

# AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE BUEIROS PARA RODOVIAS E FERROVIAS

Carolina Lourenço Santiago<sup>1</sup>, Marcelo de Miranda Reis<sup>1</sup>, Francisco José d'Almeida Diogo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Militar de Engenharia (IME), Seção de Engenharia de Fortificação e Construção, Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Urca, Rio de Janeiro, Brasil

e-mail: carol.civil@gmail.com

---

## Sumário

*O objetivo é avaliar por análise experimental as metodologias de dimensionamento de bueiros, pelos métodos da Teoria da Vazão Crítica e o Método da Circular nº 5. A comparação foi realizada por experimentos em dois modelos físicos reduzidos, originados do protótipo do bueiro simples tubular de concreto de diâmetro de um metro. Ambos foram ensaiados, considerando que trabalham como canal. Os dados foram obtidos por medições diretas e por mini-molinete, respectivamente. Foi aplicada a semelhança dimensional pelo número de Froude. As vazões obtidas foram aplicadas em uma retro-análise. Neste caso, a metodologia com maior aderência foi a Circular nº 5.*

---

**Palavras chaves:** Drenagem; Bueiros; Dimensionamento; Hidráulica; escoamento.

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com [1], para que o sistema viário exerça a sua missão de forma satisfatória e não venha a constituir-se em fator de inibição ao desenvolvimento e integração socioeconômica, é fundamental que a estrada ofereça, de forma permanente, um elevado nível de serventia, que se traduzirá na oferta ao usuário, de condições de transporte revestidas de seus atributos essenciais como conforto, segurança e economia, conforme os preceitos básicos que norteiam o papel dos transportes no contexto das atividades econômicas. Com a crescente demanda de novos projetos que exigem rapidez e racionalidade de custos, assim como a revisão do projeto dos dispositivos existentes, raras vezes o dimensionamento de bueiros é encarado com a atenção condizente com as funções a que se destinam, o vulto do investimento ou os riscos que possam representar.

Dentre componentes da infraestrutura viária, conforme [2], a drenagem deve tirar a água que, sob qualquer forma, atinge o corpo estradal, captando-a e conduzindo-a para locais em que menos afete a segurança e durabilidade da via. Como descreve [2], no caso da transposição de talvegues, essas águas originam-se de uma bacia que devem ser atravessadas sem comprometer a estrutura da estrada, seja uma rodovia ou ferrovia, nem as condições ambientais do seu entorno. Ademais, sob o ponto de vista financeiro, os custos de implantação dos sistemas de drenagem atingem valores significativos nos orçamentos, havendo a necessidade de bom planejamento e execução para se garantir boas condições de tráfego e segurança do usuário, segundo [3]. O Manual de Drenagem de Rodovias, desenvolvido pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), atual documento brasileiro utilizado como guia, orientando a aplicação dos dispositivos de drenagem em estudos e projetos de rodovias e ferrovias, prescreve dois métodos de dimensionamento de bueiros, o Método da Teoria do Fluxo Crítico e o Método segundo a Circular nº 5 do *Bureau of Public Roads*.

Conforme o exposto, este artigo visa, através de análise experimental de dois modelos reduzidos de um bueiro simples de concreto de 1,00m de diâmetro (BSTC  $\phi$ 1,00), avaliar qual metodologia de dimensionamento de bueiro atinge a dimensão do protótipo como canal.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Método da Teoria da Vazão Crítica ou do Fluxo Crítico

Baseado nas equações hidráulica de canais, orifícios e vertedouros, com algumas adequações para utilizar em

bueiros. Para o dimensionamento é necessário conhecer o valor da vazão de descarga, da declividade local e da rugosidade do material do bueiro. Neste trabalho será apresentado apenas o dimensionamento como canal.

### 2.1.1 Dimensionamento como canal

Para o cálculo como canal é necessário fazer considerações sobre a hidrodinâmica. O dimensionamento como canal é feito pela Equação de Bernoulli (Eq.1) que ao longo de qualquer linha de fluxo, a soma das alturas representativas da energia geométrica ou de posição, piezométrica e cinética é constante e pela Equação da Continuidade (Eq.2), em que  $z$  é a linha piezométrica ou de posição,  $\gamma$  é o peso específico constante,  $p$  é o peso bruto total combinado, em kN,  $g$  é a aceleração da gravidade, em  $m/s^2$ ,  $v$  é a velocidade, em  $m/s$ ,  $Q$  é a vazão, em  $m^3/s$  e  $A$  é a área da seção molhada, em  $m^2$ .

$$z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + \Delta h = 0 \quad (1)$$

$$Q = A \times v \quad (2)$$

Além disso, essa metodologia leva em consideração o regime de escoamento. Pode ser crítico, quando ocorre o mínimo de energia; supercrítico, definido pela declividade superior à do regime crítico; e o subcrítico, definido pela declividade inferior à do regime crítico. Para a determinação do regime é utilizada a fórmula de Froude (Eq.3), em que  $Fr$  é o número de Froude, adimensional,  $v$  é a velocidade, em  $m/s$ ,  $g$  é a aceleração da gravidade, em  $m/s^2$  e  $h$  é a profundidade hidráulica, em  $m$ .

