

Capítulo 79

Orifício e vertedor e curva cota-volume

“Nunca podemos alcançar a verdade, só podemos conjecturar”

Karl Popper

SUMÁRIO

Ordem	Assunto
79.1	Introdução
79.2	Orifício
79.3	Entrada nos orifícios
79.4	Captação com orifícios
79.5	Orifício de pequenas dimensões
79.6	Orifício retangular de grandes dimensões
79.7	Orifício circular de grandes dimensões
79.8	Considerando a velocidade de chegada em um canal de um orifício de grandes dimensões
79.9	Considerando a velocidade de chegada em um canal de um orifício de pequenas dimensões
79.10	Vertedor de soleira normal par vazão Q
79.11	Vertedor retangular
79.12	Vertedor retangular de soleira espessa adotada pelo DAEE São Paulo
79.13	Vertedor triangular
79.14	Vertedor circular em parede vertical
79.15	Vertedor de parede espessa
79.16	Extravasor de barragens: perfil Creager
79.17	Perfil Creager
79.18	Formulação matemática da curva cota-volume do reservatório
79.19	Análise de incerteza do orifício
79.20	Vertedor proporcional
79.21	Bibliografia e livros consultados

Capítulo 79-Orifício e vertedor e curva cota-volume

79.1 Introdução

As estruturas de controle estão classificadas em dois tipos básicos:

- *orifício* e
- *vertedor*.

79.2 Orifício

Um orifício no sentido hidráulico é uma abertura de forma regular praticada na parede ou no fundo de um recipiente, através da qual sai o líquido contido nesse recipiente, mantendo-se o contorno completamente submerso, isto é, abaixo da superfície livre (Lencastre, 1983). Um orifício pode possuir qualquer forma, tal como, circular, retangular, quadrado, etc.

Na classe do orifício, segundo (Akan,1993) estão inclusos os tubos e galerias curtas, de maneira que a saída não está submersa.

A descarga de um orifício de qualquer seção pode ser determinada usando:

$$Q = C_d \cdot A_0 (2 g h)^{0,5} \quad \text{(Equação 79.1)}$$

Sendo:

Q= vazão de descarga (m³/s);

A₀ = área da seção transversal do orifício (m²);

g= aceleração da gravidade g=9,81 m/s² ;

h= altura da água sobre a geratriz superior da galeria ou da tubulação (m);

C_d= coeficiente de descarga do orifício (adimensional). Geralmente adotado C_d=0,62

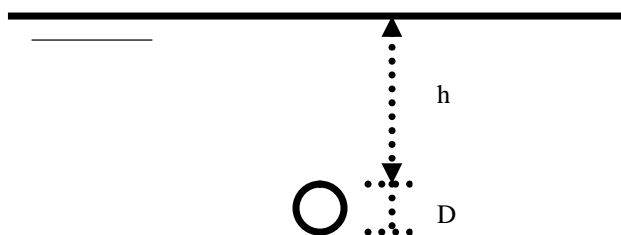


Figura 79.1- Esquema de um orifício de seção circular

A Equação (79.1) só é válida quando **h/D > 1,2**. Entretanto na prática conforme (Akan,1993) mesmo para pequenas alturas de h é usada a Equação (79.1).

Dica - o coeficiente de descarga médio de um orifício é Cd= 0,62.

Para um tubo de galeria de diâmetro D a área é:

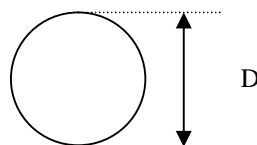


Figura 79.2- Esquema de um orifício de seção circular

$$A_0 = \pi D^2 / 4 \quad \text{(Equação 79.2)}$$

Exemplo 79.1- orifício de seção circular

Considerando o coeficiente de descarga médio usado frequentemente $C_d=0,62$ segundo (Wanielista,1997), sendo a altura de água de 3,00m e tubo de 0,60m. Calcular a descarga em m^3/s .

$$A_0 = \pi D^2 / 4 = \pi \cdot 0,60^2 / 4 = 0,2827m^2$$
$$Q = C_d \cdot A_0 \cdot (2 g h)^{0,5} = 0,62 \cdot 0,2827 \cdot (2 \cdot 9,81 \cdot 3,00)^{0,5} = 1,34m^3/s$$

Orifício retangular

Para uma galeria retangular, sendo b a largura e D a altura a área é:

$$A_0 = b \cdot D \quad \text{(Equação 79.3)}$$

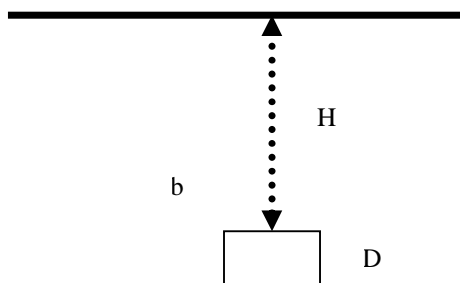


Figura 79.3- Esquema de um orifício de seção circular

Exemplo 79.2- Esquema de um orifício de seção retangular

No dimensionamento do piscinão do Pacaembu, (Canholi,1995) usou para a saída de controle um orifício retangular com 1,00m de largura por 0,50m de altura. Foi usado o coeficiente de descarga médio $C_{d0}=0,62$.

A altura h desde a geratriz inferior do orifício até o vertedor retangular superior é 4,65m. Calcular a vazão máxima do orifício.

$$Q = C_d \cdot A_0 \cdot \sqrt{2 g h} = 0,62 \cdot (1,00 \cdot 0,50) \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 4,65} = 2,96m^3/s$$

79.3 Entrada nos orifícios

A entrada nos orifícios pode ser com ou sem chanfro, conforme mostra a Figura (79.4).

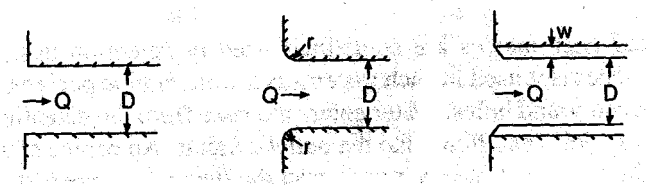


Figura 79.4- Tipos de entrada das galerias- quadrado ($r=0$), redondo e chanfrado
 Fonte: (Akan 1993).

Em função de r/D sendo "r" da Figura (79.4) e de h/D temos os valores do coeficiente de descarga C_d na Tabela (79.1) e Tabela (79.2) em função do ângulo do muro de ala e h/D .

