



ICTR 2004 – CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
Costão do Santinho – Florianópolis – Santa Catarina

**INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE NA DISTRIBUIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SUBSTÂNCIAS
POLUENTES EM RIOS URBANOS**

**Carla Freitas de Andrade
Raimundo Oliveira de Souza**

PRÓXIMA

Realização:



ICTR – Instituto de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável
NISAM - USP – Núcleo de Informações em Saúde Ambiental da USP



INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE NA DISTRIBUIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SUBSTÂNCIAS POLUENTES EM RIOS URBANOS

Carla Freitas de Andrade², Raimundo Oliveira de Souza³

Resumo – Com o objetivo de analisar o comportamento da concentração de uma substância poluente em rios urbanos, sujeito à propagação de uma onda cinemática, formulou-se um modelo matemático, baseado nas Equações da Hidrodinâmica, combinadas com a Equação da Difusão Advectiva. Para a solução das equações diferenciais contidas no modelo, o Método das Diferenças Finitas foi aplicado. Um programa computacional QUARI (Análise da Qualidade da Água em Rios Urbanos), escrito em linguagem FORTRAN 90, desenvolvido para esta pesquisa, foi usado para a realização das simulações. A eficiência e a versatilidade do programa computacional QUARI foram avaliadas através da comparação dos resultados obtidos na análise de vários exemplos com outros resultados registrados da literatura, constatando-se uma excelente concordância. Através do programa QUARI, foram realizadas várias simulações variando a rugosidade do canal para avaliar a influência desse parâmetro na distribuição da concentração. Os resultados mostram que o comportamento da concentração sofre forte influência desse parâmetro hidráulico, determinante no regime de escoamento destes corpos d'água.

Palavras-chave: hidráulica de canais, modelagem de qualidade de água, qualidade de rios urbanos, rugosidade de canais.

⁽²⁾ *Doutorando em Recursos Hídricos – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici – Bloco 713 – Fortaleza, Ceará – Brasil – CEP 60.451-970 – Fone: (85) 288.9771, (85) 234.3608. Fax: (85) 288.9627 – e-mail: engenheiracarla@yahoo.com*

⁽³⁾ *Professor PHD - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici – Bloco 713 – Fortaleza, Ceará – Brasil – CEP 60.451-970 – Fone: (85) 288.9771. Fax: (85) 288.9627 – e-mail: rsouza@ufc.br*

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico e os aspectos de sustentabilidade no uso dos recursos hídricos têm despertado na comunidade científica, responsável pela Gestão dos Recursos Hídricos, uma atenção cada vez mais intensa, na busca de melhores soluções para os problemas inerentes a este campo do conhecimento. Neste contexto, o entendimento da dinâmica da gestão dos recursos hídricos tem se destacado como um grande desafio para engenheiros e cientistas, na busca de soluções que minimizem os impactos causados pelos mais variados tipos de usos desses recursos naturais.

A intensa atividade humana, resultado da presença de grandes zonas urbanas próximas de sistemas hídricos tem produzido grandes impactos, do ponto de vista ambiental, provocando, assim, uma probabilidade muito alta da ocorrência de degradação nestes cursos d'água. No Brasil, muitos são os rios que têm suas águas em completo estado de contaminação, pela presença de sistemas de despejos originários de grandes cidades, como também de áreas irrigadas.

Os fatores principais que afetam a qualidade da água são: esgoto, poluição da agricultura difusa, acidificação e drenagem urbana. As tendências na pressão do povo sobre poluição e níveis de investimento no controle de poluição têm sido usadas para motivar a criação de meios para prever a condição da água superficial. Contudo, o progresso pode não ser tão grande devido ao aumento de fontes difusa de poluição, que são menos fáceis de controlar. Porém, são esperadas mudanças no monitoramento ambiental para evitar fonte pontual de poluição e novas leis que regulem e exijam melhoramentos do meio ambiente (MARS DEN e MACKAY, 2001, p. 374).

