

DIMENSIONAMENTO DO SANGRADOURO DE UMA BARRAGEM COM VERTEDOR LABIRINTO

* Walmir Fernando Duarte Jardim

No presente artigo é apresentado o cálculo de um muro vertedor tipo labirinto, segundo os resultados experimentais obtidos por Magalhães, que foi proposto como alternativa vantajosa a um sangradouro de superfície, com muro creager, que estava previsto para uma barragem ora em construção no estado do Ceará.

1 – INTRODUÇÃO

Na concepção do arranjo das obras de uma barragem de terra ou enrocamento, a escolha do dispositivo de sangria é de importância primordial para a viabilidade econômica de todo o empreendimento.

Via de regra, busca-se como primeira alternativa a locação do sangradouro em uma sela topográfica nas ombreiras do maciço ou ao longo da bacia hidráulica para evitar grandes e dispendiosas escavações. Se identificado um local como esse verifica-se através de sondagens mecânicas as características geológicas do substrato rochoso. Caso constata-se a presença de rocha sã acima da cota de sangria a indicação de um canal livre tipo "soleira espessa" poderá ser a mais adequada (ver figura 1). Caso a rocha sem alterações situe-se pouco abaixo da cota de sangria, digamos até 3,0m, poderá ser viável a escolha de um muro vertedouro tipo "Creager", de tal forma que a montante do muro (região de baixa velocidade de fluxo) a escavação seja realizada próxima a cota de sangria e, que a jusante (região de fluxo rápido) seja escavado até a superfície da rocha resistente a erosão (figura 2).

No entanto a adoção dessas alternativas só será viável caso seja possível o reaproveitamento do material de escavação do sangradouro no maciço da barragem ou que o volume de bota-fora seja inexpressivo. No entanto se a escavação do canal de superfície represente um elevado volume não utilizável, novas alternativas devem ser analisadas. Entre elas o emprego de um muro vertedouro tipo labirinto poderá ser extremamente interessante.

O vertedouro labirinto é caracterizado pelo eixo, em planta, na forma de zig-zag tal que o fluxo d'água se dá por um comprimento de crista maior do que o de um vertedor frontal e retilíneo que ocupe a mesma largura do canal. A soleira é, em geral, constituída por muros verticais delgados, cujo U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station (W.E.S.).

A finalidade do uso do vertedor labirinto é o aumento da descarga, por unidade de largura de canal, para a mesma lâmina de sangria. A sua eficiência em escoar grandes fluxos com uma lâmina relativamente baixa torna-o ideal em situações onde a lâmina máxima é limitada a baixos valores. Esse tipo de vertedor também permite que o nível máximo máximo do reservatório permaneça na mesma cota e o da soleira seja alteada, aumentando a capacidade de acumulação do reservatório sem acréscimo do maciço da barragem.

A seguir descreve-se um caso real de uma obra atualmente em construção no estado do Ceará, onde

