

Controlo do Escoamento e Medição de Caudais: critérios de dimensionamento de descarregadores em canais, colectores e pequenas represas

Herlander Mata-Lima^{1, #}

*Departamento de Matemática e Engenharias, Universidade da Madeira. 9000-390 Funchal
Instituto Superior Técnico. Av. Rovisco Pais, 1. 1049-001 Lisboa*

Cristina Raminhos²

Engenheira de Recursos Hídricos (Universidade de Évora)

Vera Vilhena Silva³
Engenheira Civil (IST)

RESUMO

Este trabalho apresenta de forma clara os critérios de dimensionamento de diferentes tipos de descarregadores, de aplicação frequente no âmbito da engenharia hidráulica e sanitária, e informações relevantes para a atribuição do coeficiente de vazão e medição de caudal.

Também se faz referência, de modo sucinto, aos critérios de dimensionamento das estruturas em degraus e as vantagens que oferecem no que concerne à dissipação de energia e arejamento do escoamento.

O trabalho constitui, essencialmente, a uma revisão dos conhecimentos e sintetiza de forma organizada a informação necessária para a selecção e dimensionamento dos diferentes tipos de descarregadores (e.g. soleira delgada e espessa) e as estruturas em degraus. Pretende-se fornecer informação relevante para o dimensionamento de estruturas hidráulicas integradas nos sistemas hídricos.

Palavras Chave: Descarregadores; Dimensionamento; Estrutura em Degraus.

¹ Professor Auxiliar do Departamento de Matemática e Engenharias da UMa e Investigador no CERENA-IST

² Engenheira de Recursos Hídricos (UE). Consultora no sector privado

³ Engenheira Civil (IST) Projectista

Autor para quem a correspondência deverá ser enviada (hlima@uma.pt)

Flow Control and Discharge Measurement: Design Criteria for spillways in channels and small impoundements

ABSTRACT

In this work objective has been made to present the design criteria of different types of spillways, commonly used for hydraulic engineering activities, and significant information related to discharge coefficient and discharge measurement.

One also presents the design criteria of stepped structures and stresses its advantage with respect to energy dissipation and air emulsion.

This work reviews fundamental information to select and design spillways (e.g. sharp crest and broad crest) and stepped structures. It intends to be a source of information to design hydraulic structures.

Key Words: Spillways; Design; Stepped Structures.

1. ASPECTOS GERAIS

Os descarregadores são estruturas, geralmente localizadas na secção transversal dos canais ou nas estruturas de armazenamento, que permitem o controlo de escoamento e medição de caudais. São instalados nos canais (naturais ou artificiais) independentemente da geometria da secção.

São muito usados nos sistemas hidroagrícolas constituídos por canais e represas. Particularmente, os descarregadores de crista longa (*long crested weirs*) são usados em sistemas de rega flexíveis (a pedido) para minimizarem as flutuações da superfície do escoamento acima da crista (Williams et al., 1993) e vencer a limitação imposta pela reduzida largura do canal que dificulta a manutenção do nível da água dentro da tolerância desejada quando o descarregador possui largura equivalente à do canal. Os sistemas de rega de distribuição flexível permitem maior eficiência de uso de água dado que o fornecimento de água é feito em função da procura por parte dos agricultores (Merriam, 1977). Porém, este tipo de sistema provoca flutuações de caudal e da superfície livre do escoamento no canal de distribuição (fornecimento). Esta flutuação da superfície livre do escoamento induz alterações na vazão (Clemmens e Dedrick, 1984).

O trabalho apresenta, os critérios de dimensionamento de diversos tipos de descarregadores mais comuns (e.g. soleira delgada, espessa, WES convencional e em degraus) e diferentes secções (e.g. triangular, rectangular com e sem contracção e trapezoidal) bem como as fórmulas e técnicas de determinação de caudais.

2. DIMENSIONAMENTO DE DESCARREGADORES

2.1 Considerações Prévias

Apresenta-se a metodologia de dimensionamento recorrendo às expressões de cálculo de caudal dos diferentes descarregadores; os critérios e métodos de cálculo do coeficiente de vazão; e os critérios recomendados para fixação de altura da crista do descarregador e a carga hidráulica máxima e mínima recomendada.

2.2 Descarregadores de Soleira Delgada (DSD)

Os descarregadores de soleira delgada (*sharp-crested weirs*) possuem a espessura inferior a $\frac{1}{2}$ da carga hidráulica ($\frac{1}{2} H$). Os descarregadores inseridos nesta categoria não devem funcionar em condições de escoamento submerso, i.e. a crista do descarregador deve estar acima da superfície livre do escoamento a jusante (*tailwater*). Kraatz e Mahajan (1975) realçam que a carga hidráulica acima da crista do descarregador (H) deve respeitar a seguinte condição: $0,06 \text{ m} \leq H \leq 0,60 \text{ m}$.

2.3 Descarregador Rectangular (DR)

Para este descarregador (Figura 1) o caudal é calculado pela seguinte equação (Graf e Altinakar, 1993, Massey, 2000):

$$Q = LC \frac{2}{3} \sqrt{2g} (H)^{3/2} \quad (1a)$$

onde: Q é o caudal [m^3/s], H a carga hidráulica [m], g a aceleração da gravidade ($9,8 \text{ ms}^{-2}$), C o coeficiente de vazão [-], L a largura da crista do descarregador [m]. A equação anterior tem implícita a assunção de que a velocidade de aproximação do escoamento ao descarregador é desprezável por ser aproximadamente nula.

