

ESTUDO DA INFLUENCIA DA RUGOSIDADE NOS MODELOS DE ONDAS CINEMÁTICAS E DIFUSAS.

*Raquel Jucá de Moraes Sales*¹; *Juliana Alencar Firmo de Araújo*²; *Karla de Carvalho Vasconcellos*³ & *Raimundo Oliveira de Souza*⁴

RESUMO - Na intenção de trazer respostas rápidas e com menores incertezas, quanto aos recursos hídricos, faz necessária a utilização de mecanismos que solucionem equações de difícil resolução. Neste intuito, esta pesquisa envolveu a criação de um software que traz as soluções das equações de ondas cinemáticas e difusivas em rios. A partir deste software, foi possível analisar a sensibilidade destas equações quanto à rugosidade, bem como verificar a influência da cobertura do leito na celeridade da onda. Para tanto, foram selecionados diferentes coeficiente de rugosidade e feitos os cálculos para as ondas cinemática e difusiva. Pelos resultados, verificou-se que a rugosidade exerce considerável influência no comportamento da propagação da onda cinemática, enquanto que na onda difusiva a influência é bem menor, sendo menos sensível tanto em amplitude como do ponto de vista da celeridade. Observou-se também que, embora a onda difusiva não tenha se alterado de maneira significativa, os comprimentos de onda, para qualquer cenário analisado, são maiores do que aqueles obtidos para a onda cinemática. Com isso, pode-se concluir que a onda difusiva tem maior poder dissipativo e, portanto, a aplicação deste modelo se adapta melhor as condições em que a cobertura do leito não é bem definida.

ABSTRACT - The intention of bringing quick responses and lower uncertainties, for the water resources, is necessary to use mechanisms that solve difficult equations. In such way, this research involved the creation of software that brings the solutions of the equations of kinematic and diffusive waves in rivers. From this software we can analyze the sensitivity of these equations concerning with the roughness, and to verify the influence of bed cover on the wave speed. Therefore, we selected different roughness coefficient and made the calculations for the kinematic and diffusive waves. The results showed that the roughness has a considerable influence on the behavior of propagation of the kinematics wave, while for the diffusive wave the effect is much lower, being less sensitive in both amplitude and celerity. It was also observed that although the diffusive wave has not changed significantly, the wavelength for any analyzed scene, are greater than the those ones obtained for the Kinematics wave. Thus, it can be concluded that the diffusive wave has a higher power dissipative and thus the application of model fits the best conditions under which the bed cover is not well defined.

Palavras-Chave – onda cinemática, onda difusiva, modelagem.

1) Mestre e doutoranda em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará e bolsista do CNPq. Campos do Pici, CEP- 60445-760. Bloco 713. Fortaleza – Ceará. e-mail: raqueljuca@gmail.com;

2) Mestre e doutoranda em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará e bolsista da CAPES. Campos do Pici, CEP- 60445-760. Bloco 713. Fortaleza – Ceará. e-mail: [judiaraujo@yahoo.com.br](mailto:juliaraujo@yahoo.com.br);

3) Mestranda em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará e bolsista do CNPq. Campos do Pici, CEP- 60445-760. Bloco 713. Fortaleza – Ceará. e-mail: karla_vasconcellos@hotmail.com;

4) Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Campus do Pici, Centro de Tecnologia, Bloco 713, Fortaleza – Ceará, Brasil, CEP 60445-760, Fone: (85) 3366. 9771, e-mail: rsouza@ufc.br.

1. INTRODUÇÃO

Os problemas relacionados às enchentes na cidade, devido ao crescimento caótico do perímetro urbano, tem sido um dos maiores desafios da engenharia, gerando grandes prejuízos econômicos e sociais. Estudos da propagação de ondas de cheia a partir da modelagem matemática vêm se intensificando, buscando a minimização destes impactos, bem como trazer respostas rápidas e com menores inseguranças.

No estudo do escoamento da água, se faz necessária a utilização de mecanismos que solucionem as difíceis equações diferenciais geradas pela fundamentação deste tipo de problema. Para tanto são desenvolvidos softwares matemáticos, a fim de expandir os estudos na área de recursos hídricos, a exemplo os modelos de onda cinemática, e modelos de onda difusiva, que são simplificações do modelo de onda dinâmica. Por estes modelos menos complexos, pode-se estabelecer o movimento da massa de água em rios e canais.

Na intenção de analisar detalhadamente o comportamento dos parâmetros hidráulicos que influenciam nas ondas de cheias, foi desenvolvido um programa computacional, que, a partir da simplificação das equações de Saint Venant, fundamentadas pelas equações de conservação de massas e quantidade de movimento e energia, podem-se entender matematicamente os processos de propagação tanto da onda cinemática, como da onda difusiva.