* M. Sc. Coppe/UFRJ – Professor do Departamento de Engenharia Civil da UNIFOR

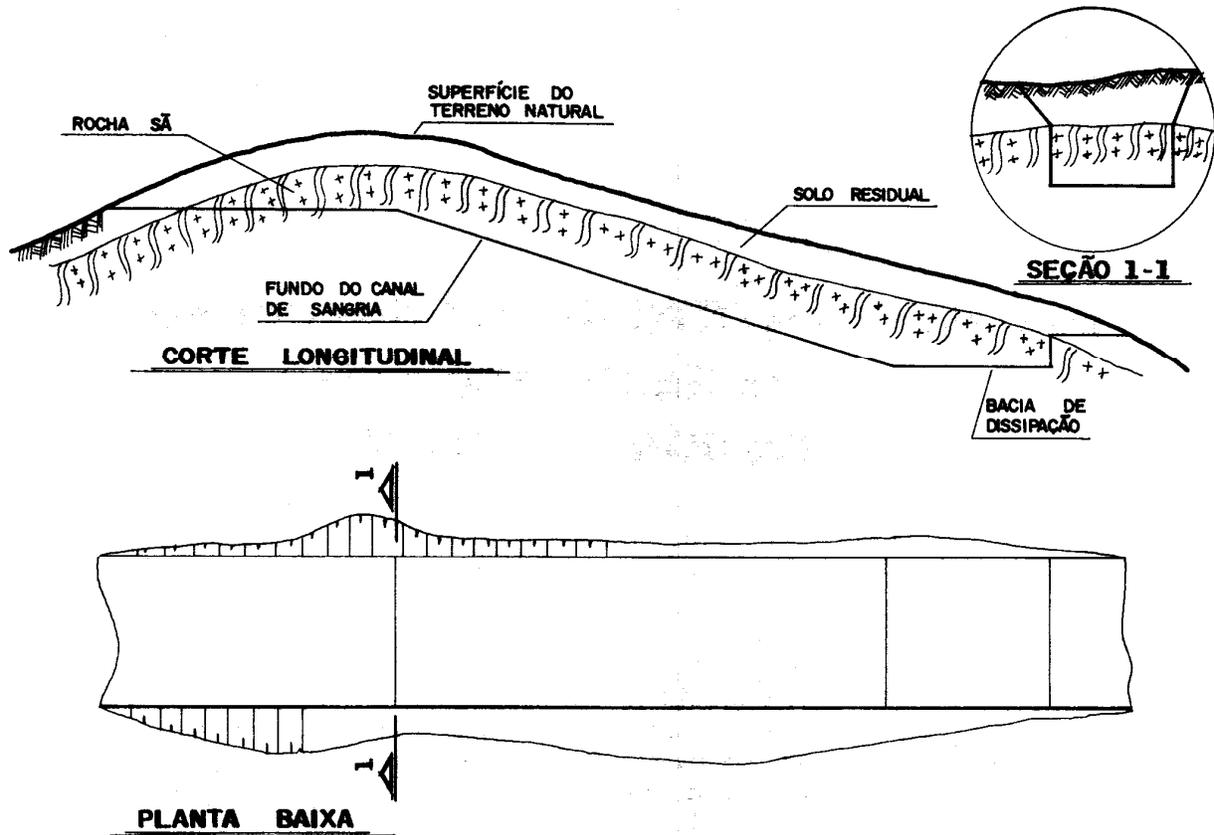


Figura 1: Detalhes de um sangradouro tipo soleira Espessa sem revestimento

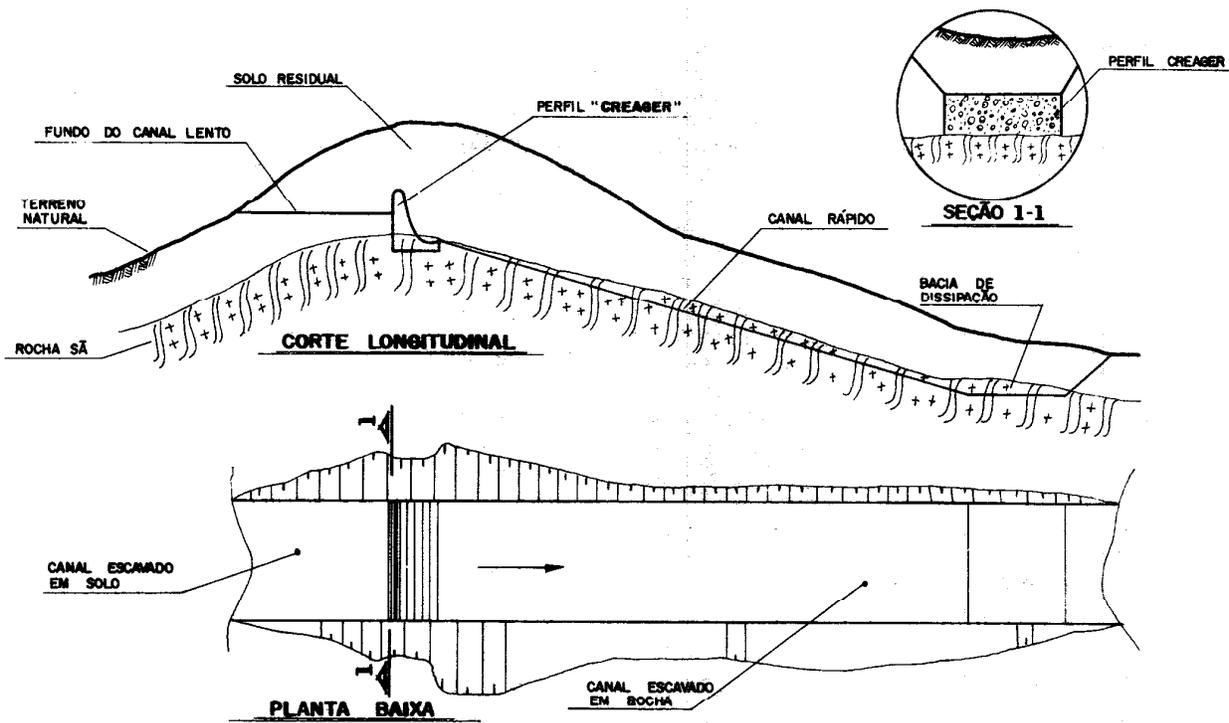


Figura 2: Detalhes de um sangradouro com vertedor tipo Creager

a substituição da concepção do sangradouro por outro constituído de um canal de superfície com muro vertedouro em labirinto acarretou na redução dos custos totais. Apresenta-se também o método de cálculo adotado para o seu dimensionamento.

2 – HISTÓRICO DA OBRA

A finalidade da obra é a criação de um reservatório para regularização do rio que cruza a região e suprir d'água perímetros irrigados, situados a jusante do eixo, já implantados ou em implantação.

Para isso projetou-se um maciço de terra com um comprimento de 195,0 m, envolvendo um movimento de terra de 154.000,0 m³, com altura máxima de 25,5 m e coroamento na cota 122,00 m. Admitiu-se uma folga, desnível entre o coroamento e o nível máximo maximum do reservatório, de 1,25 m para segurança contra as ondas e eventuais imprecisões dos cálculos hidráulicos.

O sangradouro foi idealizado numa sela topográfica a 200,0 m da ombreira esquerda constituindo-se de um canal de 60,0 m de largura com trecho em nível, muro tipo Creager e em seguida um canal rápido com bacia de dissipação. Baseado nas poucas informações geotécnicas do local projetou-se um revestimento para o canal rápido constituído por placas de concreto atirantadas e drenagem de combate a subpressão hidrostática. O dispositivo de sangria foi calculado para escoamento de uma vazão de 603,88 m³/s com uma lâmina de 2,83 m.

