

MODELAGEM HIDRÁULICA PARA DETERMINAÇÃO DE FOCOS DE INUNDAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JAGUARÃO EM JOINVILLE

Anaximandro Steckling Müller¹

RESUMO --- O presente trabalho apresenta os estudos hidrológicos e hidráulicos desenvolvidos para análise do sistema de macrodrenagem da bacia do rio Jaguarão em Joinville para os cenários atual de urbanização.

Apresentamos a metodologia para elaboração dos estudos de escoamento hidráulico bem como a fundamentação matemática necessária para equacionamento do comportamento hidráulico de um rio em regime permanente de escoamento.

A partir desses levantamentos foi desenvolvida a modelagem computacional através do programa HEC-RAS que permitiu determinar as características hidráulicas do escoamento de um determinado evento de cheia nas seções de interesse dos cursos da água.

Os estudos permitiram determinar os pontos de estrangulamento que apresentam insuficiência na sua capacidade hidráulica para a situação atual de urbanização e chuvas com períodos de retorno de 5, 10, 25 e 50 anos. Além de apresentar dados para a determinação das manchas de inundação e servir como base para um estudo de alternativas que solucionem esses problemas.

ABSTRACT – This paper presents the hydraulic and hydrologic studies developed for the Jaguarão river basin drainage system in Joinville for the present and future urbanization scenarios used to the establish the required works.

We present a methodology for preparation of studies of hydraulic flow and the mathematical reasoning required for equating the hydraulic behavior of a river in steady flow. From these surveys was developed in computational modeling through the HEC-RAS to determine the hydraulic characteristics of flow of a particular event of a flood of interest in the sections of water courses.

Studies have determined the bottlenecks that have insufficient hydraulic capacity to its current status of urbanization and rainfall with return periods of 5, 10, 25 and 50 years. In addition to providing data to determine the spots of flooding and serve as a basis for a study of alternatives to solve these problems.

Palavra-chaves: Modelagem Hidraulica, HEC-RAS, Macrodrenagem

1) Mestrando da USP-SP e Engenheiro Civil - ENGECORPS - Corpo de Engenheiros Consultores - Alameda Tocantins, 145 – 4º. andar, Alphaville – Barueri –SP. E-mail: anaximandro@engecorps.com.br

1 INTRODUÇÃO

Joinville, assim como as demais cidades brasileiras, passa por um processo de expansão urbana um tanto quanto desenfreada; devido a este processo e pela cidade ser caracterizada por uma malha fluvial muito densa a cidade apresenta problemas de inundações (Becker, 2006).

O município de Joinville possui uma área total de 1.151,69 km² segundo dados do Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Joinville (IPPUJ). Deste total, apenas 18,76% do Município corresponde a áreas urbanas. A população de acordo com o censo de 2000 do IBGE é de 429.604 habitantes.

O objetivo do presente trabalho foi realizar uma análise do sistema de macro-drenagem da Bacia Hidrográfica do Rio Jaguarão, além de servir como base para a tomada de decisões sobre intervenções que minimizassem os efeitos negativos causados pelas inundações.

A bacia possui uma área total de 8,49 km², apresenta-se num zoneamento quase que na sua totalidade como zoneamento residencial havendo alguns corredores de serviços e a zona de expansão central, sua população de acordo com o censo de 2000 do IBGE é de 17.380 habitantes.

Na Bacia Hidrográfica do Rio Jaguarão são constantes os alagamentos pelo fato de se localizar numa região densamente ocupada a muitos anos e praticamente todo o seu curso encontrar-se em meio de quadras. Os conjuntos de estrangulamentos existentes ao longo do Rio Jaguarão culminam com o aparecimento de grandes áreas de inundações em dias de chuvas com grande intensidade. Essas áreas estão localizadas na região entre a Rua Marieta Stock, esquina com a Rua 25 de Agosto, até a foz do Rio Jaguarão.

Os estudos hidrológicos e hidráulicos realizados na bacia hidrográfica do Rio Jaguarão juntamente com o cadastramento topobatimétrico do rio e a modelagem computacional, visaram levantar as características dos dispositivos ao longo do mesmo, possibilitando identificar os pontos de estrangulamento e caracterizar as áreas que sofrem com inundações.

Ao analisar a bacia de forma sistêmica e não pontual, foi possível identificar soluções estruturais para os pontos de estrangulamentos que permitam um desempenho harmônico reduzindo assim os riscos de inundações. Além disso, permitiu avaliar de forma objetiva o impacto destas intervenções no rio Cachoeira que recebe as águas drenadas pela bacia hidrográfica do rio Jaguarão.

2 MODELO HIDRÁULICO

2.1 Fundamentos Teóricos

2.1.1 Modelagem de Escoamento em Canais

Dentro do campo da engenharia hidráulica fluvial, a modelação matemática torna-se indispensável, principalmente quando se trata do dimensionamento de canais a céu aberto.

O equacionamento tradicional para a determinação das condições de escoamento em rios e canais (equações de Chezy, Manning, fórmula universal, entre outras) possibilita o cálculo de escoamentos em regime permanente e uniforme, ou seja, escoamentos unidirecionais com características constantes tanto no tempo como ao longo do trecho analisado. Quando há variação das condições de escoamento em qualquer uma dessas variáveis, torna-se necessária a análise através de métodos numéricos mais complexos.