Neste trabalho, foi estudado exclusivamente o parâmetro de rugosidade do rio, sendo analisada a influência do revestimento interno do leito no processo de propagação das ondas de cheias. Também foram comparados os resultados obtidos pela simulação do modelo de onda cinemática, com os resultados obtidos pela simulação do modelo de onda difusiva, verificando a influência de cada modelo em relação à celeridade da onda.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nos estudos de contenção de cheias, deve-se analisar o efeito de uma onda, variação temporal e espacial da altura do escoamento, no rio. Modelos que simulam ondas de cheias, por exemplo, podem ser usados para transformar uma chuva torrencial em escoamento superficial, considerando a hidrografia do escoamento do rio como dado de entrada na sua extremidade à montante.

Levando em consideração o escoamento em rios naturais, pela equação do movimento são fundamentadas as equações de onda dinâmica, onda gravitacional, onda difusiva e onda cinemática.

Desconsiderando o termo $\frac{\partial u}{\partial t}$, a equação do movimento descreve a equação da onda dinâmica permanente, Eq. 1.

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad \text{Eq. 1}$$

Onde,

u - Velocidade do escoamento [L/T]

$\frac{\partial}{\partial x}$ - Derivada parcial em relação à x [L^{-1}]

g - Aceleração da gravidade, em [L/T^2]

S_0 - Declividade do fundo do canal, [L/L]

S_f - Declividade da linha de energia [L/L]

Desprezando os termos $u \frac{\partial u}{\partial x}$ da Eq. 1 temos a equação da onda difusiva, Eq. 2. Sturm (2001) diz que a equação da onda difusiva pode ser considerada como onda difusiva analógica, uma vez que faz analogia com a equação da onda difusiva advectiva.

$$g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad \text{Eq. 2}$$

Ou ainda

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} \quad \text{Eq. 3}$$

Sabendo que $S_f = \frac{Q^2}{K^3}$, sendo K um parâmetro de transporte dependente das características do canal, a equação da difusão pode ser representada da seguinte maneira, Eq.4.

$$\frac{2Q \partial Q}{K^2 \partial t} - \frac{2Q^2 \partial K}{K^3 \partial t} = - \frac{\partial^2 y}{\partial t \partial x} \quad \text{Eq. 4}$$

Desconsiderando qualquer contribuição lateral de vazão, e substituindo a Eq. 4 na equação da continuidade, já derivada, temos a seguinte formulação matemática, Eq.5:

$$\frac{2Q \partial Q}{K^2 \partial t} - \frac{2Q^2 \partial K}{K^3 \partial t} = \frac{1 \partial^2 Q}{B \partial x^2} \quad \text{Eq. 5}$$

Uma vez que K é uma função relacionada à profundidade, conseqüentemente à área molhada do canal, sua derivada no tempo pode ser definida como, Eq.6:

$$\frac{\partial K}{\partial t} = - \frac{dK \partial Q}{dA \partial x} \quad \text{Eq. 6}$$

E também, Eq.7:

$$K = \frac{Q}{S_0^{1/2}} \quad \text{Eq. 7}$$

Substituindo as Eq. 6 e Eq. 7, na Eq. 5, tem-se, finalmente, a fundamentação matemática referente à equação da difusão em rios, Eq. 8, configurando uma equação parcial de segunda ordem, não linear:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{dQ \partial Q}{dA \partial x} = \frac{Q \partial^2 Q}{2BS_0 \partial x^2} \quad \text{Eq. 8}$$

Onde:

B é a largura da superfície livre do canal.

E $\frac{Q}{2BS_0} = D$ é o coeficiente de difusão.

A onda cinemática considera apenas os efeitos da declividade do fundo do rio e do atrito da água com as paredes do rio, desta maneira, todos os termos da equação são desprezados, excetuando-se o termo $g(S_0 - S_f)$, que configura a própria equação da onda cinemática, Eq. 9. Neste caso, a linha de energia é paralela ao fundo do canal, configurando um escoamento uniforme.

$$S_0 = S_f \quad \text{Eq.9}$$

A equação da quantidade de movimento, para esta situação, também pode ser definida da seguinte maneira, Eq.10:

$$A = \alpha Q^\beta \quad \text{Eq.10}$$

Onde:

A é a área da seção transversal do canal;

α e β são coeficientes que podem ser obtidos a partir da fórmula de Chezy.

Q é a vazão;

Para $S_0 = S_f$, tem-se a fórmula de Manning, Eq. 11:

$$A = \left(\frac{nP^{2/3}}{\sqrt{S_0}} \right)^{3/5} Q^{3/5} \quad \text{Eq.11}$$

Onde:

P é o perímetro molhado da seção transversal.