No presente trabalho, será desenvolvido um modelo advectivo-difusivo, conjuntamente com os modelos hidrodinâmicos, para analisar as taxas de concentração em diferentes pontos do rio para, através dessa análise, obter-se-á o nível de poluição e, assim, ficar ciente das condições da qualidade da água, sob a influência da rugosidade, para os mais diferentes fins e diferentes tipos de poluentes nos escoamentos não permanentes de um corpo d'água. Este modelo será descrito pelas equações de Saint-Venant, que representam os princípios clássicos de conservação de massa e quantidade de movimento e será resolvido através do método das diferenças finitas.

O método das diferenças finitas ainda é considerado um dos mais simples, versáteis e eficientes métodos numéricos na solução dos mais variados problemas práticos nas várias áreas de engenharia, particularmente quando empregado na modelagem de processos de transporte em sistemas hidrológicos (CHOUDHURY, SHRIVASTAVA e NARULKAR, 2002, p. 414).

METODOLOGIA

Teorema de transporte de Reynolds

O teorema de transporte de Reynolds é usado para desenvolver as equações de continuidade e quantidade de movimento e energia para os vários processos hidrológicos. Através deste teorema, as leis físicas, que são normalmente aplicadas a uma massa isolada de uma substância, são aplicadas a um fluido escoando continuamente através de um volume de controle.

A equação da continuidade simplificada, por se supor que a densidade do fluido é constante, é dada pela seguinte expressão:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} - q = 0. \quad (1)$$

A equação da quantidade do movimento, também supondo um fluido incompressível, e desprezando as perdas por redemoinho, o efeito do cisalhamento do vento e o influxo lateral, e observando que $Q = UA$, passa a ter a seguinte forma:

$$-\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{1}{A} \frac{\partial(Q^2 / A)}{\partial x} - g \frac{\partial y}{\partial x} + gS_0 = gS_f \quad (2)$$

onde S_0 é a declividade do fundo do canal; S_f é a declividade de atrito; y é a profundidade da água ao longo do canal; e g é a aceleração da gravidade.

As Equações (1) e (2), representando, respectivamente, a equação da continuidade e a equação da quantidade de movimento, são as equações de Saint-Venant, que governam o escoamento unidimensional não permanente em um canal aberto seja ele prismático ou não.

Considerando todos os termos nas Equações (2), tem-se a situação do escoamento não permanente e não uniforme; excluindo o primeiro termo, tem-se a situação do escoamento permanente e não uniforme; e considerando apenas os dois últimos termos, tem-se o caso do escoamento permanente e uniforme, isto é, $S_0 = S_f$.

Os modelos podem ser divididos em modelos da onda cinemática e modelos de transporte de massa. Os primeiros fazem simulações do escoamento da água levando em conta os fluxos naturais. Os modelos de transporte de massa analisam o transporte e espalhamento de uma substância poluente que atingiu um curso de água.

Modelo da onda cinemática

As ondas cinemáticas governam o escoamento quando as forças de pressão e as forças inerciais não são importantes. No modelo da onda cinemática, portanto, o escoamento não tem aceleração apreciável e os termos correspondentes às forças de pressão e às forças inerciais são desprezadas, de sorte que a equação da quantidade de movimento assume a sua forma mais simplificada possível, isto é, supõe-se que $S_0 = S_f$ e as forças de atrito e gravidade se compensam. Tal equação simplificada, associada à equação da continuidade, constitui a formulação básica da propagação de uma onda cinemática.

A equação da quantidade de movimento pode também ser expressa na forma

$$A = \alpha Q^\beta, \quad (3)$$

onde A é a área da seção transversal do canal, Q é a vazão e α e β são coeficientes que podem ser obtidos a partir da fórmula de Manning.

Para $S_0 = S_f$ e $R = A/P$, onde R é o raio hidráulico e P é o perímetro molhado, a fórmula de Manning fornece.

$$A = \left(\frac{nP^{2/3}}{\sqrt{S_0}} \right)^{3/5} Q^{3/5}, \quad (4)$$

donde, comparando-se as Equações (3) e (4), resulta em $\alpha = [nP^{2/3}/(\sqrt{S_0})]^{0,6}$ e $\beta = 0,6$, sendo n o coeficiente de rugosidade de Manning e a principal variável desse estudo.