Quando o descarregador possui dupla contracção lateral, como ilustra a figura 1b, o L é substituído por $L' = L - 0,2H$ (Chow, 1959).

Chow (1959) apresenta formulas muito simplificadas para o cálculo da vazão [m^3/s] dos descarregadores rectangulares:

$$Q = \left[\left(1,805 + 0,221 \frac{H}{P} \right) \right] LH^{3/2} \quad \text{para descarregadores sem contracção lateral} \quad (1b)$$

$$Q = \left[\left(1,805 + 0,221 \frac{H}{P} \right) \right] (L - 0,2H)H^{3/2} \quad \text{para descarregadores com contracção lateral} \quad (1c)$$

onde: P é a altura da crista do descarregador [m]. Os restantes termos já foram descritos anteriormente.

A carga hidráulica (H) deve ser medida num local, suficientemente distante ($\geq 2,5H$), a montante do descarregador para garantir o rigor da medição (ver Figura 1c);

O coeficiente C para descarregadores de secção rectangular é obtido através das seguintes equações (Naudascher, 1987):

$$C = 0,61 + 0,08 \frac{H}{P} \quad \text{se } \frac{H}{P} < 6 \quad (2a)$$

$$C = 1,61 \left(1 + \frac{P}{H} \right)^{3/2} \quad \text{se } \frac{P}{H} < 0,06 \quad (2b)$$

O mesmo autor salienta que para $\frac{H}{P} \cong 10$ deve-se considerar $C = 1,2$.

O coeficiente C pode também ser expresso pela fórmula de Rehbock (1929):

$$C = 0,605 + 0,08 \frac{H}{P} + \frac{1}{305H}, \quad \text{se } \frac{H}{P} < 10 \quad \text{ou } C = 1,135, \quad \text{se } \frac{H}{P} = 10 \quad (2c)$$

com H e P em ft (1 ft = 0,3049 m). É comum adoptar-se um valor de coeficiente $C = 0,62$. Chanson e Montes (1998) e Johnson (2000) também fornecem informação relevante sobre a atribuição do coeficiente de vazão.

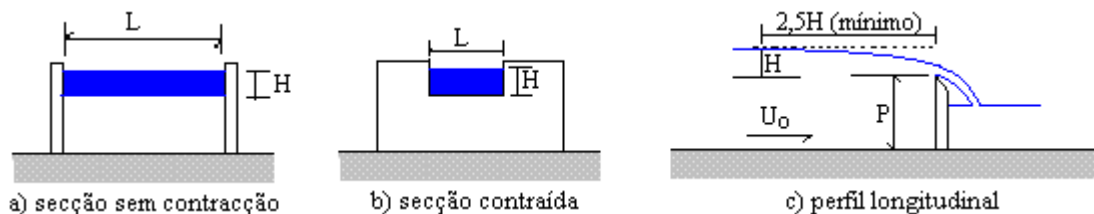


Figura 1 – Ilustração do descarregador rectangular: a) secção sem contracção e b) secção contraída.

Os critérios de dimensionamento deste tipo de descarregador são os seguintes (Kraatz e Mahajan, 1975, Williams et al., 1993, Olivera, 2000): $H_{\min} = 0,06$ m; $H_{\max} = L/2$; $P > 2H_{\max}$; e para secção contraída (Figura 1b), a largura do canal deve ser $\geq 3L$.

O descarregador deve ser dimensionado para o caudal máximo, obtendo-se iterativamente a largura através da seguinte equação:

$$Q = LC \frac{2}{3} \sqrt{2g} \left(\frac{L}{2} \right)^{3/2} \quad (3)$$

Fixando o valor do caudal de dimensionamento, o L é calculado por um processo iterativo até que o segundo termo da equação se iguale ao primeiro.

O descarregador rectangular é muito semelhante ao do tipo Cipolletti (trapezoidal). A diferença reside no facto do Descarregador Cipolletti (DC) apresentar os lados simétricos com um declive de 4V:1H. Este trabalho não aborda o DC visto que o caudal medido exibe um rigor inferior ao dos descarregadores rectangulares e triangulares.

2.4 Descarregador Triangular (DT)

A equação de cálculo da vazão [m^3/s] deste descarregador (também designado por “V-notch”) é a seguinte (ver Brater e King, 1976, Rantz et al. 1982, CNLV, 1984, Olivera, 2000, Massey, 2000):

$$Q = C \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) H^{5/2} \quad (4)$$

onde: o coeficiente C assume geralmente o valor de 0,58.

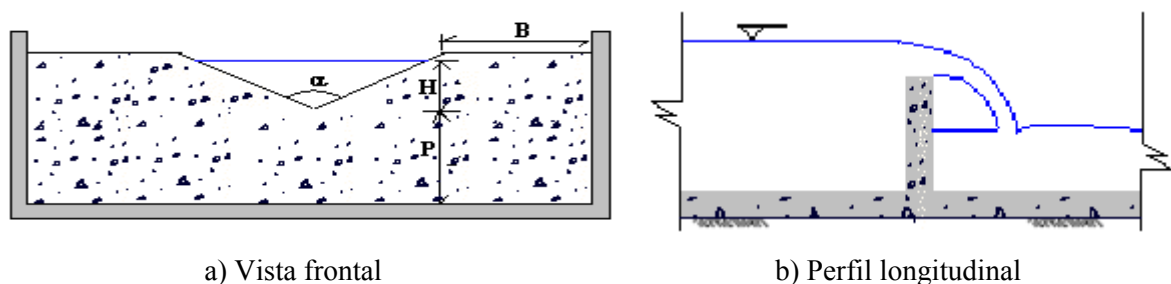


Figura 2 – Ilustração esquemática do descarregador triangular.