Por Chezy:

$$\alpha = \left(\frac{nP^{2/3}}{\sqrt{S_0}} \right)^{3/5}$$
$$\beta = 3/5$$

Derivando a Eq. 11, em relação ao tempo, e substituindo na equação da continuidade para escoamento em rios, Eq. 12, temos como resultado a Eq. 13, que configura uma equação diferencial parcial de primeira ordem, não linear, para a representação da onda cinemática em rios.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \text{Eq.12}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \alpha \beta Q^{\beta-1} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) = 0 \quad \text{Eq.13}$$

Várias tentativas têm sido realizadas na intenção de revolver analiticamente as equações de Saint Venant, no entanto, a sua complexidade somente permitiu a obtenção de soluções aproximadas, com resultados bastante satisfatórios (CHALFEN & NIEMIEC, 1986).

No campo das soluções numéricas, os estudos para o entendimento da propagação das ondas de cheias, a partir de modelos hidrodinâmicos, têm avançado consideravelmente (GOMES, 2006). Bajracharya e Barry (1999), por exemplo, aplicaram o método de Muskingum-Cunge na resolução destas equações, cujos resultados se mostraram eficientes, dependendo do número de Courant, definido através da relação $u \frac{\Delta x}{\Delta t}$.

Onde:

Δx - Incremento no espaço, para a solução numérica [L]

Δt - Incremento do tempo, para a solução numérica [T]

Outros cientistas, tais como Moussa e Bocquillon (1996), utilizaram as equações simplificadas de Saint Venant, para descrever a propagação das ondas em rios, já representadas nas equações anteriormente comentadas. Estes autores utilizaram o método das diferenças finitas para a solução da equação de onda difusiva, comparando estes resultados com a solução analítica. Pelos resultados, a confiabilidade do método foi confirmada.

Smith (1980) também utilizou o método das diferenças finitas, desta vez para as equações de onda cinemática. A partir do estudo, foram desenvolvidos um fator de ponderação e um fator de atenuação da onda, para a aplicação de métodos explícitos. Jaber e Mohtar (2002) estudaram a estabilidade deste método na resolução da equação de onda cinemática, reduzindo os efeitos de oscilação numérica. Pela pesquisa, observou-se que, para altos valores do número de Courant, os efeitos de oscilação são reduzidos em relação a outros métodos numéricos.

O interesse nos estudos dos modelos simplificados da equação dinâmica, tendo em vista a sua facilitação na obtenção de resultados que descrevem determinados processos físicos, vem se intensificando, já provado que, embora reduzidos os esforços em desenvolver mecanismos que solucionem as equações completas de Saint Venant, os resultados com o uso destes modelos simplificados são satisfatórios.

3. METODOLOGIA

Para a realização do estudo, inicialmente foram fundamentadas matematicamente as equações de propagação da onda cinemática e de propagação da onda difusiva, desenvolvidas a partir da equação da onda dinâmica, ou ainda equações de Saint Venant, que configuram o estudo do escoamento não uniforme e não permanente.

Depois de fundamentadas matemáticas destas equações, para encontrar as soluções pertinentes a cada uma, foi escolhida a resolução a partir do método número de diferenças finitas.

3.1 Formulação Numérica para a onda difusiva

Para encontrar a equação numérica da onda difusiva, utilizou-se a aproximação das derivadas parciais de forma implícita, método de Crank-Nicolson. Os pontos conhecidos são $(i-1, j)$, (i, j) e $(i+1, j)$, e desconhecidos são $(i-1, j+1)$, $(i, j+1)$ e $(i+1, j+1)$.

A derivada parcial de Q, com relação a x é, Eq. 14:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{1}{2} \left[\frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i-1}^{j+1}}{2\Delta x} + \frac{Q_{i+1}^j - Q_{i-1}^j}{2\Delta x} \right] \quad \text{Eq.14}$$

E a derivada parcial de Q, com relação a y é, Eq. 15:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{Q_i^{j+1} - Q_i^j}{\Delta t} \quad \text{Eq.15}$$

A aproximação de $\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2}$ é dado pela Eq. 16:

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = \frac{1}{2} \left[\frac{Q_{i+1}^{j+1} - 2Q_i^{j+1} + Q_{i-1}^{j+1}}{\Delta x^2} + \frac{Q_{i+1}^j - 2Q_i^j + Q_{i-1}^j}{\Delta x^2} \right] \quad \text{Eq.16}$$

Substituindo as Eq. 15 e Eq. 16, na Eq. 8, tem-se, (GOMES,2006):

$$AA. Q_{i-1}^{j+1} + BB. Q_i^{j+1} + CC. Q_{i+1}^{j+1} = FF \quad \text{Eq.17}$$

