



IX-028 – A INFLUÊNCIA DO RESSALTO HIDRÁULICO NO ENGOLIMENTO DAS BOCAS DE LOBO COM DEPRESSÃO EM PONTOS BAIXOS DE VIAS: PESQUISA EXPERIMENTAL

Maria da Glória Braz⁽¹⁾

Engenheira Civil pela Escola de Engenharia Kennedy. Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Doutora em Engenharia Metalúrgica e de Minas pela Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Professora da Faculdade de Engenharia e Arquitetura (FEA) da Universidade FUMEC e Coordenadora e Professora da Faculdade Novos Horizontes. e-mail: gloriabraz@fumec.br

Marcos Rocha Vianna⁽²⁾

Engenheiro Civil pela Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Mestre em Hidráulica pela Escola de Engenharia de São Carlos. Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Professor da Faculdade de Engenharia e Arquitetura (FEA) da Universidade FUMEC. e-mail: mrvianna@fumec.br

Endereço⁽¹⁾: Rua Cobre, 200 - Cruzeiro - Belo Horizonte - MG - CEP: 30.310-190- Brasil - Tel: (31) 3228-3000- Cel: (31) 8838-9493

RESUMO

O projeto de um sistema de drenagem deve ser elaborado para que o escoamento das águas pluviais seja captado e esgotado convenientemente pelos órgãos acessórios_ sarjetas, bocas de lobo, rede de galerias_ convenientemente localizados nos arruamentos.

No caso das bocas de lobo e sua localização, é importante ressaltar que a depressão executada, a princípio para auxiliar no engolimento, pode levar a um comportamento genuíno, caso ocorra alta declividade na via.

Hidraulicamente, não existem, ainda, discussões de que a depressão nas bocas de lobo, associadas ao escoamento e ressalto em pontos de interseção provoquem desvios no caminho preferencial das águas, não previstos nos projetos.

Este trabalho se baseou em estudos de campo e laboratório, que detectaram comportamento hidráulico genuíno no desempenho de boca de lobo, comprovado através de detecção de imagens de um sistema de drenagem de um arruamento em Belo Horizonte. Com base nesta observação, vem-se efetuando estudos experimentais de laboratório, no intuito de analisar com mais profundidade, o comportamento hidráulico, ora referido.

PALAVRAS-CHAVE: Ressalto Hidráulico, Bocas de Lobo, Depressão, Engolimento.

INTRODUÇÃO

O elemento captador essencial à eficácia de um sistema de drenagem urbano é a boca de lobo, e a sua eficiência se relaciona com a capacidade de engolimento, função da altura da lâmina d'água no trecho da sarjeta, imediatamente à montante, tipo, dimensões e ponto de localização.

Não existem, ainda, discussões sobre o aproveitamento da interseção de greides de vias e o aumento da capacidade de absorção das bocas de lobo, devido ao ressalto hidráulico provocado por essa interseção, muito menos a localização das bocas de lobo nessa região, bem como a respectiva acomodação do fluxo sobre a grelha, no intuito de promover melhor engolimento.

Este trabalho efetuou estudos experimentais em laboratório, através de protótipos que simulassem as condições hidráulicas e topográficas dos arruamentos urbanos, no intuito de prever o melhor desempenho das bocas de lobo nos sistemas de drenagem, verificando o posicionamento da boca de lobo dentro da faixa de ressalto para se obter o máximo engolimento deste dispositivo de drenagem.

O objetivo do presente estudo foi analisar o comportamento hidráulico de bocas de lobo em pontos baixos de vias, sob diferentes condições de escoamento e declividade de greides de vias, segundo os parâmetros estabelecidos pela Prefeitura Municipal de Belo Horizonte - SUDECAP (2008).

O RESSALTO HIDRÁULICO

O ressalto hidráulico é caracterizado pela elevação brusca no nível d'água, a uma curta distância, com grande turbulência e consequente perda de energia e ocorre nas mudanças de regime de escoamento em regime supercrítico para o subcrítico.

Segundo CHOW (1959), o ressalto hidráulico pode ser classificado em função do número de Froude, razão entre forças inerciais e de campo gravitacional, denominado como F_1 . Assim, conforme figura 1, têm-se os seguintes tipos de ressalto e intervalos respectivos de número de Froude (Fr).