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (3)$$

Para a determinação do regime, o Froude caracteriza o escoamento em crítico se  $Fr = 1$ , subcrítico caso  $Fr < 1$  e em supercrítico se  $Fr > 1$ . Caso ocorra um fluxo uniforme, pode-se estabelecer a correlação dos elementos do escoamento com a declividade do canal através de fórmula de Chezy-Manning (Eq.4), em que  $V$  é a velocidade do fluido, em  $m/s$ , o  $R$  é o raio hidráulico (área molhada dividida pelo perímetro molhado), em  $m$ ,  $I$  é o gradiente hidráulico, em  $m/m$ ; e  $n$  é o coeficiente de rugosidade.

$$v = \frac{R^{2/3} \times I^{1/2}}{n} \quad (4)$$

Portanto, no caso de bueiro trabalhando como canal, o dimensionamento considera duas hipóteses: funcionamento no regime supercrítico e no regime subcrítico. No primeiro caso, limita-se a capacidade admissível à vazão crítica, estabelecendo a condição do bueiro funcionar com a entrada não-submersa. A energia específica será igual ao seu diâmetro (ou altura), o que exige avaliar a montante e a jusante, devido aos riscos de erosão ou de abrasão. O regime crítico acontecerá ao longo do bueiro, em pelo menos uma seção, exercendo dessa forma o controle da capacidade hidráulica da obra. Como premissa, tem-se que a declividade deverá ser igual, ou superior, à crítica, desde que as restrições a jusante não limitem tal capacidade.

A segunda hipótese ocorre quando o escoamento é subcrítico. Para seu dimensionamento é necessário utilizar as equações gerais de fluxo, ou seja, os quadros com a relação de  $d/D$ , apresentado no manual, cujo  $d$  é o tirante e  $D$  é o diâmetro, se tubular, ou  $B$  (largura do bueiro) e  $d$ , para bueiros celulares, para a determinação de  $K_Q$  e  $K_V$ , coeficientes de vazão e velocidade, respectivamente. A vazão pode ser obtida através da Eq. 5 e a velocidade pela Eq.6, em que  $Q$  é a vazão em  $m^3/s$ ,  $V$  é a velocidade, em  $m/s$ , a  $K_Q$  e  $K_V$  são coeficientes,  $D$  é o diâmetro, em  $m$ ,  $I$  é o gradiente hidráulico, em  $m/m$ ; e  $n$  é o coeficiente de rugosidade.

$$Q = K_Q \times D^{8/3} \times \frac{I^{1/2}}{n} \quad (5)$$

$$v = K_V \times D^{2/3} \times \frac{I^{1/2}}{n} \quad (6)$$

## 2.2 Método de Dimensionamento de Bueiro Segundo a Circular nº 5 do “Bureau of Public Roads”

A Circular nº 05 do *Bureau of Public Roads* foi originalmente publicada em 1965 e atualmente pode ser

consultada no *Hydraulic Design of Highway Culverts*, publicado pela *Federal Highway Administration* (FHWA). Tal circular surgiu após a realização de diversos ensaios experimentais, os quais compararam as relações da capacidade de vazão às alturas de água de montante e jusante. O dimensionamento se destina aos bueiros correntes ou tipos considerando dois grupos: com controle do fluxo de entrada ou de saída. No bueiro com controle do fluxo de saída, a energia do fluxo ao sair, a inclinação, rugosidade e comprimento do corpo do bueiro são características determinantes para a capacidade da estrutura. Contudo, estes parâmetros são irrelevantes ao bueiro com controle na entrada (ou próxima dela) sendo necessários os seguintes fatores: a altura d'água e a sua seção transversal. Então, calcula-se a altura d'água a montante, nos dois casos, e utiliza-se o maior valor. A metodologia americana de dimensionamento admite que qualquer vazão é capaz de passar pelo bueiro. A alteração de materiais, geometria, declividade, entre outras variáveis, implicará em mudança na altura da carga d'água a montante da estrutura, e conseqüente, o aumento da velocidade do fluxo.

### 2.2.1 Controle de Entrada

O controle de entrada pode ocorrer em duas situações: com a boca de entrada submersa ou não submersa. O projetista deve comparar os dois valores de  $H_w$  e considerar o maior. Para entrada não submersa existem duas equações. A primeira fornece a carga d'água quando o fluxo preenche o bueiro até a altura crítica, ajustada por fatores de correção (Eq. 7). É tida como mais precisa, e, portanto, preferível do ponto de vista teórico.

$$\frac{H_w}{D} = \frac{H_c}{D} + K \times \left( \frac{1,811 \times Q}{A \times D^2} \right)^M - 0,5S \quad (7)$$

Onde  $H_w$  é a carga d'água, em m,  $D$  é o diâmetro (em caso de tubular) ou a altura (em caso celular) do bueiro, em m,  $K$  e  $M$  são constantes adimensionais,  $A$  é a área da seção transversal do bueiro, em  $m^2$  e  $Q$  é a vazão de projeto, em  $m^3/s$  e  $S$  é a declividade. A energia específica,  $H_c$ , é definida pelas expressões Eq. 8 e pela Eq. 9, em que  $D$  é o diâmetro (em caso de tubular) ou a altura (em caso celular) do bueiro, em m. A profundidade crítica  $d_c$  é apresentada na Eq. 10, para bueiros tubulares. A segunda, Eq. 11, é uma equação exponencial, semelhante à equação de vertedouro, mais fácil de se aplicar em que  $H_w$  é a carga d'água, em m,  $D$  é o diâmetro (em caso de tubular) ou a altura (em caso celular) do bueiro, em m,  $K$  e  $M$  são constantes adimensionais, listadas no Quadro 1 e  $A$  é a área da seção transversal do bueiro, em  $m^2$  e  $Q$  é a vazão de projeto, em  $m^3/s$ . Para verificar se o dimensionamento está adequado aplica-se a Eq. 12.