A utilização dos modelos numéricos de cálculo, associados aos grandes avanços ocorridos na área de informática com disponibilidade de softwares adequados permite agilizar a entrada e a manipulação de extensas quantidades de dados e a possibilidade de examinar uma quantidade maior de alternativas de soluções de engenharia com um maior grau de confiabilidade.

O cálculo do escoamento permanente em canais artificiais ou naturais tem como objetivo a análise do funcionamento destes, nas condições onde as grandezas hidráulicas variam ao longo do espaço, em função de um dado conjunto de dados de geometria e condições de extremidade. O regime permanente de escoamento em determinado canal é caracterizado pela constância da vazão no tempo, ao longo de todo o conduto em análise.

Já o escoamento hidráulico não permanente tem como característica a variação de vazões e níveis d'água, ao longo do tempo, ocasionada por qualquer interferência ou novos "inputs" ao sistema capazes de desestabilizar temporariamente as características de um regime permanente de vazões.

Diversos autores e organizações tem apresentado programas computacionais para solucionar as equações de escoamento não uniforme em rios e canais, tanto em regime permanente como em regime variado.

2.1.2 O Modelo HEC-RAS

O US Army Corps of Engineers, através do Hydrologic Engineering Center desenvolveu um modelo computacional para a análise de escoamento em rios e canais, denominado HEC-RAS, atualmente em sua versão 4.0. Os fundamentos teóricos empregados nesta modelagem matemático-computacional para o escoamento em regime permanente são apresentados a seguir.

Equações Básicas

No modelo HEC-RAS os perfis de linha d'água são calculados de uma seção transversal para a seguinte resolvendo a Equação de Energia:

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

Onde:

Y_1, Y_2 : profundidade de água a montante e a jusante das seções transversais

Z_1, Z_2 : carga de posição em relação a um plano horizontal de referência α_1, α_2 : coeficiente de correção da energia cinética ou coeficiente de Coriolis

g : aceleração da gravidade

h_e : perda de carga de energia

A Figura 1 apresenta de forma esquemática a relação entre os termos da equação.

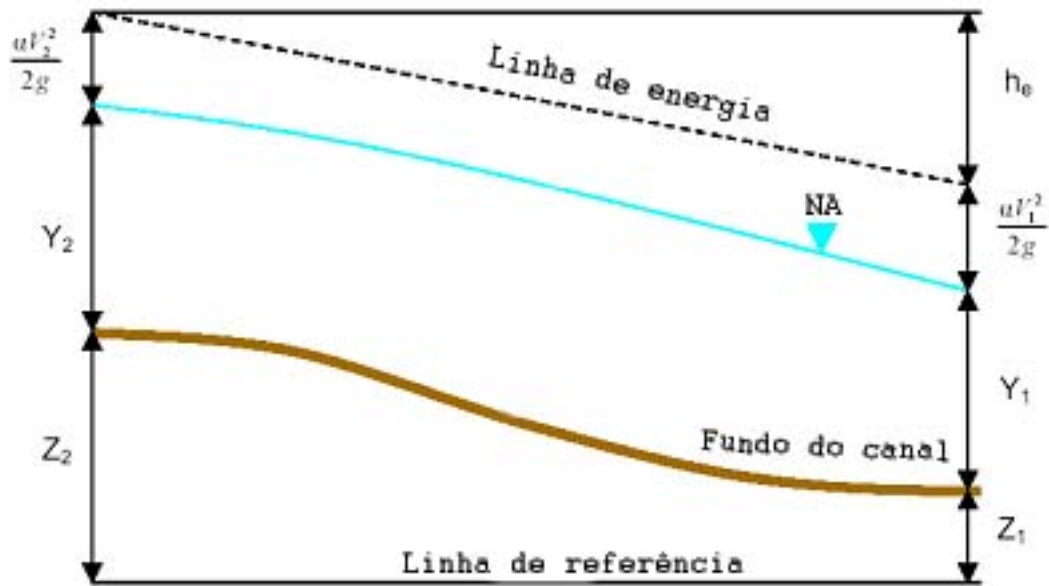


Figura 1 - Representação esquemática dos termos da equação de energia

A perda de energia entre duas seções compreende as perdas por atrito e as perdas por expansão/contração do escoamento, e pode ser descrita por:

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (2)$$

Onde

L : comprimento do tramo entre duas seções

\bar{S}_f : coeficiente de atrito resultante da declividade entre duas seções

C : coeficiente de perda de expansão/contração

O comprimento do tramo por distâncias balanceadas, entre as duas seções sucessivas é obtido por:

$$L = \frac{L_{lob} \bar{Q}_{lob} + L_{ch} \bar{Q}_{ch} + L_{rob} \bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad (3)$$

Onde

L_{lob}, L_{ch}, L_{rob} : comprimento das seções transversais especificadas para a vazão na margem esquerda, no canal principal e na margem direita

$\bar{Q}_{lob}, \bar{Q}_{ch}, \bar{Q}_{rob}$: média aritmética das vazões entre as seções para a margem direita, para o canal principal e margem esquerda