O volume de serviços estimado para a realização desse dispositivo de sangria era o seguinte:

- volume de escavação: 340.000 m³.
- concreto para as placas: 9.800 m³.
- extensão da drenagem de alívio: 3.400 m.
- número total de tirantes: 8.500 m.

O custo total do sangradouro representava cerca de 60% de todo o empreendimento.

Iniciada a escavação para implantação desse sangradouro verificou-se a existência de material rochoso alterado, não detectado nas exíguas sondagens de projeto, cujo desmonte elevariam ainda mais os custos do sangradouro.

Nesse ponto foram interrompidas as obras e novas soluções foram analisadas até que optou-se pelo emprego de um vertedouro em labirinto em canal mais estreito. A escolha desse dispositivo vertedor possibilitou a redução em 15,00 m (25%) na largura do canal, a redução da lâmina para a vazão máxima de 2,83 m para 1,62 m e, resguardando a folga anteriormente adotada, elevar a soleira de sangria (topo do vertedor) acarretando um ganho de 41% no volume de acumulação do reservatório. Com isto os serviços para a implantação do sangradouro passaram a ser os seguintes:

- volume de escavação: 217.000 m³.
- concreto para as placas: 5.900 m³.
- extensão da drenagem de alívio: 910 m.
- comprimento total de tirantes: 4.800 m.

