

EMPREGO DE SOLEIRAS LATERAIS EM RESERVATÓRIOS DE CONTROLE DE CHEIAS URBANAS – ASPECTOS HIDRÁULICOS

José Rodolfo Scarati Martins¹

RESUMO --- Este trabalho descreve alguns conceitos hidráulicos úteis para o emprego das soleiras laterais como estruturas de tomada d'água em reservatórios de controle de cheias urbanas. Este tipo de estrutura vem sendo mais e mais utilizado em conjunto com os reservatórios de amortecimento de cheias do tipo off-line, também conhecidos popularmente no Brasil como 'piscinões', em função de suas vantagens econômicas e construtivas. Inicialmente são apresentados os aspectos práticos do dimensionamento das soleiras laterais em função das demandas hidrológicas, e em seguida um método para cálculo da capacidade de engolimento das mesmas a partir dos coeficientes de descarga propostos por diferentes pesquisadores. Um modelo de cálculo da linha d'água em canais com este tipo de estrutura é então descrito e exemplificado considerando a influência dos parâmetros intervenientes como a declividade de fundo e a rugosidade do canal.

ABSTRACT --- This article describes the hydraulic concepts related to use of side-weirs as intake structures for urban flood control detention ponds and reservoirs. This particular hydraulic structure has been present in most of urban flood control off-line reservoirs in Brazil, named 'piscinões', due to their constructive advantages and low cost. Practical aspects of hydrological and hydraulic design of side weirs area presented, followed by some formulas for estimating the discharge coefficient of such structures, proposed by different authors. A numerical model for predicting water level in a rectangular channel with a side-weir is proposed and discussed with the influence of flow parameters like bottom slope and wall roughness.

Palavras-chave: Soleiras Laterais. Drenagem urbana. Reservatórios de controle de cheias

¹ Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Av. Prof. Lúcio Martins Rodrigues 120 CEP 05508-900 São Paulo SP. Email: scarati@usp.br

1 - INTRODUÇÃO

O uso das soleiras laterais como estrutura tomada de água para os reservatórios de controle de cheias em áreas urbanas, popularmente chamados de *piscinões* tornou-se uma solução atraente em razão de suas facilidades construtivas que conduz a menores custos de implantação. Constata-se que, nos vários reservatórios de detenção do tipo off-line (não inserido no escoamento principal) construídos na Região Metropolitana de São Paulo nos últimos anos, este tipo de estrutura foi freqüentemente utilizado em conjunto com a canalização do trecho de aproximação e restituição, resultando num sistema bastante apropriado para obras lineares como mostra a Figura 1.

Em linhas gerais, o fluxo aproxima-se da soleira lateral através de um canal de seção regular, e pós a mesma implanta-se uma soleira de controle, cujo objetivo é regular o nível d'água e impedir que efeitos de jusante possam interferir no nível d'água na região da entrada para o reservatório. A jusante desta soleira o canal prossegue através um trecho regularizado cuja capacidade nominal deve ser compatível com a capacidade de amortecimento proporcionada pelo reservatório.

Este artigo tem por objetivo discutir uma sistemática de análise hidráulica pra dimensionamento destas estruturas associadas aos reservatórios de detenção de deflúvios em áreas urbanas, e a simulação de seu funcionamento.