Tabela 79.1-Coeficiente de descarga C_d em orifícios com paredes verticais

h/D	r/D ou W/D						
	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,14
1,4	0,44	0,46	0,49	0,50	0,50	0,51	0,51
1,5	0,46	0,49	0,52	0,53	0,53	0,54	0,54
1,6	0,47	0,51	0,54	0,55	0,55	0,56	0,56
1,7	0,48	0,52	0,55	0,57	0,57	0,57	0,57
1,8	0,49	0,54	0,57	0,58	0,58	0,58	0,58
1,9	0,50	0,55	0,58	0,59	0,60	0,60	0,60
2,0	0,51	0,56	0,59	0,60	0,61	0,61	0,62
2,5	0,54	0,59	0,62	0,64	0,64	0,65	0,66
3,0	0,55	0,61	0,64	0,66	0,67	0,69	0,70
3,5	0,57	0,62	0,65	0,67	0,69	0,70	0,71
4,0	0,58	0,63	0,66	0,68	0,70	0,71	0,72
5,0	0,59	0,64	0,67	0,69	0,71	0,72	0,73

Fonte: (Bodhaine,1976 in Akan,1993)

Tabela 79.2- Orifício - Coeficiente de descarga C_d para condutos extravasores com muros de ala

h/D	Ângulo do Muro Ala				
	30°	45°	60°	75°	90°
1,3	0,44	0,44	0,43	0,42	0,39
1,4	0,46	0,46	0,45	0,43	0,41
1,5	0,47	0,47	0,46	0,45	0,42
1,6	0,49	0,49	0,48	0,46	0,43
1,7	0,50	0,50	0,48	0,47	0,44
1,8	0,51	0,51	0,50	0,48	0,45
1,9	0,52	0,52	0,51	0,49	0,46
2,0	0,53	0,53	0,52	0,49	0,46
2,5	0,56	0,56	0,54	0,52	0,49
3,0	0,58	0,58	0,56	0,54	0,50
3,5	0,60	0,60	0,58	0,55	0,52
4,0	0,61	0,61	0,59	0,56	0,53
5,0	0,62	0,62	0,60	0,58	0,54

Fonte: (Bodhaine,1979 in Akan, 1993)

Exemplo 79.3- orifício de seção circular com chanfro de entrada de raio de 6cm

Considerando um orifício com diâmetro de 1,00m, paredes verticais e com e que o raio $r=0,06m$. Calcular $Q=?$

Usando a Tabela (79.1) com $r/D = 0,06/1,00 = 0,060$ e supondo $h=4,00m$ e $h/D=4,00/0,60 =6,66$. Portanto temos $K_0= 0,70$.

79.4 Captação com orifício

Algumas vezes devido a pouca vazão são feitas captações om tubos na vertical com orifícios espaços.

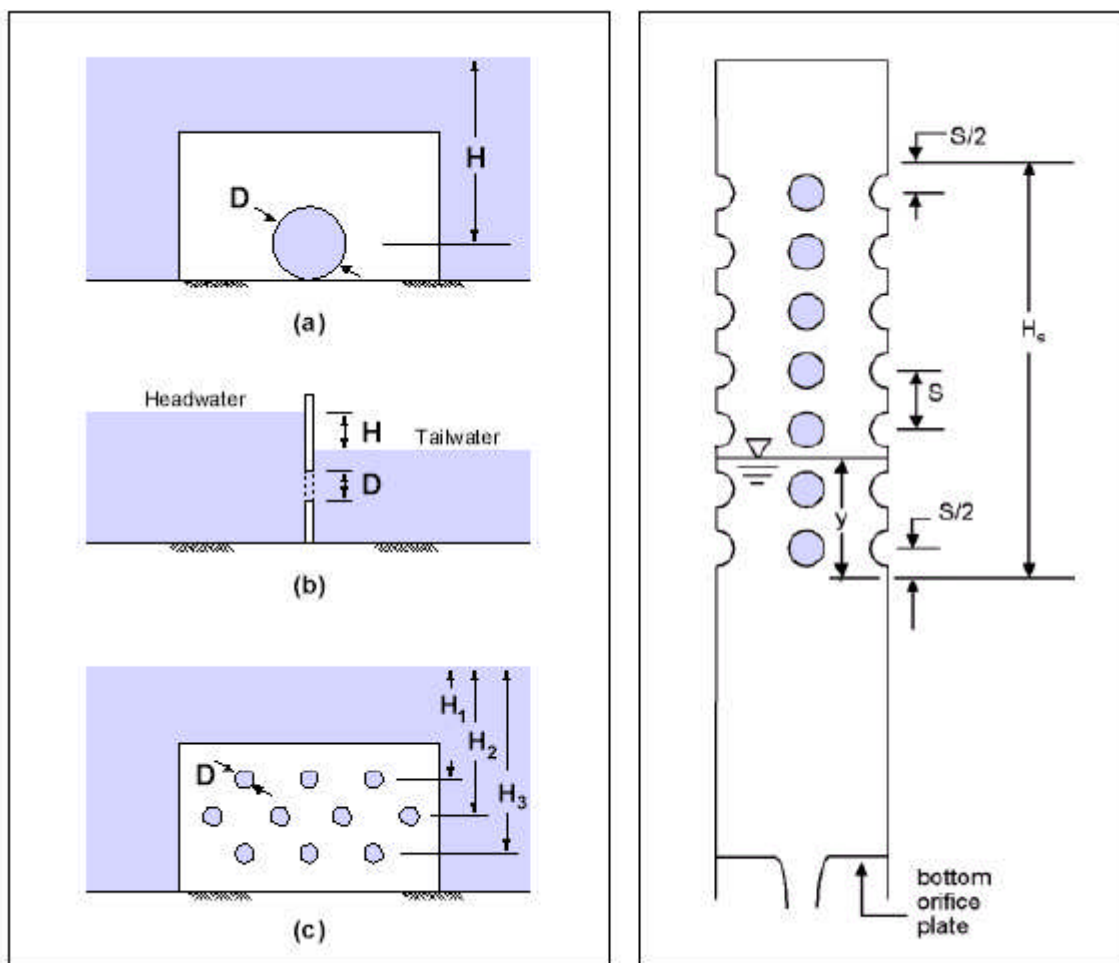


Figura 79.5- Orifício com varias perfurações. Fonte: Georgia, 2001

Existe uma espécie de torre de captação com orifícios conforme se pode ver na Figura (79.1). Conforme Georgia, 2001 em estudos baseados de McEnroe, 1988 podemos obter a vazão da torre com orifícios usando a seguinte equação:

$$Q= C_d \cdot (2A_p/3H_s) (2.g)^{0,5} \cdot H^{3/2}$$

Sendo:

Q = vazão (m^3/s)

C_d = 0,62

$g=9,81m/s^2$ = aceleração da gravidade

A_p = área da seção transversal de todos os orifícios (m^2)

H_s = distância de metade do diametro ($S/2$) do orifícioi mais baixo para a metade do orfício mais alto. É a distância entre o orifício mais baixo e o mais alto, descontado o diâmetro.

H = altura do nível de água até a média dos orifícios (m)

79.5 Orifício de pequenas dimensões

Orifício segundo Lencastre, 1983 é uma abertura de forma regular praticada na parede ou no fundo de um recipiente, através da qual sai o líquido contido nesse recipiente, mantendo-se o contorno completamente submerso, isto é, abaixo da superfície livre.

Esclarecemos que o orifício não é uma tubulação longa e sim uma abertura na parede.

Existem orifícios de parede delgada e parede espessa e orifícios de pequena dimensões e de grandes dimensões.