Onde:

$$AA = -DD$$

$$BB = 1 + 2\phi$$

$$CC = -GG$$

$$DD = \gamma + \phi$$

$$EE = 1 - 2\phi$$

$$FF = DD. Q_{i-1}^j + EE. Q_i^j + GG. Q_{i+1}^j$$

$$GG = -\gamma + \phi$$

$$\gamma = \varphi_i^{j+i} \frac{\Delta t}{4\Delta x}$$

$$\phi = E_i^{j+i} \frac{\Delta t}{2\Delta x^2}$$

$$\varphi = \frac{dQ}{dA}$$

$$E = \frac{Q}{2BS_0}$$

Na forma matricial a equação pode ser apresentada na forma, Eq. 18:

$$[A][Q] = [FF] \quad \text{Eq.18}$$

Para resolver a Eq. 18, em função de Q , que servirá de base para os cálculos da vazão ao longo do rio faz-se, Eq. 19:

$$[Q] = [FF][A]^{-1} \quad \text{Eq.19}$$

3. 2 Formulação Numérica para a onda cinemática

Para resolver numericamente a Eq. 13, a vazão (Q), e as derivadas parciais de Q no tempo e no espaço, são substituídas por expressões aproximadas, por diferenças finitas. Neste esquema são conhecidos os valores de Q_{i+1}^j e Q_i^{j+1}

Desta maneira, a derivada de Q em x é definida como, Eq. 20:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta x} \quad \text{Eq.20}$$

A derivada de Q em t é definida como Eq.21:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta t} \quad \text{Eq.21}$$

Substituindo as Eq.20 e Eq. 21 na Eq. 13, tem-se, Eq. 22:

$$Q_{i+1}^{j+1} = \frac{\frac{\Delta t}{\Delta x} Q_i^{j+1} + \alpha \beta Q_{i+1}^j \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1}}{\frac{\Delta t}{\Delta x} + \alpha \beta \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1}} \quad \text{Eq.22}$$

A Eq. 22 é a equação numérica que servirá de base para os cálculos da vazão ao longo do rio.

3. 3 Solução numérica

Depois de fundamentadas as equações matemáticas, foram desenvolvidas um programa computacional, em linguagem FORTRAN, que calcula as variáveis de controle, relacionadas ao escoamento de um fluido em rios naturais, no seu estado não permanente, a partir do método numérico de diferenças finitas. Desta maneira, foi possível encontrar as soluções pertinentes às equações de propagação da onda de cheias. Vale lembrar que a linguagem FORTRAN facilita os cálculos de matrizes de grande extensão, gerando resultados com rapidez e praticidade.

Neste programa, além do programa principal, foram elaboradas três sub-rotinas:

- Leitura dos dados de entrada;
- Cálculo do modelo de onda cinemática;
- Cálculo do modelo de onda difusiva.

Na primeira sub-rotina, leitura de dados de entrada, foram definidos todos os parâmetros do estudo, bem como todas as condições iniciais e de contorno. As especificações encontram-se definidas na tabela 1 abaixo:

Tabela 1: Parâmetros matemáticos das equações de onda cinemática e difusiva.

Parâmetros		Un.
Vazão inicial no canal	10,00	m ³ /s
Comprimento do canal	50.000,00	m
Largura do canal	20,00	m
Declividade do canal	0,00005	m/m

Nas outras duas sub-rotinas, cálculo do modelo de onda cinemática e cálculo do modelo de onda difusiva, foram calculados todos os elementos pertinentes a cada equação, retornando ao programa principal as variáveis de controle, tais como vazão da onda cinemática e vazão da onda difusiva, tanto do espaço quanto no tempo.

A partir do programa, foi possível se fazer as simulações para diferentes tipos de rugosidade, Tabela 2, sendo possível comparar a influência da cobertura interna do rio na propagação das ondas cinemáticas e difusivas.

Tabela 2: Parâmetro de rugosidade, para cada tipo diferente de revestimento do rio.

Rugosidade	
Canal de terra	0,018
Canal de pedras	0,035
Canal com irregularidades	0,040
Canal com alta vegetação	0,050
Canal de fundo com ranhuras	0,100
Canal com vegetação alta e densa	0,150

Fonte: Adaptado de Vem Te Chow, (1969).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através do programa computacional desenvolvido para esta pesquisa, foi realizada uma série de simulações, tomando como base o modelo da onda cinemática e o modelo da onda difusiva, para diferentes coeficientes de rugosidade, ou seja, diferentes tipos de cobertura do leito do rio.

Na Figura 1 estão ilustrados os hidrogramas da onda cinemática, para o tempo de 4h, considerando diferentes coeficientes de rugosidade.