$$H_c = d_c + \frac{V_c^2}{2g} \quad (8)$$

$$V_c = 2,56 \times \sqrt{D} \quad (9)$$

$$d_c = 0,596 \times \left( \frac{Q}{D^2} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (10)$$

$$\frac{H_w}{D} = K \times \left( \frac{1,811 \times Q}{A \times D^{0,5}} \right)^M \quad (11)$$

$$\frac{Q}{AD^2} < 1,93 \quad (12)$$

Quadro 1: Constantes para as equações da Circular nº5. Fonte: [4]

| Material e Tipo de Seção | Boca de Entrada             | K      | M    | c      | Y    |
|--------------------------|-----------------------------|--------|------|--------|------|
| Concreto Tubular         | Muro testa, borda quadrada  | 0,0098 | 2,00 | 0,0398 | 0,67 |
|                          | Muro testa, borda chanfrada | 0,0018 | 2,00 | 0,0292 | 0,74 |
|                          | Projetada, borda chanfrada  | 0,0045 | 2,00 | 0,0317 | 0,69 |

### 2.3. Análise Dimensional e semelhança

De acordo com [5] o princípio da homogeneidade dimensional (PHD) é utilizado para facilitar o desenvolvimento de equações e conversão de sistemas de unidades. Este princípio estabelece que uma equação é dita homogênea dimensionalmente quando os seus diferentes termos apresentam o mesmo grau de relação às grandezas fundamentais [6].

Segundo [7], é um método para reduzir o número e a complexidade das variáveis que afetam um fenômeno físico. Na mecânica dos fluidos, as quatro dimensões básicas a serem escolhidas são a massa  $M$ , o comprimento  $L$ , o tempo  $T$  e a temperatura  $\theta$ , ou, em suma, um sistema  $MLT\theta$ .

Esse método fornece, além das vantagens descritas anteriormente, as leis de transposição, que permitem converter dados de um modelo pequeno e barato em informação de um projeto de um protótipo grande e caro, além disso, permitem a análise em um curto espaço de tempo. Isto posto, é indicador da verificação de equações e modelagem física. Quando a lei de transposição é válida, há a relação de semelhança entre o modelo e o protótipo.

#### 2.3.1 Tipos de Semelhança

Para o estudo do modelo reduzido, é necessário obedecer a determinadas condições que assegurem uma semelhança com o protótipo. Para que o modelo seja válido, deve reproduzir as forças, momentos e cargas dinâmicas do protótipo. Isso requer que as relações sejam satisfeitas.

Conforme [6] o primeiro requisito é que haja semelhança geométrica, isto é, que o modelo tenha a mesma forma do protótipo e que exista uma relação de escala entre as dimensões lineares dos dois. O segundo requisito é que haja semelhança cinemática, sendo necessário que as velocidades em pontos correspondentes nos dois escoamentos tenham a mesma direção e sentido e que as magnitudes mantenham uma relação de escala. Portanto, para haver semelhança é necessário que o número de Froude do protótipo e modelo sejam iguais.

Nos processos de escoamentos livres, as condições cinemáticas do escoamento são muito importantes e as forças viscosas não são relevantes em relação as forças de gravidade, ou seja, modelos governados pela Lei de Semelhança de Froude (igualdade no número de Froude entre protótipo e modelo) seriam a melhor opção [8]. De acordo com [7] a semelhança dinâmica requer que número de Froude e de Reynolds sejam equivalentes (Eq. 13), em que  $V$  é a velocidade média, em m/s,  $l$  é o comprimento característico, em metro e  $\alpha$  é escala de comprimentos, adimensional.

$$\frac{v_m}{v_p} = \frac{V_m L_m}{V_p L_p} = \alpha \sqrt{\alpha} = \alpha^{\frac{3}{2}} \quad (13)$$

De acordo com [9], o atendimento da equação fica facilitado se for possível a utilização de fluidos de propriedades físicas ( $\mu$  e  $\rho$ ) diferentes. Contudo, por razões de segurança, economia e também praticidade, a água é o fluido mais indicado para uso desse tipo de pesquisa. Dessa forma, caso fossem adotados para o modelo e o protótipo o mesmo fluido, em condições iguais de temperatura e pressão, seria necessário um modelo na escala 1:1, tornando-o, na maioria das vezes, impraticável. Neste caso, a relaxação do critério de semelhança que consiste em se desconsiderar o efeito de algumas forças envolvidas no fenômeno pode ser a solução para o problema.

#### 2.3.2 Número de Froude

Para o modelo reduzido do experimento do artigo, o parâmetro adimensional independente será Froude. É determinado para o escoamento à superfície livre, como em rios, canais, vertedores e barragens, os quais trabalham com grandes volumes de água, em que a força mais importante é a gravidade. O número de Froude pode ser entendido como a comparação entre a velocidade de escoamento e a velocidade de propagação de uma onda no líquido. Quando elevado ao quadrado transforma-se num outro adimensional chamando fator cinético e representa a relação entre a força de inércia e a gravidade.

