



ICTR 2004 – CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E  
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Costão do Santinho – Florianópolis – Santa Catarina

**VAZÕES EXCESSIVAS EM CANAIS ABETOS: RISCO DE A VAZÃO ULTRAPASSAR  
A VAZÃO ADMISSÍVEL CONSIDERANDO A VARIABILIDADE DA RUGOSIDADE E  
DA DECLIVIDADE NA EQUAÇÃO DE MANNING**

**Carla Freitas de Andrade  
Vicente P. P. B. Vieira**

**PRÓXIMA**

Realização:



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



## VAZÕES EXCESSIVAS EM CANAIS ABETOS: RISCO DA VAZÃO ULTRAPASSAR A VAZÃO ADMISSÍVEL CONSIDERANDO A VARIABILIDADE DA RUGOSIDADE E DA DECLIVIDADE NA EQUAÇÃO DE MANNING

Carla Freitas de Andrade<sup>(2)</sup>, Vicente P. P. B. Vieira<sup>(3)</sup>

**Resumo** – O presente trabalho mostra o risco de vazões excessivas em canais abertos com escoamento permanente e uniforme, calculado pela equação de Manning. O risco foi definido pela probabilidade da vazão do escoamento ultrapassar a vazão admissível, quando se considera a variabilidade da rugosidade, para o tipo de material encontrado no canal, e erro na declividade ocorrida efetivamente implantada na execução do projeto. Calculou-se a vazão admissível do projeto e, através do método de simulação, considerando diferentes tipos de distribuição e do método MFOSM, encontrou-se o risco. Fez-se uma comparação entre os resultados obtidos pelos métodos de simulação e MFOSM. Foram também feitas simulações para diferentes níveis de erros na declividade, também considerando a variabilidade da rugosidade, com vistas a analisar a influência da declividade.

**Palavras Chaves:** Risco, variabilidade da declividade, variabilidade da rugosidade

<sup>(2)</sup> *Doutoranda 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](mailto:engenheiracarla@yahoo.com)*

<sup>(3)</sup> *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) 288.9767. Fax: (85) 288.9627 – e-mail: [vpvieira@ufc.br](mailto:vpvieira@ufc.br)*

## INTRODUÇÃO

Para o presente estudo, foi aplicada a equação de Manning, conjuntamente com modelos probabilísticos, para obter uma comparação entre os valores do risco, em um escoamento permanente e uniforme de um canal aberto. Os modelos probabilísticos são descritos pelo método de simulação de Monte Carlo e método MFOSM (Mean Value First Order Second Moment). Para o método de simulação de Monte Carlo, consideraram-se quatro diferentes tipos de combinações entre três tipos de distribuições (uniforme, normal e triangular).

Além disso, foram consideradas diferentes hipóteses de erros para a declividade, a fim de obter, também, um estudo comparativo que mostre a influência do aumento do erro da declividade, junto com a variabilidade da rugosidade, no cálculo do risco.

Todas as comparações obtidas e as conclusões tiradas do estudo permitem avaliar o comportamento da vazão em um canal aberto de escoamento permanente e uniforme sujeito a uma variabilidade do coeficiente de Manning e da declividade por considerar um erro durante a execução do canal permitindo avaliá-lo para características hidráulicas pré-estabelecida do canal, de modo a fornecer subsídios que auxiliem na tomada de decisões, em programas de Gestão de Recursos Hídricos.

## METODOLOGIA

Os escoamentos em canais abertos são muito importantes. A drenagem natural de água nos riachos e sistemas de rios é um exemplo complexo de escoamento em canal aberto. Além da geometria destes sistemas serem complicada, as propriedades do escoamento resultante são muito importantes dos pontos de vista econômico, ecológico e social. Outros exemplos de escoamentos em canais abertos são aqueles encontrados nas calhas de uma edificação, nos sistemas de esgoto e águas pluviais, nas sarjetas das ruas e nas lâminas de água de chuva que se formam nos estacionamentos (ANDRADE, 2003, p. 53)

As equações utilizadas para determinar a vazão em canais abertos foram derivadas há muitos anos e os valores dos coeficientes empíricos destas equações têm sido otimizados desde então. Atualmente, tem-se equações semi empíricas que fornecem resultados adequados para os projetos de engenharia. A utilização de métodos mais refinados na solução destes escoamentos não garante resultados mais preciosos porque a descrição dos problemas são complexos e existem muitas incertezas na formulação dos problemas, pois é difícil descrever os formatos e as irregularidades do perímetro molhado dos canais, particularmente nos canais naturais

Os cálculos em canais estão baseados em equações de resistência, equações que ligam a perda de carga em um trecho à velocidade média, ou a vazão, através de parâmetros geométricos e da rugosidade do perímetro molhado. Para o caso do escoamento permanente e uniforme em canais prismáticos com declividade de fundo baixa, isto pode ser feito a partir da condição de equilíbrio dinâmico entre as forças que atuam sobre a massa d'água.