Debitância da Seção

O cálculo da capacidade total de descarga da seção transversal (debitância da seção) requer a subdivisão da seção transversal em partes onde a velocidade de escoamento seja uniformemente distribuída. Para tanto, na metodologia empregada no HEC-RAS, a seção transversal é subdividida, com base nos pontos definidos para mudança do coeficiente de rugosidade. A debitância de cada subdivisão é calculada com a utilização da equação de Manning:

$$V = \frac{1}{n} Rh^{2/3} I^{1/2} \quad (4)$$

Onde:

V : velocidade

n : coeficiente de rugosidade de Manning

Rh : raio hidráulico

I : declividade do canal

Para o canal central a debitância é calculada de forma usual, considerando um único elemento. Nas subdivisões correspondentes às margens a debitância é obtida por somatória das debitâncias incrementais calculadas para os trechos entre dois pontos que definem a seção. A debitância total é obtida pela somatória das debitâncias do canal central e de ambas as margens.

Cálculo do valor da Energia Cinética em cada Seção

Por se tratar de um cálculo unidimensional, para cada seção transversal é definido um único nível de água e, conseqüentemente, é necessário o cálculo de um valor médio da energia cinética na seção. Para um dado nível d'água, a energia cinética média é obtida pela média ponderada pela vazão das energias cinéticas em cada subdivisão da seção transversal, conforme indicado na Figura 2.

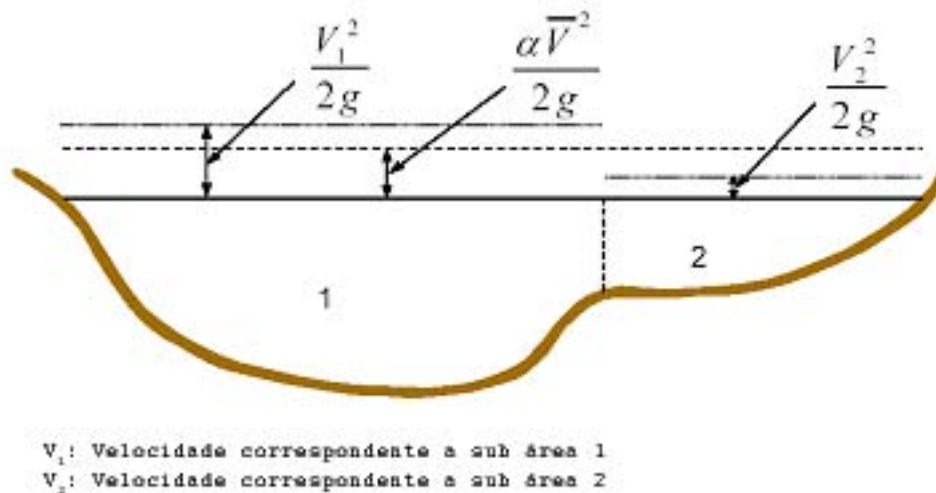


Figura 2 - Representação dos termos cinéticos em cada subdivisão da seção transversal

O valor do coeficiente Alpha de ponderação é obtido pela equação 5:

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \left[\frac{K_{lob}^3}{A_{lob}^2} + \frac{K_{ch}^3}{A_{ch}^2} + \frac{K_{rob}^3}{A_{rob}^2} \right]}{K_t^3} \quad (5)$$

Onde

A_t : área total da seção transversal

A_{lob}, A_{ch}, A_{rob} : áreas correspondentes à margem esquerda, ao canal principal e a margem direita

K_t : vazão total da seção transversal

K_{lob}, K_{ch}, K_{rob} : vazões correspondentes à margem esquerda, ao canal principal e a margem direita

Cálculo das Perdas por Atrito

O programa HEC-RAS possui controles para possibilitar a utilização de vários métodos de estimativa das perdas médias por atrito. Tipicamente é utilizado o cálculo por média da debitância, conforme equação 6:

$$\bar{S}f = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \quad (6)$$

Cálculo das perdas por contração ou expansão do escoamento

As perdas por expansão ou contração são calculadas pela equação 7:

$$h_{ce} = C \left| \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right| \quad (7)$$

Onde

C : coeficiente de contração/expansão

São definidos coeficientes diferentes para expansão ou contração do escoamento e o programa assume se tratar de expansão ou contração e função do aumento ou diminuição da energia cinética entre as seções, respectivamente.

Procedimentos Computacionais

O NA em uma seção é determinado por um processo iterativo, solucionando as equações apresentadas:

- inicialmente é adotado um valor arbitrário para o NA na seção seguinte de cálculo (a montante ou a jusante de uma seção conhecida, conforme o escoamento seja fluvial ou torrencial);
- com base no NA são calculadas a debitância total da seção e a energia cinética;
- de posse desses valores são calculadas as perdas entre as duas seções;
- a partir das perdas é calculado o NA na seção seguinte de cálculo;
- os valores inicial e calculado são comparados . O processo é repetido iterativamente, até uma precisão de 3 mm.

Processos numéricos são utilizados para acelerar a convergência dos cálculos.

2.2 Avaliações Iniciais

Os estudos iniciais de avaliação do comportamento do rio Jaguarão foram realizados utilizando a modelagem apresentadas: HEC-RAS.

A estrutura para realizar a modelagem com o programa HEC-RAS baseia-se nas características das geometrias do leito, no regime de simulação e nas vazões ou hidrogramas inseridos.