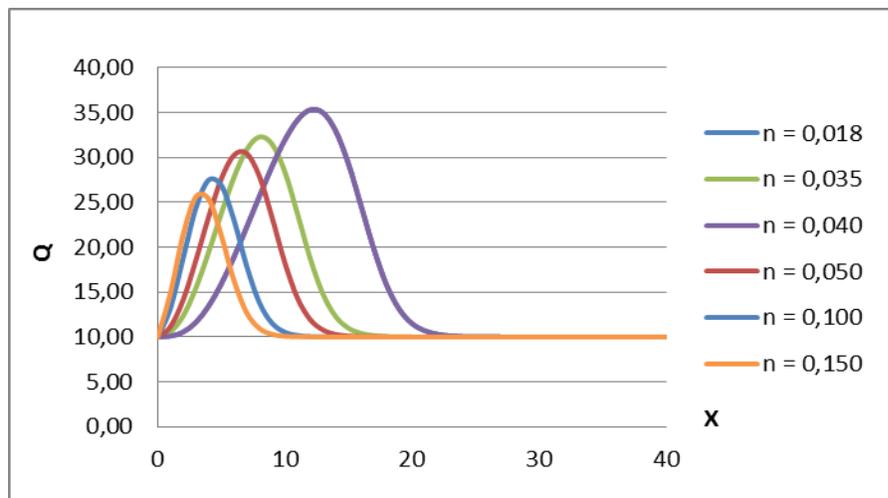


Figura 1 – Hidrograma da onda cinemática ao longo do canal, para diferentes coeficientes de rugosidade.

Observando a Figura 1, verifica-se que este parâmetro exerce considerável influência no comportamento da propagação da onda cinemática.

Pela análise, conclui-se que, na medida em que se eleva o valor do coeficiente de rugosidade, o pico da onda cinemática diminui, reduzindo conseqüentemente a celeridade desta onda. Por exemplo, para uma rugosidade de 0,018 o pico da onda, em 4h, é de aproximadamente 25 m³/s, enquanto que, para uma rugosidade de 0,15 o pico da onda, no mesmo tempo, é de aproximadamente 18,5 m³/s.

Já a Figura 2, que ilustra os hidrogramas da onda difusiva, para o tempo de 4h, considerando diferentes coeficientes de rugosidade, verifica-se que este parâmetro exerce uma influência menor do que aquela verificada para as ondas cinemáticas.

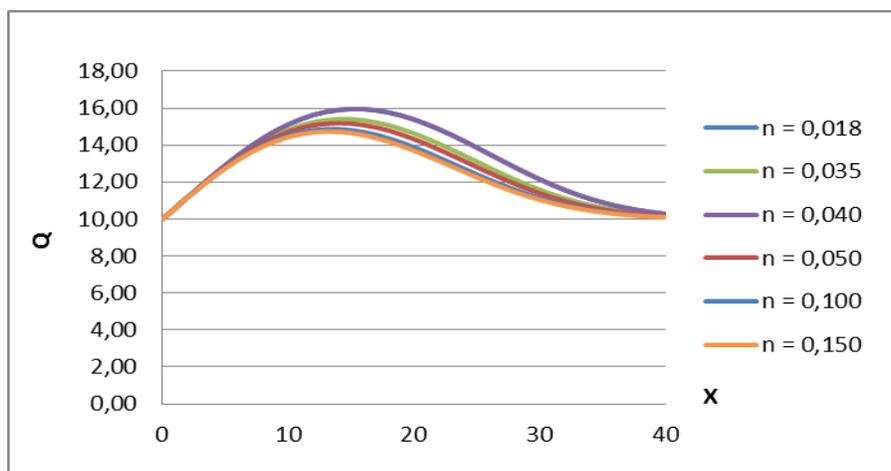


Figura 2 – Hidrograma da onda difusiva ao longo do canal, para diferentes coeficientes de rugosidade.

Os resultados mostram que a onda difusiva é menos sensível à rugosidade do leito, tanto do ponto de vista da amplitude da onda, como da celeridade, uma vez que, conforme ilustrado na Figura 2, este parâmetro pouco se altera.

As Figuras 3 e 4 ilustram o comportamento das ondas cinemática e difusiva, em função do tempo, para uma seção de 10 km à jusante da seção inicial de observação do rio, considerando diferentes rugosidades.