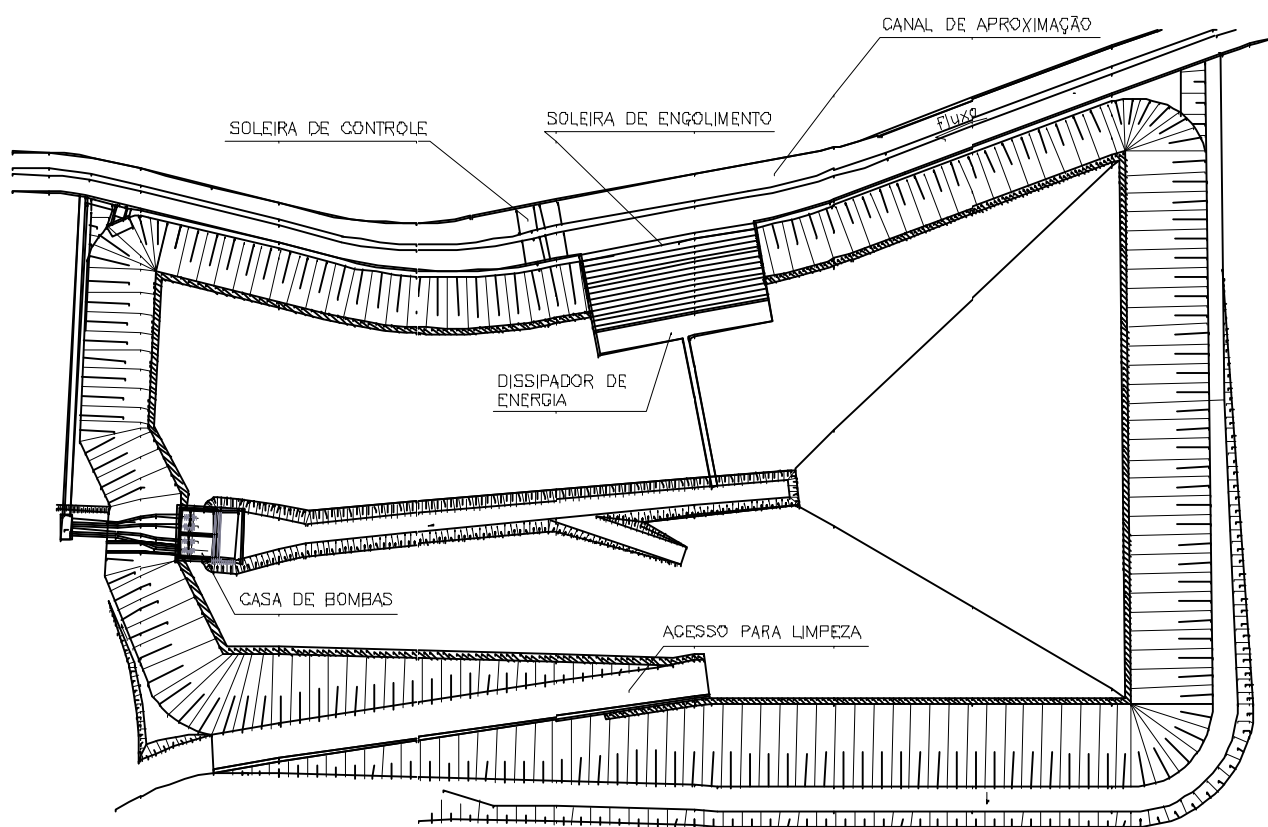


Figura 1: Arranjo geral típico de um reservatório de controle de cheias *off-line*

2 – DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

2.1 – Condicionantes hidrológicas

O conceito hidrológico envolvido no dimensionamento dos reservatórios off-line consiste na definição de um volume capaz de amortecer a vazão afluyente associada a um determinado período de retorno, de forma a tornar a vazão efluente do conjunto compatível com a capacidade de condução da canalização de jusante (Figura 2). A definição tanto do período de retorno da cheia afluyente como deste valor limite está associada a aspectos econômicos e restrições ambientais, como a de se evitar a transferência de cheias para jusante numa bacia hidrográfica

Desta forma, as dimensões da estrutura de tomada d'água devem ser tais que permitam o 'corte' na parte superior do hidrograma afluyente, resultando na utilização eficiente do volume alocado para a detenção. A eficiência do sistema estrutura-reservatório pode ser caracterizada pela relação de amortecimento, calculada pela equação abaixo, onde Q_{afl} é a vazão máxima afluyente e Q_{efl} é a vazão máxima efluente .

$$Ef(\%) = \frac{Q_{afl} - Q_{efl}}{Q_{efl}} \cdot 100 \quad (1)$$

Como a capacidade de descarga dos vertedouros de superfície é uma função da carga hidráulica a potência $3/2$, para obtenção da resposta indicada na Figura 2 tem-se a necessidade de um grande comprimento longitudinal de soleira, inviabilizando muitas vezes uma solução ótima. Na prática o funcionamento de uma soleira lateral assemelha-se ao indicado na Figura 3, onde a vazão máxima efluente é definida pelas características geométricas e hidráulicas resultantes do conjunto formado pelas soleiras de engolimento e de controle (Figura 6). Observa-se ainda que este tipo de estrutura, em seu limite permite o retorno da água do reservatório para o canal, após a passagem da cheia.