Para delimitação da geometria do leito foram efetuados inúmeros levantamentos topobatimétricos e traçados perfis transversais e o perfil longitudinal do leito do rio. Além de efetuar levantamentos da calha do rio necessitou-se da coleta de dados sobre os dispositivos existentes no seu traçado.

O programa HEC-RAS impõe alguns critérios com relação a estrutura da geometria do leito do rio. Exige uma seção a montante e uma a jusante de cada dispositivo (culvert), uma seção no ponto de inserção da vazão do trecho ou hidrograma de cheia das sub-bacias. Além desses critérios adotamos seções intermédias para caracterizar variações no revestimento canal e variações bruscas da seção principal de escoamento.

Numa análise prévia o regime de escoamento adotado foi o regime permanente, ou seja, a velocidade, a profundidade e a vazão permanecem constante ao longo do tempo. Entretanto numa passagem de uma onda de cheia o regime de escoamento é não-permanente, pois as características de mencionadas acima variam no tempo. A princípio é um contra-senso adotar o regime permanente para a análise da cheia, mas quando o escoamento mostra-se gradualmente variado como no presente caso de estudo, a modelagem em regime permanente resulta em dados com qualidade satisfatória.

As vazões de entrada no modelo foram extraídas do programa HEC-HMS, para o regime permanente serão inseridas as vazões de pico nos trechos caracterizados pelas propagações. Já para o regime não-permanente os hidrogramas de cheia, gerados por cada sub-bacia são inseridos como contribuições laterais nas seções transversais onde ocorre a junção de cada sub-bacia com o leito principal do Rio Jaguarão.

O modelo HEC-RAS exige alguns parâmetros para caracterizar as seções transversais e suas mudanças ao longo do canal. Entre esses parâmetro estão distância da seção em relação a seção de jusante, esta distância foi limitada ao máximo de 150 m, limites do fundo do canal, coeficientes de Manning para representar a rugosidade do fundo e das margens do canal variando de acordo com o material conforme a tabela 1, e os coeficientes de contração e expansão adotados respectivamente 0,1 e 0,3.

Para caracterização dos dispositivos necessita-se de parâmetros como distância do dispositivo à seção de montante, comprimento do dispositivo, coeficiente de entrada (adotado 0,5), coeficiente de saída (adotado 1,0), coeficiente de rugosidade de Manning utilizando a tabela 1, cotas de fundo na entrada e saída do dispositivo, seção transversal do dispositivo, características do deck do dispositivo.

Tabela 1 – Valores do coeficiente de rugosidade da fórmula de Manning

| Natureza das Paredes | n |
|---|-------|
| Galeria pré-moldada | 0,014 |
| Tubo de concreto | 0,015 |
| Canal em pedra revestida de argamassa | 0,013 |
| Canal em pedra revestida de argamassa alisada | 0,012 |
| Canal em pedra sem revestimento | 0,020 |
| Canal em terra | 0,030 |
| Canal em terra com vegetação nos taludes | 0,035 |
| Canal em gabião* | 0,026 |

Fonte: Hidráulica básica (Porto, 2003, p.273)

Na simulação em regime permanente foram adotados as vazões de pico geradas pela modelagem hidrológica no programa HEC-HMS para os cenários de ocupação atual e chuvas com períodos de retorno de 5, 10, 25 e 50 anos. Essas vazões e seções de inserção são apresentados na tabela 2. Adotamos o regime de simulação subcrítico ou lento, a simulação nesse regime necessita

uma condição de jusante, como condição de jusante informamos o nível da lâmina da água na seção mais à jusante do trecho em estudo igual a 2,5 m. Esse valor foi adotado devido a preamar observada.

Tabela 2 – Vazões de pico.

| Seção de Inserção | Vazões para o Cenário de Ocupação Atual (m ³ /s) | | | |
|-------------------|---|----------|----------|----------|
| | T=5anos | T=10anos | T=25anos | T=50anos |
| 1010 | 1,60 | 2,60 | 4,80 | 7,10 |
| 981 | 3,20 | 5,20 | 9,10 | 13,20 |
| 961 | 5,80 | 9,10 | 15,40 | 21,90 |
| 805 | 18,60 | 27,00 | 42,70 | 58,80 |
| 703 | 23,80 | 34,00 | 53,00 | 72,40 |
| 510 | 20,50 | 28,10 | 42,60 | 58,50 |
| 485 | 29,00 | 40,50 | 62,60 | 85,40 |
| 445 | 29,50 | 41,00 | 62,70 | 85,50 |
| 421 | 28,50 | 39,40 | 60,30 | 82,70 |
| 389 | 28,80 | 40,20 | 62,10 | 85,50 |

3 AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE ATUAL DA CALHA DO RIO JAGUARÃO

As seções transversais resultantes do levantamento topográfico foram implantadas no modelo HEC-RAS, considerando distâncias aproximadas entre as mesmas. A planta esquemática do modelo pode ser observada na figura 3.