A equação fundamental do escoamento permanente uniforme em canais é dada pela Equação (1), denominada fórmula de Manning, válida também para escoamentos turbulentos rugosos, com grande número de Reynolds.

$$Q = \frac{A}{n} R_h^{2/3} S_o^{1/2} \quad (1)$$

Sendo  $A$  é a área molhada,  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning,  $R_h$  é o raio hidráulico e  $S_o$  é a declividade de fundo do canal.

Segundo PORTO (1998, p. 244), deve-se observar que a fórmula de Manning, além de ter origem empírica, carrega um coeficiente  $n$  que não é um adimensional. Os valores do coeficiente  $n$  para vários tipos de revestimentos em canais artificiais e em cursos de água naturais encontram-se variando entre limites e podem ser encontrados em tabelas.

Como era esperado, quanto mais rugosa for a superfície do canal em contato com a água maior será o valor de  $n$ . Por exemplo, note que a rugosidade de uma superfície inundada aumenta se esta passa de pasto para cerrado até floresta. Os valores precisos de  $n$ , para um canal particular exige do projetista critério e bom senso, pois são sempre difíceis de obter, exceto para canais artificiais novos mas, normalmente, a estrutura da superfície dos canais é complexa e variável, além do que, outros fatores além do revestimento podem alterar a rugosidade, como crescimento de vegetação, processos de erosão ou sedimentação e até mesmo a presença de curvas pela alteração dos perfis de velocidade. Existem vários métodos para determinar uma estimativa razoável do valor de  $n$  para uma dada situação.

Além de se ter um erro gerado pelo coeficiente de rugosidade  $n$ , tem-se também um erro no valor da declividade, empregada na execução do canal, pois trabalha-se com valores muito pequenos, cuja imprecisão interfere significativamente nos resultados. Esse erro é resultado do tipo de aparelho topográfico utilizado na medição das cotas, da má calibração do aparelho medidor, do erro de leitura cometido pelo topógrafo ou responsável e/ou pela falta de preparo e conhecimento do responsável pela leitura ou medição.

Sabendo-se da existência de um erro no cálculo da vazão causado pela variabilidade do coeficiente de rugosidade  $n$ , e de declividade  $S_o$ , percebe-se a necessidade de um estudo sobre tais erros, para se obter o risco de uma vazão calculada, ultrapassar a vazão limite permitida para um determinado canal no projeto.

CHOW, MAIDMENT e MAYS (1988, p. 297) propôs um estudo para se saber a vazão admissível em um canal retangular aberto, em rochas irregulares, com altura de 1,05 m, largura de 60,96 m, declividade do fundo igual a 0,01 m/m e coeficiente de rugosidade de 0,035.

Calculando as variáveis, substitui-se na Equação (1) e encontra o valor da vazão admissível de projeto ( $Q_{adm} = 184.71 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Para fazer o estudo da variabilidade do coeficiente de Manning, considerou-se como os limites de variabilidade de  $n$ , o intervalo de 0.033 a 0.05, conforme PORTO (1988, p. 273) propôs, em uma de suas tabelas, para um canal sujeito a estas condições topográficas e geológicas.

Quanto ao estudo da variabilidade de  $S_0$ , atribui-se uma erro aceitável de 5%, para mais ou para menos, segundo dados retirados da literatura de RICARDO e CATALANI (1990, p. 285), onde os autores mostram que tal medição topográfica está sempre sujeita a uma erro devido aos fatores já relatados.

Cálculou-se o risco da vazão originada da variabilidade de  $n$  e  $S_0$ , ultrapassar a vazão limite pelo método de Monte Carlo e método MFOSM.

A simulação de Monte Carlo consiste na geração simulada de conjuntos de valores  $X_i$ , a partir de suas distribuições de probabilidade, de modo a se calcular um conjunto de valores da função desempenho  $Z$  ( $Z = Q_{adm} - Q$ ) suficientemente grande para representar uma boa amostra da população  $Z$  (VIEIRA, 2003, p. 51). É um método muito flexível, de muita utilidade no caso de funções não lineares e sistemas complexos.