Portanto, para haver semelhança dinâmica é necessário que o número de Froude do protótipo seja igual ao número de Froude do modelo. A relação entre as velocidades é apresentada na Eq. 14, em que  $Fr_m$  e  $Fr_p$  são número de Froude, adimensionais,  $V_m$  e  $V_p$  são as velocidades do protótipo e do modelo, em m/s,  $g$  é aceleração da gravidade, em  $m^2/s$  e  $l_p$  e  $l_m$  são os comprimentos dos protótipos e modelo, em m. Eliminando  $g$ , e aplicando a razão de comprimento, obtendo-se assim a relação entre as vazões ( $\lambda_Q$ ), apresentado na Eq. 15.

$$Fr_m = Fr_p \quad (14)$$

$$\lambda_Q = \frac{Q_m}{Q_p} = \frac{\lambda_l^3}{\lambda_l^{1/2}} = \lambda_l^{5/2} \quad (15)$$

### 3. METODOLOGIA

O modelo físico em modelagem hidráulica é uma forma usada para investigar questões de projeto e de operação de engenharia hidráulica. Os modelos dependem de princípios de semelhança para reproduzir os efeitos de protótipos e dos processos.

O trabalho experimental consistiu na modelagem física, com a construção de modelos reduzidos de acordo com o projeto do bueiro, denominado protótipo, por ser o sistema de verdadeira grandeza.

Na construção dos modelos, utilizou-se materiais distintos do protótipo, os quais foram apropriadamente caracterizados com a finalidade de se conhecer suas propriedades e assim permitir a interpretação dos resultados dos ensaios experimentais e dos teóricos. Após construídos os modelos, estes foram submetidos aos ensaios hidráulicos, com a finalidade de se conhecer as vazões e o comportamento hidráulico. Os dados experimentais foram obtidos através de medições diretas e por medição com mini-molinete.

#### 3.1 Execução de Experimento em Laboratório

Para o desenvolvimento do experimento com o modelo reduzido neste estudo, utilizou-se canal aberto de declividade variável com caixa coletora, sistemas de bombas e reuso de água que permitiram a execução do experimento, no laboratório de hidráulica pertencente ao Instituto Militar de Engenharia (IME). O canal retangular confeccionado em aço e acrílico, de 7,90 m de comprimento, seção transversal de aproximadamente 0,25 m de largura e 0,35 m de altura, possui sistema que permite a variação do fundo do canal, possibilitando ensaios com declividades entre 0,3% e 4%. Na extremidade inferior há uma comporta, que permite o fechamento total da seção transversal.

Primeiramente, fez-se necessário determinar as vazões de projeto do bueiro em estudo em diferentes situações hidráulicas. Neste sentido foi realizado um método de pesquisa de modelagem física, através de modelos reduzidos de um bueiro tubular de concreto de um metro de diâmetro (BSTC  $\phi$  1,00 m). Justifica-se a escolha da referida estrutura por ser amplamente utilizada em drenagem de rodovias e ferrovias e devido às restrições do canal hidráulico do laboratório.

O protótipo dimensionado para os ensaios consiste em uma seção de plataforma de aterro com catorze (14) metros de largura, com bueiro implantado com esconsidade normal, de dezessete (17) metros de comprimento de tubo e bocas de entrada e saída semelhantes, conforme projeto tipo do DNIT, constante em [10], para esse modelo.

O experimento consistiu em realizar 5 anotações de vazões, em diferentes alturas de água a montante, com entrada não submersa, sendo que para a versão do Modelo Reduzido 1 (MR1) pelo método direto, ou seja, por medição de volume de água em um determinado tempo. Para o Modelo Reduzido 2 (MR2), utilizou-se a medição indireta da vazão realizada por mini molinete de hélice.

De acordo com [11] os molinetes são aparelhos constituídos de palhetas, hélices ou conchas móveis, as quais, impulsionadas pelo líquido, dão um número de rotações proporcional à velocidade da corrente. A contagem da rotação se dá por meio de um contador e a velocidade do fluxo é determinada pela equação do molinete, disponibilizada pelo fabricante do aparelho, calibrada para cada aparelho. Para fazer a contagem das medições, computou-se a quantidade de rotações durante um (1) minuto. Para cada medição de velocidade para a determinação de vazão foram realizadas 3 medidas, a 0,2h, 0,4h e 0,8h, em que h é a altura da lâmina d'água, em metros, e o referencial é o fundo do canal do escoamento.

O mini molinete utilizado é da marca Rott (código - 12409), utilizando a Hélice 1, conforme Eq. 16, em que V é a velocidade em m/s e N é o número de rotações, adimensional. As hipóteses adotadas para os ensaios nos modelos reduzidos 1 e 2 com relação ao escoamento do fluido no canal é que fosse permanente em relação à

variação no tempo e uniforme, em relação ao espaço. Também levou em consideração que o fluido é newtoniano isotrópico e que a temperatura da água é constante e igual a 15°C, por estar armazenada em um tanque subterrâneo.

$$v = (0,056 \times N) + 0,032 \quad (7)$$

Ainda, verificou-se a altura d'água a montante e a jusante. Essas aferições foram realizadas em diversas declividades, dentro dos limites mínimo e máximo adotados pelo DNIT, entre 0,4% e 5,0%, dentro dos limites permitidos pelo canal hidráulico existente no laboratório de hidráulica. Porém, o canal hidráulico disponível no laboratório tem declividade máxima de 4%, restringindo o espectro de declividades ensaiadas. As variáveis de interesse foram a altura da lâmina d'água e a vazão, para cada declividade do canal.