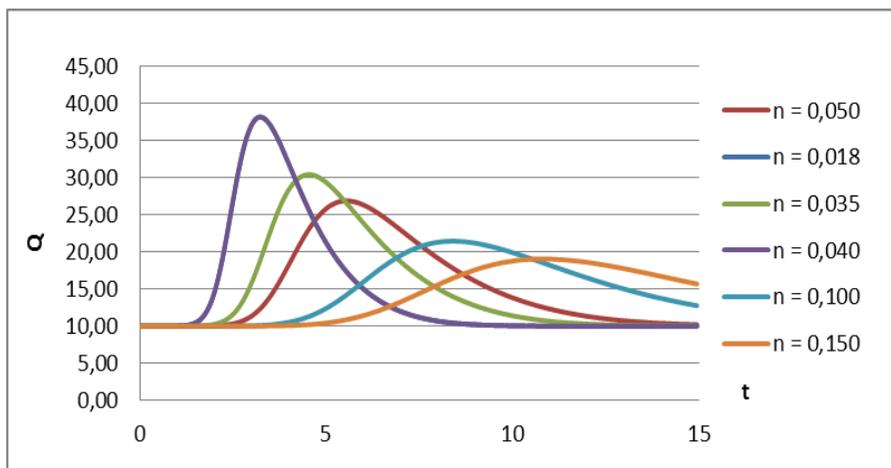


Figura 3 – Hidrograma da onda cinemática ao longo do tempo, para diferentes n.

Como foi concluído anteriormente, pelos resultados da Figura 3, observa-se que o coeficiente de rugosidade tem forte influência na propagação da onda cinemática, onde o tempo da chegada do pico da onda, na seção de observação, varia de aproximadamente 4h, para $n = 0,018$, equivalente à canais

revestidos com terra, até aproximadamente 13h, para $n = 0,15$, equivalente a canais com vegetação alta e densa.

Por outro lado, observando o comportamento da onda difusiva no tempo, Figura 4, a variação da rugosidade do rio praticamente não altera a celeridade da onda, ou seja, o pico da onda, para todos os valores simulados de n , ocorreram aproximadamente em 2h, embora os resultados indiquem que, em qualquer cenário analisado, a celeridade da onda difusiva seja bem maior do que a celeridade da onda cinemática.

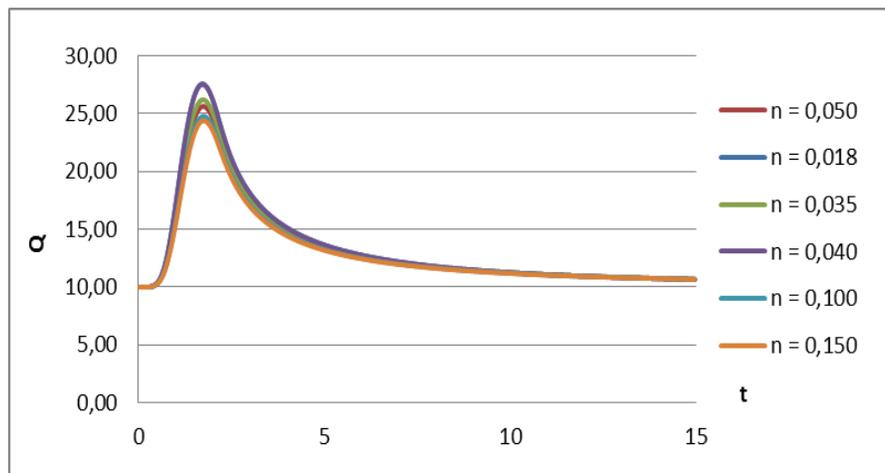


Figura 4 – Hidrograma da onda difusiva ao longo do tempo, para diferentes n .

Foi feito ainda uma comparação entre os dois modelos estudados, para os valores extremos de rugosidade considerados, Figuras 5 e 6.

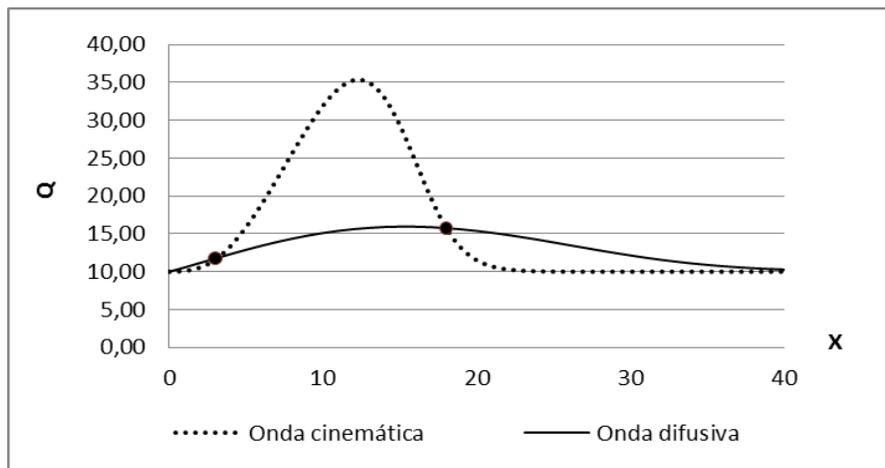


Figura 5 – Comparação entre os hidrograma da onda cinemática e da onda difusiva ao longo do rio, para rios revestidos com terra, ou seja, canais de $n = 0,018$.

