



XII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

INFLUENCIA DA DECLIVIDADE E DO NÚMERO DE MANNING NO COMPORTAMENTO DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DIFUSIVA

Alice Rocha de Souza¹ ; Maria Patrícia Sales Castro² ; Raimundo Oliveira de Souza³ & Ticiania Fontoura Vidal⁴

RESUMO – Um dos assuntos mais importantes da engenharia é a análise da propagação de ondas ao longo da extensão de um rio. Esta propagação é obtida com a resolução das equações de continuidade e de quantidade de movimento simultaneamente, conhecidas como Equação de Saint-Venant. Se os termos de inércia na equação de Saint-Venant são desprezíveis, a equação será convertida em equação da onda difusiva. Neste estudo busca-se entender o comportamento da propagação da onda difusiva bem como identificar a influencia dos fatores de declividade e número de Manning tanto no espaço quanto no tempo. O sistema de equações de Saint-Venant foi resolvido pelo método das Diferenças Finitas e elaborado um programa computacional para a sua solução matemática. Os resultados apresentaram que tanto o número de Manning quanto a declividade apresentam influencia na propagação da onda no espaço e tempo.

ABSTRACT– One of the most important subjects in river engineering is flow routing analysis of rivers through extension of river. The flow routing is obtained with solving simultaneous continuity and momentum equation, well-known as Saint – Venant equations. If inertia terms in Saint – Venant equations are negligible, flow equation will be converted to diffusion equation. In this study seeks to understand the diffusive wave flood routing and to identify the influence of slope and Manning number of both space and time factors. The system of Saint-Venant equations was solved by the method of Finite Differences. A computer program was developed for its mathematical solution. The results showed that both the number of Manning as the slope feature influences the wave propagation in space and time.

Palavras-Chave – Modelo da Onda Difusiva, Propagação de Onda, Mecânica de Rios.

1) Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental. Doutoranda em Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará e bolsista CAPES. Endereço: Campus Pici. Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental-DEHA. Avenida Mister Hull, S/Nº, Bloco 713, Fortaleza-Ceará. CEP- 60.445-760. Fone: 33669771. Email: alycesouza@hotmail.com

2) Mestranda em Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará e bolsista do CAPES. Endereço: Campus do Pici, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental-DEHA. Avenida Mister Hull, S/Nº, Bloco 713, Fortaleza-Ceará. CEP- 60.445-760. Fone: (85) 33669771. E-mail: patricia.sales@gmail.com

3) Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Endereço: Campus do Pici, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental-DEHA. Avenida Mister Hull, S/Nº, Bloco 713, Fortaleza-Ceará. CEP- 60.445-760. Fone: (85) 3366. 9771, e-mail: rsouza@ufc.br

4) Mestre e doutoranda em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará e bolsista do FUNCAP. Endereço: Campus Pici. Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental-DEHA. Avenida Mister Hull, S/Nº, Bloco 713, Fortaleza-Ceará. CEP- 60.445-760. Fone: (85) 33669771. Email: ticianafvidal@gmail.com

1 - INTRODUÇÃO

Desde a sua origem o homem convive com os fenômenos da natureza, entre eles encontram-se as cheias. Os fenômenos de cheia fluvial, com inundação de zonas adjacentes, podem colocar em risco a segurança de pessoas e de bens, além de comprometer a qualidade do ambiente e o desenvolvimento econômico de uma região. A extensão das inundações e os impactos correspondentes podem ser mitigados com base na implementação de restrições em determinadas atividades humanas e/ou construção de obras de controle. De acordo com o artigo 3º da Lei 12.608/2012, cabe aos municípios criar mecanismos de controle e fiscalização para evitar a edificação em áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos.

A aplicação desta lei é uma oportunidade para o desenvolvimento de medidas preventivas e sustentáveis das inundações proporcionando novos desafios a engenharia. Os modelos hidrológicos e hidráulicos espacialmente distribuídos para determinação das zonas inundáveis são uma ferramenta importante que permite a oportunidade de um bom planejamento e gestão da análise de risco. A representação da superfície do terreno é um fator crítico na modelação hidrológica e hidráulica de inundações, pois, como dado de entrada do modelo, condiciona a vazão de entrada e a extensão da inundação (Horritt e Bates, 2001).