A equação do orifício é seguinte:

$$Q = C_d \times A \times (2gh)^{0,5}$$

Sendo:

Q = vazão (m^3/s)

H = altura no orifício (m)

A =área da secção transversal do tubo (m^2)

C_d = coeficiente de descarga do orifício= 0,62

$g= 9,81m/s^2$

79.6 Orifício retangular de grande dimensões

Segundo Novaes Barbosa, 2003 quando as dimensões do orifício não podem ser desprezadas em presença da carga h o orifício diz-se de *grandes dimensões*.

Na Figura (79.2) mostramos um orifício retangular de grandes dimensões de largura L .

$$Q = (2/3) \times C_d \times L \times (2g)^{0,5} \times (H_1^{3/2} - H_2^{3/2})$$

Sendo:

Q = vazão (m^3/s)

C_d = 0,62

$g= 9,81m/s^2$

L = largura do orifício retangular (m)

H_1 =altura da água acima da base inferior do orifício (m)

H_2 = altura da água acima da base superior do orifício (m)

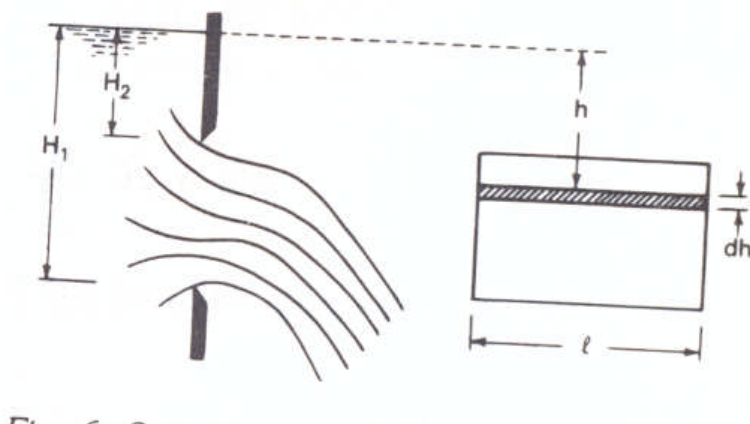


Figura 79.6- Orifício retangular de grandes dimensões
 Fonte: Novais-Barbosa, 2003

79.7 Orifício circular de grande dimensão

O orifício circular de grande dimensão é calculado conforme Figura (79.3) sendo a altura H a carga até o meio do orifício.

$$Q = C_d \times M \times S (2gH)^{0,5}$$

Sendo:

Q= vazão (m³/s)

C_d= 1,00, pois como o orifício é grande não há praticamente contração.

M= fornecido pela Tabela (27.2)

S= área do orifício (m²)

H= altura da superfície da água até o centro da tubulação (m)

Tabela 27.2- Valores de M em função de H/2R sendo R o raio

H/ 2R	M
0,5	0,960
0,8	0,987
1,4	0,996
3,0	0,999

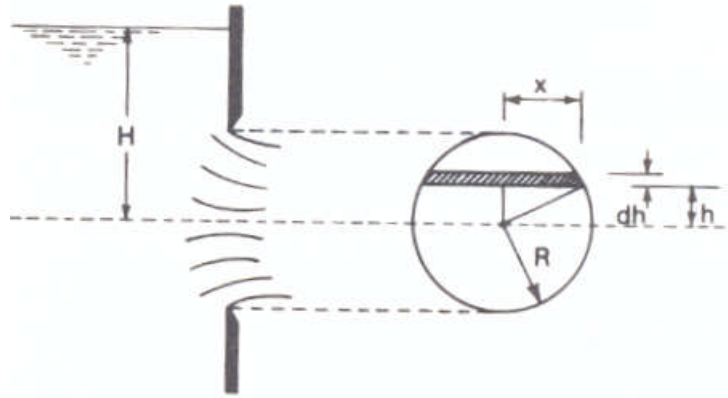


Figura 79.7- Orifício circular de grandes dimensões
Fonte: Novais-Barbosa, 2003

79.8 Considerando a velocidade de chegada em um canal de um orifício de grandes dimensões

Quando um orifício é de grande dimensão, como informa Novais Barbosa, 2003 nem sempre a velocidade a montante se pode considerar nula como foi admitido nos itens anteriores.

Um caso frequente é um canal em que na extremidade tem um orifício de grande dimensão e neste caso deve ser considerada a velocidade da água no canal.

A equação geral é:

$$Q = (2/3) \times C_d \times L \times (2 \cdot g)^{0,5} [(H_1 + V_o^2/2g)^{3/2} - (H_2 + V_o^2/2g)^{3/2}]$$

Sendo:

Q= vazão (m³/s)

C_d= coeficiente de descarga

L= largura do orifício (m)

g= aceleração da gravidade =9,81m/s²

H₁=altura da água acima da base inferior do orifício (m)

H₂= altura da água acima da base superior do orifício (m)

V_o= velocidade da água no canal (m/s)

79.9 Considerando a velocidade de chegada em um canal de um orifício de pequenas dimensões

Neste caso o orifício de pequenas dimensões está no fim de um canal com velocidade V_0 .

$$Q = C_d \times S [(2g (h + V_0^2/2g))]^{0,5}$$

Sendo:

Q = vazão (m^3/s)

S = area da seção do orifício (m^2)

g =aceleração da gravidade= $9,81m/s^2$

h = altura da superfície até o centro do orifício (m)

V_0 = velocidade da água no canal.

79.10 Vertedor de soleira normal para a vazão Q

O vertedor de soleira normal é empregado para o escoamento de grandes vazões.

A carga medida com relação a crista e correspondente à vazão Q_d é designada por carga de projeto ou de definição da soleira h_D .

Entretanto o vertedor poderá funcionar para cargas diferentes do projeto, produzindo-se sobrepressões ou depressões ao longo da soleira que podem chegar a valores elevados Figura (79.4).

Uma expressão clássica para delinear o perfil da vertente de soleira normal para jusante da crista é devida a Creager e fácil de se encontrar (ver Lencastre,1983 ou Azevedo Netto,1998 p. 99).

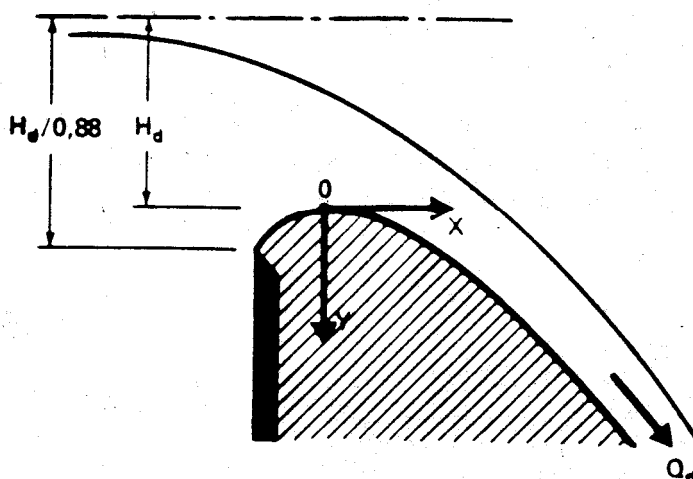


Figura 79.8-Vertedor de soleira normal para vazão Q_d

Fonte: Notas de aula da EPUSP, prof. dr. Paolo Alfredini, 1998, p. 26, 1998

O vertedor de soleira normal deve ser dimensionada pela Equação (79.4) conforme (Akan,1993).

$$Q = k_w L (2g)^{0,5} h^{3/2} \quad \text{(Equação 79.4)}$$

onde:

k_w = coeficiente de vazão;

L = comprimento da crista do vertedor;

g = aceleração da gravidade

h = lâmina d'água sobre a crista

Os coeficientes k_w estão na Tabela (79.3) em função de h/h_D sendo h_D a altura da crista do vertedor para a vazão de projeto Q_d .