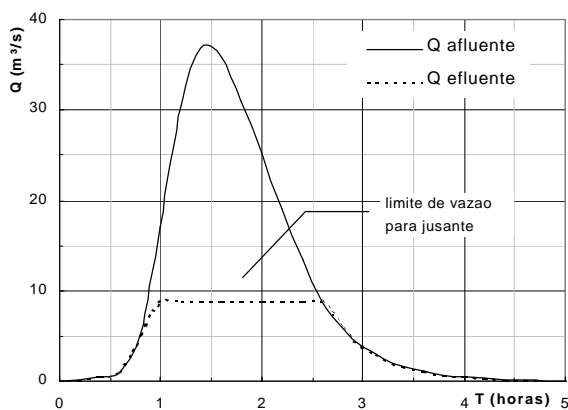


Figura 2: Funcionamento teórico de um reservatório de retenção off-line

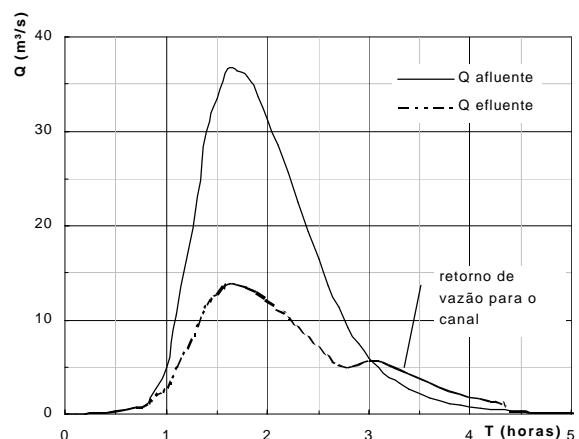


Figura 3: Funcionamento próximo do real de um reservatório de retenção off-line

O dimensionamento hidráulico das soleiras laterais requer portanto o ajuste do comprimento e da cota da soleira de forma a se obter a maior eficiência possível e não a teórica, tendo como limitantes físicos o espaço disponível e a cota máxima admitida para o nível d'água. Deve se considerar ainda imposições econômicas como custo das obras, das áreas a serem utilizadas, operação e manutenção e etc. A Figura 4 ilustra o comportamento, em termos de eficiência (Eq. 1) de um reservatório de detenção urbano, em função do comprimento e da cota da soleira. Consta-se que o ganho de eficiência é mais significativo para os menores comprimentos de soleira (Figura 5).

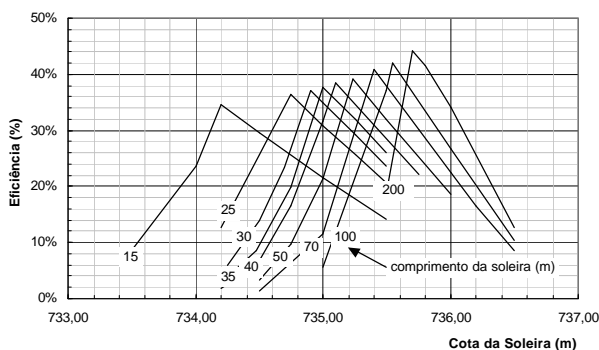


Figura 4: Efeito do comprimento e cota da soleira sobre a eficiência do reservatório

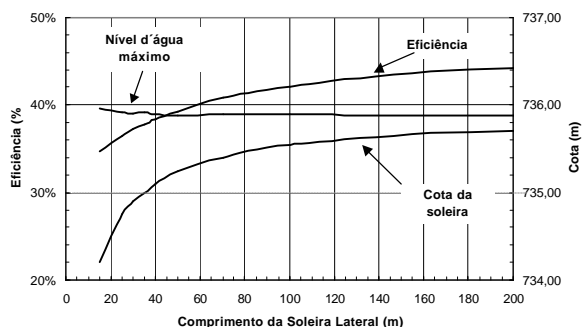


Figura 5: Relação entre o comprimento, cota e eficiência máxima de um reservatório de controle de cheia com soleira lateral

2.1 – Análise hidráulica

A soleira lateral é geralmente constituída por um rebaixamento do muro lateral do canal com ou sem acabamento hidrodinâmico, podendo funcionar como soleira delgada ou espessa. A distância entre o fim da soleira lateral e a soleira de controle deve ser suficiente para o estabelecimento de uma condição de regime subcrítico. A vazão engolida pela soleira é função do desenvolvimento da linha d'água no canal a frente da abertura lateral, que por sua vez depende do coeficiente de descarga desta e da condição de contorno imposta pela soleira de controle. O engolimento específico assim varia ao longo do comprimento, e pode ser expresso por:

$$q_w = \frac{dQ_w}{dx} = -\frac{2}{3} C_w \sqrt{2g} (E_e - H_w)^{3/2} \quad (2)$$

sendo q_w a vazão por unidade de comprimento ao longo da soleira, Q_w a vazão total através da soleira lateral, C_w o coeficiente de descarga, E_e a energia específica e H_w a altura da soleira