A resolução espacial (horizontal e vertical) e a qualidade do conjunto de dados geográficos podem produzir grandes diferenças nos resultados da modelação hidráulica de inundações (Wilson, 2004). Têm sido apresentados vários estudos sobre a aplicação de diferentes modelos hidráulicos na avaliação da extensão da zona inundável (Horritt e Bates, 2002; Hunter *et al.*, 2008). Apesar destas aplicações, é importante compreender o mérito das diferentes metodologias, com diferentes níveis de representação matemática do escoamento e diferentes técnicas numéricas.

As equações de Saint-Venant são usadas para descrever as ondas dos rios. O sistema das equações de Saint-Venant é reduzido até a equação da onda difusiva que pode ser resolvida usando algoritmo das diferenças finitas. A escolha do método numérico e uma das etapas de espaço e tempo a serem acumuladas dependem essencialmente da forma de hidrogramas de cheias e as propriedades hidráulicas do rio. Para este trabalho foi desenvolvido um programa em linguagem FORTRAN que permitiu diversas simulações a fim de avaliar o comportamento da propagação da onda difusa para diferentes números de Manning e declividades.

2 - FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

O estudo do escoamento não permanente em canais começou no início do século XIX, com os trabalhos de Laplace e Lagrange e em 1871, o matemático francês Barre de Saint Venant desenvolveu duas equações parciais diferenciais para o escoamento não permanente (Yevjevich, 1975).

Estas equações são obtidas a partir da aplicação dos princípios da continuidade (equação 2) e da quantidade de movimento (equação 5), conhecidas como equações de Saint-Venant (Cunge *et. al.*, 1980), em homenagem ao seu formulador.

2.1 - Equação da continuidade

A primeira equação fundamental do escoamento em rios e canais é a equação da continuidade. Na aplicação a rios, como o princípio original referem-se à conservação de massa, os volumes de água serão multiplicados pela massa específica, de maneira que o balanço resultante seja feito em termos de massa através do mesmo elemento de controle. (Andrade, 2006). Primeiro, considere a equação de continuidade, que será derivada de um volume de controle de altura igual à profundidade, y , e comprimento, Δx . Aplicando o princípio da conservação de massa nesse referido volume de controle, temos que o balanço de massa do fluido que entra e sai do volume de controle é igual a variação temporal da massa fluida no interior do referido volume. (Gomes, 2006). Isto pode ser expresso como:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x \Delta t - q_L \Delta x \Delta t = -\Delta x \frac{\partial A}{\partial t} \Delta t \dots\dots\dots(1)$$

em que: Q = vazão média no interior do canal natural; q_L =contribuição lateral por unidade de comprimento do canal natural; A = área da seção transversal do fluxo; Δx = comprimento do volume de controle; Δt =intervalo de tempo relativo ao volume de controle. Dividindo a equação (1) por $\Delta x \Delta t$ temos que a equação da continuidade é:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_L \dots\dots\dots(2)$$

2.2 - Equação da quantidade de movimento

O princípio de conservação da quantidade de movimento linear diz que: a taxa de variação substantiva da quantidade de movimento é igual ao somatório das forças que agem num fluido, logo:

$$\frac{\partial(m\vec{U})}{\partial t} = \sum \vec{F} \dots\dots\dots(3)$$

em que: $m\vec{U}$ é a quantidade de movimento linear e $\sum \vec{F}$ é a força resultante que age no fluido. A equação 3 corresponde a segunda lei de Newton ($\vec{F} = m\vec{a}$) formulada na mecânica clássica. A taxa de variação da quantidade de movimento pode então ser calculada através do balanço da quantidade de movimento que entra/sai e das forças aplicadas ao volume de controle

$$F_{px} + F_{gx} - F_{ax} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\int_A \rho v_x dA \right] \Delta x + \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_A \rho v^2 dA \right] \Delta x - \rho q_L \Delta x v_L \cos \theta \dots\dots\dots(4)$$

em que: F_{px} = componente da força de pressão na direção x; F_{gx} = componente da força gravitacional na direção x; F_{ax} = componente da força de cisalhamento na direção x; q_L = vazão lateral de entrada por unidade de comprimento na direção do fluxo; v_L = velocidade da vazão lateral entrando, com ângulo de inclinação θ na direção x. Fazendo as devidas considerações na equação 4 e rearranjando temos que a equação da quantidade de movimento é:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial y}{\partial x} - S_0 \right) + gAS_f = 0 \dots\dots\dots(5)$$