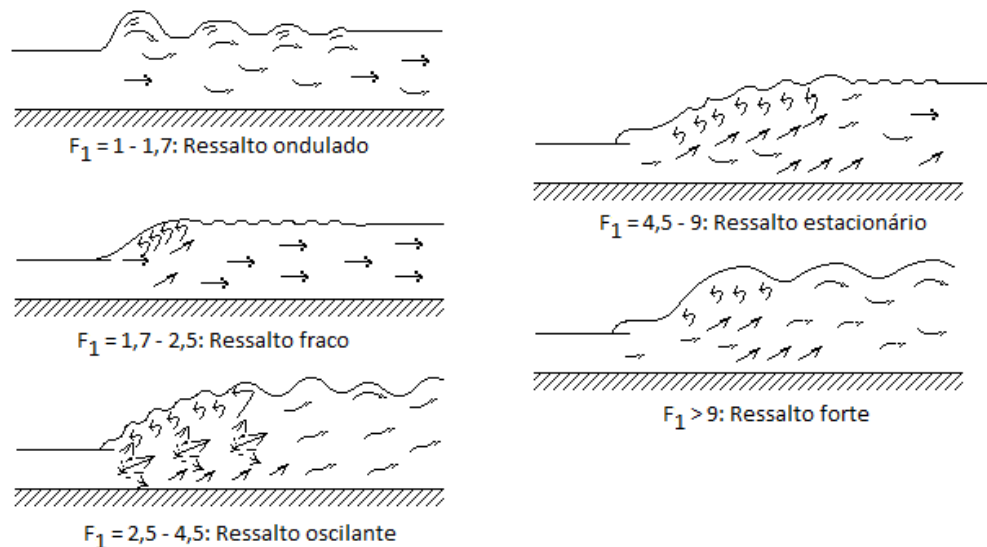


Figura 1 - Tipos de ressalto hidráulico e respectivos intervalos quanto ao número de Froude.

Fonte: Chow, 1959

O ressalto é definido pelas alturas conjugadas y_1 (altura da lâmina d'água na região torrencial) e y_2 (altura da lâmina d'água na região fluvial), e o comprimento do ressalto, denominado L_r .

Em canais prismáticos, não retangulares, não existem expressões diretas para o cálculo do ressalto, tendo-se que aplicar e ajustar a equação da conservação da quantidade de movimento, conforme a seguir:

$$\vec{R} = \vec{F}_1 - \vec{F}_2 = \rho Q (\vec{U}_2 - \vec{U}_1) \quad \text{equação (1)}$$

Tendo-se:

\vec{R} como a resultante das forças atuantes no sistema;

\vec{F}_1 e \vec{F}_2 como as forças hidrostáticas atuantes nas seções 1 e 2;

\vec{U}_1 e \vec{U}_2 como as velocidades nas respectivas seções.

$$\frac{\rho Q}{g} (U_2 - U_1) = \gamma A_1 h_{01} - \gamma A_2 h_{02} \quad \text{equação (2)}$$

Sendo h_0 , a extensão da superfície até o centro de gravidade da seção molhada e A , as áreas molhadas nas referentes seções. Aplicando-se a equação da continuidade, chega-se à seguinte expressão:

$$\frac{Q^2}{gA_1} + A_1 h_{01} = \frac{Q^2}{gA_2} + A_2 h_{02} \quad \text{equação (3)}$$

Em canais com greides cujas declividades são sequenciais e diferentes, o peso do volume de controle relativo ao ressalto hidráulico atua na estimativa das profundidades conjugadas e comprimento do ressalto, uma vez que o gradiente da declividade é diretamente proporcional à velocidade do escoamento.

Com base no exposto, o tratamento matemático para canais prismáticos não retangulares é bastante complexo, sendo indicado por CHOW (1959) estudos teóricos e experimentais sobre o assunto, utilizando-se gráficos que facilitam o tratamento da questão.

SARJETAS

No dimensionamento das sarjetas, adota-se uma margem de segurança na sua capacidade de condução, pois podem acontecer problemas de ordem operacional, levando à diminuição da sua capacidade de escoamento ou acarretando danos materiais ou humanos através de excessivas velocidades.