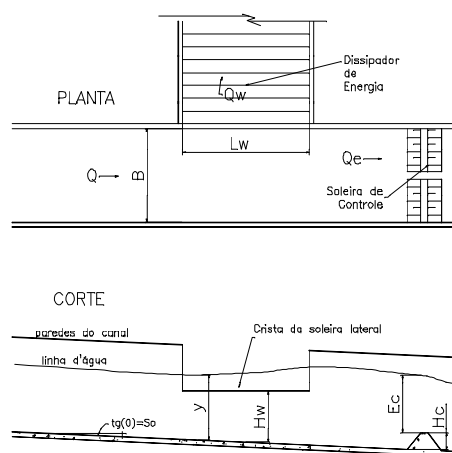


Figura 6: Esquema de Cálculo da Soleira Lateral

em relação ao fundo do canal. O coeficiente C_w pode ser tomado da forma definida por De Marchi (apud Chow, 1985) onde B é a largura do canal, L_w o comprimento da soleira e f uma função da energia específica E_e , determinada nas extremidades da soleira:

$$C_w = \frac{3}{2} \frac{B}{L_w} (f_2 - f_1) \quad (3)$$

$$\text{az } \Phi = \frac{2E - 3H_w}{E_e - H_w} \sqrt{\frac{E_e - H_w}{y - H_w}} \quad (4)$$

O coeficiente C_w pode se relacionado com o número de Froude no canal de aproximação e com as características geométricas da soleira (BORGHEI et al., 1999). RANGA RAJU et al.(1986) apresentam a relação abaixo levando em conta a espessura w da crista da soleira no sentido do fluxo:

$$C_w = (0.81 - 0.60F_1)K \quad (5)$$

Nesta expressão, $K = 1$ se $(y_1 - H_w)/w \geq 2$ e $K = 0,80 + 0,10(y_1 - H_w)/w$ se $(y_1 - H_w)/w < 2$, sendo y_1 o nível d'água na extremidade de montante. O Número de Froude na aproximação F_1 pode ser obtido em função desta profundidade e da velocidade na aproximação V_1 , através de:

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}} \quad (6)$$

Vários pesquisadores estabeleceram relações experimentais para C_w na condição de escoamento subcrítico, tomando o parâmetro F_1 como variável principal. BORGHEI et al (1999) entretanto, avaliaram diversos resultados experimentais considerando a influência da altura da soleira H_w , do comprimento L_w e da inclinação do fundo S_0 , chegando a propor a expressão:

$$C_w = (0.687 - 0.46F_1 - 0.3 \frac{H_w}{y_1} + 0.06 \frac{L_w}{B} + 1.2S_0) \quad (7)$$

O mesmo autor conclui por uma expressão mais prática na qual a influência da declividade longitudinal do canal pode ser desprezada resultando a expressão da equação abaixo, de onde se verifica a notável dependência das condições de aproximação, representada pelo número de Froude e pelo comprimento da soleira.

$$C_w = (0.7 - 0.48F_1 - 0.3 \frac{H_w}{y_1} + 0.06 \frac{L_w}{B}) \quad (8)$$

As expressões abaixo apresentam outras relações para o coeficiente de descarga das soleiras laterais encontradas na bibliografia.

$$\text{Subramanya \& Awasthy (apud ASCE, 1992)} \quad C_w = 0,864 \cdot \left(\frac{1 - F_{r1}^2}{2 + F_{r1}^2} \right)^{0,5} \quad (9)$$

$$\text{Jalili \& Borghei (1999)} \quad C_w = 0,71 - 0,41 \cdot F_{r1} - 0,22 \cdot \left(\frac{H_w}{y_1} \right) \quad (10)$$

$$\text{Anchieta (2006)} \quad C_w = 0,66 - 0,173 \cdot F_{r1} - 0,05 \cdot \left(\frac{y_1}{H_w} \right) \quad (11)$$

Todas as expressões fundamentam-se em dados extraídos de modelos de laboratório, destacando-se que a expressão de Borghei et al (1999) (Eq.8) é a única que considera a interferência do comprimento da soleira levando a resultados significativamente diferentes, como mostram as Figuras 7^a e 7b.