3 – CÁLCULO DO VERTEDOR DE SOLEIRA EM LABIRINTO

Primeiramente adotou-se valores para a largura do canal fazendo-o igual a 30, 0; 35, 0; 40,0 e 45,0 m.

Para cada largura do canal estabeleceu-se uma geometria trapezoidal, vista em planta, para cada módulo do vertedor tal que obedecesse as seguintes condições preconizadas por Magalhães (1) para evitar o afogamento da soleira;

- O ângulo (α) formado pela parede lateral com a direção preferencial de fluxo, deve ser maior ou igual a 80% de α máx. O valor de α máx é dado pela expressão: $\alpha \text{ máx} = \text{arc sen}(W/L)$. Onde W = largura do módulo; L = desenvolvimento total do módulo;
- A relação entre o desenvolvimento total do módulo (L) e a largura do módulo (W) deve estar compreendida entre 1 e 8; ou seja: $1 \leq L/W \leq 8$.

Fez-se variar, para cada caso, a altura do muro vertedor (p) adotando valores superiores a 2,0 m de forma a atender a outras duas condições de não afogamento constatadas por Magalhães, que são:

- A relação entre a largura do módulo (W) e a altura do muro (p) deve ser superior ou igual a 2; ou seja $W/p \geq 2$;
- A relação entre a lâmina d'água vertente e a altura do muro deve estar compreendida entre 0,2 e 0,6; ou seja $0,2 \leq h/p \leq 0,6$.

Os critérios finais para a escolha do muro foram que: – o canal tivesse menor largura ou seja menor volume de escavação – o muro do vertedor labirinto tivesse a maior cota de soleira possível para maior acumulação do lago reservatório – o muro tivesse a menor altura para economia de concreto – que o nível máximo maximum do reservatório não ultrapassasse o estabelecido no projeto.

Chegou-se então a um vertedor labirinto com as seguintes características (figura nº 3):

- muro formado por 6 módulos ($n = 6$) de forma trapezoidal em planta;
- desenvolvimento total de um módulo (L) igual a 39,0 m.
- largura do módulo (W) igual a 7,50 m.
- altura do muro (p) de 3,0 m, espessura de 0,40 m e topo de forma circular.
- dimensões em planta $a = 0,50$ m; $b = 18,50$ m e $c = 18,29$ m.
- ângulo = 8,55°.

A seguir apresenta-se o roteiro de cálculo para a determinação da lâmina sobre o muro vertedor (h) para escoamento da vazão máxima prevista de 603,88 m³/s. Tal roteiro baseou-se no cálculo de um dispositivo semelhante empregado na barragem de Dungo, na República de Angola, apresentado por Magalhães (1).

As etapas consistem em:

- Arbitrar valores para a altura da lâmina (h);
- Calcular a razão (h/p);
- Calcular a razão (L/W);
- Entrar no a'baco experimental (figura nº 4)