Para as seções usuais de sarjetas em projetos urbanos, a Prefeitura Municipal de Belo Horizonte por meio da Superintendência de Desenvolvimento da Capital - SUDECAP (2004) recomenda as seções tipos A, B e C para as declividades $I > 16\%$, $16\% \geq I \geq 0,50\%$ e $I < 0,50\%$, respectivamente. Analisando as declividades dos tipos de sarjetas apresentados, verifica-se que a sarjeta tipo B é a que possui maior probabilidade de ocorrência nos arruamentos, pois apresenta faixa de declividade coerente com a topografia de loteamentos corriqueiros. A Figura 2 apresenta a seção da sarjeta tipo B.

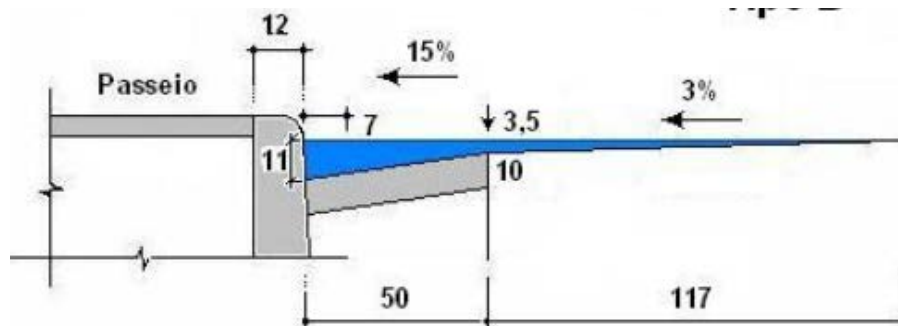


Figura 2 - Sarjeta Tipo B - Padrão SUDECAP

Fonte: SUDECAP, 2004

BOCAS DE LOBO

As bocas de lobo são estruturas hidráulicas destinadas a interceptar as águas escoadas pela sarjeta e encaminhá-las às galerias pluviais. Dependendo da estrutura, localização ou funcionamento, as bocas de lobo podem ser agrupadas em:

- Quanto à estrutura: simples, combinada ou múltipla;
- Quanto à localização ao longo das sarjetas: intermediárias; de cruzamento ou de ponto baixo. As intermediárias são aquelas que se localizam ao longo das sarjetas, em pontos onde a capacidade de escoamento atinge o limite máximo admissível; as de cruzamento localizam-se a montante das seções das sarjetas, nas esquinas dos quarteirões e as bocas de lobo de pontos baixos que se encontram situadas nos pontos de inversão côncava da declividade de rua;

- Quanto ao funcionamento: livre ou afogada, sendo que se denomina livre, a que funciona como vertedouro e afogada, a que funciona como orifício, dependendo dessas condições hidráulicas, exclusivamente, da altura de água na sarjeta e da abertura da boca de lobo.

Encontram-se, no meio técnico, as seguintes indicações para a escolha do tipo da boca de lobo:

- Boca de lobo simples: em pontos intermediários de sarjetas com pequena declividade longitudinal ($I < 5\%$); na possibilidade de existir materiais obstrutivos nas sarjetas; em vias de tráfego intenso e a montante dos cruzamentos;
- Boca coletora com grelha: em sarjetas com limitação de depressão; na inexistência de materiais obstrutivos e em pontos intermediários das sarjetas localizadas em vias com declividade longitudinal ($I > 10\%$).
- Combinada: em pontos baixos de vias; em pontos intermediários da sarjeta com declividade média entre 5 e 10%; na existência de materiais obstrutivos;
- Múltipla: em pontos baixos das vias e na presença de sarjetas com grandes vazões.

É de extrema importância observar que é exigência da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte (2004) que a localização das bocas de lobo nos cruzamentos das vias tenha que ser imediatamente à montante dos pontos de tangência ou de curvatura dos passeios, tendo como objetivo de preservar os rebaixos para passagem de pedestres, de acordo com a figura 3.

Além disso, se estiverem implantadas nos vértices das vias, os fluxos convergentes pelas diferentes sarjetas se chocariam na entrada da boca de lobo, promovendo fluxo contrário à afluência e com aumento da altura de lâmina d'água, fenômeno denominado remanso. Por isso, recomenda-se que a instalação de bocas de lobo seja feita em pontos pouco a montante de cada faixa de cruzamento usada pelos pedestres.