Os critérios de dimensionamento recomendados para o DT são (Kraatz e Mahajan, 1975, Williams et al., 1993, Olivera, 2000): $H_{\min} > 0,061$ m; $H_{\max} < 0,61$ m; $P > 2H_{\max}$; $B > 2H_{\max}$; e os valores mais comuns para o ângulo α , em graus, são os seguintes: 22,5°; 30°; 45°; 60°; 90° e 120°. De acordo com Rantz et al (1982), 90° é o valor mais comum de todos.

Devem evitar-se cargas hidráulicas (H) muito baixas porque, nestas situações, o jacto do escoamento adere à parede do descarregador, deixando o escoamento de ocorrer de modo desejado conforme se apresenta na Figura 2b.

O Descarregador Rectangular (DR) pode ser usado em combinação com o triangular (inserido na crista do DR) recebendo a designação de descarregador composto (USBR, 1997). Esta situação é particularmente importante em canais com grande variação do escoamento, por permitir que para escoamentos de fraca magnitude a medição do caudal se faça apenas através do descarregador triangular.

Os descarregadores de soleira delgada não devem funcionar em condições de submersão. Contudo, quando submersos, o caudal pode ser estimado pela seguinte equação (Brater e King, 1976):

$$Q_s = Q_f \left[1 - \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^{3/2} \right]^{0,385} \quad (5)$$

onde: Q_s é o caudal em condições submersas [m^3/s], Q_f o caudal em condições de escoamento livre [m^3/s], H_1 a carga hidráulica a montante do descarregador e H_2 a carga hidráulica a jusante do descarregador.

2.5 Descarregadores de Crista Longa (DCL)

Os descarregadores de crista longa (*long crested weirs*) permitem minimizar a flutuação da superfície livre do escoamento induzida pelas alterações sucessivas de caudal no canal (Williams et al., 1993) por exibirem um perímetro da crista superior à largura do canal, permitindo aumentar a eficiência de descarga. A minimização de flutuações permite atenuar as variações de caudal através dos orifícios de descarga submersos o que, de acordo com Clemmens e Dedrick (1984), melhora a eficiência dos sistemas de rega.

Estes descarregadores apresentavam uma desvantagem relativamente aos outros por não terem sido calibrado de modo a permitir medições rigorosas de caudal (Kraatz e Mahajan, 1975), até que Williams et al. (1993) realizaram um estudo experimental onde testaram diferentes geometrias de descarregadores de crista longa. Os três tipos de descarregadores de crista longa conhecidos (ver Figura 3) são os seguintes: diagonal; bico de pato e labirinto.

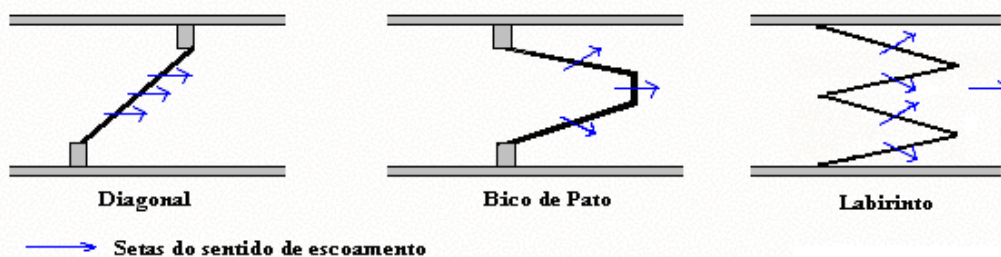


Figura 3 – Descarregadores de crista longa.

O caudal [m^3/s] do descarregador de crista longa pode ser obtido pela equação (Kraatz e Mahajan, 1975):

$$Q = CBH^{3/2} \sqrt{2g} \quad (6)$$

onde: o coeficiente C é obtido através da Tabela 1 e B é o comprimento da crista do descarregador [m].

Tabela 1 – Valores de C para descarregadores de crista longa (Kraatz e Mahajan, 1975).

| Tipo de crista | Tipo de descarregador | | |
|-----------------|-----------------------|--------------|-----------|
| | Diagonal | Bico de pato | Labirinto |
| Arredondada | 0,38 | 0,36 | 0,34 |
| Não arredondada | 0,34 | 0,32 | 0,31 |

Estudos realizados por Williams et al. (1993) conduziram a definição da seguinte equação para o cálculo do coeficiente C dos descarregadores em labirinto e bico de pato:

$$C = 0,543 - 0,217\left(\frac{T}{H}\right) + 0,0597\left(\frac{L}{H}\right) - 0,163\left(\frac{P}{H}\right) - 0,193\left(\frac{b_d}{H}\right) - 0,00953\left(\frac{B_d}{H}\right) \quad (7)$$

onde: T é a largura do topo do canal [m], H a carga hidráulica acima da crista do descarregador [m], L a largura da garganta do descarregador [m], P a altura da crista do descarregador [m], b_d o comprimento de um dos lados da crista do descarregador [m] e B_d o comprimento total da crista do descarregador [m].

2.6 Orifício Submerso (OS)

A equação de cálculo do caudal [m^3/s] de um orifício é a seguinte (Quintela, 2005, USBR, 1997, GDOE, 2001, Massey, 2000):

$$Q = CA\sqrt{2gH} \quad (8)$$

onde: A é a área do orifício [m^2] e H a carga hidráulica [m] medida desde o centro do orifício ($1/2 D$) até a superfície livre da água. Para orifícios submersos a carga hidráulica corresponde à diferença entre o nível de água a montante (*headwater*) e jusante (*tailwater*).