O Modelo Reduzido 1 foi ensaiado levando em consideração somente o controle a montante, já que a comporta não permitiu ensaios com controle a jusante, pois o experimento possuía pouca lâmina d'água e não vertia sobre a comporta para que fosse realizada a leitura. Os valores da lâmina d'água foram registrados como valores de  $H_w$ , ou seja, a carga d'água, referida ao fundo do canal. O Modelo Reduzido 2 foi ensaiado levando em consideração os controles de montante e de jusante, visto que suas vazões são maiores e permitia que a água desaguasse sobre a comporta, gerando velocidades e alturas de lâmina d'água suficientes para a coleta dos dados de velocidade e, conseqüentemente, da vazão. Os valores da lâmina d'água foram estipulados pelos valores de  $H_w$ , a carga d'água referida ao fundo do canal.

Os dados obtidos passaram por tratamento estatístico para a verificação de "outliers". Com as vazões obtidas nos modelos reduzidos foi possível determinar a vazão do protótipo através da análise dimensional e semelhança dinâmica do fluido. Com as vazões do projeto do tamanho real, foram aplicadas as metodologias de dimensionamento de bueiros constantes no Manual de Drenagem de Rodovias, do DNIT, e, por conseguinte, determinou-se os diâmetros do bueiro, realizando a comparação com o modelo do protótipo, um BSTC  $\phi 1,00$ .

### 3.2 Modelo Reduzido 1 (MR1) e Modelo Reduzido 2 (MR2)

O modelo MR1 foi confeccionado em uma proporção de 1/0,0321. Este valor foi adotado devido à largura do canal retangular disponível no laboratório de hidráulica, ao uso da teoria da contração incompleta do jato, para evitar a interferência das paredes laterais do canal hidráulico e ao tamanho comercial do tubo de acrílico, de 1 1/2" (diâmetro externo de 40 mm).

Para a confecção do modelo reduzido, como mostrado na Fig. 1, foi utilizado tubo de 52,0 cm de comprimento de acrílico novo, aterro confeccionado em brita número zero, bocas de plástico impressas em impressoras 3D, com 25,2 cm de largura. O modelo reduzido ao todo possui 54 cm de comprimento e fica alocado no meio do canal hidráulico.

Devido aos problemas ocorridos no Modelo Reduzido 1 pelo fator de escala ser demasiado pequeno e sofrer influência da tensão superficial, tomou-se a decisão de confeccionar o Modelo Reduzido 2, em escala maior, para fins de comparação entre modelos para buscar dados mais satisfatórios para a comparação.

De acordo com [12], para que os efeitos de viscosidade sejam desprezáveis, é necessário que o número de Reynolds seja superior a 10.000 e, para que o escoamento adquira a conformação final, é necessário que o comprimento do duto seja maior que 10 vezes o seu diâmetro, aproximadamente. Dessa forma, o Modelo Reduzido 2 foi confeccionado na escala 1:10 e não levou em consideração a teoria do jato incompleto, já que era inviável a seção transversal do canal, o mesmo que foi utilizado no MR1.

Para a confecção do segundo modelo reduzido (MR2) foi utilizado tubo de 1,40 m de comprimento de PVC novo, que possui rugosidade, segundo [11] de 0,010, bocas confeccionadas em acrílico novo colado, com 25,2 cm de largura, como pode ser visto na Fig.2. Neste modelo não foi possível inserir o aterro em brita, pois não havia espaço na parte superior. O material do tubo, PVC, foi escolhido pela disponibilidade do material. O modelo reduzido foi posicionado no meio do canal hidráulico para evitar possíveis instabilidades no fluxo de água. As peças foram fixadas na estrutura do canal existente com silicone para que a estrutura ficasse estanque durante o processo.

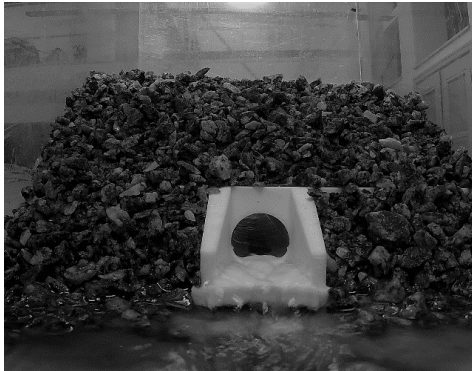


Fig. 1. escoamento a jusante.



Fig. 2. Detalhe do modelo reduzido 2.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Determinação do Coeficiente de Rugosidade para bueiros não submersos

A determinação do coeficiente de rugosidade ( $n$ ) foi realizada com os dados de escoamento não submersos dos MR1 e MR2. Neste caso, como o tubo é de acrílico, esperava-se que o resultado fosse próximo a 0,010, coeficiente de rugosidade do tubo de acrílico descrito em [4]. O coeficiente de rugosidade obtido foi equivalente, levando em consideração que o escoamento ocorreu no canal e no tubo, resultando no valor de 0,022.

Já para o MR2, o tubo de PVC, segundo [11], o valor do coeficiente de rugosidade do tubo deveria ser 0,010. Porém, através dos cálculos se obteve o valor médio de 0,035, também considerado um valor equivalente. Para o concreto, o material da confecção do protótipo, o coeficiente de rugosidade de 0,015, de acordo com [13]. Os resultados de MR1 e MR2, mostram que os modelos reduzidos não possuem a mesma rugosidade.

Nos dois casos, os valores sofreram variações referentes ao limite do canal, ou seja, os materiais do canal, como o acrílico antigo e as juntas com massa epóxica, que interferiram no resultado. A hipótese de haver semelhança geométrica perfeita é descartada, já que as rugosidades são diferentes. Porém, é possível se adotar a semelhança geométrica relaxada e os erros considerados desprezíveis.