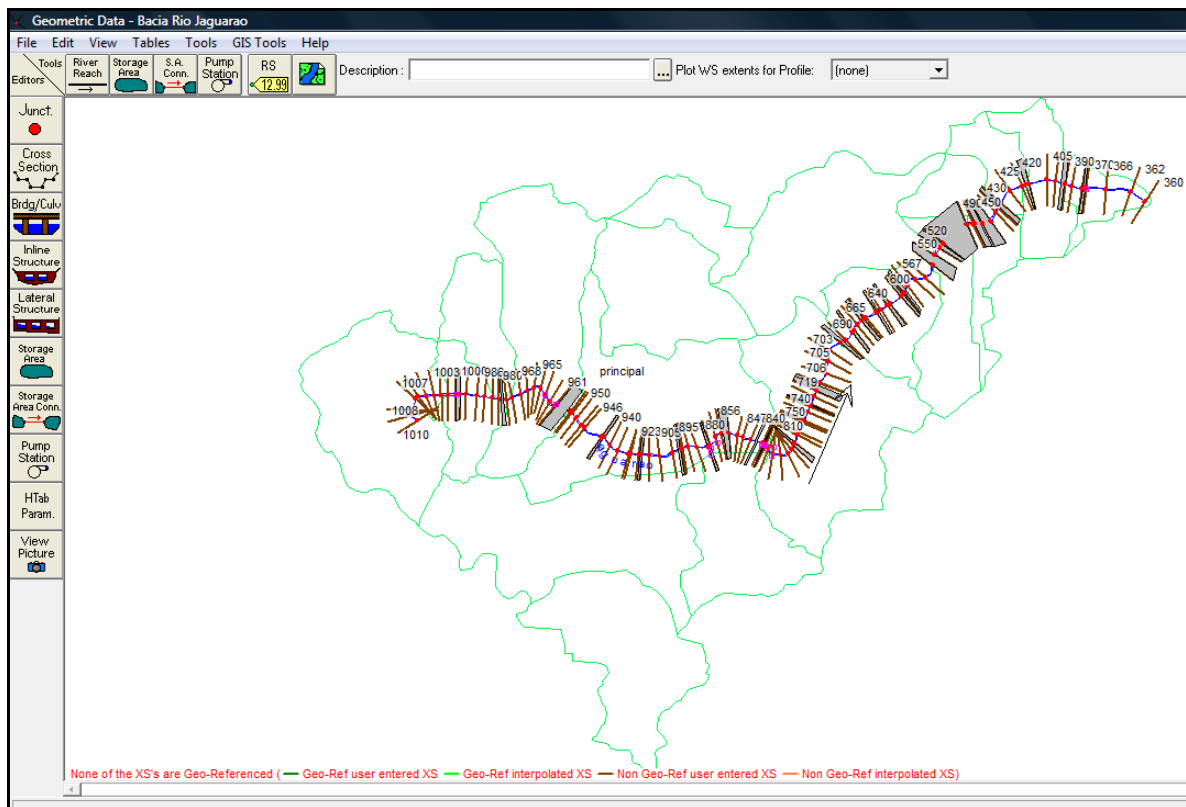


Figura 3 – Apresentação Esquemática do Rio Jaguarão em Planta

A partir das simulações obtivemos como resultados os perfis da água para cada simulação, estes estão apresentados nas figuras 4, 5, 6 e 7.