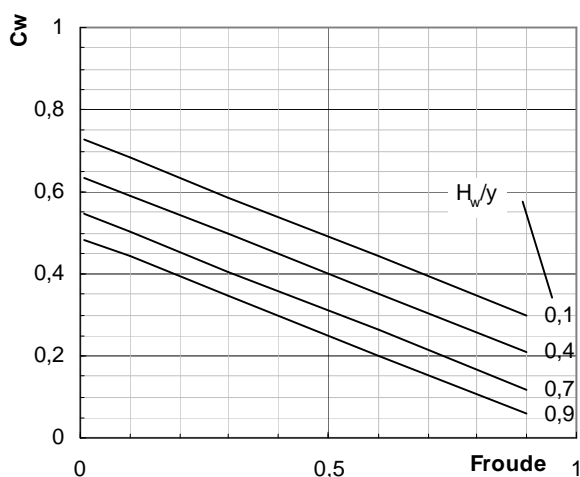


Figura 7a: Coeficiente de descarga da soleira lateral L/B=1

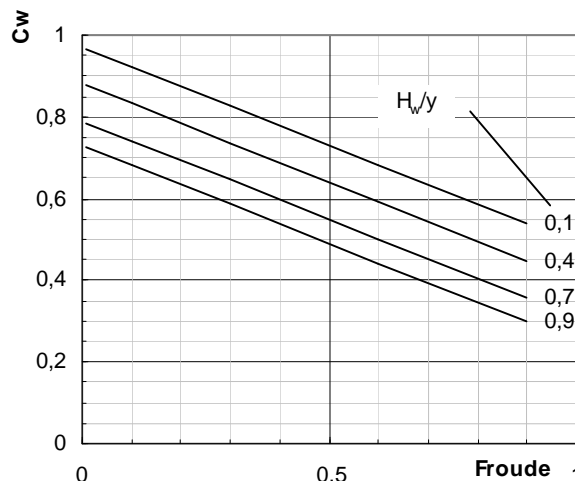


Figura 7b: Coeficiente de descarga da soleira lateral L/B=5

CHOW (1959) e posteriormente, SMITH (1973) e KASHAB et al. (1976) discutiram o cálculo da linha d'água ao longo da soleira lateral desenvolvendo um método a partir da integração numérica da equação da energia. Partindo-se do mesmo conceito, porém empregando-se aqui a equação da quantidade de movimento (momentum) particularizada para o escoamento permanente unidimensional, tem-se :

$$\frac{\beta}{\beta} \left(\frac{bQ^2}{A} \right) + gA \frac{\beta y}{\beta} + gAS_f = 0 \quad (12)$$

onde A representa a área da seção transversal do escoamento, β é o coeficiente de quantidade de movimento, Q a vazão em escoamento, y a profundidade no canal e S_f indica o gasto de energia por unidade de comprimento ou a declividade da linha de energia. A equação 12 pode ser desenvolvida, para introdução da variação de vazão ao longo da soleira lateral indicada pela expressão:

$$\frac{Q^2}{A} \frac{\partial b}{\partial x} + 2b \frac{Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} gA(1 - bF_r^2) \frac{\partial y}{\partial x} - b \frac{Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial x} \Big|_{y=const} + gAS_f = 0 \quad (13)$$

Nesta última expressão o termo S_f pode ser obtido através da equação de Chézy, considerando o fator de atrito f análogo ao da Fórmula de Darcy, onde R_h representa o raio hidráulico do escoamento e $C = (8g/f)^{1/2}$ (SOUZA et alli,1992):

$$S_f = \frac{Q^2}{C^2 A^2 R_h} \quad (14)$$

Para a integração torna-se necessária introdução da discretização espacial das grandezas da expressão (13) através dos operadores (15), resultando na expressão genérica (16) para cálculo do escoamento

$$\bar{G}(x) = \frac{1}{2}(G_{i+1} + G_i) \quad \frac{d}{dx} G(x) = \frac{1}{\Delta x}(G_{i+1} - G_i) \quad (15)$$

$$D_i y_{i+1} + B_i y_i = E_i \quad (16)$$

A equação (17) permite o cálculo da linha d'água para qualquer condição de escoamento, sendo os coeficientes C_w estimados a partir das relações (7) a (11) para cada parcela da soleira. Admitindo-se que o canal de aproximação é retangular e a declividade de fundo é constante tem-se:

$$\beta=1$$

$$(\partial A/\partial x) \Big|_{y=const} = S_0$$

$$D_i = -B_i = \frac{g\bar{A}}{\Delta x}(1 - \bar{F}_r^2) \quad (17)$$

$$E_i = 2 \frac{\bar{Q}}{A} \left(-\frac{2}{3} \bar{C}_w \sqrt{2g} (\bar{E}_e - H_w)^{3/2} \right) + g\bar{A}S_0 - g\bar{A}\bar{S}_f$$

A solução do sistema proposto pelas equações (17) pode ser facilmente obtida através de um algoritmo numérico construído com o auxílio de uma planilha eletrônica. A solução entretanto exigirá a adoção de um padrão de discretização espacial compatível com as variações esperadas do nível d'água, que depende por sua vez da geometria do canal, soleira de engolimento e soleira de controle, além do número de Froude do escoamento.