### 4.2 Dados obtidos dos Modelos Reduzidos

Após as medições de realizadas e a realização do estudo estatístico, chegou-se aos dados apresentados nos Quadro 2 e Quadro 3. Aplicando a análise dimensional aos valores obtidos pela semelhança de Froude encontrou-se os seguintes resultados, apresentados também nos Quadro 2 e Quadro 3. Os resultados foram colocados em l/s por serem pequenos.

Na verificação do número de Froude, nota-se para MR1 que apenas um resultado é acima de 1, supercrítico, e os demais estão abaixo de 1, significando que o escoamento nesse modelo reduzido é predominantemente subcrítico. No MR2 é possível observar que há 4 resultados acima de 1 e o restante, trabalha em regime subcrítico. No plano de ensaio supôs-se que a variação das declividades abrangeria os escoamentos subcríticos e críticos em tubos parcialmente cheios, porém, a incidência de resultados de escoamentos supercríticos foi baixa nos MR1 e MR2, representando, respectivamente, 10% e 21%.

### 4.3 Dimensionamento pela Teoria do Fluxo Crítico

No escoamento não submerso, o parâmetro adimensional que garante a semelhança dinâmica é o Número de Froude. Para MR1 a relação de comprimento é de 0,0321, a relação de velocidade é de 0,17916, a relação de tempo é de 0,17916 e a relação de vazão é de 0,00018. Já para MR2 a relação de comprimento é de 0,10, a relação de velocidade é de 0,3162, a relação de tempo é de 0,3162 e a relação de vazão é de 0,0032, sendo  $Q_m$  a vazão do modelo e  $Q_p$  é a vazão do protótipo.

#### 4.4 Dimensionamento pela Teoria do Fluxo Crítico

Os dados apresentados para a execução dos cálculos deste método, mostrados nos Quadro 2 e Quadro 3 são a declividade do experimento, a vazão real que é obtida ao multiplicar a vazão do protótipo pela relação da vazão. O coeficiente de rugosidade adotado para ambos os casos é de 0,015 e a velocidade limite é de 4,50 m/s.  $Q_p$  é a vazão de protótipo,  $H_w/D$  é a capacidade hidráulica,  $Q/A(D^{0.5})$  é a performance adimensional e  $V$  é velocidade do escoamento na seção transversal. As dimensões dos bueiros de concreto são comerciais. Para MR1, dos dez pontos levantados, apenas dois resultados chegaram a mesma dimensão do protótipo, BSTC  $\phi$  1,00, que corresponde a 20% do total de pontos. No caso de MR2, dos dezenove pontos levantados, nenhum deles chegou ao resultado da mesma dimensão do protótipo, BSTC  $\phi$  1,00.

#### 4.5 Dimensionamento pelo Método da Circular nº5

Para o cálculo de dimensionamento utilizou-se a formulação apresentada no subitem 2.2. Foi adotada a rugosidade do concreto de 0,013, inerente ao método para tubos de concreto e a velocidade limite é de 4,50 m/s.  $Q_p$  é a vazão de protótipo,  $H_w/D$  é a capacidade hidráulica,  $Q/A(D^{0.5})$  é a performance adimensional e  $V$  é velocidade do escoamento na seção transversal. As dimensões dos bueiros de concreto são comerciais. Para o MR1, no Quadro 2 traz os resultados dos cálculos do dimensionamento do bueiro. As 10 amostras calculadas mostraram que 20% dos bueiros são de BSTC de diâmetro de 0,80 m, 50% de BSTC de diâmetro de 1,00 m e 30% correspondem aos BSTC de diâmetro de 1,20 m. A Quadro 3 apresenta o resultado para MR2. As 19 amostras calculadas mostraram que 47% dos bueiros são de BSTC de diâmetro de 0,80 m e 53% BSTC de diâmetro de 1,00 m.

#### 4.6 Apresentação dos dados

Quadro 2: Dados obtidos no experimento de MR1.

| Decliv. (m/m) | Altura d'água (m) | Vazão $Q_m$ (l/s) | n      | Froude | Vazão $Q_p$ (m <sup>3</sup> /s) | Teoria da Fluxo Crítico |            |                  | Circular nº 5 |            |                  |
|---------------|-------------------|-------------------|--------|--------|---------------------------------|-------------------------|------------|------------------|---------------|------------|------------------|
|               |                   |                   |        |        |                                 | $H_w/D$                 | Vel. (m/s) | Tipo de bueiro   | $H_w/D$       | Vel. (m/s) | Tipo de bueiro   |
| 0,0035        | 0,016             | 0,0932            | 0,0106 | 0,636  | 0,50                            | 0,6412                  | 0,541      | BSTC $\phi$ 0,80 | 0,75649       | 2,56       | BSTC $\phi$ 1,00 |
|               | 0,031             | 0,2031            | 0,0101 | 0,285  | 1,10                            | 0,7358                  | 0,557      | BSTC $\phi$ 1,00 | 0,84270       | 2,80       | BSTC $\phi$ 1,20 |
| 0,0106        | 0,016             | 0,1055            | 0,0162 | 0,720  | 0,57                            | 0,4910                  | 0,277      | BSTC $\phi$ 0,80 | 0,78380       | 2,56       | BSTC $\phi$ 1,00 |
| 0,0194        | 0,018             | 0,0839            | 0,0334 | 0,459  | 0,45                            | 0,5660                  | 0,233      | BSTC $\phi$ 0,60 | 0,72432       | 2,56       | BSTC $\phi$ 1,00 |
|               | 0,026             | 0,1976            | 0,0229 | 0,525  | 1,07                            | 0,5993                  | 0,235      | BSTC $\phi$ 0,80 | 0,98811       | 2,56       | BSTC $\phi$ 1,00 |
| 0,0300        | 0,006             | 0,0265            | 0,0179 | 1,135  | 0,14                            | 0,4000                  | 0,201      | BSTC $\phi$ 0,60 | 0,60791       | 2,29       | BSTC $\phi$ 0,80 |
|               | 0,016             | 0,1174            | 0,0246 | 0,801  | 0,64                            | 0,6107                  | 0,249      | BSTC $\phi$ 0,60 | 0,80275       | 2,56       | BSTC $\phi$ 1,00 |
|               | 0,027             | 0,2640            | 0,0219 | 0,642  | 1,43                            | 0,6287                  | 0,249      | BSTC $\phi$ 0,80 | 0,91678       | 2,80       | BSTC $\phi$ 1,20 |
| 0,0406        | 0,013             | 0,0610            | 0,0385 | 0,614  | 0,33                            | 0,3810                  | 0,252      | BSTC $\phi$ 0,60 | 0,77132       | 2,29       | BSTC $\phi$ 0,80 |
|               | 0,025             | 0,2428            | 0,0259 | 0,702  | 1,32                            | 0,3850                  | 0,275      | BSTC $\phi$ 1,00 | 0,88167       | 2,80       | BSTC $\phi$ 1,20 |