A probabilidade de falha será avaliada pela razão entre a quantidade de valores de  $Z$  negativos e a quantidade total de eventos  $Z$  gerados.

Segundo VIEIRA (2003, p. 70), o método MFOSM consiste na expansão da função-desempenho  $Z = g(X_i)$  em série de Taylor, em torno dos pontos médios  $\mu_{x_i}$  das variáveis  $X_i$ , considerando apenas os termos de primeira ordem, onde o primeiro e segundo momento de  $Z$ , considerando a não correlação, assumem, por aproximação, as expressões:

$$\mu_Z \approx g(\mu_{x_i}) \quad (2)$$

$$VAR(Z) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)^2 VAR(X_i) \quad (3)$$

Pela Equação (3) tem-se o desvio padrão:

$$\sigma_Z = \sqrt{VAR(Z)} \quad (4)$$

Pelas Equações (2) e (4) é obtida a média e o desvio padrão de  $Z$ , com isso, considera-se a hipótese de  $Z$  ser normalmente distribuída, logo o risco (probabilidade de falha) é calculado por:

$$P_F = 1 - \varphi(\beta) \quad (5)$$

onde,  $\beta = \mu_Z / \sigma_Z$ .

## RESULTADOS

### Método de Monte Carlo

Usando a metodologia da simulação de Monte Carlo, gerou-se 500 números aleatórios e considerou-se, a título de comparação, que as variáveis aleatória  $n$  e  $S_0$  comportam-se como uma distribuição uniforme, normal e triangular.

Estabeleceu-se combinações entre diferentes tipos de distribuições para ser feito comparações com os valores dos riscos encontrados nas quatro hipóteses consideradas. As combinações estabelecidas estão listadas na Tabela (1), sendo as médias e os desvios padrões calculados segundos as distribuições, ao lado correspondentes:

**Tabela 1.** Relação entre as distribuições das duas variáveis para o método de simulação de Monte Carlo

		$n$	$S_0$
1º Combinação	Distribuição	Uniforme	Uniforme
	Média e Desvio Padrão	Uniforme	Uniforme
2º Combinação	Distribuição	Normal	Normal
	Média e Desvio Padrão	Triangular	Uniforme
3º Combinação	Distribuição	Triangular	Triangular
	Média e Desvio Padrão	Triangular	Triangular
4º Combinação	Distribuição	Triangular	Uniforme
	Média e Desvio Padrão	Triangular	Uniforme

Assim, depois de gerar os 500 números aleatórios no Excel e supor para cada uma das quatro combinações de distribuições, as médias e desvios padrões respectivos, encontra-se 500 valores de  $n$  e  $S_0$  aleatórios, obtendo assim, 500 valores de vazão,  $Q$ , que são calculados conforme a Equação (7).

$$Q = \frac{A}{n_{aleat}} R_h^{2/3} S_{0.aleat}^{1/2} \tag{6}$$

$$Q = \frac{64.6478}{n_{aleat}} (S_{0.aleat})^{1/2} \tag{7}$$

Calcula-se, agora, o valor de  $Z$  pela Equação (8), para poder depois calcular o risco.

$$Z(m) = Q_{adm} - Q \tag{8}$$

Soma-se quantos valores de  $Z$  deram negativos, ou seja, soma-se a quantidade de vezes que a vazão calculada ultrapassou a vazão limite. O risco é dado pelo número de  $Z$  negativos dividido pelo número total de  $Z$  (500), ou seja

$$P_F = P [Z < 0] \tag{9}$$

Os valores do risco encontrados pelo método da simulação para os quatro tipos diferentes de distribuição encontram-se, em resumo, na Tabela (2), a seguir.

**Tabela 2.** Valores do risco encontrado pelo método de simulação de Monte Carlo.

	1° Combinação	2° Combinação	3° Combinação	4° Combinação
Risco (%)	9.80	10.80	9.80	10.60

Com o objetivo de comparar os valores do risco obtidos com o método da simulação, calculou-se também o risco através do método MFOSM.