Para cargas h menores que a carga de projeto h_D teremos coeficientes de escoamento diferentes (cuidado para não esquecer).

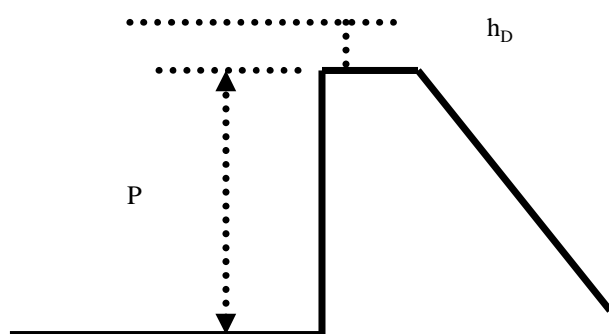


Figura 79.9- Perfil Creager

Para usar a Tabela (79.3) tem que ser obedecida a relação $P/h_D > 1$, sendo P a altura do vertedor e h_D a altura da crista de projeto do vertedor em relação ao topo do mesmo. Assim um vertedor com $P=4,5\text{m}$ e $h_D=1,50\text{m}$ a relação $P/h_D = 4,5/1,5 = 3 > 1$.

Tabela 79.3- Vertedor retangular - Coeficientes de descarga k_w para vertedores em ogiva

h/h_D	k_w
0,2	0,41
0,4	0,44
0,6	0,46
0,8	0,48
1,0	0,49
1,2	0,50

Fonte: Akan,1993

Exemplo 79.4

Calcular a vazão no vertedor retangular com largura $L=2,00\text{m}$, altura de $1,60\text{m}$ e altura do fundo de $4,65\text{m}$.

$h/h_D = 1,60/1,60 = 1,00$ e entrando na Tabela (79.3) achamos $k_w = 0,49$. Usando Equação(79.4) temos:

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$Q_d = k_w L \sqrt{2g} h^{3/2} = 0,49 \cdot 2,00 \sqrt{2g} 1,6^{3/2} = 8,79 \text{ m}^3/\text{s}$$

Q_d é a vazão de projeto do vertedor. Para alturas menores que h_D teremos diferentes valores de k_w conforme a Tabela (79.3).

Exemplo 79.5 – orifício e vertedor retangular de soleira normal

Seja um reservatório de detenção com orifício de diâmetro $D=0,80\text{m}$ e a $P=4,50\text{m}$ do fundo até a soleira do vertedor de soleira retangular com largura $L=2,00\text{m}$ e altura $h_D=1,50\text{m}$.

Calcular a curva da descarga do orifício e do vertedor em função da altura da água no reservatório.

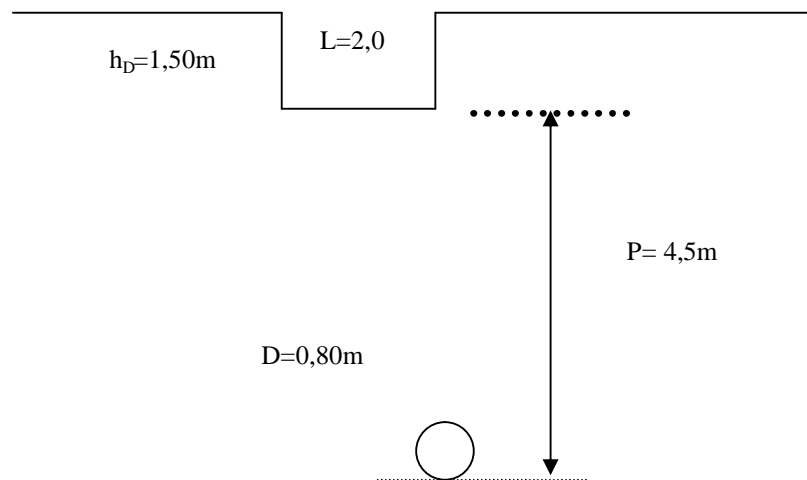


Figura 79.10- Esquema de vertedor tipo orifício no fundo e acima vertedor retangular.

Para o orifício usamos a Equação (79.1) com duas variáveis, uma a altura h e outra o valor do coeficiente de descarga C_d que varia em função da relação h/D e também da relação r/D dependendo do raio do chanfro na entrada do mesmo.

$$Q = C_d A_0 (2g h)^{0,5}$$

Como $D=0,80\text{m}$ a área A_0 será:

$$A_0 = \pi D^2 / 4 = \pi \cdot 0,80^2 / 4 = 0,50\text{m}^2$$

O valor de h irá variar de 0 até $4,50\text{m}$.

Escolhido o raio do chanfro, por exemplo, de $3\text{cm}=0,03\text{m}$ teremos:

$$r/D = 0,03/0,80 = 0,04$$

Com o valor de $r/D=0,04$ e $h/D = (4,5-0,8)/0,8 = 4,65$ entramos na Tabela (79.1) e achamos os valores de $C_d=0,67$, o qual será constante.

Para o vertedor retangular procedemos da mesma forma, mas usando a Equação (79.4).

$$Q = k_w L (2g)^{0,5} h^{3/2}$$

A largura do vertedor retangular $L=2,00\text{m}$ e portanto o valor da descarga Q varia em função de k_w e da altura h .

Para achar os valores de k_w devemos usar a Tabela (79.4) onde entram as relações h/h_D , não esquecendo que $h_D = 1,50\text{m}$ é altura do vertedor. Para $h/h_D = 1,00$ achamos $k_w=0,49$ o qual vamos supor constante.

A Tabela (79.4) foi feita para aplicação das duas fórmulas orifício e vertedor retangular. O gráfico da Figura (79.4) mostra como fica a curva da descarga em m^3/s .