Quadro 3: Dados obtidos no experimento de MR2.

| Decliv. (m/m) | Altura d'água (m) | Vazão $Q_m$ (l/s) | n     | Froude | Vazão $Q_p$ (m <sup>3</sup> /s) | Teoria da Fluxo Crítico |            |                  | Circular nº 5     |            |                  |
|---------------|-------------------|-------------------|-------|--------|---------------------------------|-------------------------|------------|------------------|-------------------|------------|------------------|
|               |                   |                   |       |        |                                 | H <sub>w</sub> /D       | Vel. (m/s) | Tipo de bueiro   | H <sub>w</sub> /D | Vel. (m/s) | Tipo de bueiro   |
| 0,0035        | 1,182             | 0,035             | 0,035 | 0,0767 | 0,3739                          | 0,5289                  | 1,39       | BSTC $\phi$ 0,60 | 0,69142           | 2,27       | BSTC $\phi$ 1,00 |
|               | 0,392             | 0,015             | 0,015 | 0,5818 | 0,1240                          | 0,4352                  | 1,05       | BSTC $\phi$ 0,60 | 0,60131           | 1,81       | BSTC $\phi$ 0,80 |
|               | 0,698             | 0,011             | 0,011 | 0,7646 | 0,2207                          | 0,6155                  | 1,21       | BSTC $\phi$ 0,60 | 0,69926           | 1,81       | BSTC $\phi$ 0,80 |
|               | 1,101             | 0,014             | 0,014 | 0,6027 | 0,3481                          | 0,5068                  | 1,36       | BSTC $\phi$ 0,60 | 0,67942           | 2,27       | BSTC $\phi$ 1,00 |
| 0,0106        | 0,377             | 0,025             | 0,025 | 0,5884 | 0,1192                          | 0,3169                  | 1,55       | BSTC $\phi$ 0,60 | 0,59034           | 1,81       | BSTC $\phi$ 0,80 |
|               | 0,634             | 0,033             | 0,033 | 0,4399 | 0,2004                          | 0,4186                  | 1,79       | BSTC $\phi$ 0,60 | 0,68048           | 1,81       | BSTC $\phi$ 0,80 |
|               | 1,133             | 0,030             | 0,030 | 0,4649 | 0,3583                          | 0,5900                  | 2,06       | BSTC $\phi$ 0,60 | 0,68491           | 2,27       | BSTC $\phi$ 1,00 |
| 0,0194        | 1,076             | 0,093             | 0,093 | 0,0997 | 0,3403                          | 0,4757                  | 2,57       | BSTC $\phi$ 0,60 | 0,78967           | 1,81       | BSTC $\phi$ 0,80 |
|               | 1,689             | 0,028             | 0,028 | 0,6928 | 0,5340                          | 0,6286                  | 2,85       | BSTC $\phi$ 0,60 | 0,77185           | 2,27       | BSTC $\phi$ 1,00 |
|               | 1,062             | 0,027             | 0,027 | 0,7369 | 0,3357                          | 0,4721                  | 2,56       | BSTC $\phi$ 0,60 | 0,79581           | 1,81       | BSTC $\phi$ 0,80 |
|               | 0,657             | 0,019             | 0,019 | 1,0268 | 0,2079                          | 0,4000                  | 1,98       | BSTC $\phi$ 0,60 | 0,68752           | 1,81       | BSTC $\phi$ 0,80 |
| 0,0300        | 1,538             | 0,078             | 0,078 | 0,0944 | 0,4865                          | 0,5164                  | 3,30       | BSTC $\phi$ 0,60 | 0,73451           | 2,27       | BSTC $\phi$ 1,00 |
|               | 1,442             | 0,086             | 0,086 | 0,1238 | 0,4561                          | 0,4971                  | 3,25       | BSTC $\phi$ 0,60 | 0,73479           | 2,27       | BSTC $\phi$ 1,00 |
|               | 1,823             | 0,033             | 0,033 | 0,7203 | 0,5766                          | 0,5732                  | 3,44       | BSTC $\phi$ 0,60 | 0,79133           | 2,27       | BSTC $\phi$ 1,00 |
|               | 1,106             | 0,032             | 0,032 | 0,7677 | 0,3498                          | 0,4272                  | 3,04       | BSTC $\phi$ 0,60 | 0,68031           | 2,27       | BSTC $\phi$ 1,00 |
|               | 0,694             | 0,023             | 0,023 | 1,0844 | 0,2196                          | 0,3323                  | 2,67       | BSTC $\phi$ 0,60 | 0,69827           | 1,81       | BSTC $\phi$ 0,80 |
| 0,0406        | 1,900             | 0,033             | 0,033 | 0,8426 | 0,6007                          | 0,5354                  | 3,90       | BSTC $\phi$ 0,60 | 0,78191           | 2,27       | BSTC $\phi$ 1,00 |
|               | 1,456             | 0,028             | 0,028 | 1,0105 | 0,4604                          | 0,5333                  | 2,29       | BSTC $\phi$ 0,80 | 0,73689           | 2,27       | BSTC $\phi$ 1,00 |
|               | 0,882             | 0,021             | 0,021 | 1,3769 | 0,2788                          | 0,4000                  | 1,98       | BSTC $\phi$ 0,60 | 0,74977           | 1,81       | BSTC $\phi$ 0,80 |