Na maioria das aplicações práticas, os termos da aceleração, equação 5, das equações de Saint-Venant podem ser negligenciados, uma vez que são pequenas. Assim a equação da onda difusiva é dada por:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C \frac{\partial Q}{\partial x} = D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \dots\dots\dots(6)$$

em que: x (m) é a distância a jusante, t (s) de tempo, C (ms^{-1}) e D (m^2s^{-1}) são funções não lineares do descarga Q (x,t) (m^3s^{-1}) e são geralmente conhecido como celeridade e difusividade, respectivamente

3 - METODOLOGIA

Um esquema numérico baseado no Método das Diferenças Finitas Implícito foi utilizado para calcular a equação da onda difusiva, isto é, devido o método de diferenças finitas implícito ser incondicionalmente mais estável. Para este trabalho foi utilizado o Método de Crank-Nicolson pelo

fato que este método dispõe de um tipo de discretização que garante a estabilidade numérica no processo de solução (Anderson *et. al.*, 1984).

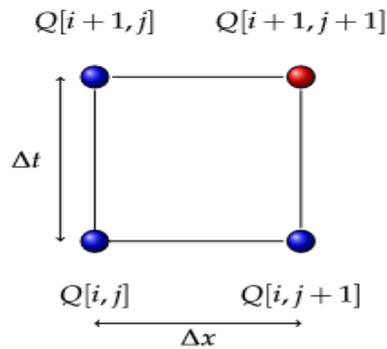


Figura 1: Malha para a discretização da equação

Para discretizar o problema, considere uma pequena malha mostrada na Figura 1. De acordo com a figura 1, a linha é representada pelo índice i e a coluna pelo índice j . Os passos no espaço e no tempo são respectivamente iguais a Δx e Δt . O ponto em vermelho significa que o valor é desconhecido. Segundo Gomes (2006) as derivadas discretizadas no tempo e no espaço são dadas por :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \approx \frac{Q[i, j+1] - Q[i, j]}{\Delta t} \dots\dots\dots(7)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \approx \frac{1}{2} \left[\frac{Q[i+1, j+1] - Q[i-1, j+1]}{2\Delta x} + \frac{Q[i+1, j] - Q[i-1, j]}{2\Delta x} \right] \dots\dots\dots(8)$$

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \approx \frac{1}{2} \left[\frac{Q[i+1, j+1] - 2Q[i, j+1] + Q[i-1, j+1]}{\Delta x^2} + \frac{Q[i+1, j] - 2Q[i, j] + Q[i-1, j]}{\Delta x^2} \right] \dots\dots(9)$$

3.1 - Aspectos computacionais

Para se resolver os problemas da equação da onda difusa, foi desenvolvido um programa computacional em linguagem FORTRAN 90, capaz de resolver as equações contidas no modelo. Isto é o programa é capaz de escrever de forma vetorial, assim não havendo a necessidade de se fazer um loop em x para cada elemento $Q[i]$ individualmente. Com isso, a implementação computacional dos cálculos gerados em linguagem FORTRAN são potencialmente mais eficientes.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira simulação trata de estudar o comportamento da vazão (Q), em função do comprimento do canal (x), onde é possível observar como a onda difusiva se comporta ao longo do canal por um determinado período de tempo, para uma declividade de 0,0001 e um número de Manning de 0,01.