Quando o orifício de saída corresponde à secção de um tubo considera-se, neste trabalho, que o mesmo deve ser tratado no âmbito dos descarregadores de soleira espessa (ver secção 2.9.2).

2.7 Comportas Radiais (CR)

As comportas radiais (*radial gate*) são muito utilizadas para o controlo de caudal e altura do escoamento nos canais (Figura 4). Nesta situação, a equação geral de cálculo do caudal [m^3/s] é a seguinte (USBR, 1997):

$$Q = CG_o B \sqrt{2gH} \quad (9)$$

onde: G_o é a abertura vertical da comporta [m] e B a largura da comporta.

A carga hidráulica (H) pode ser considerada igual a carga de montante (H_1) ou corresponder à diferença entre H_1 e H_2 (ver Figure 4). Quando se considera $H = H_1 - H_2$ a equação (9) transforma-se na equação de orifício.

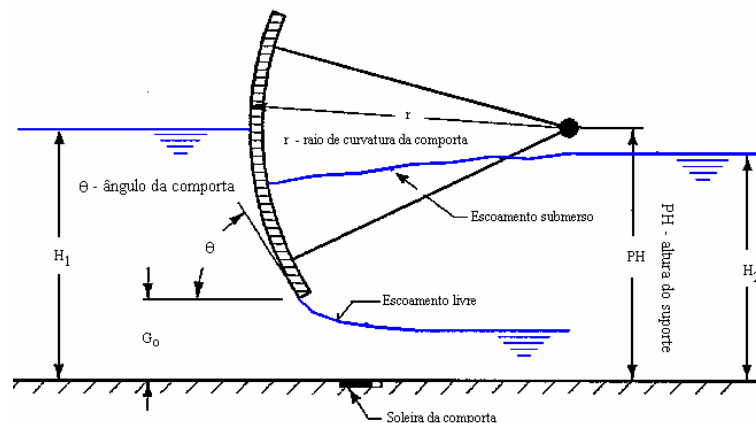


Figura 4 – Exemplo ilustrativo de uma comporta radial (modificada de USBR, 1997).

2.8 Descarregador Proporcional (DP)

GDOE (2001) refere que apesar deste descarregador apresentar um processo de dimensionamento e construção mais complexo que os anteriores, a sua adopção como dispositivo de descarga associado à bacia de retenção do escoamento é vantajosa porque pode reduzir o volume de armazenamento. Existe, para este tipo de descarregador, uma relação linear entre a carga hidráulica e o caudal (Figura 5) sendo as equações de dimensionamento as seguintes (Sandvik, 1985, Corcoran, 1995):

$$Q = 2,74 a^{0,5} b \left(H - \frac{a}{3} \right) \quad (10a)$$

$$\frac{x}{b} = 1 - \left(\frac{1}{3,17} \right) \arctan \left(\frac{y}{a} \right)^{0,5} \quad (10b)$$

onde: Q é o caudal [m^3/s] e as restantes grandezas, expressas em metros, estão indicadas na Figura 5.

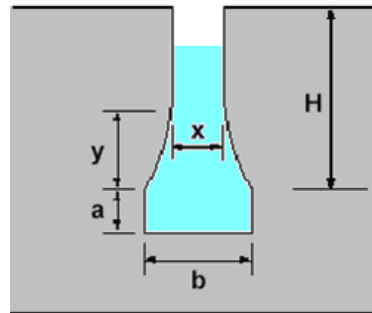


Figura 5 – Definição esquemática de um descarregador proporcional (Sandvik, 1985).

2.9 Descarregadores de Soleira Espessa (DSE)

2.9.1 Descarregadores de Superfície

Um descarregador diz-se de soleira espessa (*broad crested weirs*), ver Figura 6, quando a sua espessura b é igual ou superior a $\frac{2}{3}H$ (Olivera, 2000, USDA, 1997).

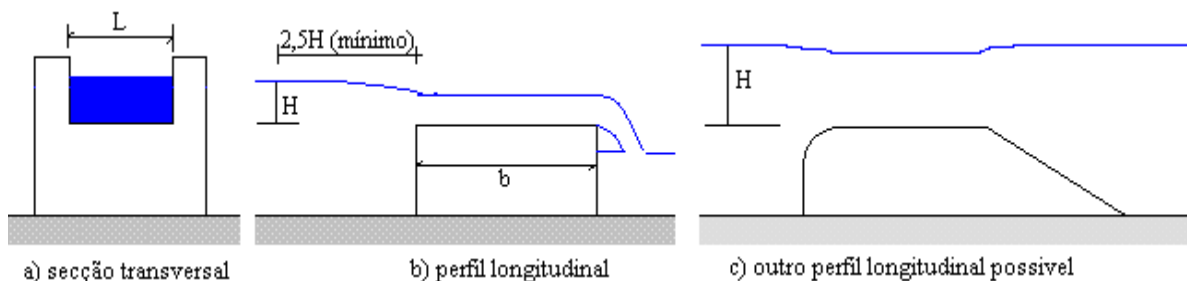


Figura 6 – Definição esquemática do descarregador de soleira espessa.