Pela Figura 5, pode-se ver claramente que a onda difusiva tem um poder dissipativo maior do que a onda cinemática. Isto ocorre pela presença da difusividade no referido modelo, fazendo com que esta onda se propague de maneira espalhada ao longo do canal, e com o menor pico.

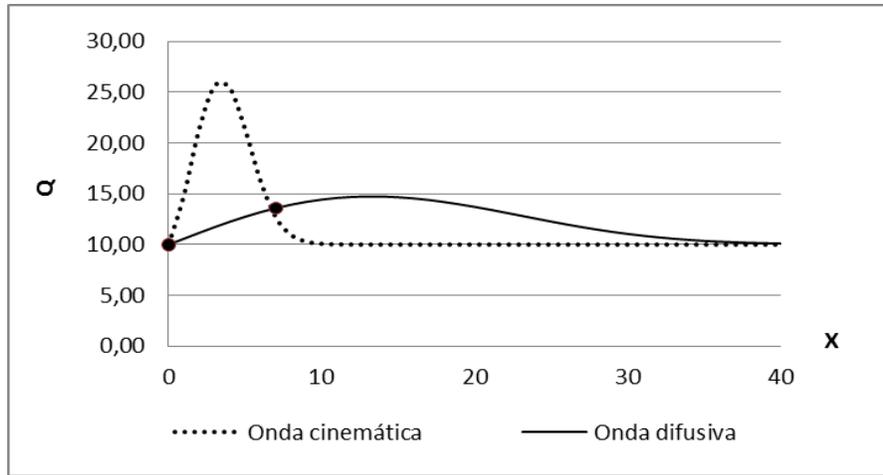


Figura 6 – Comparação entre os hidrograma da onda cinemática e da onda difusiva ao longo do rio, para rios revestidos de vegetação alta e densa, ou seja, canais de $n = 0,15$.

A Figura 6 mostra semelhante comparação, para o $n = 0,15$, onde se pode ver que para valores maiores de coeficiente de rugosidade, tem-se menores valores de celeridade para a onda cinemática, enquanto que para a difusiva, esses valores não se alteram significativamente.

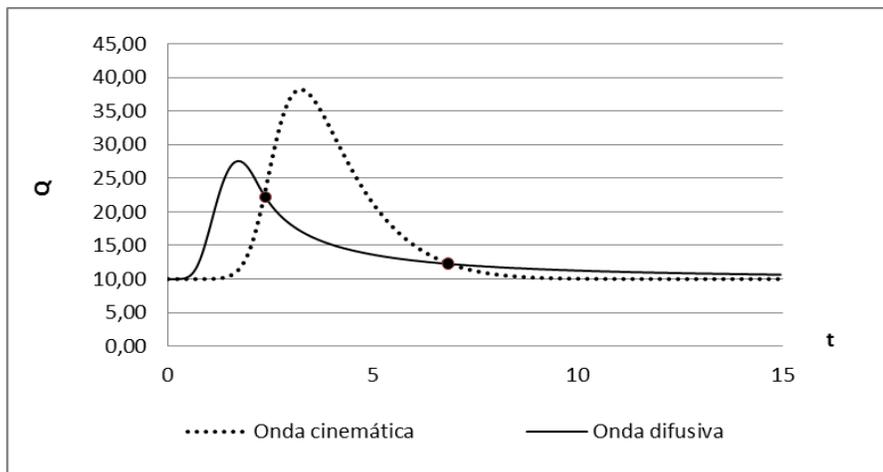


Figura 7 – Comparação entre os hidrograma da onda cinemática e da onda difusiva ao longo do tempo, para o $n = 0,018$.

Analisando as Figuras 7 e 8, verifica-se que seus resultados comprovam as análises anteriores, onde a influência da rugosidade é determinante apenas na onda cinemática, alterando o seu poder de propagação, como também o comportamento dos seus picos.

Por exemplo, na Figura 7 o tempo necessário para o pico da onda chega até a seção de observação é de aproximadamente 4 h, enquanto que, na Figura 8, para $n = 0,15$, o tempo necessário é de 12 h, sendo uma diferença considerável.