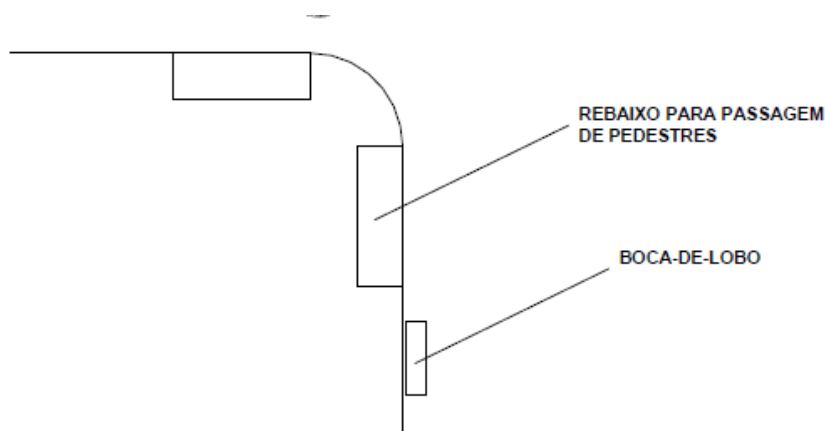


Figura 3 – Localização das bocas de lobo nos cruzamentos de vias
Fonte: Prefeitura Municipal de Belo Horizonte (2004)

Ressalta-se, ainda, que a Prefeitura Municipal de Belo Horizonte, por meio de padronização especificada no Caderno de Encargos de Infraestrutura Urbana (2004) solicita que todas as bocas de lobo sejam implantadas com depressão no pavimento adjacente, exceto onde a sarjeta adotada seja do tipo C. Isto se deve a pesquisas e estudos já consagrados, visando o aumento da capacidade de engolimento das bocas de lobo que indicam a adoção da chamada *depressão*, que nada mais é do que um rebaixamento executado na sarjeta junto à entrada da boca coletora, com a finalidade de majorar a capacidade de engolimento desse dispositivo e cuja inclinação ou deflexão possui ângulo aproximado de $9,46^\circ$. A Figura 4 apresenta o padrão das características hidráulicas do escoamento em uma boca de lobo simples com depressão e abertura na guia.

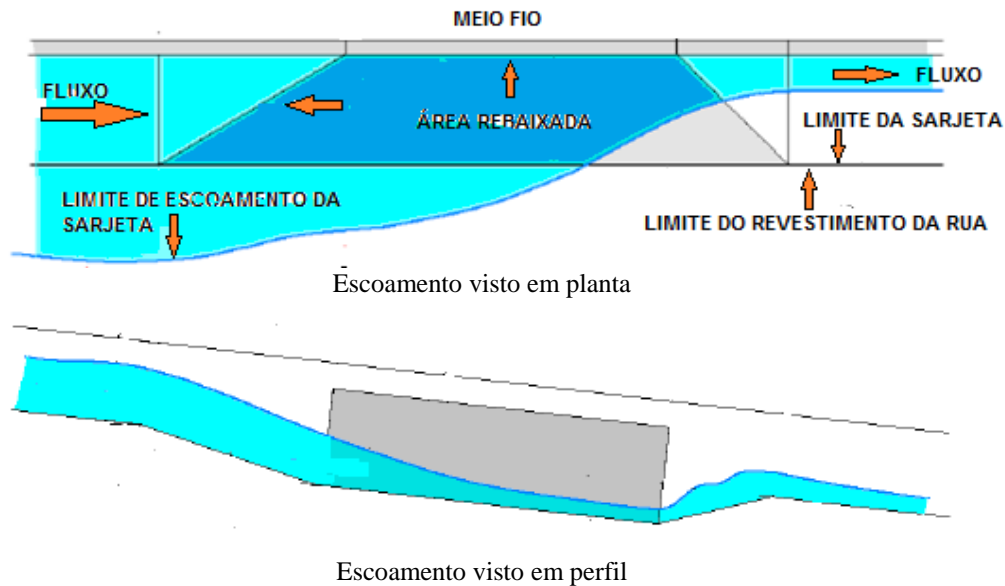


Figura 4 – Características hidráulicas do escoamento em uma boca de lobo simples com depressão e abertura na guia.

Fonte: BRAZ et al (2015)

Mesmo sendo elemento de grande importância na dinâmica do processo captação-escoamento nos sistemas de drenagem urbana, as pesquisas, até então, não possuem demasiada abrangência sobre todas as condições de projeto que envolvem as bocas de lobo.

