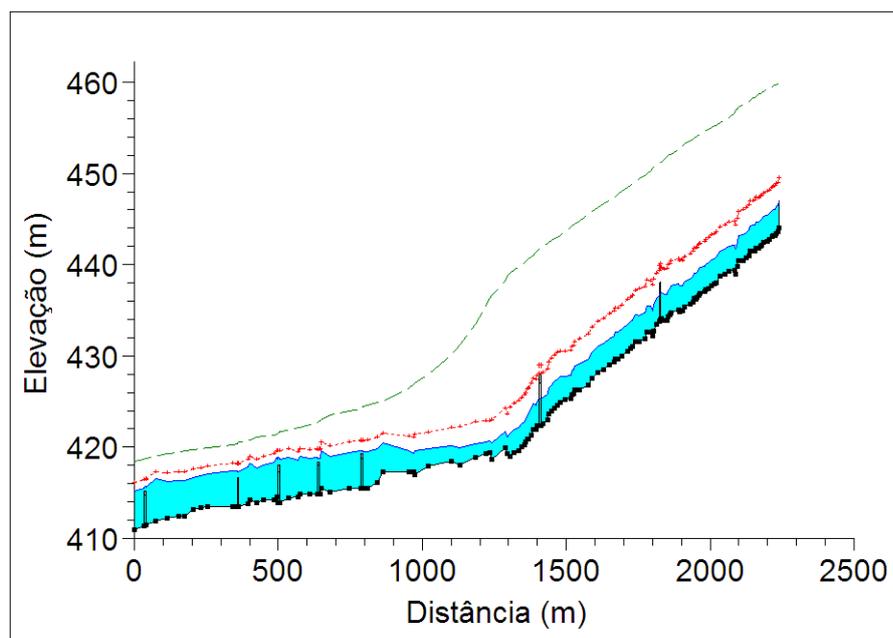


Figura 07 – Perfil do escoamento para canal sem as pontes para condições de rugosidade atuais escoando uma vazão referente a uma precipitação com 100 anos de tempo de retorno (Simulação D).

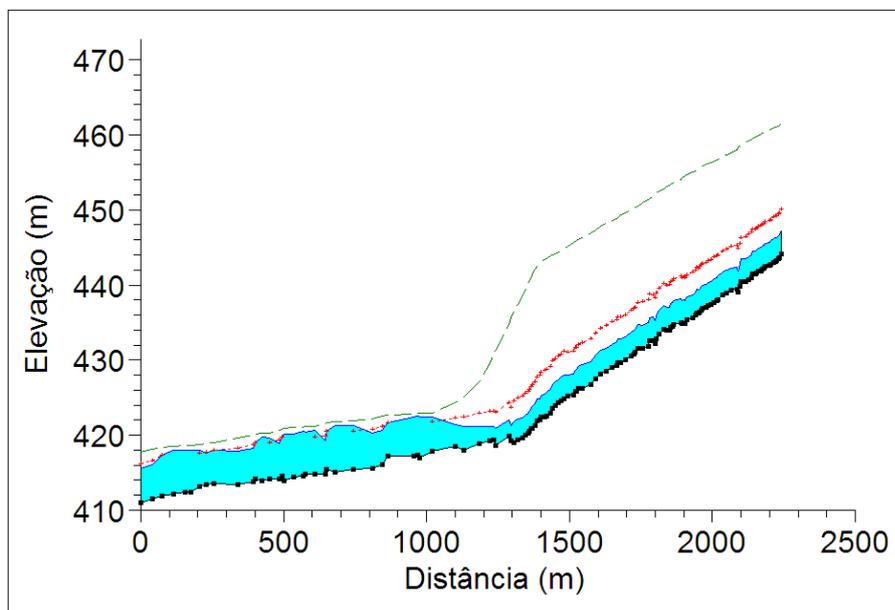


Figura 08 – Perfil do escoamento para canal sem as pontes para condições de rugosidade atuais escoando uma vazão referente a uma precipitação com 20 anos de tempo de retorno (Simulação D).