Tabela 79.4- Descarga final resultante do orifício e do vertedor em função da elevação

Altura da água h (m)	Orifício		Vertedor		Soma vazões (m ³ /s)
	coeficiente de escoamento K_0	Q (m ³ /s)	Coeficiente k_w	Q (m ³ /s)	
0		0			0
0,25		0,75			0,75
0,50		1,05			1,05
0,75		1,29			1,29
1,00		1,49			1,49
1,25		1,67			1,67
1,50		1,83			1,83
1,75		1,97			1,97
2,00		2,11			2,11
2,25		2,24			2,24
2,50		2,36			2,36
2,75		2,47			2,47
3,00		2,58			2,58
3,25	0,67	2,69			2,69
3,50		2,79			2,79
3,75		2,89			2,89
4,00		2,98			2,98
4,25		3,08			3,08
4,50		3,16		0	3,16
4,75		3,25		0,54	3,79
5,00		3,34		1,53	4,87
5,25		3,42		2,82	6,24
5,50		3,50	0,49	4,34	7,84
5,75		3,58		6,06	9,64
6,00		3,65		7,97	11,62

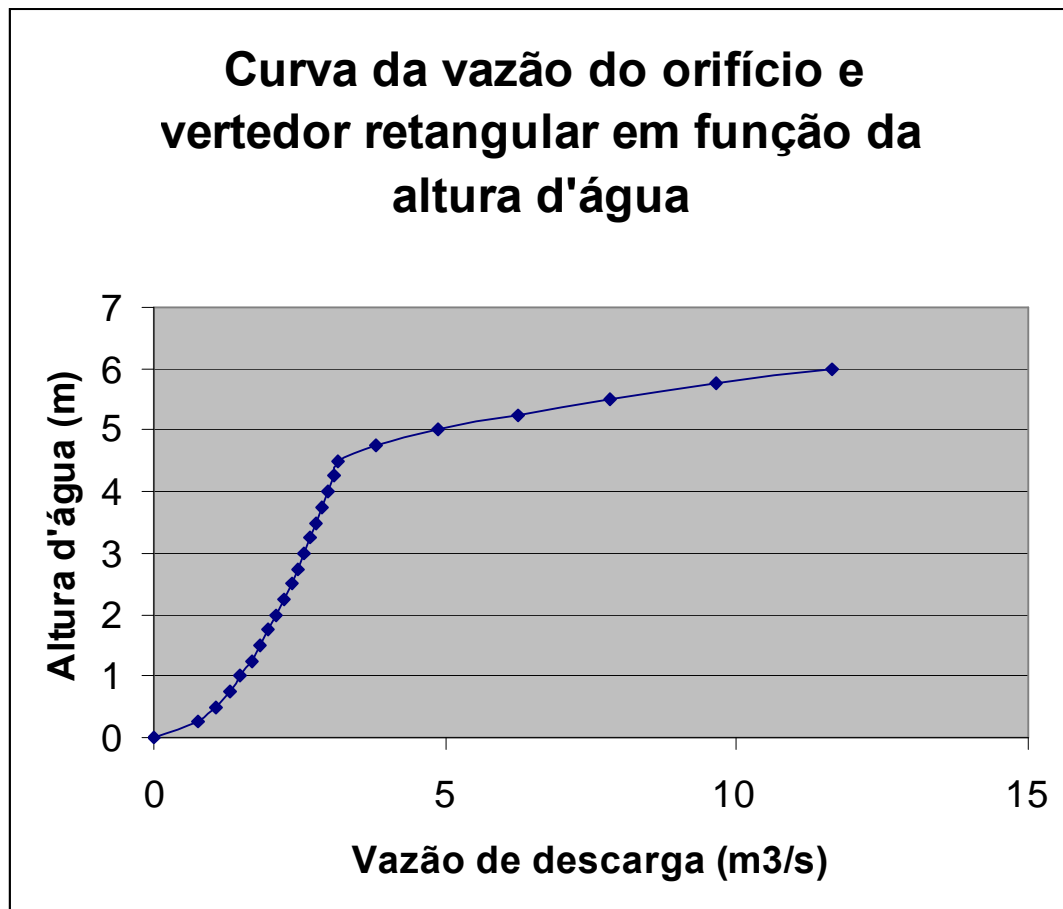


Figura 79.11- Gráfico da descarga total referente ao orifício e ao vertedor

79.11 Vertedor retangular

Os vertedores podem ser de soleira delgada e soleira espessa. O vertedor será de soleira delgada quando a parte da soleira que está em contato com a água, isto é, a espessura da crista tem dimensões muito reduzidas da ordem de 1mm a 2mm. Na prática temos vertedores de soleira espessa.

$$Q = C_w \times L \times h^{1,5}$$

Sendo:

Q= vazão (m³/s)

L= comprimento da crista do vertedor retangular (m)

h= altura do nível de água do vertedor retangular a partir da crista do vertedor (m)

C_w= coeficiente de descarga do vertedor retangular sem contração para unidades SI.

H= altura da crista do vertedor em relação ao fundo (m).

Tabela 79.5 - Coeficiente C_w de vertedor retangular sem contração.

H/h	Altura h do vertedor em relação a crista (m)						
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,60	1,50
0,5	2,31	2,28	2,27	2,27	2,27	2,26	2,26
1,0	2,07	2,05	2,04	2,03	2,03	2,03	2,03
2,0	1,95	1,93	1,92	1,92	1,91	1,91	1,90
10,0	1,85	1,83	1,82	1,82	1,82	1,82	1,81
∞	1,83	1,81	1,80	1,80	1,79	1,79	1,79

Fonte: adaptado de Linsley e Franzini, 1992 para as unidades SI.

Exemplo 79.1

Calcular a vazão de um vertedor retangular com altura $H=0,90\text{m}$ desde o fundo até a crista e altura do nível de água, a contar da crista do vertedor $h=0,18\text{m}$.

Primeiramente calculamos: $H/h = 0,90/0,18 = 5$

Entrando na Tabela (79.5) com $H/h=5$ e $h=0,18\text{m}$, estimamos o valor $C_w=1,82$

$$Q = C_w \times L \times h^{1,5}$$

$$Q = 1,82 \times 2,0 \times 0,18^{1,5} = 0,28\text{m}^3/\text{s}$$

79.12 Vertedor retangular de soleira espessa adotada pelo DAEE São Paulo

O Departamento de Aguas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo adota para pequenas barragens que o vertedor de parede espessa seja dimensionada pela equação:

$$Q = 1,55 \times L \times H^{1,5}$$

Sendo:

L = largura do vertedor retangular (m)

H = altura do vertedor a partir da soleira do vertedor (m)

Q = vazão máxima (m^3/s)

79.13 Vertedor triangular

Os vertedores triangulares não são usados devido ao problema de depósito de lixo e sujeira nos mesmos. Urbanas e Stare, 1993 apresentam a equação:

$$Q = C_t \cdot h^{5/2} \tan(\theta/2)$$

Sendo:

Q = vazão de descarga no vertedor triangular (m^3/s)

h = carga desde o vértice até o nível de água (m)

θ = ângulo de abertura do vertedor triangular

C_t = fornecido pela Tabela (79.6)