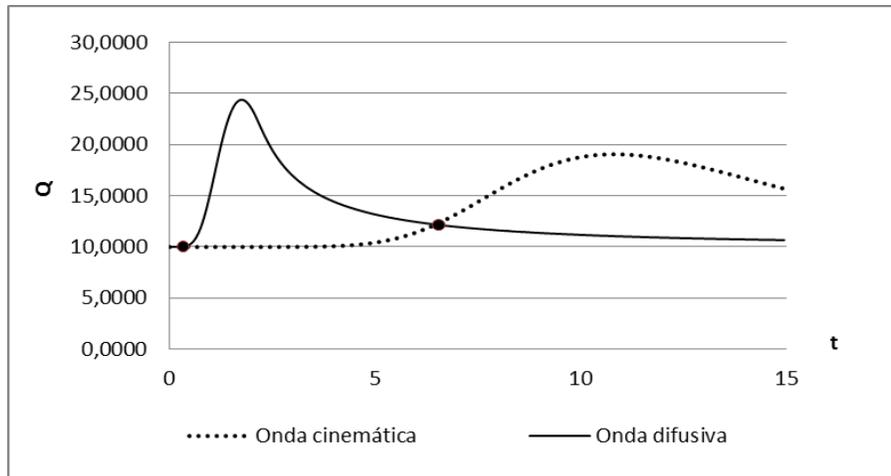


Figura 8 – Comparação entre os hidrograma da onda cinemática e da onda difusiva ao longo do tempo, para o $n = 0,15$.

4. CONCLUSÃO

Pelos resultados, conclui-se que o coeficiente de rugosidade exerce considerável influência no comportamento da propagação da onda cinemática. Estes valores foram constatados tanto para a análise espacial, quanto para a análise temporal da vazão cinemática.

Concluiu-se também, ainda para a onda cinemática, que quanto maior for o coeficiente de rugosidade do leito, ou seja, quanto maior, e mais espessa for a cobertura do leito, menor será o valor do pico da onda, fazendo com que a celeridade desta onda também diminua.

Das análises dos resultados da onda difusiva que, diferentemente da onda cinemática, leva em consideração a difusividade do processo de propagação da onda, observou-se menor influência do parâmetro de rugosidade, sendo menos sensível tanto do ponto de vista da amplitude da onda, quanto do ponto de vista da celeridade da onda, uma vez que este parâmetro pouco se altera. Estes resultados foram constatados tanto na variação espacial, quanto na variação temporal da vazão difusiva.

Pela comparação dos resultados obtidos para a onda cinemática e para a onda difusiva, verificou-se que, embora a celeridade da onda difusiva não tenha se alterado de maneira significativa, os seus comprimentos de onda, para qualquer cenário analisado, são bem maiores do que os resultados obtidos de celeridade da onda cinemática. Desta maneira, pode-se concluir, com isso, que a onda difusiva tem maior poder dissipativo. Isto se deve a presença da difusividade, que provoca maior espalhamento da propagação da onda ao longo do canal, o que faz com que o pico da onda seja diminuído.

A partir dos resultados deste estudo, entende-se que, pelo modelo de onda difusiva sofrer menor influência na propagação de ondas, quanto ao parâmetro rugosidade do leito, a aplicação deste modelo se adapta melhor as condições em que a cobertura do leito não é bem definida. Outros estudos de comparação destas duas ondas devem ser feitos para verificar sob que condições devem ser aplicadas, avaliando quais destes métodos melhor se adapta aos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAJRACHARYA, K.; BARRY, D.A. (1999). *Similarity of Diffusion Wave Flood Routing*. Journal of Hydrology, 206, p. 248-251.

CHAFLÉN, M.; NIEMIEC, A. (1986). *Analytical and Numerical Solution of Saint-Venant Equations*. Journal of Hydrology, v. 86, p. 1-13.

GOMES, V.U. (2006). *Aplicação dos modelos da onda cinemática e da onda difusiva, em rios naturais, para estudar propagação de onda de cheias*. Dissertação, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará.

JABER, F.H.; MOHTAR, R.H. (2002). *Stability and Accuracy of Finite Element Schemes for the One-dimensional Kinematic Wave Solution*. Advances in Water Resources, Elsevier Science, 25, p. 427-438.

MOUSSA, R.; BOCQUILLON, C. (1996). *Criteria for the choice of Flood-Routing Methods in Natural Channels*. Journal of Hydrology, n. 186, p 1-30.

SMITH, A.A. (1980). *Generalized Approach to Kinematic Flood Routing*, Journal of Hydrology. Elsevier Science, 45, p. 71-89.

STURM, T.W. (2001). OPEN CHANNEL HYDRAULICS, MCGRALL HILL SERIES IN WATER RESOURCES AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING, first edition.

AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos ao CNPq e CAPES, pelo suporte financeiro que permitiu o desenvolvimento desta pesquisa.