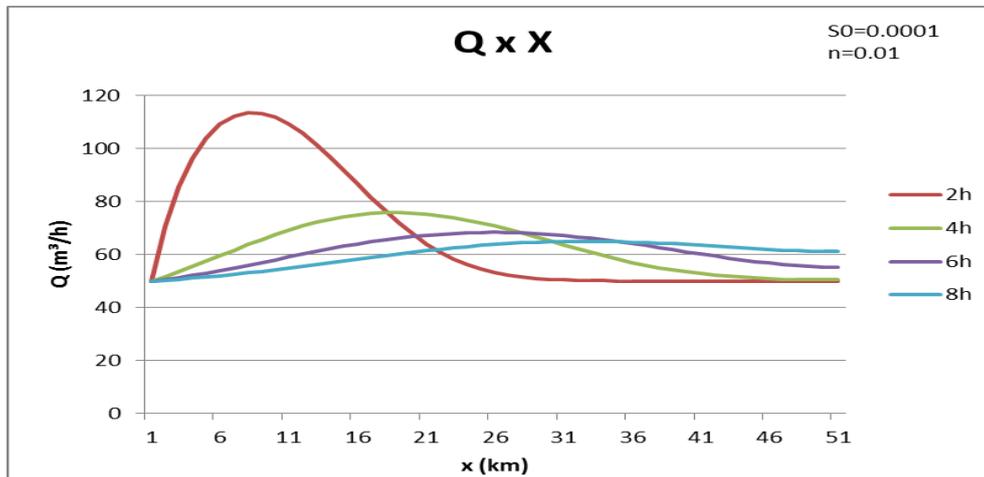


Figura 2: Hidrograma para vazão versus comprimento para diferentes tempos

Como pode ser observado na figura 2, um processo de amortecimento é verificado ao longo do comprimento do rio para os diferentes tempos. Isto é decorrente do termo difusivo existente na equação diferencial para a onda difusiva. Estes parâmetros, como o nome indica, têm a propriedade de dispersar a energia de propagação da onda, ao longo do canal, fazendo com que a onda se espalhe e atenuar os seus efeitos no processo de enchentes. Através da figura é possível verificar que, para um tempo de 4 horas, o pico da onda é bem menor do que para um tempo de 2 horas, confirmando a análise feita anteriormente.

A segunda simulação trata de verificar o comportamento da propagação da onda para uma determinada declividade fixa, ao longo da extensão do rio para diferentes números de Manning em determinado tempo. Isso foi feito para três tempos diferentes (Figura 3), onde se verifica que, para diferentes números de Manning, quanto menor o número de Manning, maior será o amortecimento da onda, isto devido quase não ter atrito no fundo do rio, assim a onda pode se difundir ao longo do eixo do canal. Entretanto deve ficar claro que este amortecimento é devido a difusividade da onda, e não da dissipação da energia causado pelo atrito das paredes do canal. Os resultados ainda mostram que com o passar do tempo, a onda se dispersa inteiramente ao longo do canal, como era de se esperar, tendo em vista o efeito descrito anteriormente.