Podem considerar-se a seguinte equação para o cálculo de vazão dum descarregador de soleira espessa:

$$Q = LC\sqrt{g}\left(\frac{2}{3}H\right)^{3/2} \quad (11)$$

Para efeitos práticos é comum considerar-se $C = 0,98$ (especialmente indicado para a situação da Figura 6c).

Brater e King (1976) apresentam a seguinte equação para o cálculo de caudal Q [m³/s] num descarregador de soleira espessa:

$$Q = 0,028317(CLH^{3/2}) \quad (12)$$

onde o L e H são expressos em feet [ft]. As simbologias têm o significado referido anteriormente (ver representação na Figura 6) e o coeficiente C é obtido através da consulta da Tabela 2.

Tabela 2 - Valores do coeficiente C para descarregador de soleira espessa (Brater e King, 1976)

| Carga hidráulica, H^* [m] | Comprimento da crista do descarregador, b [m] (ver Figura 6b) | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0,15 | 0,23 | 0,30 | 0,46 | 0,61 | 0,76 | 0,91 | 1,22 | 1,52 | 3,05 | 4,57 |
| 0,061 | 2.80 | 2.75 | 2.69 | 2.62 | 2.54 | 2.48 | 2.44 | 2.38 | 2.34 | 2.49 | 2.68 |
| 0,122 | 2.92 | 2.80 | 2.72 | 2.64 | 2.61 | 2.60 | 2.58 | 2.54 | 2.50 | 2.56 | 2.70 |
| 0,183 | 3.08 | 2.89 | 2.75 | 2.64 | 2.61 | 2.60 | 2.68 | 2.69 | 2.70 | 2.70 | 2.70 |
| 0,244 | 3.30 | 3.04 | 2.85 | 2.68 | 2.60 | 2.60 | 2.67 | 2.68 | 2.68 | 2.69 | 2.64 |
| 0,305 | 3.32 | 3.14 | 2.98 | 2.75 | 2.66 | 2.64 | 2.65 | 2.67 | 2.68 | 2.68 | 2.63 |
| 0,366 | 3.32 | 3.20 | 3.08 | 2.86 | 2.70 | 2.65 | 2.64 | 2.67 | 2.66 | 2.69 | 2.64 |
| 0,427 | 3.32 | 3.26 | 3.20 | 2.92 | 2.77 | 2.68 | 2.64 | 2.65 | 2.65 | 2.67 | 2.64 |
| 0,488 | 3.32 | 3.29 | 3.28 | 3.07 | 2.89 | 2.75 | 2.68 | 2.66 | 2.65 | 2.64 | 2.63 |
| 0,549 | 3.32 | 3.32 | 3.31 | 3.07 | 2.88 | 2.74 | 2.68 | 2.66 | 2.65 | 2.64 | 2.63 |
| 0,610 | 3.32 | 3.31 | 3.30 | 3.03 | 2.85 | 2.76 | 2.27 | 2.68 | 2.65 | 2.64 | 2.63 |
| 0,762 | 3.32 | 3.32 | 3.31 | 3.28 | 3.07 | 2.89 | 2.81 | 2.72 | 2.67 | 2.64 | 2.63 |
| 0,915 | 3.32 | 3.32 | 3.32 | 3.32 | 3.20 | 3.05 | 2.92 | 2.73 | 2.66 | 2.64 | 2.63 |
| 1,067 | 3.32 | 3.32 | 3.32 | 3.32 | 3.32 | 3.19 | 2.97 | 2.76 | 2.68 | 2.64 | 2.63 |
| 1,220 | 3.32 | 3.32 | 3.32 | 3.32 | 3.32 | 3.32 | 3.07 | 2.79 | 2.70 | 2.64 | 2.63 |
| 1,372 | 3.32 | 3.32 | 3.32 | 3.32 | 3.32 | 3.32 | 3.32 | 2.88 | 2.74 | 2.64 | 2.63 |
| 1,525 | 3.32 | 3.32 | 3.32 | 3.32 | 3.32 | 3.32 | 3.32 | 3.07 | 2.79 | 2.64 | 2.63 |
| 1,677 | 3.32 | 3.32 | 3.32 | 3.32 | 3.32 | 3.32 | 3.32 | 3.32 | 2.88 | 2.64 | 2.63 |

* O H deve ser medido à uma distância de pelo menos $2,5H$ a montante do descarregador. Nota: 1ft = 0,3049m.

Contrariamente aos descarregadores de soleira delgada que não devem funcionar em condições de submersão (Williams et al., 1993), este tipo de descarregador pode ser submerso (ver Figura 6c). USDA (1997) trata, detalhadamente, dos descarregadores de soleira espessa.

2.9.2 Orifício Descarregador de Comprimento Superior ao Diâmetro (ODCSD)

Quando o descarregador corresponde à secção do orifício de um tubo de comprimento (L) superior ao diâmetro (D) a vazão pode ser estimada através da seguinte equação (NRCS, 1984):

$$Q = \frac{1}{2} A \frac{2gH}{1 + k_m + k_p L_t} \quad (13a)$$

onde: Q é o caudal descarregado [m³/s], A a área da secção transversal do tubo [m²], H a carga hidráulica ou diferença de carga entre *headwater* e *tailwater* [m], k_m o coeficiente de

perda de carga localizada (e.g. considera-se $k_m = 1.0$), k_p o coeficiente de atrito do material que constitui o tubo

$$k_p = \frac{5087n^2}{D^{4/3}} \quad (13b)$$

L_t o comprimento do tubo [m], D o diâmetro do orifício [m] e n o coeficiente de rugosidade de Manning [$m^{-1/3}s$].