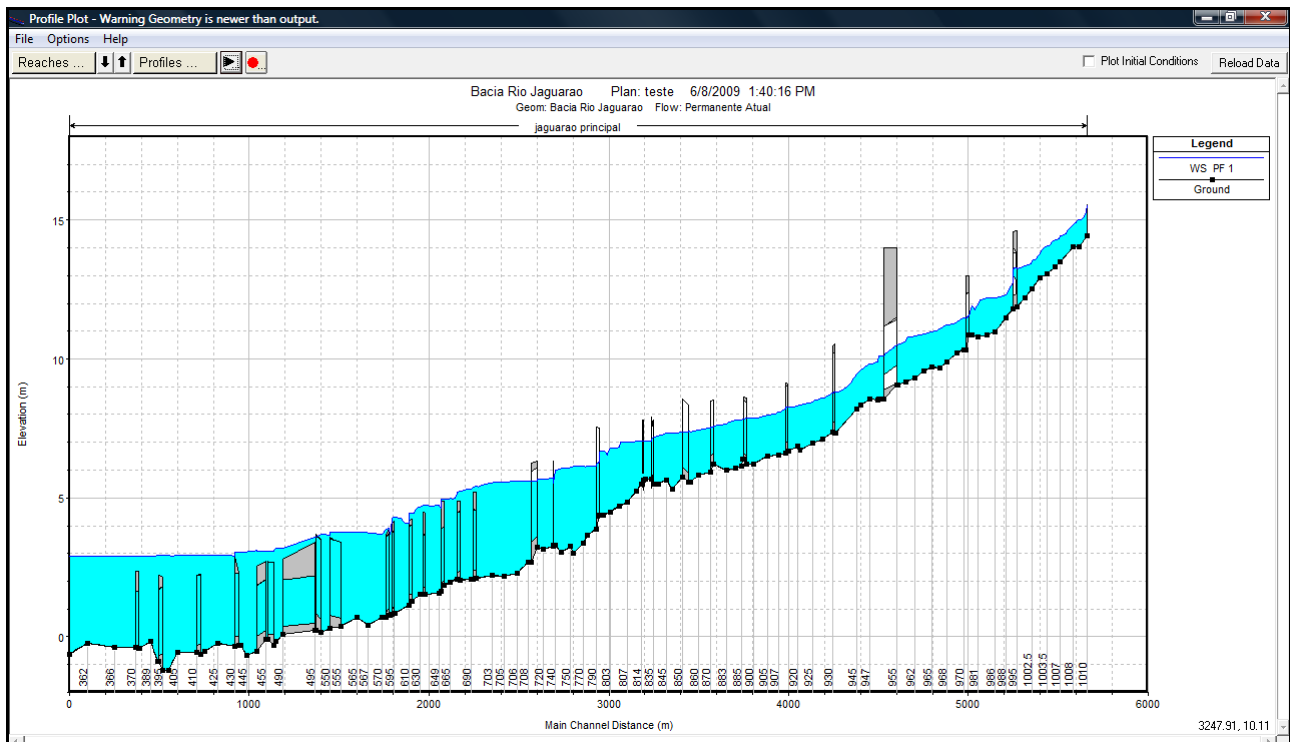


Figura 4 – Apresentação Linha da Água do Rio Jaguarão (T=05 anos)

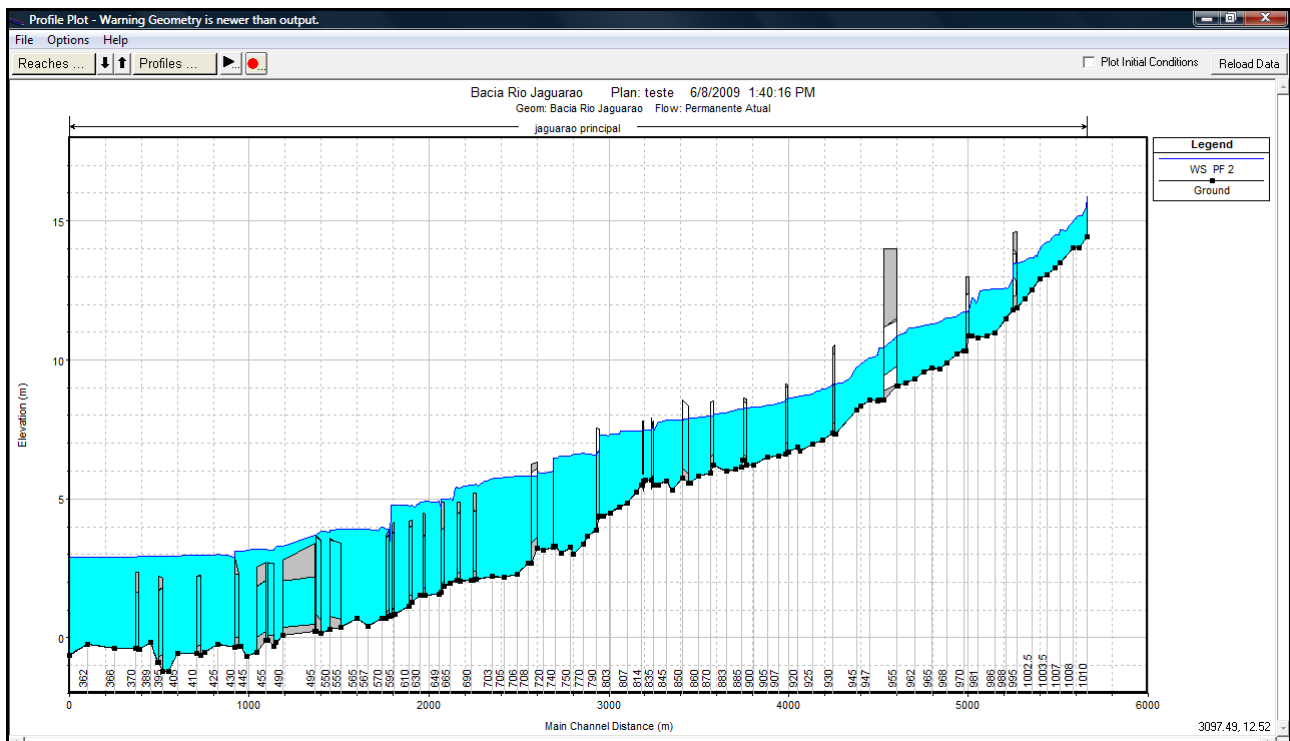


Figura 5 – Apresentação Linha da Água do Rio Jaguarão (T=10 anos)