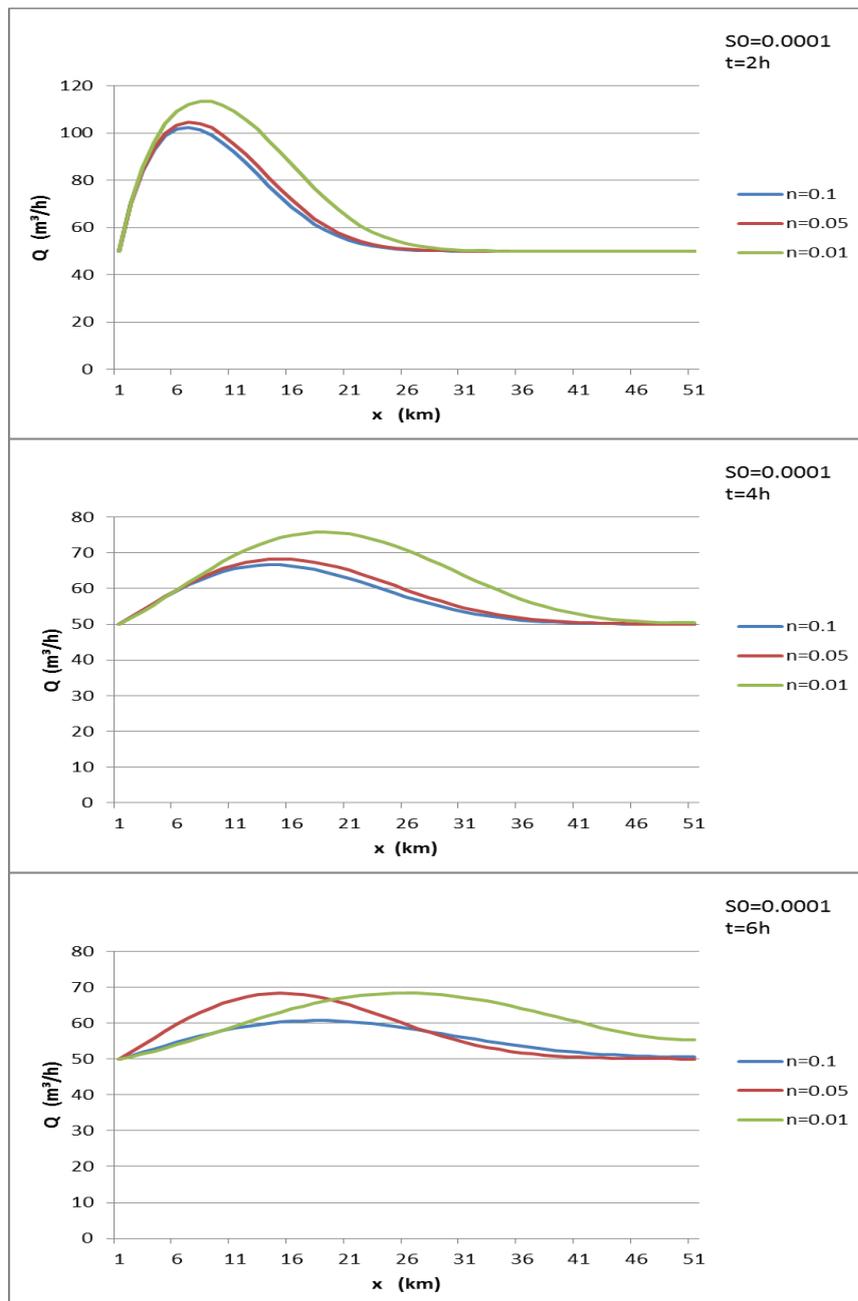


Figura 3: Hidrograma de vazão versus espaço para diferentes Número de Manning e diferentes tempos, considerando uma declividade fixa.

A terceira simulação trata de verificar de que forma a propagação da onda difusiva se comporta para um determinado número de Manning fixo, ao longo da extensão do rio, para diferentes declividades em determinado tempo. A simulação foi realizada para dois tempos diferentes (Figura 4). Como pode ser observado, a variação da declividade se apresenta com um grau de sensibilidade mais intenso do que a variação do Número de Manning. Através da figura 4 é possível ver que a dispersão da onda foi bem mais forte, e bem mais dependente da declividade. Por exemplo, para uma declividade de 0,00001 m/m, há um processo de dispersão da onda de forma muito

acentuada. Isto é explicado pelo fato de que o coeficiente de dispersão ser função direta da declividade do fundo do canal.