### Método MFOSM

Inicialmente calculou-se a média e o desvio padrão de  $n$  pela fórmula da distribuição triangular, visto que são dados dois limites de  $n$  na tabela e por CHOW, MAIDMENT e MAYS (1988, p. 297) é dado um valor intermediário de  $n$ , sendo assim  $n_{(m)} = \mu_n = 0.039333$  e  $\sigma_n = 0.003793$ , já a média e o desvio padrão de  $S_0$  foram calculados pela expressão da distribuição uniforme, pois o valor dado por CHOW, MAIDMENT e MAYS (1988, p. 297) corresponde ao valor médio, já que o limite é uniforme para os dois lados, sendo encontrado  $S_{0(m)} = \mu_{S_0} = 0.01$  e  $\sigma_{S_0} = 0.0002887$ .

Calcula-se o valor da vazão pela Equação (1) usando como valor de  $n$ , o valor médio calculado pela distribuição triangular e o valor de  $S_0$  o valor médio encontrado pela expressão da distribuição uniforme, encontrando  $Q = 164.3591 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Conforme a Equação (8),  $Z_m$  é dado por:

$$Z(m) = 184.7083 - 164.3591 = 20.34922$$

A variância de  $Z$  é calculada pela fórmula

$$VAR(Z) = \left(\frac{\partial Q}{\partial n}\right)^2 (\sigma_n)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial S_0}\right)^2 (\sigma_{S_0})^2 \tag{10}$$

onde o valor de  $n$  e de  $S_0$  são os valores médios calculados anteriormente e  $\frac{\partial Q}{\partial n}$  e

$$\frac{\partial Q}{\partial S_0} \text{ são } \frac{\partial Q}{\partial n} = A.R_h^{2/3} S_{0(m)}^{1/2} (-1)n_{(m)}^{-2} \text{ e } \frac{\partial Q}{\partial S_0} = \frac{A}{n_{(m)}} R_h^{2/3} \left(\frac{1}{2}\right) S_{0(m)}^{-1/2}.$$

Substituindo os valores, obtém-se a seguinte Tabela 3.

**Tabela 3 :** Resultados encontrados para o método MFOSM

$Z_m$	$\frac{\partial Q}{\partial n}$	$\frac{\partial Q}{\partial S_0}$	$\sigma_n$	$\sigma_{S_0}$	$VAR(Z)$	$\sigma_Z = (\sqrt{VAR(Z)})$
20.349	- 4178.6	8217.95	0.00379	0.000288	254.844	15.96385

Diante dos valores encontrados, calcula-se o risco da vazão aleatória ultrapassar a vazão limite pelo método MFOSM, aplicando a Equação (8).

$$P_F = 1 - \varphi\left(\frac{20.34922}{15.96385}\right) = 1 - \varphi(1.27471) \tag{11}$$

Pela tabela da distribuição Z, o valor correspondente a  $\varphi(1.27471)$  é 0.898793, assim,

$$P_F = 10.12 \%$$

Com base no método MFOSM, há um risco de 10.12 % de ocorrer uma vazão maior que a vazão limite calculada no projeto do canal aberto, sujeito aos valores das variáveis hidráulicas atribuídos por CHOW, MAIDMENT e MAYS (1988, p. 297).

Apesar de estar estipulado por RICARDO e CATALANI (1990, p. 285) que o erro admissível para a declividade é de 5 %, simulou-se, sob as mesmas condições, para o erro da declividade variando entre 0 % e 10 %.

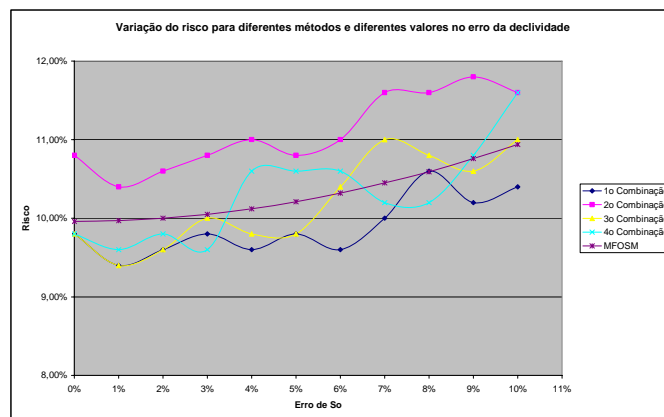
Os procedimentos usados foram os mesmos, e os métodos aplicados também. Com isso, encontrou-se diferentes valores do risco para diferentes situações de variação do erro da declividade, cujos resultados podem ser vistos na Tabela (4).

Foram feitos, também, gráficos mostrando a influência que a mudança no erro da declividade trás para o estudo do risco, considerando sempre a variabilidade da rugosidade.