Os diagramas da Figura 8 permitem observar os padrões de linha d'água a frente das soleiras laterais, calculado com o modelo proposto acima para um canal retangular de fundo horizontal, com diferentes valores de Froude e H_w/y . O Número de Froude considerado é o da seção imediatamente a montante da soleira lateral e a profundidade y_1 é tomada como a média a frente da soleira. O grau de engolimento Q_w/Q é calculado a partir da vazão afluyente e a vazão tomada pela soleira. O coeficiente de descarga representativo da soleira é calculado com a carga específica na seca imediatamente à montante do início.

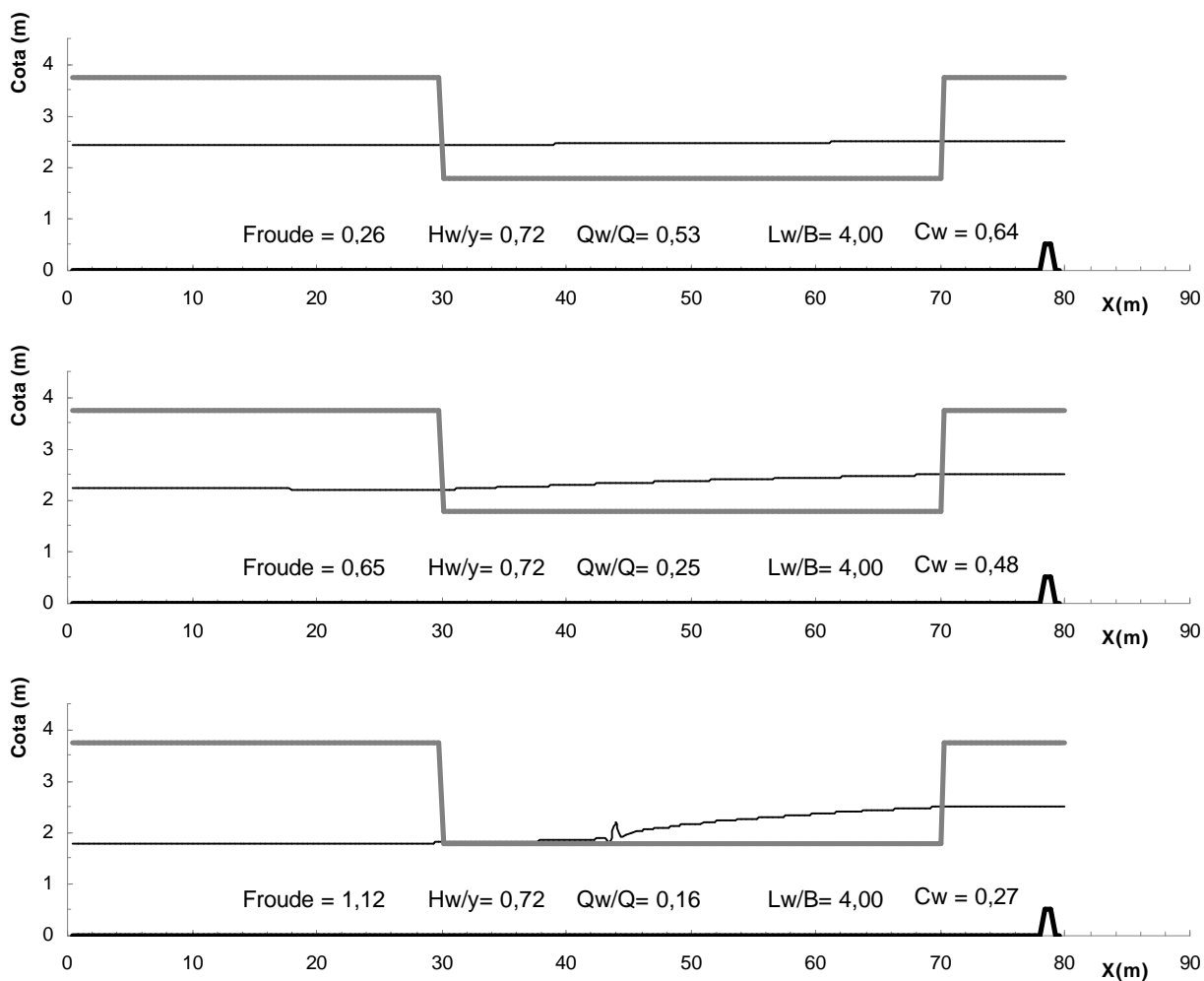


Figura 8: Comportamento típico do escoamento em canal com soleira lateral para diferentes No.s de Froude