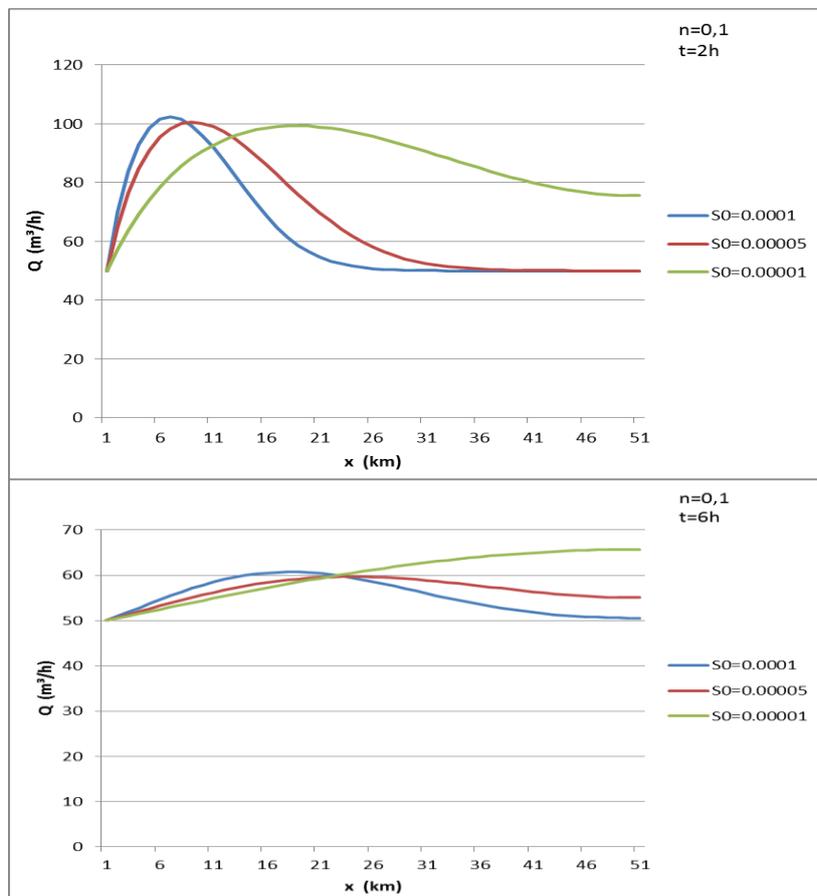


Figura 4: Hidrograma de vazão versus espaço para diferentes declividades e diferentes tempos considerando um valor fixo do número de Manning

A quarta simulação trata de verificar como a onda difusiva se comporta ao longo do tempo para um determinado número de Manning fixo, para diferentes declividades. Os resultados mostram que a declividade atua não só no processo de atenuação, como também na celeridade da onda. Como pode ser observado na figura 5, as maiores atenuações do hidrograma ocorrendo em rios com maior declividade, e para menores declividades as atenuações do hidrograma são menores, isto é, mais amortecidos. Também com relação à celeridade da onda, pode-se ver que para maiores declividades temos menores celeridades, fazendo com que a onda chegue mais lentamente na seção de observação.

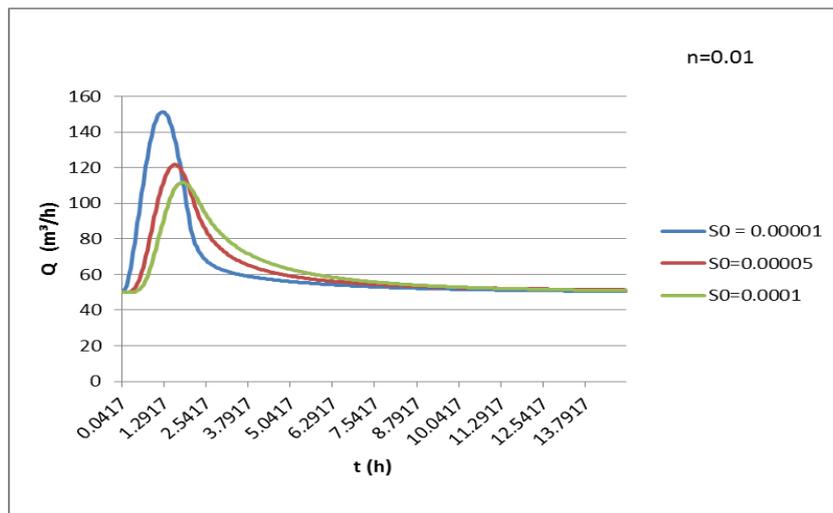


Figura 5: Hidrograma de vazão versus tempo para diferentes declividades

Por último, como a onda difusiva se comporta ao longo do tempo para uma determinada declividade fixa em diferentes números de Manning, neste caso, o hidrograma apresenta valores de vazão bem próximos, mostrando assim, como foi dito antes que o efeito do Número de Manning não tão intenso como é o efeito da declividade na propagação de uma onda difusiva.