SOUZA (1986) cita que estudos datados de 50 anos atrás ainda são referências no dimensionamento dessas estruturas de drenagem. Em todos os estudos, verificou-se que a boca de lobo com depressão apresentou maior eficiência hidráulica.

Pesquisas de DALFRÉ E GENOVEZ (2004) avaliaram em laboratório, um modelo de boca de lobo simples, sem depressão e com uma abertura adicional na guia. Os resultados mostraram que houve grande acréscimo na eficiência hidráulica desse tipo de boca de lobo, tendo sido encontrados coeficientes de descarga superiores em até duas vezes aos coeficientes referidos em outras pesquisas elaboradas com bocas de lobo simples e sem abertura adicional na guia.

Baseados em modelo reduzido na escala 1:3, os estudos de CARDOSO *et al.* (2004) avaliaram os coeficientes de captação de uma boca de lobo com defletores instalados em frente à abertura na guia e no sentido perpendicular ao fluxo da sarjeta. Essa pesquisa mostrou que o coeficiente de descarga, nesse caso, é superior a duas vezes o coeficiente encontrado em outras pesquisas elaboradas com bocas de lobo sem defletores na sarjeta, em frente à abertura na guia.

LIMA (2007) e LIMA & COELHO (2007) elaboraram estudo detalhado das bocas de lobo situadas em sarjetas de greide contínuo, com base em modelo reduzido em escala 1:3 e admitiram a necessidade de se estudar as diferentes configurações das lâminas d'água, quando da mudança da declividade do greide da rua.

Em nenhum estudo, até agora desenvolvido, pesquisou-se o emprego das alturas conjugadas de ressalto na verificação do melhor posicionamento da boca de lobo na via e o comportamento da lâmina d'água sobre a grelha com depressão, quando da ocorrência de altas declividades.

METODOLOGIA DOS ESTUDOS

A escala básica para o modelo hidráulico é a escala geométrica, que depende da característica a ser estudada e do espaço físico disponível para a implantação do modelo. Posteriormente à adoção do valor da escala

geométrica, deve-se utilizar a semelhança dinâmica na determinação das outras escalas necessárias à condição de semelhança ao protótipo. Dado que a força dominante, nesse caso específico, é a força gravitacional, o escoamento deverá ser modelado com base na semelhança de Froude, sendo, portanto, as escalas necessárias à condição de semelhança:

- Escala geométrica: $\lambda = \frac{y_{0m}}{y_{0p}}$; equação (4)

- Escala de velocidades: $\lambda_V = \frac{V_m}{V_p} = \lambda^{\frac{1}{2}}$; equação (5)

- Escala de vazões: $\lambda_Q = \frac{Q_m}{Q_p} = \lambda^{\frac{5}{2}}$; equação (6)

- Escala dos tempos: $\lambda_t = \frac{t_m}{t_p} = \lambda^{\frac{1}{2}}$. equação (7)

Com base nas equações acima, pode-se escrever que:

$$\sqrt{\frac{y_{0m}}{y_{0p}}} = \frac{V_m}{V_p} = \lambda^{\frac{1}{2}}; \quad \text{equação (8)}$$

$$\sqrt{\frac{y_{0m}}{y_{0p}}} \sqrt{\frac{i_m}{f_m}} \sqrt{\frac{f_p}{i_p}} = \frac{V_m}{V_p} \quad \text{equação (9)}$$

Em consequência da viscosidade e rugosidade dos materiais componentes do modelo, o escoamento poderá ser afetado pelos efeitos de escala, caso não possa se reproduzir a semelhança dinâmica. Assim, para que o critério de Froude seja cumprido, é necessário que se proceda a uma distorção na escala, obtida pela comparação das equações (11) e (12). Obtém-se, então, a relação materializada na equação (13) que sugere, no caso da rugosidade ou fator de atrito (f) no modelo ser maior que no protótipo ($f_m > f_p$), ser imperativo para a distorção que a declividade do modelo seja maior que do protótipo ($i_m > i_p$).

$$\sqrt{\frac{i_m}{f_m}} = \sqrt{\frac{f_p}{i_p}} \quad \text{equação (10)}$$

Para a construção do modelo, adotou-se as dimensões da sarjeta tipo B com declividade longitudinal de 10%, a princípio, no intuito de facilitar a sua execução. O modelo físico foi elaborado em acrílico e instalado no laboratório didático de hidráulica da FEA-FUMEC, tendo sido executado em escala 1:10, escala bem menor que a dos experimentos anteriores, ora referidos, pois o espaço para a sua implantação era bastante limitado, não comportando escala maior.