A capacidade de engolimento da soleira depende fortemente do Número de Froude a montante, fazendo com que os escoamentos na faixa supercrítica tenham baixas eficiências. A Figura 9 permite o dimensionamento das soleiras laterais a partir da seleção da relação L/B apropriada para o projeto e da eficiência Q_w/Q desejada. De modo geral, a soleira lateral é mais eficiente para números de Froude inferiores a 0,5 e a relação H_w/y inferior a 0,5. A eficiência também aumenta com a relação L/B . Nas curvas da Figura 9, o coeficiente C_w é determinado tomando-se como referência a seção imediatamente a montante da soleira lateral.

2 – OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO

A experiência do emprego de soleiras laterais como estruturas de tomada d'água para reservatórios de retenção tem mostrado que o alargamento da seção do canal destinado, que reduz o número de Froude e assim melhora o coeficiente de engolimento destas estruturas cria condições para deposição de material sedimentar bem como de resíduos sólidos trazidos pela corrente.

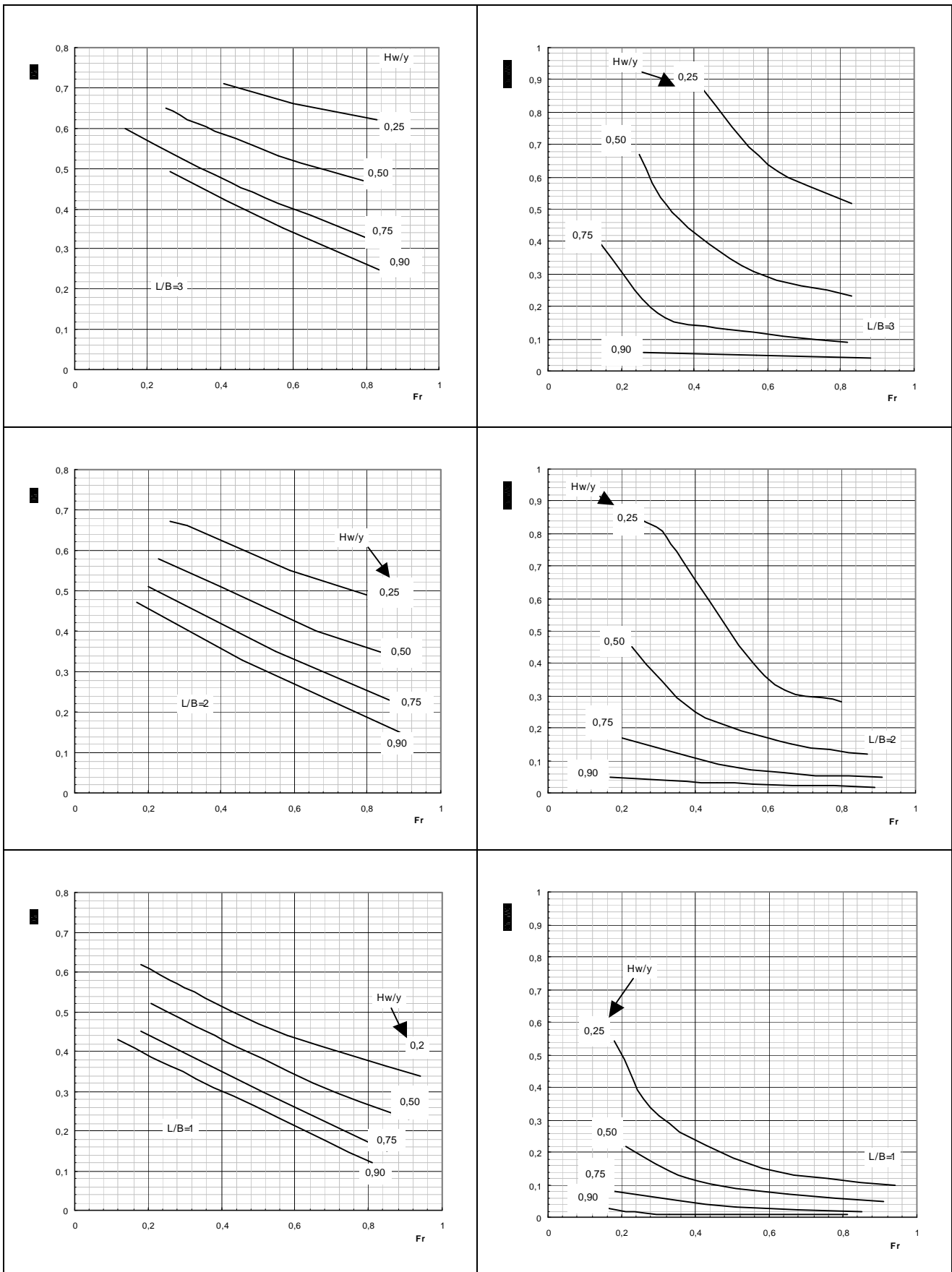


Figura 9: Relações C_w x Froude e Q_w/Q x Froude para diferentes relações H_w/y e L/B

O acúmulo de material defronte a soleira de engolimento favorece o desenvolvimento de vegetação que por sua vez contribui para a retenção de outros resíduos, colocando em risco a capacidade de captação da estrutura. A adoção de barreiras de retenção, tais como grades e telas metálicas, tanto no canal propriamente dito como na crista da soleira lateral, também não se mostra recomendável pela dificuldade de limpeza e remoção destes detritos, capazes de bloquear totalmente as grades ou telas, impedindo o acesso da água.

Desta forma, é recomendável a concepção destas estruturas em canal aberto, evitando-se a implantação das mesmas no interior de galerias fechadas ou sob estruturas como pontes ou travessias, de forma a permitir inspeções periódicas das condições de aproximação. Também devem ser cuidadosamente planejadas rampas ou outras formas de acesso dos equipamentos de manutenção à região da soleira de tomada e controle (Figura 10).



Figura 10: Reservatório de Detenção AT-3 – Mauá – São Paulo

5 – CONCLUSÕES