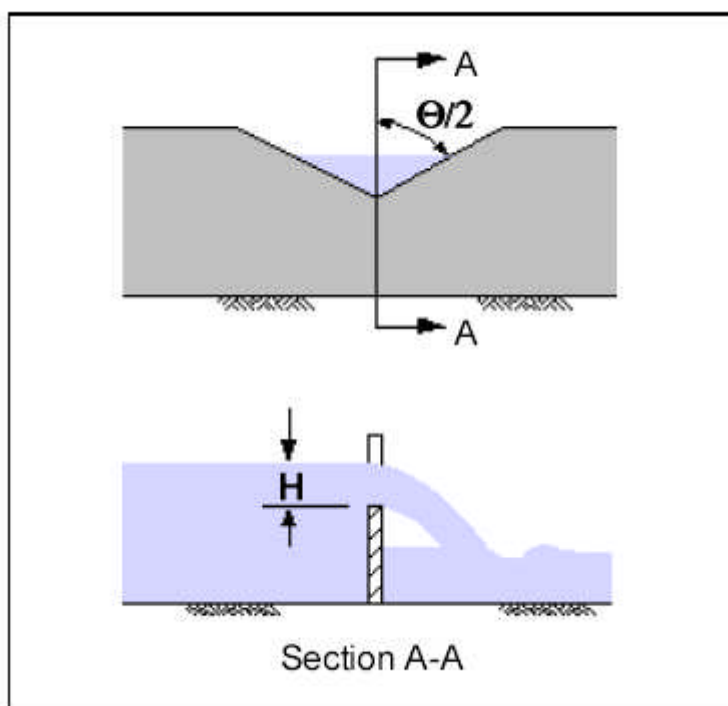


Figura 79.12- Vertedor triangular. Fonte> Georgia, 201

Tabela 79.6- Valores de Ct conforme Urbonas, 1993

Profundidade h (m)	Ângulo de 45°	Ângulo de 60°	Ângulo de 90°
0,06	1,47	1,45	1,42
0,12	1,42	1,40	1,39
0,18	1,40	1,39	1,37
0,24	1,39	1,38	1,37

Fonte: Urbonas e Stahre, 1993

Exemplo 79.6 – Vertedor Triangular em ângulo de 90°

Calcular a descarga em m³/s sendo a altura d'água em relação ao vértice H=2,00m

$$Q = 1,4 \cdot H^{5/2} = 1,4 \cdot 2,00^{5/2} = 7,92 \text{ m}^3/\text{s}$$

79.14 Vertedor circular em parede vertical

São raramente empregados e a fórmula é a seguinte (Vianna,1997, p. 539), tem como vantagem dispensar o nivelamento da soleira.

$$Q = 1,518 \cdot D^{0,693} H^{1,807} \quad \text{(Equação 79.6)}$$

Sendo Q em m³/s, D e H em metros.

Exemplo 79.7- Vertedor circular em parede vertical

D=0,90m

H=0,40m (a altura da água em relação a geratriz inferior)

$$Q = 1,518 \cdot D^{0,693} H^{1,807} = 1,518 \cdot 0,90^{0,693} \cdot 0,40^{1,807} = 0,27 \text{ m}^3/\text{s}$$

79.15 Extravador de barragens: perfil Creager

Um vertedor de com perfil Creager é muito usado em barragens.

Para se obter a vazão aproximada que passa por um perfil Creager, usaremos a fórmula proposta por Azevedo Netto et al.,1998 p.99.

$$Q = 2,2 \cdot L \cdot H^{3/2} \quad \text{(Equação 79.8)}$$

Exemplo 79.9- Calcular a vazão que passa pelo vertedor com perfil Creager sendo a largura de 2,00m e altura da água de 1,50m (carga).

$$Q = 2,2 \cdot L \cdot H^{3/2} = 2,2 \cdot 2,00 \cdot 1,50^{3/2} = 8,08 \text{ m}^3/\text{s}$$

Perfil Creager

Uma maneira prática de se achar o perfil Creager de um vertedor é usar os valores da Tabela (79.7) conforme Azevedo Netto et al, 1998.

Tabela 79.7- Valores de x e de y para vertedor Creager com altura de 1,00m. Para altura maiores multiplicar as coordenadas pelo novo valor de H.

Valores de x para H=1,00m	Valores de y para H=1,00m
0	0,126
0,1	0,036
0,2	0,007
0,3	0,000
0,4	0,007
0,6	0,060
0,8	0,142
1,0	0,257
1,2	0,397
1,4	0,565
1,7	0,870
2,0	1,220
2,5	1,960
3,0	2,820
3,5	3,820

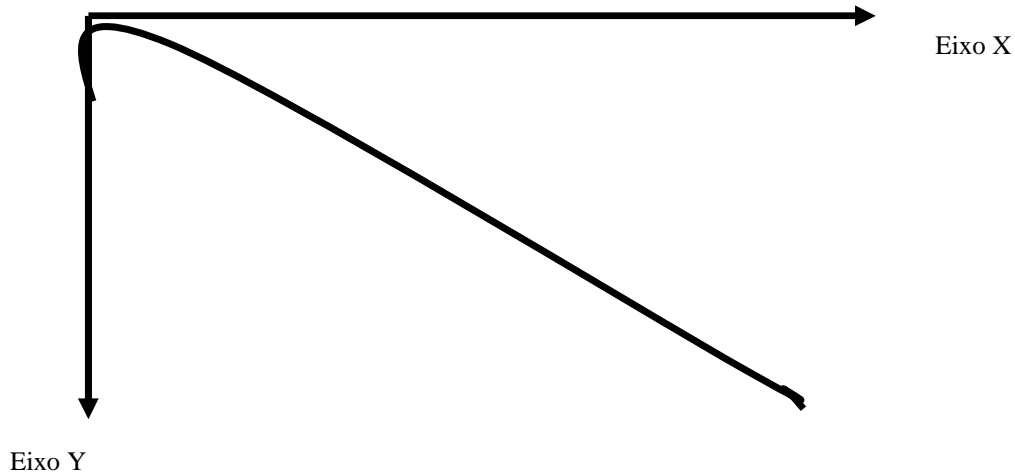


Figura 79.13- Perfil Creager com os eixos X e Y conforme Azeveto Netto et al,1998.

Exemplo 79.8- Traçar o perfil Creager supondo $H=1,50m$.

Multiplicamos todas as coordenadas da Tabela (79.7) por $H=1,50m$ e obtemos a Tabela (79.8) e a Figura (79.14).