Em assim sendo, a largura total do modelo se limitou a 50cm, sendo 5cm para a sarjeta, propriamente dita e o restante tomado, apenas, como borda livre para quaisquer elevações da linha d'água, mesmo tendo obedecido a declividade de 3% de caimento transversal. Cabe lembrar que não foi simulado o escoamento com a largura de 1,67, conforme fluxo máximo indicado, porque, em um primeiro momento, seria interessante, apenas verificar o comportamento do canal triangular, onde se concentra o fluxo.

O comprimento adotado foi de 200cm para o canal em declive e 20cm para o seu complemento (correspondente a 2m, no protótipo), além de ter sido criada boca de lobo com depressão com as características físicas de uma boca de lobo em ponto baixo.

Para o bombeamento do fluxo, utilizou-se as bombas disponíveis no local, direcionando-o para a sarjeta através de mangueiras de borracha, já existentes. A vazão foi medida através dos hidrômetros instalados na canalização de recalque das bombas.

A intenção do experimento foi avaliar as características hidráulicas impostas pelo escoamento, declividade e seção geométrica da sarjeta na capacidade de absorção da boca de lobo, em relação ao seu posicionamento através de experimentos de laboratório.

ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONSIDERAÇÃO FINAIS

Pode-se observar que no choque entre o escoamento da sarjeta e a grade da boca de lobo, em greide com declividade equivalente a 10%, ocorreu um aumento de lâmina d'água, de montante para jusante, acima da grelha da boca de lobo, cujas características se assemelham ao comportamento do ressalto hidráulico em outras estruturas, conforme figura 5.



Figura 5 – Ressonância na Grelha e Elevação da Lâmina D'Água na Depressão da Boca de Lobo Simples

Ressalta-se que a velocidade para essa declividade na sarjeta do protótipo, alcança o valor máximo de 3,08m/s, sendo a vazão de 175,11 L/s. A ocorrência do ressalto se deve ao choque com a grade central da boca de lobo, haja vista o fluxo ser direcionado para a grade, através do rebaixamento da sarjeta na acomodação com a boca de lobo. Além disso, essa elevação brusca da lâmina d'água se assemelha ao comportamento hidráulico de uma estrutura de dissipação, denominada Salto de Esqui, muito utilizada em vertedouros de barragens.

Observou-se, ainda, que o engolimento da boca de lobo se reduzia a um jato direcionado pelo impacto do fluxo na grelha e através dela, conforme mostrado na figura 6.



Figura 6 – Visualização do Ressonância na Grelha da Boca de Lobo e Jato Direcionado pelo Impacto do Fluxo na Grelha

Em 07 de dezembro de 2013, ocorreu um evento chuvoso em Belo Horizonte, que provocou escoamento em ruas do bairro Serra, onde se pode registrar o mesmo comportamento da lâmina d'água (em planta) na sarjeta e boca de lobo em ponto baixo de via, mostrado na figura 7, sendo observado, ainda, que o escoamento sobre a boca de lobo impele o escoamento da rua principal, através do ressalto hidráulico produzido.

Essa observação de campo comprovou a simulação acima, tendo em vista que a rua em questão possui declividade semelhante a 9%.



Figura 7 - Comportamento da Lâmina d'Água (em Planta) na Sarjeta e Boca de Lobo em Ponto Baixo de Via.

Deve-se ressaltar que o jato provoca um ressalto hidráulico cuja energia pode afastar e, até mesmo, retirar o fluxo do canal de jusante da direção correta, conforme pode ser visto na figura 6, onde se pode perceber que existe separação entre os fluxos, pois um dos escoamentos carrega material e se espalha quando da junção das sarjetas.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Em vista de se possuir pouco espaço neste artigo, para se discutir todos os pormenores do assunto em pauta, há que se destacar a importância do estudo, visto que, do ponto de vista hidráulico, não existem, ainda, discussões sobre o comportamento hidráulico das bocas de lobo com depressão em pontos baixos.