**Tabela 4.** Valores do encontrados para o risco de uma vazão ultrapassar a vazão limite admissível, considerando uma variação no erro da declividade.

Risco (%)		Variação no erro da declividade (%)										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Simulação de Monte Carlo	1º Combinação	9.8	9.4	9.6	9.8	9.6	9.8	9.6	10.0	10.6	10.2	10.4
	2º Combinação	10.8	10.4	10.6	10.8	11.0	10.8	11.0	11.6	11.6	11.8	11.6
	3º Combinação	9.8	9.4	9.6	10.0	9.8	9.8	10.4	11.0	10.8	10.6	11.0
	4º Combinação	9.8	9.6	9.8	9.6	10.6	10.6	10.6	10.2	10.2	10.8	11.6
MFOSM		9.96	9.97	10.0	10.1	10.1	10.2	10.3	10.5	10.6	10.8	10.9





**Figura 1.** Variação do risco para os métodos utilizados, considerando diferentes erros na declividade.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Diante dos valores do risco da vazão limite ser atingida e ultrapassada, calculados pelos métodos acima descritos, percebe-se a concordância entre eles, pois tanto o método de simulação, usando quatro combinações de distribuições, quanto o método MFOSM convergem para valores muito próximos.

A convergência do risco mostra a eficiência dos métodos utilizados e o grau de confiança que eles podem proporcionar.

Conclui-se, então, que a variabilidade do coeficiente de rugosidade,  $n$ , e do coeficiente da declividade,  $S_0$ , afetam a vazão diretamente, proporcionando um risco de até 10,80 % do canal receber uma vazão maior que a admissível, levando ao projetista reavaliar os critérios a serem usados na escolha do valor do coeficiente  $n$  e  $S_0$  a serem utilizados, para que nem seja super dimensionado o canal, aumentando os custos e nem haja um risco de ocorrer uma vazão maior que a permitida, com possíveis transbordamentos e prejuízos ambientais.

Pode-se dizer que a variabilidade de  $n$  influi mais do que a variabilidade de  $S_0$  no cálculo do risco da vazão. Isto deve ser notado através da Equação (1) de Manning, onde o coeficiente  $n$  varia diretamente com a vazão e o  $S_0$  inversamente e também quando se considera o erro da declividade de 0% e tem-se um risco entre 9,8 % e 10,80 % dependendo do método usado. Se  $n$  aumenta e  $S_0$  diminui, a vazão tende a aumentar, enquanto que se  $n$  diminui e  $S_0$  aumenta, a vazão também tende a diminuir.

Observando a Tabela (4), percebe-se que à medida que o erro aumenta, o risco também aumenta, existindo sempre uma pequena diferença entre os métodos, o que mostra uma boa aceitação para os resultados.

À Figura (1) mostra com mais clareza o comportamento dos métodos no cálculo do risco, considerando a variação do erro da declividade. Percebe-se, que se traçar

uma linha reta sobre a percentagem de 5 %, pode-se observar o comportamento dos métodos para o erro aceitável da declividade.

Recomenda-se que antes de executar o canal, faça-se um estudo de risco nessa variabilidade da rugosidade para se saber se o risco está dentro de limites aceitáveis ou não, a fim de evitar maiores problemas posteriormente.

Recomenda-se também para estudos posteriores saber a influência de um erro na variabilidade do coeficiente de rugosidade  $n$  sobre o risco.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

PORTO, Rodrigo de Melo. Hidráulica Básica. São Paulo: Publicação EESC-USP, 1998.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. Applied Hydrology, New York: McGraw-Hill, 1988.

RICARDO, Hélio de Souza, CATALANI, Guilherme. Manual Prático de Escavação. São Paulo: Ed. Pini, 2<sup>o</sup> edição, 1990.

VIEIRA, V.P.P.B. Análise de Risco em Recursos Hídricos – Fundamentos e Aplicações. Notas de Aula. Fortaleza, 2003.



**Abstract** – The present work shows the risk of open channels steady uniform flow discharge, calculated by Manning equation, to exceed the allowable value, when roughness variation, for the material type found in the channel, and a slope error during construction are considered. The project allowable discharge was calculated and, by using the simulation method, considering different types of distribution, and the MFOSM method, the risk was found. A comparison between the results obtained by the simulation and the MFOSM method was made. Simulations for different slope errors and also considering roughness variation was also made, in order to analyze the slope influence.

**Key – words:** Risk, Roughness Variability, Slope Variability.