2.10 Descarregador de Soleira WES

É comum encontrar-se este tipo de descarregador (Figura 7) associado a pequenos aproveitamentos hidroagrícolas (e.g. pequenas albufeiras). O caudal [m^3/s] é calculado através da seguinte equação (ver USACE-WES, 1952, USACE, 1990, Olivera, 2000, Chatila e Jurdi, 2004):

$$Q = C_w LH_e^{3/2}, \text{ com } C_w = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C \quad (14)$$

A carga hidráulica efectiva (H_e) é igual a H porque a velocidade de aproximação é sensivelmente nula.

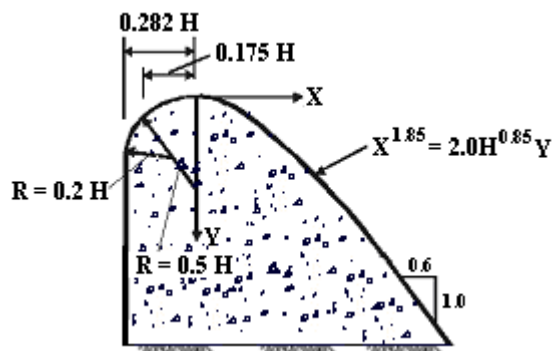


Figura 7 – Definição esquemática do critério de dimensionamento do descarregador de soleira WES com paramento convencional (ver USACE, 1990, Olivera, 2000).

Para relações $P/H > 4/3$ o $C = 0.75$, logo o C_w assume o valor de 4.03.

A Figura 7 sintetiza o critério de dimensionamento a adoptar-se de modo a evitar problemas de erosão por cavitação.

2.11 Descarregador Lateral (DL)

A fórmula de Poleni é geralmente utilizada para o cálculo da caudal [m^3/s] debitado por um Descarregador Lateral (ver Muslo, 2002 e Kamrath e tal., 2006):

$$Q = \frac{2}{3} \mu \sqrt{2g} LH^{3/2} \quad (15a)$$

onde: μ é um factor de escoamento que inclui todas as perdas de carga [-].

De acordo com Bollrich (1996) (*in* Kamrath et al., 2006), o valor máximo de μ para um descarregador de soleira espessa com escoamento paralelo à crista é $\mu_0 = 0,577$.

Generalizando, $\mu = \mu_0 \mu^*$ em que μ^* é um parâmetro que varia entre 0 e 1 $\{\mu^* = f\left(\frac{b_i}{L}, F_r\right)\}$, F_r é o número de Froude e b_i é a largura do canal que é a distância que vai desde o canal principal até a crista do descarregador}. A introdução do parâmetro μ^* por Kamrath et al. (2006) é particularmente importante em situações em que se analisa o escoamento lateral provocado, por exemplo, pela rotura de diques (nesse caso, a largura do descarregador varia ao longo do tempo com a evolução da rotura).

Finalmente, obtém-se o μ pela equação:

$$\mu = \mu_0 \mu^*, \text{ com } \mu^* = 0,1146 \ln\left(0,4\sqrt{F_r}\left(\frac{b_i}{L}\right)^2\right) + 0,6895 \quad (15b)$$

2.12 Descarregador Não Convencional – soleira em degraus

Os descarregadores em degraus (ver Figura 8) possuem uma eficiência de dissipação de energia superior à dos descarregadores convencionais devido à existência de degraus que funcionam como macrorugosidades provocando a dissipação de energia e ainda o emulsionamento do ar e o conseqüente arejamento do escoamento (Chanson, 1999, Matos, 1999, 2000, André et al., 2004, Meireles et al., 2005).

De entre as aplicações de estruturas em degraus destacam-se (Chanson, 1999, Matos, 2000): açudes e cascatas em degraus nos rios (e.g. açudes de gabiões, cascatas de degraus para regularização de cursos de água); quedas em degraus para dissipação de energias em sistemas de rega; descarregadores de cheias de barragens; e cascatas de degraus em sistemas de drenagem de águas residuais.

Nos últimos tempos tem-se verificado também uma crescente utilização das estruturas em degraus nos sistemas de drenagem das vias de comunicação.



Figura 8 – Definição esquemática de um descarregador em degraus (Boes, 2000).

No dimensionamento de estruturas em degraus é comum optar-se pelo critério que conduz à obtenção de escoamento deslizante sobre turbilhões (*skimming flow*) em detrimento do escoamento em quedas sucessivas (*nappe flow*). Segundo Chanson (1994a), o escoamento deslizante sobre turbilhões atinge maior eficiência na dissipação de energia.

Chanson (1993, 1994b), apresenta as seguintes relações para propósitos de dimensionamento das estruturas em degraus:

i) escoamento em quedas sucessivas sem ressalto hidráulico (EQ)

$$h_c \leq 0,0916 h_d \left(\frac{h_d}{L_d}\right)^{-1,276} \quad (16a)$$

ii) escoamento em quedas sucessivas com ressalto hidráulico (EQRH)

$$\frac{h_c}{h_d} < \frac{1}{3} \quad (16b)$$

iii) escoamento deslizando sobre turbilhões (EDT)

$$h_c \geq 1,195 h_d - 0,595 \frac{h_d^2}{L_d} \quad (16c)$$

onde: h_c é a altura crítica do escoamento [m]; h_d e L_d são respectivamente a altura e o comprimento do degrau [m].