Tabela 79.8- Coordenadas X e Y do perfil Creager

X	Y
0,00	0,19
0,15	0,05
0,30	0,01
0,45	0,00
0,60	0,01
0,90	0,09
1,20	0,21
1,50	0,39
1,80	0,60
2,10	0,85
2,55	1,31
3,00	1,83
3,75	2,94
4,50	4,23
5,25	5,73

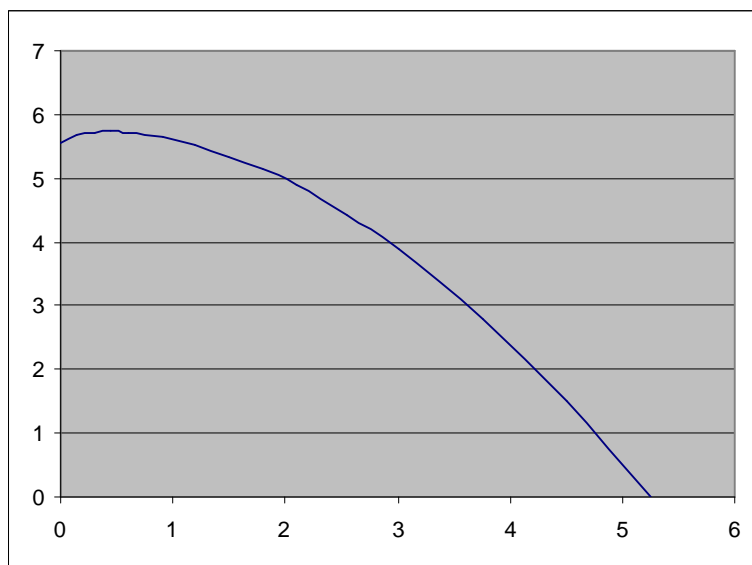


Figura 79.14- Perfil Creager com os eixos X e Y conforme Azeveto Netto et al,1998 considerando a carga de H=1,50m. O valor de y foi calculado usando (5,73-y)

79.16 Vertedor lateral conforme Subramanya, 2009

Subramanya, 2009 para vertedor lateral considera a seguinte equação:

$$Q_s = (2/3) \cdot C_M \cdot (2 \cdot g)^{0,5} L (y-s)^{3/2}$$

Sendo:

Q_s = vazão que passa pelo vertedor de largura L, altura da crista s e altura y desde o piso até o nível de água.

s= altura da crista do vertedor lateral (m)

y= altura do nível de água no vertedor lateral desde o piso (m)

C_M = coeficiente de Marchi

C_M possui valores diferentes para regime de escoamento subcritico criticoi;

Para regime supercritico, isto é, $F_1 \geq 1$ temos:

$$C_M = 0,36 - 0,008 \cdot F_1$$

F_1 = número de Froude

Para $F_1 < 1$ temos:

$$C_M = 0,611 [1 - 3F_1^2 / (F_1^2 + 2)]^{0,5}$$

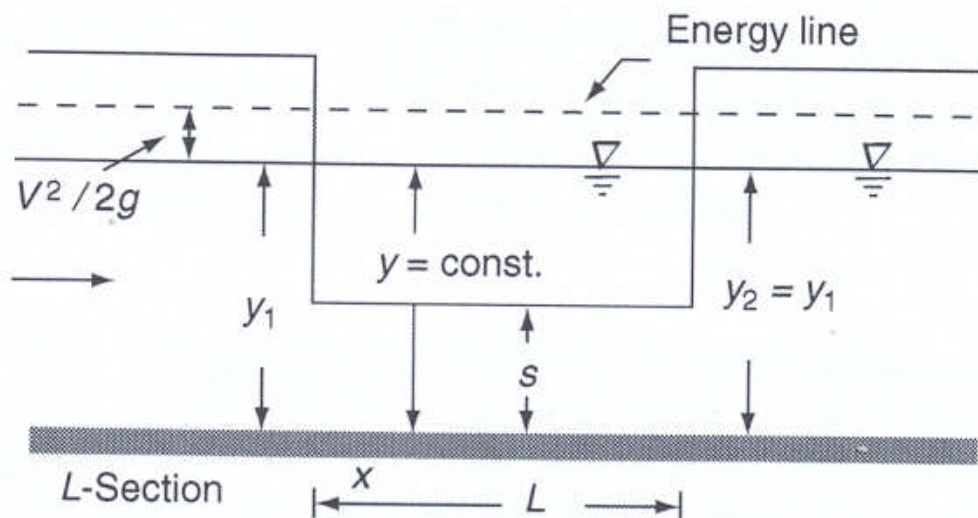


Figura 79.15- Corte do vertedor lateral. Observar a altura da crista “s” e a altura “y” e o comprimento L.
 Fonte: Subramanya, 2009

79.17 Formulação matemática da curva cota - volume do reservatório

Segundo (Akan,1993) a curva cota-volume de reservatórios naturais ou artificiais pode ser representada pela expressão:

$$S = b h^c \quad \text{(Equação 79.9)}$$

Sendo:

S= volume do reservatório

h= lâmina d'água sobre a saída

b, c = parâmetros constantes que dependem da forma do reservatório

A constante c não tem dimensão e a constante b tem a dimensão [comprimento]^{3-c}.

As constantes b, c dependem do tamanho e da forma do reservatório. Por exemplo, se o reservatório tem paredes verticais, então $c=1$ e $b=$ área da seção horizontal.

Se existe tabulados N pares da curva cota-volume, então as constantes b, c podem ser achadas através de análise de regressão:

$$c = \frac{\Sigma (\log S) (\log h) - \frac{(\Sigma \log S) (\Sigma \log h)}{N}}{\Sigma (\log h)^2 - \frac{(\Sigma \log h)^2}{N}} \quad \text{(Equação 79.10)}$$

Para o valor de b temos:

$$b = 10^{[\Sigma \log S - c(\Sigma \log h)] / N} \quad \text{(Equação 79.11)}$$

Exemplo 79.10

Seja um reservatório natural com 87.990m³. A curva cota-volume foi obtida de 0,10m em 0,10m com N=30. Fazendo-se a planilha da análise de regressão por (Akan,1993) p. 128 obtemos a Tabela (79.7).

O volume (*Storage*) S em função da altura h é a Equação (79.5):

$$S = b h^c$$

Sendo c=0,999561 e b= 29331,58 teremos:

$$S = 29331,58 h^{0,999561}$$

Tabela 79.9- Planilha para cálculo da fórmula matemática da curva cota-volume de um reservatório natural.

Altura h N=30 (m)	log h	(logh) ²	Volume (m ³)	log S	(logh) *(logS)
0,1	-1,000	1,000	2933	3,467	-3,467
0,2	-0,699	0,489	5866	3,768	-2,634
0,3	-0,523	0,273	8799	3,944	-2,062
0,4	-0,398	0,158	11732	4,069	-1,619
0,5	-0,301	0,091	14665	4,166	-1,254
0,6	-0,222	0,049	17598	4,245	-0,942
0,7	-0,155	0,024	20531	4,312	-0,668
0,8	-0,097	0,009	23464	4,370	-0,424
0,9	-0,046	0,002	26397	4,422	-0,202
1,0	0,000	0,000	29330	4,467	0,000
1,1	0,041	0,002	32263	4,509	0,187
1,2	0,079	0,006	35196	4,546	0,360
1,3	0,114	0,013	38129	4,581	0,522
1,4	0,146	0,021	41062	4,613	0,674
1,5	0,176	0,031	43995	4,643	0,818
1,6	0,204	0,042	46928	4,671	0,954
1,7	0,230	0,053	49861	4,698	1,083
1,8	0,255	0,065	52794	4,723	1,206
1,9	0,279	0,078	55727	4,746	1,323
2,0	0,301	0,091	58660	4,768	1,435
2,1	0,322	0,104	61593	4,790	1,543
2,2	0,342	0,117	64526	4,810	1,647
2,3	0,362	0,131	67459	4,829	1,747
2,4	0,380	0,145	70392	4,848	1,843
2,5	0,398	0,158	73325	4,865	1,936
2,6	0,415	0,172	76258	4,882	2,026

2,7	0,431	0,186	79191	4,899	2,113
2,8	0,447	0,200	82124	4,914	2,198
2,9	0,462	0,214	85057	4,930	2,279
3,0	0,477	0,228	87990	4,944	2,359
	$\Sigma= 2,424$	$\Sigma= 4,152$		$\Sigma= 136,443$	$\Sigma= 14,979$
$c= 0,999561$		$b=29331,58$		$S=29331,58 \cdot h^{0,999561}$	

Exemplo 79.11- Caso real

Reservatório de detenção projetado pela firma Hagaplan no córrego São João, bairro Alegre do município de São João da Boa Vista em São Paulo.