O emprego das soleiras laterais permite a implantação de estruturas de tomada e desvio de vazões de forma econômica e eficiente. A capacidade de engolimento é determinada principalmente em função do No. de Froude do escoamento, selecionando-se a relação L_w/B em função da eficiência pretendida e da relação H_w/y do arranjo. A estrutura ideal deve ser composta por uma soleira de controle transversal ao canal, cuja finalidade é a de regular o nível na soleira de

engolimento, evitando que a mesma seja influenciada pelas condições de escoamento de jusante, como por exemplo, as obstruções. Para melhor eficiência, o escoamento a frente da soleira deve apresentar baixos números de Froude, o que pode ser obtido com o alargamento do canal na região. Esta geometria entretanto tende a facilitar o depósito de sedimentos e outros resíduos na região, por causa das baixas velocidades. Para tanto devem ser previstos dispositivos que facilitem a limpeza ou a purga dos mesmos.

A determinação da capacidade de descarga da soleira pode ser feita através do cálculo da linha d'água no canal, considerando-se os coeficientes de descarga da a partir da relação de BORGHEI (1999).

BIBLIOGRAFIA

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems. 77rd edn. New York: ASCE, 1992. 724 p.

_____. Stormwater Detention Outlet Control Structures. New York: ASCE, 1985. 34 p.

ANCHIETA, Heber de Bosco. Coeficiente de Vazão em Vertedores Laterais. 2006. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

BORGHEI, S.M.; JALILI, M.R.; GHODSIAN, M. Discharge Coefficient for sharp-crested side weir in sub-critical flow. Journal of Hydraulic Engineering, v.125, No.10, p.1051- 1056, October 1999.

CANHOLI, Aluísio Pardo. Drenagem Urbana e Controle de Enchentes. 1a Edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. 302 p.

CHOW, Ven Te. Open-channel hydraulics. New York: McGraw-Hill, 1959. 680p.

KHASHAB, A.; SMITH, K. Experimental Investigation of flow over side weirs. . Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, v.102, No.HY9, p.1255- 1268, September 1976.

SMITH, Kenneth V.H. Computer Programming for flow over side weirs. Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, v.99, No. .HY3, p.495-508, March 1973.

SOUZA, P.A.; MARTINS, J. R. S. & FADIGA Jr, F. M.. Métodos Computacionais para Engenharia Hidráulica. São Paulo: Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos, 1991. 170p.

TOZZI, M.J. Caracterização / Comportamento de escoamentos em vertedouros com paramento em degraus. São Paulo, 1992. 302p. Tese (Doutorado) Universidade de São Paulo