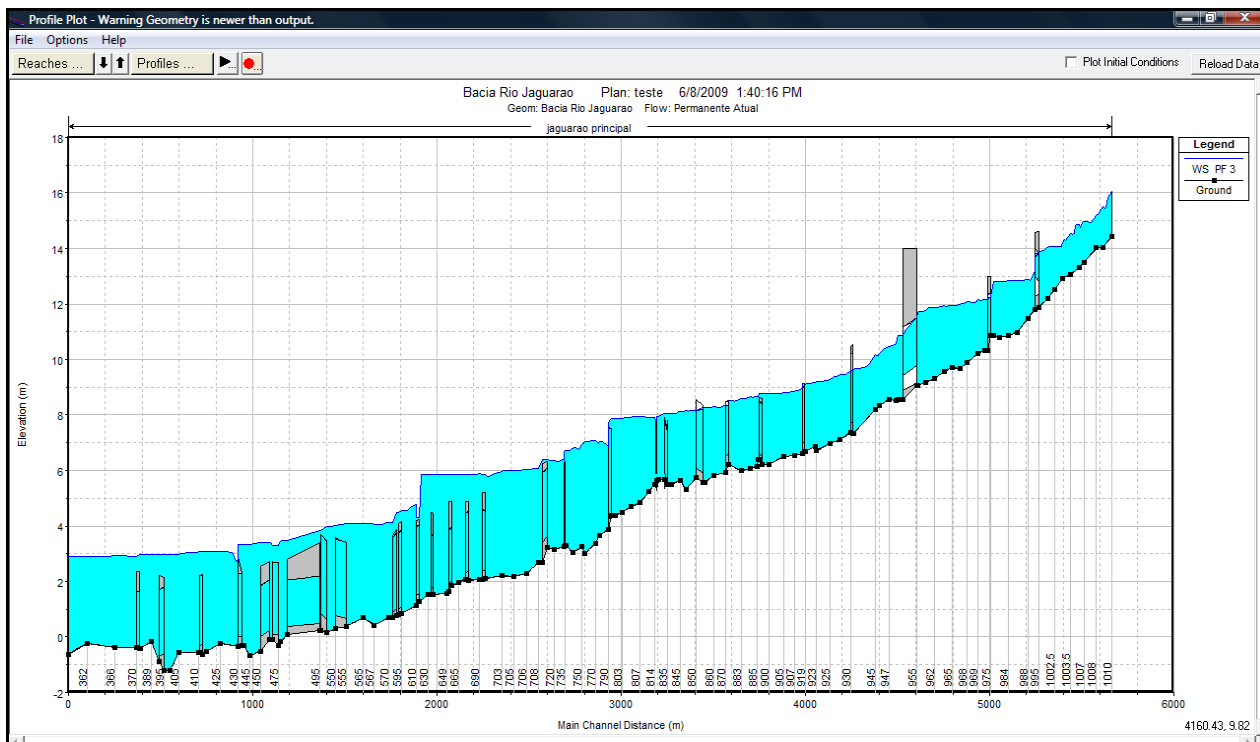


Figura 6 – Apresentação Linha da Água do Rio Jaguarão (T=25 anos)

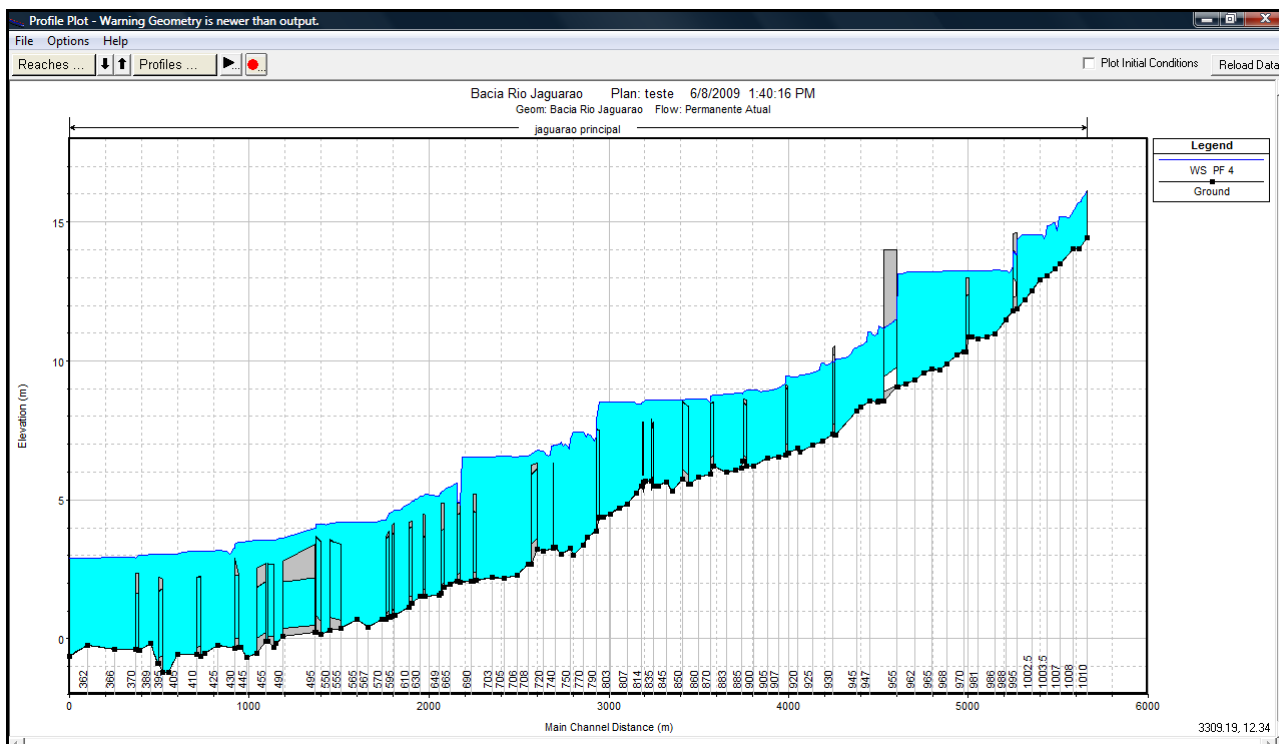


Figura 7 – Apresentação Linha da Água do Rio Jaguarão (T=50 anos)