A Equação (2) contém duas variáveis dependentes, A e Q , que torna mais difícil encontrar a sua solução. Entretanto, a variável A pode ser eliminada, derivando-se a Equação (3) e substituindo na Equação (2), resultando em

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \alpha \beta Q^{\beta-1} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) = q \quad (5)$$

A equação diferencial acima, com uma única variável dependente, Q , é equivalente ao sistema de duas equações formado por $S_0 = S_f$ e pela Equação (2). A solução numérica desta equação determinará, no presente estudo, os valores da vazão no canal de um rio sob a influência de uma onda cinemática, cujos valores serão substituídos na equação de transporte de massa para obter os valores de concentração para os diferentes pontos do rio, sabendo-se que o valor da rugosidade será variado e será criada diferentes situações para avaliar a sua influência na capacidade de autodepuração do rio.

Aspectos do transporte de poluentes

Associada a equação da onda cinemática, está a equação de transporte de poluentes que dará como resultado de sua solução numérica, pelas diferenças finitas, os valores de concentração para os diferentes pontos do rio.

O estudo do transporte de poluentes pelos rios é bastante importante e necessário para que se possa avaliar a capacidade de autodepuração de um sistema hídrico e estudar o comportamento de rios urbanos quando sujeitos ao lançamento de cargas poluidoras e sob a influencia da rugosidade.

(a) advecção: resulta do escoamento unidimensional e não muda a identidade da substância que está sendo transportada (CHAPRA, 1997, p. 138). De acordo com

CHOW, MAIDMENT e MAYS (1988, p. 285), a advecção se refere ao transporte devido ao movimento bruto da água que contém o soluto.

(b) difusão: se refere ao movimento de massa devido ao movimento aleatório da água ou da mistura (CHAPRA, 1997, p. 138). Conforme CHOW, MAIDMENT e MAYS (1988, p. 285), a difusão é o transporte não advectivo devido à migração de um soluto em resposta a um gradiente de concentração.

As leis que governam os processos de transporte de massa são a Lei da Conservação de Massa e a Lei de Fick. Normalmente, na análise de um problema hidroambiental, onde uma massa poluente é lançada, através de uma fonte puntiforme ou difusa, em um meio aquático, há a necessidade de se estabelecer uma forma de estudo do comportamento desta massa dentro do sistema fluido.

A formulação para avaliar o comportamento de um campo de concentração em um fluido escoando em um regime turbulento qualquer, pode ser apresentada na forma.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + kC, \quad (6)$$

onde C representa o campo de concentração da substância estudada; E_x é o coeficiente de difusão turbulenta na direção x ; e kC representa uma fonte ou um sumidouro de massa.

Para rios, uma boa aproximação para o coeficiente de dispersão é formulada por (CHAPRA, 1997, p. 246)

$$E = \frac{0,05937}{S_o b} Q, \quad (7)$$

onde b é a largura do canal.

Formulação numérica

Nesta formulação numérica, o método a ser usado será o método das diferenças finitas, para desenvolver o programa computacional escrito em linguagem FORTRAN 90.

Esquema de solução da onda cinemática

Como já mostrado na Equação (5), a equação da continuidade e a equação da quantidade de movimento para a onda cinemática foram combinadas para produzir uma equação com uma única variável dependente Q .

O objetivo é obter a solução numérica da Equação (5), para determinar o valor de $Q(x, t)$ em cada ponto da malha $x - t$, dados os parâmetros do canal α e β , o influxo lateral q , as condições iniciais $Q(x, 0)$ e as condições de contorno $Q(0, t)$. A solução numérica da equação da onda cinemática é mais flexível do que a solução

analítica, pois ela pode manipular mais facilmente as variações das propriedades do canal, das condições iniciais e das condições de contorno.

Para a obtenção da solução numérica da Equação (5), as derivadas parciais de Q com relação a t e com relação à x , a vazão Q e o influxo lateral q são substituídos por expressões aproximadas contendo diferenças finitas apropriadas.