## 5. CONCLUSÕES

Com os resultados de vazões obtidos na correlação do modelo reduzido e do protótipo através do parâmetro adimensional do número de Froude foram calculadas as dimensões dos bueiros. Para a metodologia da Teoria da Vazão Crítica, nos MR1 e MR2, houve uma quantidade significativa de BSTC de diâmetro de 0,60 m e para a o Método da Circular nº 5 a maior parte das amostras são de BSTC de diâmetro de 1,00 m. Portanto, a metodologia da Circular nº 5, para bueiros não submersos, trouxe mais resultados de dimensionamento coincidentes com o protótipo.

Os cálculos de dimensionamento de bueiros buscam a prática tecnológica, ou seja, busca obter resultado adequado aplicado à obra, levando em consideração um fator de segurança e desprezando-se pequenos valores para facilitar o cálculo, para que possa ser utilizado pelo maior número de pessoas. O método do FHWA, ao gerar os ábacos, incluiu um público mais técnico e com poucos recursos em campo.

A necessidade de um contínuo aperfeiçoamento dos métodos de dimensionamento dos bueiros é indiscutível. As soluções atualmente propostas no manual do DNIT são apenas um passo nesta direção. Somente com um trabalho sistemático de verificação de obras existentes, de confronto com as suas dimensões com as resultantes da utilização destes métodos, Vazão Crítica e Circular nº 5, de registro sistemático do desempenho das estruturas, sua ruína parcial ou total e suas causas, seja possível estabelecer critérios de projeto mais satisfatórios cujo resultado econômico será considerável.

Na formulação de canal na Teoria da Vazão Crítica, é possível considerar outros tipos de materiais, atendendo a gama de tipos de bueiros existentes no Brasil, como pedra de cantaria, tijolos de alvenaria, PEAD, inclusive para a verificação do dimensionamento hidráulico dos bueiros existentes. O Método da Circular nº5 já prefixa os valores da rugosidade do material em suas formulações. Somente a possibilidade de alterar esse dado na utilização do software criado pela FHWA para o dimensionamento de bueiros, chamado HY-8.

## 6. AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Militar de Engenharia, a CAPES, aos orientadores Professor Marcelo Reis e Professor Francisco Diogo, aos técnicos do Laboratório de Hidráulica e ao Professor Luiz Paulo Gomes Ribeiro.

## 7. REFERÊNCIAS

1. Brasil, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Manual para Atividades Ambientais Rodoviárias*. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, 2006.
2. D.M. Pereira *et al.* *Dispositivos De Drenagem Para Obras Rodoviárias*. Curitiba, 2008. Disponível em: <http://www.Dtt.Ufpr.Br/Transportesa/Arquivos/Apostiladrenagem-2008.Pdf>. Acesso em 03 de março de 2017.
3. Brasil, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Manual de Drenagem de Rodovias*. 2ª Ed. Instituto De Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, 2006.
4. FHWA, Federal Highway Administration. *Hydraulic Design of Highway Culverts*. Fort Collins, 2012.
5. F. L. Carneiro. *Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos*. 2a Edição, Editora UFRJ, Rio de Janeiro, 1996.
6. J. A. Cirilo; M. L. P. Coelho; M. B. B. Baptista. *Hidráulica Aplicada*. Ed. ABRH, Porto Alegre, 2001.
7. F. M. White. *Mecânica dos Fluidos*. 4a edição Mc Graw-Hill Interamericana do Brasil Ltda, Rio de Janeiro, 2002.
8. L. S. Carvalho. *Análise do comportamento hidráulico da caixa de transição de sistema extravasor em encosta por meio de modelo hidráulico reduzido*. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
9. J. G. de A. Lima. *Investigações experimentais da Eficiência Hidráulica em Bocas de Lobo em Greide Contínuo*. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
10. Brasil, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Álbum De Projetos-Tipo de Dispositivos de Drenagem*. 5ª Ed, Instituto De Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, 2018.
11. J. M. de Azevedo Netto *et al.* *Manual de Hidráulica*. 8a ed. Blücher, São Paulo, 1998.
12. W. H. Kanashiro *et al.* *Técnicas de laboratório para estudos em modelo reduzido*. XIX Seminário Nacional De Grandes Barragens, p. 1–20, 2013.
13. R. de M. Porto. *Hidráulica Básica*. 4a ed. EESC-USP, São Carlos, 2006.