Conforme pode ser observado nessas figuras:

A vazão de uma precipitação com $Tr = 5$ anos resultas em níveis de água que provocam pequenas inundações desde a Rua Paraíba até a foz do Rio Jaguarão, essas inundações foram confirmadas junto a moradores da região e ocorrem freqüentemente, o que ocasiona danos às propriedades e moradores desses locais;

A vazão de uma precipitação com $Tr = 5$ anos resulta em níveis de água que provocam significativas inundações desde a Rua Independência até a foz do Rio Jaguarão;

A vazão de uma precipitação com $Tr = 25$ anos resultas em níveis de água que provocam grandes inundações desde a Rua Marieta Stock até a foz do Rio Jaguarão, essa inundações foram confirmadas num evento ocorrido no mês de novembro de 2008, onde foi observado precipitações na região com período de recorrência de aproximadamente 40 anos;

A vazão de uma precipitação com $Tr = 50$ anos resultas em níveis de água que provocam grandes inundações desde a Rua Marieta Stock até a foz do Rio Jaguarão, essa inundações foram confirmadas num evento ocorrido no mês de novembro de 2008, onde foi observado precipitações na região com período de recorrência de aproximadamente 40 anos, as precipitações com $Tr = 50$ anos ocasionam manchas de inundação com profundidade de aproximadamente 1,5m;

Para vazões maiores a velocidade de escoamento na calha apresenta valores da ordem de 2,5 à 3,0 m/s;

O número de Froude da calha do rio Jaguarão é na sua totalidade inferior a 1 caracterizando assim escoamentos fluviais.

4 CONCLUSÕES

Foram apresentados os estudos hidráulicos desenvolvidos para a análise do sistema de macro-drenagem da bacia do Jaguarão nos cenários atual. Apresentamos o equacionamento de forma geral sobre o escoamento em canais a céu aberto, servindo como base para a determinação das características hidráulicas de um corpo hídrico sujeito a um determinado evento de escoamento.

Por meio da obtenção das características físicas do Rio Jaguarão e da determinação dos hidrogramas de cheia afluentes a esse corpo hídrico, realizaram-se estudos que retratasse os fenômenos de cheias ocorridos freqüentemente na bacia. A aplicação desta metodologia permitiu a identificação das seções de estrangulamento do sistema de macro-drenagem na situação atual que permitirá a análise de alternativas estruturais para solução dos problemas de inundações que afetam esta área de Joinville.

BIBLIOGRAFIA

- BECKER, P. “*Obtenção de informações para plano diretor de drenagem urbana utilizando SIG*”, 2006. 107 p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- FUNDAÇÃO DO MEIO AMBIENTE. “*Atlas ambiental da região de Joinville: complexo hídrico da baía da Babitonga*”, 2. ed. Florianópolis: FATMA/GTZ, 2003. 152 p.
- GARCIA, L. A. V. “*Ajuda memória*”, [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <carla.cristina@joinville.sc.gov.br> em 26 jun. 2006.
- GONÇALVES, M. L. “*Geologia para planejamento de uso e ocupação territorial do município de Joinville*”, 1993. 70 p. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- LOPES, F. H. Y.; RAMOS, D. A. “*Comparação das equações de chuvas na área urbana de Joinville – SC*”, 2006. 42 p. Relatório técnico – Prefeitura Municipal de Joinville – Secretaria de Infra-Estrutura Urbana – Unidade de Drenagem, Joinville, 2006.
- PFASSTETTER, O. “*Chuvas intensas no Brasil*”, 2. ed. Rio de Janeiro: DNOS, 1982. 426p.
- PORTO, R. de M. “*Hidráulica básica*”, 2. ed. São Carlos: EESC-USP, 2003. 540 p.
- SILVA, R. C. V.; MASCARENHAS, F. C. B.; MIGUEZ, M. G. “*Hidráulica Fluvial*”, 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Universidade COPPE/UFRJ, 2007. vol. 1.
- SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. “*Revista Brasileira de Recursos Hídricos*”, Porto Alegre, v.10, n.1, p.5-23, jan./mar. 2005.
- TUCCI, C. E. M. Gerenciamento da drenagem urbana. “*Revista Brasileira de Recursos Hídricos*”, Porto Alegre, v.7 n.1, p.5-27 jan./mar. 2002.
- TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. M. L. da M. (Org.). “*Avaliação e controle da drenagem urbana*”, 1. ed. Porto Alegre: Editora ABRH, 2001. 548 p.
- TUCCI, C. E. M. (Org.) et al. “*Drenagem urbana*”, 1. ed. Porto Alegre: Editora Universidade (UFRGS)/ABRH, 1995. 428 p. v. 2.
- U.K. INSTITUTE OF HYDROLOGY FLOOD STUDIES REPORT. “*National environmental research council*”, 1975. v. II. Wallingford, United King, 1975.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS. “*HEC-RAS 4.0*”, Disponível em: <http://www.hec.usace.army.mil> Acesso em: 22 June 2008, 10:55:54.
- US Soil Conservation Service, “*Urban Hydrology for Small Watersheds*”, Tech. Release 55 (2^o edition), junho de 1986.