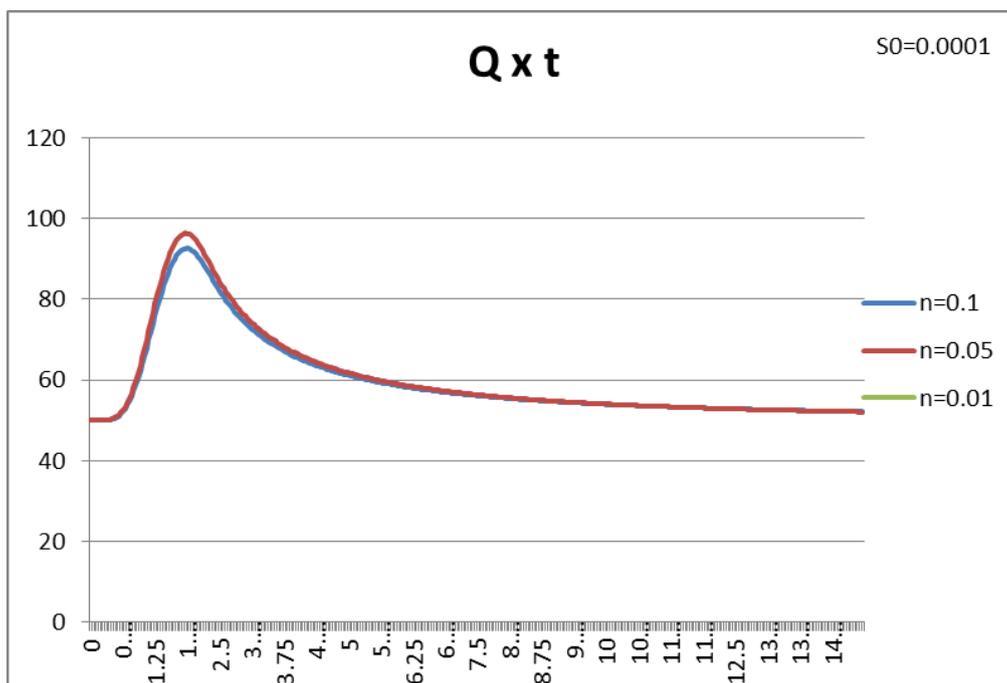


Figura 6: Hidrograma de vazão versus tempo para diferentes números de Manning

5 - CONCLUSÃO

O programa computacional desenvolvido para resolver equações difusivas, responde com eficiência aos objetivos da pesquisa, apresentando excelentes resultados para as mais diversas situações práticas encontradas no seu campo de trabalho.

Os resultados apresentaram que tanto a declividade quanto o número de Manning apresentam papel importante na propagação da onda difusiva. Os mesmos mostram que quanto menor o número de Manning maior será a dispersão da onda ao longo da extensão do rio, já que quanto menor o número de Manning menor será o efeito da tensão de cisalhamento.

6 - BIBLIOGRAFIA

ANDRADE, C. F. (2006). *Estudo de planícies de inundação através da análise dos parâmetros hidráulicos do canal principal e sua influencia na avaliação do risco fuzzy de enchentes*. Tese – Universidade Federal do Ceará, Programa de pós-graduação em Engenharia Civil - Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, 213 p.

ANDERSON, D. A.; TANNEHILL, J. C.; PLETCHER, R. H. (1984). *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*. Hemisphere Publishing Corporation, 3, pp.63-65.

CUNGE, J. A., HOLLY, F.M.JR, AND VERWEY, A. (1980) “*Practical Aspects of Computational River Hydraulics*”. Pitman Publishing Ltd., London, UK. ISBN: 0273084429, 1, pp 7-23.

GOMES, V. U. (2006). *Estudo comparativo dos modelos da onda cinemática e da onda difusiva na análise de propagação de cheias, em função dos parâmetros hidráulicos da bacia*. Dissertação – Universidade Federal do Ceará, Programa de pós-graduação em Engenharia Civil – Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, 88 p.

HORRITT, M.S.; BATES, P.D. (2002) - “*Evaluation of 1-D and 2-D numerical models for predicting river flood inundation*”. *Journal of Hydrology*, 268, pp.87- 99.

HORRITT, M.S.; BATES, P.D. (2001). “*Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach*”. *Hydrological Processes*, 15, pp. 825-842.

HUNTER, N.M.; BATES, P.D.; NEELZ, S.; PENDER, G.; VILLANUEVA, I.; WRIGHT, N.G.; LIANG, D.; FALCONER, R.A.; LIN, B.; WALLER, S.; CROSSLEY, A.J.; MASON, D.C. (2008). “*Benchmarking 2D hydraulic models for urban flooding*”. *Water Management*, 161, pp 13-30.

Lei 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm. Acesso em 13/06/2013.

WILSON, M. D. (2004). *Evaluating the effect of data and data uncertainty on predictions of flood inundation*. Ph.D. Thesis, Faculty of Engineering, Science and mathematics. University of Southampton, Southampton, p. 252.

YEVJEVICH, V.; MAHMOUD, K. (1975). “*Introduction Unsteady Flow in Open Channels*”, ed. Vol. 1, Water Resources Publications, Fort Collins, Co., p1-24.