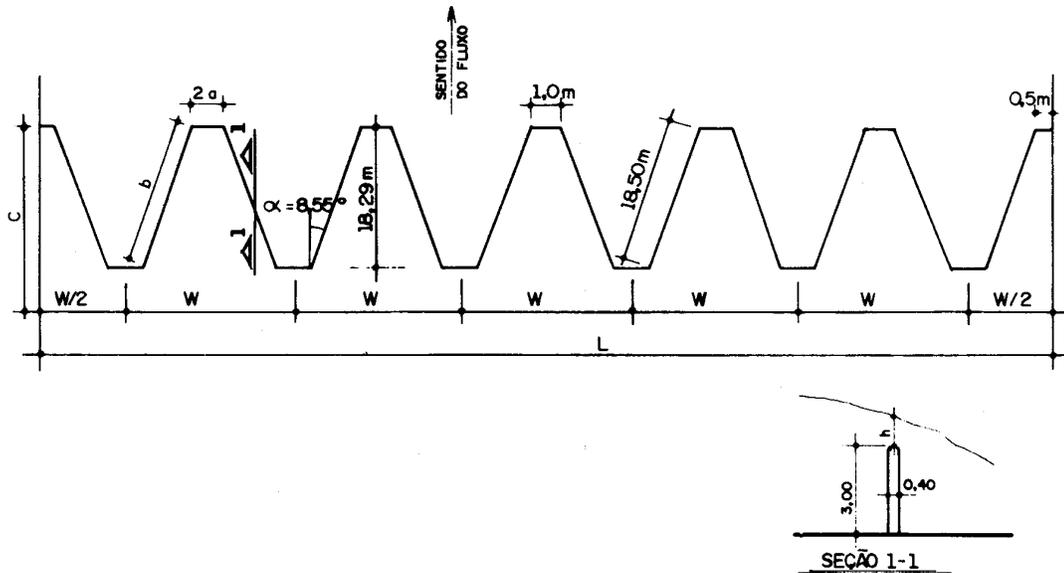


Figura 3: Esquema do vertedouro tipo Labirinto

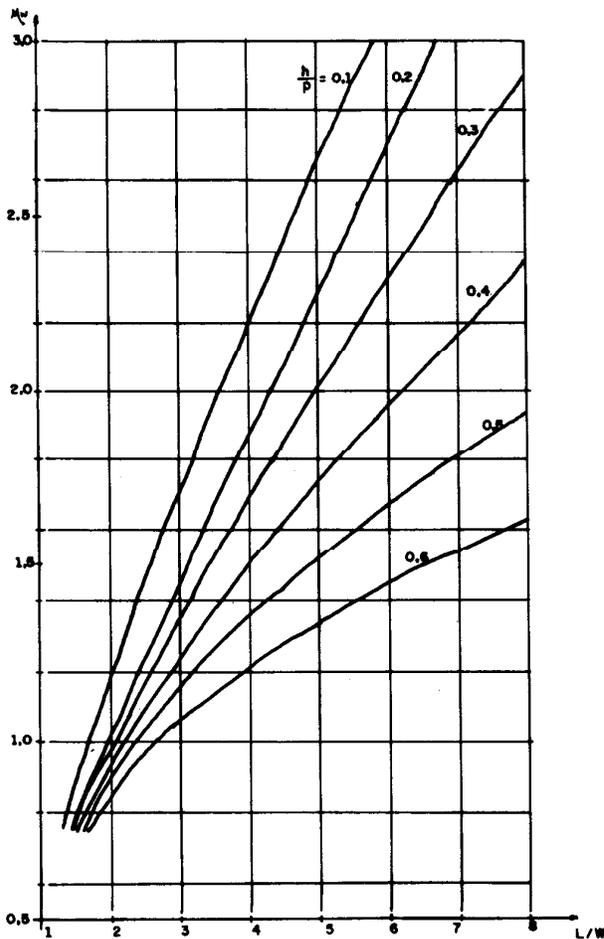


Figura 4: Coeficiente de vazão de soleira com a forma Trapezoidal em Planta

com h/p e L/W e obter o valor do coeficiente da vazão (M_w);

e) Calcular a vazão escoada por um módulo pela expressão:

$$Q_m = M_w \cdot W \sqrt{2g} \cdot h^{3/2} \text{ (m}^3\text{/s);}$$

f) Calcular a vazão total $Q_t = Q_m \times n$, onde n é o número de módulos;

g) Construir um gráfico para cada par de valores: altura da lâmina arbitrada (h); vazão total (Q_t);

h) Entrar no gráfico com o valor da vazão máxima prevista ($Q_{m\acute{a}x}$) e obter a correspondente altura da lâmina vertedoura.