Os estudos, aqui apresentados, continuam através de modelos matemáticos, tendo em vista o modelo físico estar sendo reprojetoado para, posteriormente, estudar a eficiência hidráulica para as bocas de lobo simples em vias com interseção de greides com declividades entre 5 e 16%, com sarjetas tipo B e 17 a 30%, com sarjetas tipo A, todas padrão SUDECAP. Espera-se, assim, colaborar para os estudos de aferição da eficiência hidráulica das bocas de lobo em determinadas condições de funcionamento.

Ressalta-se que a relação das alturas conjugadas do ressalto hidráulico com a extensão do mesmo versus a capacidade de absorção e localização das bocas de lobo em pontos baixos de interseções de greides, não é lembrada nos projetos de drenagem urbana, especialmente no que diz respeito à desejável altura de água e acomodação do fluxo sobre a grelha, no intuito de promover melhor engolimento, evitando-se a situação retratada na figura 3.

Deve-se, ainda, lembrar que os estudos sobre ressalto hidráulico em canais com geometria não retangular e em canais inclinados são objeto, até o momento, de tratamento prático através de gráficos e que, ainda, nesses



canais acrescidos de greides descendentes sequentes, o ressalto pode adquirir formas e posicionamentos bem diferentes dos, até o momento, publicados no meio técnico, sendo necessário estudo mais aprofundado sobre o assunto.

Além disso, o presente estudo observou o mau funcionamento da boca de lobo com depressão e pretende incorporar esse novo estudo ao projeto de pesquisa original, procurando, dessa forma, programar estudos e pesquisas com foco em sistema de drenagem urbana.

Com base na afirmação de que o sistema de microdrenagem existe para dar condições aceitáveis de circulação de veículos e pedestres nas áreas urbanas, quando da ocorrência de chuvas frequentes, e que é necessário se verificar o seu desempenho em eventos de grande magnitude, sob a ótica de possíveis danos às propriedades e riscos de perdas humanas, acredita-se que os estudos, ora apontados, são de grande importância para a engenharia hidráulica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BAPTISTA, M.; COELHO, M.L., M. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. Editora UFMG, 2ª ed. Belo Horizonte, 2006.
2. CARDOSO, C. H. A.; GENOVEZ, A. I. B.; GENOVEZ, A. M. Eficiência de captação de águas pluviais com defletores. *in Anais do 1o Congresso da água*, 2004, Campinas. São Paulo, 2004.
3. CHOW, V.T.. **Open-channel hydraulics**. McGrall-Hill Book Company, International Editions.1959.
4. DALFRÉ P. M. O.; GENOVEZ A. I. B. Eficiência de captação em boca de lobo com depressão e rasgo adicional *in Anais do XXI Congresso latino americano de hidráulica*, São Pedro. São Paulo, 2004.
5. FRENCH, R.H. **Open-channel hydraulics**. Singapura. McGrall-Hill, 1986, 705p.
6. LENCASTRE, A. **Hidráulica geral**; edição do autor, reimpressão, 1996.
7. LIMA, J. G. A. Investigações experimentais da eficiência hidráulica em bocas de lobo em greide contínuo. 2007. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós- Graduação em Saneamento Meio Ambiente e Recursos Hídricos.
8. LIMA, J. G. A., COELHO, M. M. L. P. Avaliação das capacidades das sarjetas e bocas de lobo *in Anais do 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Belo Horizonte, MG, 2007.
9. MASCARÓ, J.L. **Loteamentos urbanos**. Porto Alegre, R.S. Editora Masquatro, 2005, 2ª Edição, 210p.
10. PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE. **Instrução técnica para elaboração de estudos e projetos De drenagem urbana do município de Belo Horizonte**, 2004
11. PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE. **Caderno de encargos da SUDECAP**, 2008. 3ª Edição.
12. PORTO, R.M **Hidráulica básica**. Projeto Reenge, EESC-USP, SP, 2006.
13. SOUZA, P. A., Eficiência hidráulica da boca de lobo. **Boletim 3**. Centro Tecnológico de Hidráulica, DAEE, São Paulo, 36 p., 1986.
14. SOUZA, P. M. B. M., Estudo da dissipação de energia por ressalto hidráulico a jusante de descarregadores não convencionais. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto., Dissertação de Mestrado, 2011.