Seja um reservatório natural com $250.334,80\text{m}^3$. A curva cota-volume foi obtida em sete intervalos, portanto $N=7$. Fazendo-se a planilha da análise de regressão por (Akan,1993) p. 128 obtemos a Tabela (79.10).

Tabela 79.10- Planilha para cálculo da fórmula matemática da curva cota-volume de um reservatório natural.

Altura h N=7 (m)	log h	(logh) ²	Volume (m ³)	log S	(logh) x (logS)
0,6	-0,22	0,05	402,30	2,60	-0,58
1,6	0,20	0,04	6562,30	3,82	0,78
2,6	0,41	0,17	28101,30	4,45	1,85
3,6	0,56	0,31	65437,80	4,82	2,68
4,6	0,66	0,44	122251,30	5,09	3,37
5,6	0,75	0,56	201477,80	5,30	3,97
6,1	0,79	0,62	250334,80	5,40	4,24
	$\Sigma= 3,15$	$\Sigma= 2,19$		$\Sigma= 31,48$	$\Sigma= 16,31$
$c= 2,78$		$b=1761,94$		$S=1761,94 \cdot h^{2,78}$	

O volume (*Storage*) S em função da altura h é a Equação (79.5):

$$S = b h^c$$

sendo:

$$c=2,78$$

$$b=1761,94$$

$$S = 1761,94 \cdot h^{2,78}$$

79.18 Análise de incerteza do orifício

As equações dos orifícios e vertedores apresentam incertezas. Estão na altura da cota volume, determinação dos volumes por faixas de cota, e incerteza na escolha do coeficiente de descarga.

Para verificar as incertezas devemos aplicar o método de análise de incerteza de primeira ordem (Tomaz, 1999).

Consideremos que o erro na determinação da altura da cota h igual a 5% ou seja o coeficiente de variação de h é $\Omega_h = 0,05$ e que o coeficiente de descarga, tanto para o orifício como para o vertedor retangular igual 20% ou seja o coeficiente de variação é $\Omega_K = 0,20$.

$$Q = K_0 A_0 \sqrt{2 g h}$$
$$\Omega_Q^2 = \Omega_K^2 + (1/2)^2 \cdot \Omega_h^2$$
$$\Omega_Q^2 = \Omega_K^2 + (1/4) \cdot \Omega_h^2$$

Exemplo 79.12

$$\Omega_Q^2 = 0,20^2 + (1/4) \cdot 0,05^2$$

$$\Omega_Q^2 = 0,040625$$

$\Omega_Q = 0,2016$ ou seja a incerteza da vazão Q calculada é de 20,16%

79.19 Análise de incerteza do vertedor retangular

$$Q = k_w L \sqrt{2 g} h^{3/2}$$

$$\Omega_Q^2 = \Omega_k^2 + (3/2)^2 \cdot \Omega_h^2$$

$$\Omega_Q^2 = \Omega_k^2 + (9/4) \cdot \Omega_h^2$$

Exemplo 79.13

$$\Omega_Q^2 = 0,20^2 + (9/4) \cdot 0,05^2$$

$\Omega_Q = 0,2136$ ou seja a incerteza da vazão calculada Q é de 21,36%

79.20 Vertedores proporcionais

Georgia, 2001 apresenta o vertedor proporcional, que é de difícil construção, mas que permite uma descarga linear apesar da altura variar.

A equação básica do vertedor proporcional é:

$$Q = 4,97 \cdot a^{0,5} \cdot b (H-a/3)$$
$$x/b = 1 - (1/3 \times 17) (\arctang (y/a)^{0,5})$$

Sendo:

Q = vazão em (cfs)

Dimensões a , b , H e x mostradas na Figura (79.11)

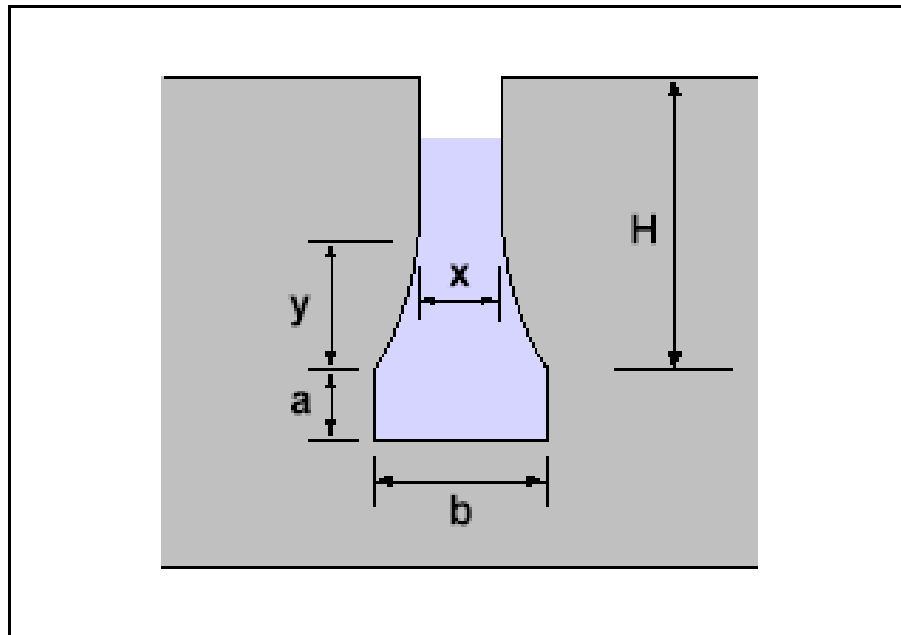


Figura 79.16- Vertedor proporcional. Fonte: Georgia, 2001

79.21 Bibliografia e livros consultados

- OUTLET STRUCTURES. Georgia. acessado em 14 de outubro de 2010
<http://www.georgiastormwater.com/vol2/2-3.pdf>
- SUBRAMANYA, K. *Flow in open channels*. 3a ed. 548páginas.
- URBONAS,BEM e STAHR, PETER. *Stormwaterwater Best Management practices and detention for water quality, drainage and CSO management*. Printe Hall, 1993, New Jersey, 449 páginas.