No esquema adotado para a avaliação das diferenças finitas, são considerados conhecidos os valores da vazão Q_i^{j+1} e Q_{i+1}^j e os valores do influxo lateral q_{i+1}^j e q_{i+1}^{j+1} . São considerados desconhecidos e, portanto, a determinar, os valores da vazão Q_{i+1}^{j+1} . Os valores da vazão nos pontos da malha para a onda cinemática são determinados através de

$$Q_{i+1}^{j+1} = \frac{\left[\frac{\Delta t}{\Delta x} Q_i^{j+1} + \alpha\beta Q_{i+1}^j \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1} + \Delta t \left(\frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^j}{2} \right) \right]}{\left[\frac{\Delta t}{\Delta x} + \alpha\beta \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1} \right]} \quad (8)$$

Solução para o processo de advecção e difusão/dispersão

A solução numérica da Equação (6) é obtida através da solução de sistemas de equações algébricas simultâneas estabelecidas após a introdução de diferenças finitas naquela equação. Cada termo na equação é substituído por uma expressão aproximada, com base em um determinado esquema de diferenças finitas.

Após as devidas substituições, a Equação (6) se transforma em (ANDRADE, 2003, p. 81).

$$\frac{C_i^{j+1} - C_i^j}{\Delta t} + \frac{1}{4\Delta x} [U_i^j (C_{i+1}^j - C_{i-1}^j) + U_i^{j+1} (C_{i+1}^{j+1} - C_{i-1}^{j+1})] + \frac{k}{2} (C_i^j + C_i^{j+1}) - \frac{1}{2\Delta x^2} [E_i^j (C_{i+1}^j - 2C_i^j + C_{i-1}^j) + E_i^{j+1} (C_{i+1}^{j+1} - 2C_i^{j+1} + C_{i-1}^{j+1})] = 0 \quad (9)$$

onde Δx e Δt definem a malha $x - t$.

Observando que $U = \frac{Q}{A}$ e $E = \frac{0,05937}{S_o b} Q$, chega-se à equação final.

$$-[\alpha_1 (Q_i^{j+1})^{1-\beta} + \alpha_3 Q_i^{j+1}] C_{i-1}^{j+1} + (1 + \alpha_2 + 2\alpha_3 Q_i^{j+1}) C_i^{j+1} + [\alpha_1 (Q_i^{j+1})^{1-\beta} - \alpha_3 Q_i^{j+1}] C_{i+1}^{j+1} = (1 - \alpha_1) C_i^j - \alpha_1 (Q_i^j)^{1-\beta} (C_{i+1}^j - C_{i-1}^j) + \alpha_3 Q_i^j (C_{i+1}^j - 2C_i^j + C_{i-1}^j), \quad (10)$$

$$\text{onde } \alpha_1 = \frac{\Delta t}{4\alpha\Delta x}, \quad \alpha_2 = \frac{k\Delta t}{2} \quad \text{e} \quad \alpha_3 = \frac{0,05937\Delta t}{2S_o b\Delta x^2}.$$

O esquema para determinar a concentração, tem como termos conhecidos os valores da função nos pontos $(i-1, j)$, (i, j) , $(i+1, j)$, e o valor da função (concentração) é desconhecido nos pontos $(i-1, j+1)$, $(i, j+1)$, $(i+1, j+1)$, usando um esquema de diferença finita progressiva e um esquema de diferença finita central.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Serão discutidos os vários resultados, com relação aos valores de concentração, obtidos a partir de um conjunto de simulações, onde se variou a rugosidade e considerou-se a influência de uma onda de cinemática, de modo a avaliar o comportamento da concentração em rios urbanos.

Para verificar a eficiência do programa computacional QUARI, escrito em linguagem FORTRAN 90, na solução de problemas de concentração, compararam-se os resultados obtidos numericamente pelo programa, com os resultados obtidos analiticamente por CHAPRA (1997, p. 182).

Os valores máximos da concentração, na solução analítica, foram de 0,1357; 0,0960 e 0,0784 mg/l, para t igual a 12, 24 e 36 min, e ocorrem para x igual a 980, 1460 e 1940 m, respectivamente. Os valores máximos da concentração correspondentes na solução numérica, considerando a discretização em 30 trechos, são 0,1400; 0,0973 e 0,0788 mg/l. Os erros relativos entre os valores máximos da solução numérica e da solução analítica, a saber, 3,2 %, 1,3 % e 0,5 %, são bem aceitáveis. Tal diferença entre a solução analítica e a solução numérica decorre do fato de que a solução analítica é uma solução “exata”, enquanto que, a solução numérica, é baseada na solução aproximada das equações diferenciais que governam o problema.