Para o muro labirinto estudado para a substituição do muro frontal projetado obteve-se os seguintes valores:

$$M = \frac{L}{W} = \frac{45,0}{7,5} = 6 \text{ módulos}$$

$$\frac{L}{W} = \frac{39,0}{7,50} = 5,20 \text{ -- atendendo a condição (ii)}$$

$$\frac{W}{P} = \frac{7,5}{3,0} = 2,50 \text{ -- atendendo a condição (iii)}$$

$$\text{tg } \alpha = \frac{2,75}{18,29} \dots \alpha = 8,55^\circ$$

$$\text{sen } \alpha_{\text{máx}} = \frac{7,5}{39,0} = 0,192 \dots \alpha_{\text{máx}} = 11,08^\circ$$

$$\frac{\alpha}{\alpha_{\text{máx}}} = \frac{8,55}{11,08} = 0,77 \approx 0,8 \text{ atendendo praticamente a condição (i)}$$

Para $L/W = 5,20$ e $p = 3,0$ m pode-se com ajuda do abáco da figura nº 4 chegar aos valores da tabela 1.

TABELA 1 – CÁLCULO DA VAZÃO DO VERTEDOR PARA CADA LÂMINA ADOTADA				
h	h/p	Mw	$Q_m = Mw\sqrt{2gh^{3/2}}$	$Q_t = n Q_m$
0,30	0,1	2,67	14,57	87,0
0,60	0,2	2,38	36,75	220,48
0,90	0,3	2,09	59,28	355,69
1,20	0,4	1,79	78,17	469,01
1,50	0,5	1,56	95,21	571,25
1,80	0,6	1,36	109,11	654,65

A partir dos valores (h) e (Q_t) traçou-se o gráfico da figura nº 5 onde, para a vazão máxima de 603,88 m^3/s , obteve-se a altura da lâmina vertedouro de 1,62m.

4 – RESUMO

O emprego de canal de superfície dotado de muro vertedor tipo labirinto pode ser a solução adequada para sangradouros de barragens onde a vazão máxima efluente não alcance valores muito elevados. No caso da obra analisada o emprego desse dispositivo permitiu a redução do volume de escavação do sangradouro e o aumento da capacidade de acumulação do reservatório, sem alteração da folga e da cota do coroamento do maciço. Isto representou uma economia apreciável no custo total da obra.

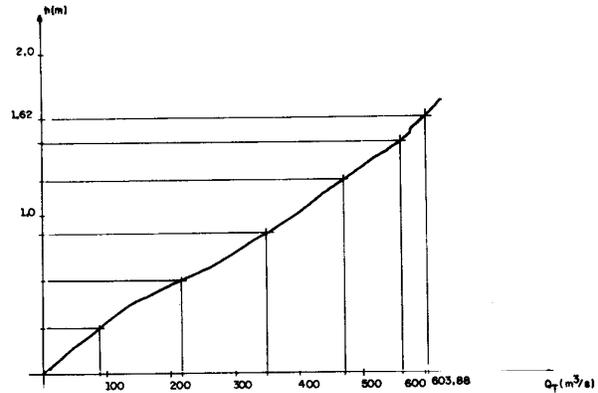


Figura 5: Relação Altura da Lâmina x Vazão Total $p/p = 3,0$ m e $L = 45,0$ m

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MAGALHÃES, A. P. — “O Descarregador em labirinto da barragem do Dungo” — Simpósio Luso-Brasileiro sobre simulação e modelação em hidráulica e recursos.
2. CASSIDY, J. J.; Gardner, A. C.; Peascock, R. T. — “Bordman Labyrinth — Crest Spillway” — Journal of Hydraulic Engineering, vol. 111, nº 3, Março, 1985.
3. HAY, NO; TAYLOR, G. — “Performance and Design of Labyrinth Weirs” — Journal of Hydraulic Division, vol. 96, Novembro 1970.