Peyras et al. (1992) apresentaram a seguinte equação para o cálculo da energia dissipada (ΔH) ao longo de um descarregador em degraus com o escoamento do tipo EDT:

$$\frac{\Delta H}{P + 1,5h_c} = 1 - \frac{\left(\frac{f}{8 \operatorname{sen} \theta}\right)^{1/3} \cos \theta + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8 \operatorname{sen} \theta}\right)^{-2/3}}{\frac{3}{2} + \frac{P}{h_c}} \quad (17)$$

onde: P é a altura da crista do descarregador (ver Figura 8), θ o ângulo entre a soleira do descarregador e o plano horizontal e f é o factor de resistência ao escoamento. É comum considerar-se f igual a 0.1 na fase de pré-dimensionamento.

A altura crítica do escoamento (h_c) e o factor de resistência (f) em regime uniforme podem ser obtidos através das equações (USBR, 1997):

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (18)$$

$$f = \frac{8gJh^3}{q^2} \quad (19)$$

onde: q é o caudal específico ou caudal por unidade de largura [$\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-1}$], g a aceleração da gravidade ($9,8 \text{ ms}^{-2}$), h a altura uniforme do escoamento [m], e J a perda de carga unitária [m/m].

Ainda sobre a dissipação de energia, Chanson e Montes (1998) referem que estudos experimentais (válido para $0,045 < \frac{h_c}{P_q} < 1$) realizados por Rand (1955) revelaram que a energia dissipada numa estrutura de queda (*drop structure*) pode ser calculada através da equação:

$$\frac{\Delta H}{H_1} = 1 - \left(\frac{0,54 \left(\frac{h_c}{P_q}\right)^{0,275} + 1,71 \left(\frac{h_c}{P_q}\right)^{-0,55}}{\frac{3}{2} + \frac{P_q}{h_c}} \right) \quad (20)$$

onde: $\Delta H = H_1 - H_2$, H_1 e H_2 são respectivamente a carga hidráulica [m] a montante e jusante do descarregador, P_q é a altura de queda [m] e h_c é a altura crítica do escoamento [m].

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho pretende constituir uma ferramenta útil para os engenheiros que intervêm no âmbito do dimensionamento de canais e estruturas de controlo e armazenamento do escoamento. Os descarregadores referidos, no trabalho, adaptam-se tanto a canais artificiais como naturais.

Dado o actual reconhecimento da necessidade de integrar de forma harmoniosa os projectos de engenharia no ambiente circundante tem-se atribuído prioridade às estruturas que suscitam menos perturbações no meio natural. Esta necessidade leva a que as estruturas em betão estejam a ser substituídas em benefício daquelas que são consideradas ambientalmente recomendáveis (e.g. gabiões) – ver Figura 9.



a) Convencional

b) degraus

Figura 9 – Exemplo de um descarregadores em gabiões. Fonte: a) FranceGabion e b) Maccaferri.

De acordo com os projectos realizados, a adopção de estruturas em gabiões apresenta as seguintes vantagens: i) baixo custo económico – as estruturas em gabiões são economicamente mais acessíveis que as estruturas convencionais. Quando existe material rochoso apropriado nas imediações da obra as vantagens económicas são ainda maiores. Saliente-se ainda que este tipo de estrutura não é exigente no que respeita às operações de manutenção; ii) resistência – tem elevada capacidade de absorção de energia e tensão exercida pelo meio; iii) permeabilidade – os gabiões exibem uma considerável permeabilidade que é extremamente vantajosa para a estabilidade da estrutura. Pois, não ocorrem pressões hidrostáticas significativas. Esta característica confere grande flexibilidade aos gabiões, sendo também estruturas apropriadas para a estabilização de taludes; iv) durabilidade – possui elevada durabilidade especialmente quando o material que constitui a malha é revestido com PVC (reduz a corrosão); e v) flexibilidade – têm inúmeras aplicações, adaptando-se a várias situações (e.g. obras hidráulicas, controlo de erosão e estabilidade de taludes, entre outras). É oportuno ressaltar que os gabiões suportam grandes assentamentos de terreno.

4. REFERÊNCIAS

André, M., Ramos, P., Matos, J., Dissipação de Energia em Descarregadores de Cheia em Degraus. Aplicação a Descarregadores com Largura Constante e com Paredes Convergentes. *Proceeding do 7º Congresso da Água*, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, APRH, Lisboa. (2004)

Boes, R.M., Characteristics of Skimming Flow Over Stepped Spillways, Discussion, *Journal of Hydraulic Engineering*, **126(11)**, 860-862 (2000).

Bos, M.G., Replogle, J.A. e Clemmens, A.J., *Flow Measuring Flumes For Open Channel System*, 1st Edition, John Wiley & Sons, New York (1984).

Brater, E.F. e King, H.W., *Handbook of Hydraulics*, 6th Edition, McGraw-Hill, New York (1976).

Brosz, D.J., *Irrigation Water Measurement, Irrigation Ditches and Pipelines*, Agricultural Extension Service, University of Wyoming, Bulletin 583 R (1984).

Chanson, H., Self-aerated Flows on Chutes and Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **119(2)**, 220-243 (1993).

Chanson, H., Comparison of Energy Dissipation Between Nappe and Skimming Flow Regimes on Stepped Chutes. *Journal of Hydraulic Research*, **32(2)**, 213-218 (1994a).

Chanson, H., Hydraulics of Skimming Flow Over Stepped Channels and Spillways, *Journal of Hydraulic Research*, **32(2)**, 445-460 (1994b).

Chanson, H. e Montes, J.S., Overflow Characteristics of Circular Weirs: Effect of Inflow Conditions, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, **124(3)**, 152-162 (1998).