Verificada a eficiência do programa computacional QUARI, simulações para descrever o comportamento da concentração de substâncias poluentes em rios urbanos podem ser realizadas.

Neste contexto, foram feitos estudos da concentração inicialmente para um canal sujeito a uma propagação de onda e para um canal com diferentes valores da rugosidade e em diferentes situações. Todos os estudos foram feitos admitindo uma concentração de uma substância conservativa.

O estudo analisou os efeitos de diferentes condições da rugosidade sobre a concentração sujeita a uma onda de cheia, simulando, também, situações para diferentes declividades. Os resultados mostram que, para uma mesma declividade, a rugosidade influencia diretamente na capacidade de diluição do corpo hídrico.

Através das Figuras 1 e 2, para os tempos de 441 e 711 minutos, respectivamente, e para a declividade de 0,0001 m/m, percebe-se que, quanto maior for a rugosidade, menor será o processo de diluição, fazendo com que a onda possua menor interferência na dispersão dos poluentes.

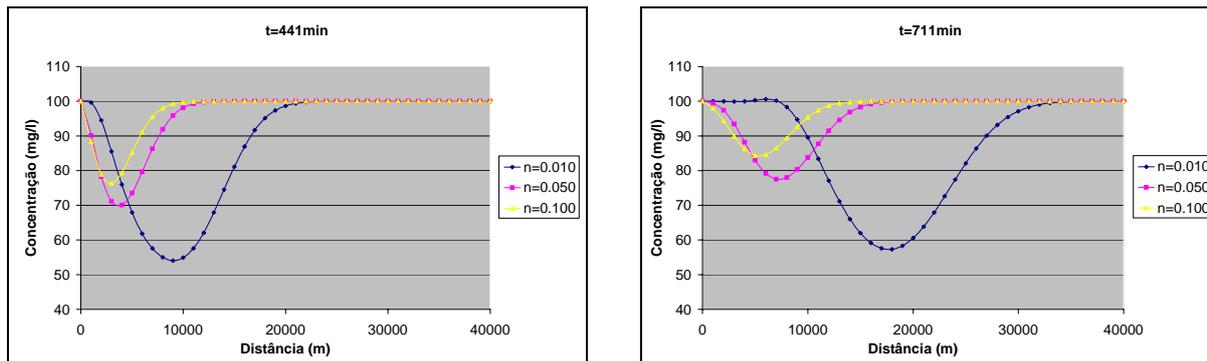


Figura 1 e 2. Distribuição da concentração para diferentes rugosidades, considerando uma declividade de 0,0001 m/m, em diferentes intervalos de tempo.

Isto ocorre pelo fato de que a rugosidade atua diretamente na vazão, reduzindo-a à medida que seu coeficiente de rugosidade (n) cresce, fazendo com que a capacidade de diluição do corpo de água seja menor. Este resultado está de acordo com observações experimentais.

As Figuras 3 e 4 mostram esta mesma análise para uma outra diferente declividade, a saber, para $s_0 = 0,00005$ m/m. Neste caso, observou-se, também que, com o aumento da declividade, o processo de diluição aumenta, como já foi detectado anteriormente.

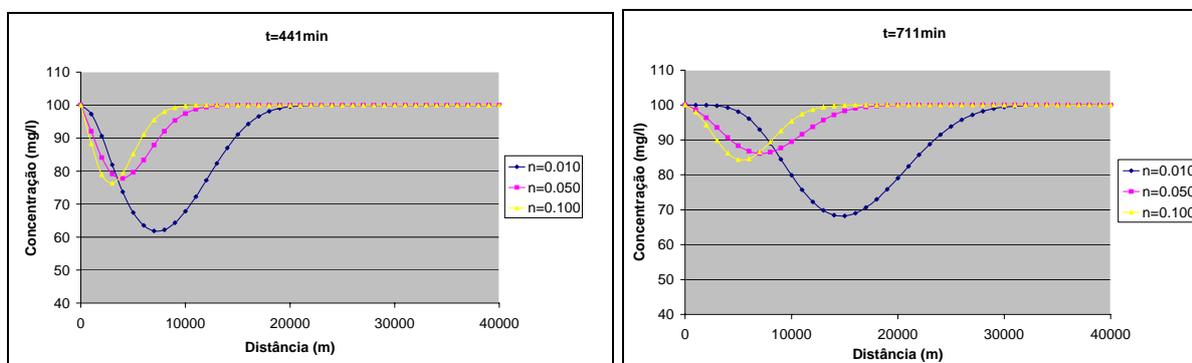


Figura 3 e 4. Distribuição da concentração para diferentes rugosidades, considerando uma declividade de 0,00005 m/m, em diferentes intervalos de tempo.

Comparando os resultados dos casos em que se considera uma variação da declividade e uma variação da rugosidade, para um mesmo tempo de 711 minutos, pode-se verificar nas Figuras 2 e 4, que a onda de concentração sofre uma maior dispersão para uma maior declividade. Isto ocorre pelo fato de que, com a maior declividade, aumenta-se a vazão. Este resultado já foi verificado em outras simulações anteriores, ao se fixar a rugosidade e variar a declividade.

Como se pode observar, uma série de simulações foi realizada através do programa computacional, QUARI, desenvolvido para esta pesquisa, cujos resultados permitiram que se fizesse uma avaliação bastante consistente do comportamento da

concentração de poluentes em um rio sob o efeito de uma onda cinemática e para diferentes condições da rugosidade, mostrando assim, a sua influência no comportamento da concentração das substâncias poluentes.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A grande vantagem desse programa computacional é que ele permite realizar simulações de um grande número de situações normalmente encontradas em rios naturais e urbanos. Tal fato garante a continuidade do presente estudo, permitindo, assim, que conclusões bastante significativas possam ser extraídas, principalmente para rios urbanos altamente castigados pela presença das mais variadas fontes poluidoras.

O modelo, matemático-computacional desenvolvido, responde plenamente aos objetivos da pesquisa, com grande versatilidade e eficiência na solução das mais variadas situações práticas encontradas no campo de sua aplicabilidade;

Foi verificada a influência da rugosidade no comportamento da concentração. Os resultados mostram que, rios com rugosidades com maior poder de atrito, reduzem sua capacidade de diluição, aumentando, portanto, o risco de degradabilidade;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MARSDEN, M. W.; MACKAY, D.W. Water quality in Scotland: the view of the regulator. *The Science of the Total Environment*, v. 265, p. 369 – 386, 2001.

CHOUDHURY, P.; SHRIVASTAVA, R.K.; NARULKAR, S.M. Flood routing in river networks using equivalent Maskingum inflow. *Journal of Hydrologic Engineering*, American Society of Civil Engineers, New York, v. 7, n. 6, p. 413-419, Nov. 2002.

CHAPRA, Steven C. *SURFACE-WATER QUALITY MODELING*. New York: The McGraw Hill Companies, 1997.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. *APPLIED HYDROLOGY*, New York: McGraw-Hill, 1988.

ANDRADE, Carla Freitas de. *Aplicação dos Modelos Hidrodinâmicos para Estudar Índices de Poluição em Rios Urbanos, em Função dos Seus Parâmetros Hidráulicos*. Fortaleza, 2003. 165fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará.



Abstract – With the objective of analyzing the behavior of the concentration of a pollutant substance in urban rivers, subject to the propagation of a kinematic wave, a mathematical model was formulated, based on the Equations of Hydrodynamics, combined with the Equation of Transport Process. For the solution of the differential equations present in the model, the Finite Difference Method was applied. A computer program QUARI (Analysis of Water Quality in Urban Rivers), written in FORTRAN 90, developed for this research, was used for the accomplishment of the simulations. To evaluate the capability and efficiency of the computer program QUARI, several examples were analyzed and the results compared with other results presented in the literature, showing an excellent agreement. By using the computer code QUARI, several simulations varying the channel roughness were performed with the purpose to evaluate the influence of this hydraulic parameter on the concentration distribution. The results show that the behavior of the concentration distribution depends strongly on this hydraulic parameter that is decisive in the flow regime of these bodies of water.

Key –Words: open channels hydraulics, water quality model, quality water in urban rivers, channels slope.