Chanson, H., Current Expertise and Experience on Stepped Chute Flows: hydraulics of stepped spillways, in: *Invited Seminar at Kyoto University*, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto (Japão), 27 de Abril (1999).

Chatila, J.G. e Jurdi, B.R., Stepped Spillway as An Energy Dissipater, *Canadian Water Resources Journal*, **29(3)**, 147-158 (2004).

Chow, C.N., *Open channel hydraulics*, McGraw Hill, New York (1959).

Clemmens, A. e Dedrick, A. R., Irrigation Water Delivery Performance, *Journal of Irrigation and Drainage, ASCE*, **110(1)**, 1-13 (1984).

CNLV, *Onsite Stormwater Detention Manual*, City of Noth Las Vegas (CNLV), Las Vegas (1984).

Corcoran, C., *The Proportional Weir: a closer look computational methods in stormwater management*. Division of Continuing Education and the Department of Civil Engineering, Virginia Tech, Virginia (1995).

GDOE, *Georgia Stormwater Management Manual*. Volume 2, Technical Handbook, 1st Edition, Prepared by AMEC Earth & Environmental (formerly the Edge Group), Center for Watershed Protection, Debo & Associates, Jordan Jones & Goulding and Atlanta Regional Commission. Georgia Department of the Environment (GDOE), Georgia, USA (2000).

Graf, W.H e Altinakar, M.S., *Hydraulique Fluviale, Tome 1, Ecoulement Permanent Uniforme et Non Uniforme*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne (1993).

Hill, R., How Good is Your Water Measurement, *Electronic publishing AG/BIE/WM/01*, Utah State University Extention, (1999).

Israelsen, O.W. e Vaughn, E.H., *Irrigation Principles*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York (1962).

Johnson, M., Discharge coefficient analysis for flat-topped and sharp-crested weirs, *Irrigation Science*, **19**, 133-137 (2000).

Kamrath, P., Disse, M., Hammer, M., Köngeter, J., Assessment of Discharge through a Dike Breach and Simulation of Flood Wave Propagation, *Natural Hazards*, **38(1-2)**, 63-78 (2006).

Kraatz, D.B e Mahajan, I.K., Small Hydraulic Structures, *Irrigation and Drainage Paper No. 26/2*, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome (1975).

Massey, B., *Mecânica dos Fluidos*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa (2002).

Matos, J.S., *Emulsão de Ar e Dissipação de Energia do escoamento em Descarregadores em Degraus*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa (1999).

Matos, J., *Dimensionamento de Descarregadores em Degraus para Rearejamento de Cursos de Água*, Material de Apoio ao Curso de Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos, Instituto Superior Técnico, Lisboa (2000).

Meireles, I., Matos, J., Falcão de Melo, J., Altura piezométrica e energia específica do escoamento deslizante sobre turbilhões no pé de descarregadores de cheias em degraus, *Revista Recursos Hídricos*, **26(1)**, 7-15 (2005).

Merriam, J.L., Level Top Canals for Semi-Automation of On-Farm Irrigation and Supply Systems, em: *Water Management For Irrigation and Drainage*. Proceedings of a Speciality Conference of the Irrigation and Drainage Division of ASCE in Reno, NV July 20-22, 217-224 (1977).

Muslu, Y., Lateral Weir flow Model Using a Curve Fitting Analysis, *Journal of Hydraulic Engineering*, **128(7)**, 712-715 (2002).

Naudascher, E., *Hydraulik Der Gerinne und Gerinnebauwerke*, Springer-Verlag, Wien (1987).

NRCS, *Engineering Field Manual For Conservation Practices*, National Research Conservation Service (NRCS), Soil Conservation Service, Engineering Division, Whashington, DC, USA (1984).

Olivera, F., *Course of Hydraulic Engineering Design*, Center for Research in Water Resources (CRWR), University of Texas at Austin (2000).

Peyras, L., Royet, P. e Degoutte, G., Flow and Energy Over Gabion Weirs, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **118(5)**, 707-717 (1992).

Quintela, A., *Hidráulica Geral*, 9ª edição, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa (2005).

Rantz, S.E. et al., *Measurement and Computation of Stream Flow*. Volume 2: Computation of Discharge. Geological Survey Water-Supply Paper 2175. U.S. Geological Survey. U.S. Government Printing Office, Washington D.C (1982).

Rehbock, T., "The River Hydraulic Laboratory of the Technical University of Karlsruhe", in: Freeman, J.R. (Ed.), *Hydraulic Laboratory Practice*, American Society of Mechanical Engineers, New York, 111-242 (1929)

Sandvik, A., Proportional Weirs for Stormwater Pond Outlets, *Civil Engineering, ASCE*, March 1985, 54-56 (1985).

Sardinha, A.M. e Macedo, F.W., 1981, *Hidráulica Florestal*, Instituto Universitário de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real (1981).

USACE, *Hydraulic Design of Spillways*, U.S. Army Corps of Engineers, EM 1110-2-1603, Washington D.C (1990).

USACE-WES, *Corps of Engineers Hydraulic Design Criteria*, United States Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station. Washington D.C (1952).

U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, *Design of Small Canal Structures*. Denver, Colorado (1987).

USBR, *Water Measurement Manual*, 3rd Edition, U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado (1997).

Williams, M.L., Reddy, J.M. e Hasfurther, V., *Calibration of Long Crested Weir Discharge Coefficient*, Technical Report, Wyoming Water Resources Center, University of Wyoming, Laramie, Wyoming (1993).