# Capítulo 79
# Orifício e vertedor e curva cota-volume

"Nunca podemos alcançar a verdade, só podemos conjecturar"
Karl Popper

# SUMÁRIO

## 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:

$$Q= C_d . A_0 \ (2\ g\ \ h)^{0,5} \qquad \textbf{(Equação 79.1)}$$

Sendo:
Q= vazão de descarga ($m^3$/s);
$A_0$ = área da seção transversal do orifício ($m^2$);
g= aceleração da gravidade g=9,81 m/$s^2$ ;
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

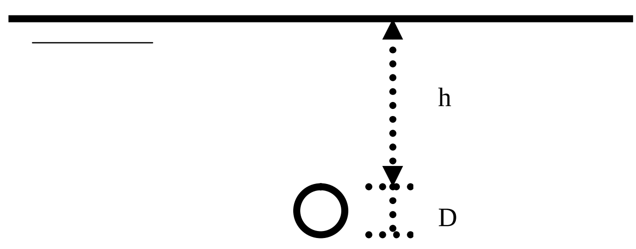


**Figura 79.1- Esquema de um orificio de seção circular**

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:

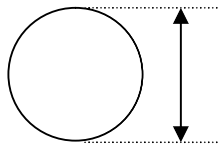


**Figura 79.2- Esquema de um orificio de seção circular**

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

**Exemplo 79.1- orifício de seção circular**

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

$A_0 = \pi D^2 / 4 = \pi . 0,60^2 / 4 = 0,2827m^2$

$Q = Cd. A_0 (2 g h)^{0,5} = 0,62 . 0,2827 . (2 . 9.81 . 3,00)^{0,5} = 1,34m^3/s$

**Orifício retangular**

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

$$A_0 = b . D \qquad \textbf{(Equação 79.3)}$$

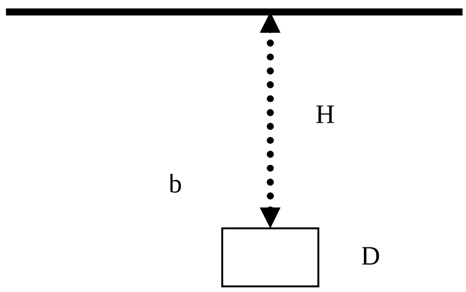


**Figura 79.3- Esquema de um orificio de seção circular**

**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 $Cd_0$= 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.

$Q = Cd. A_0 \sqrt{2 g h} = 0,62 . ( 1,00 .0,50) . \sqrt{2 . 9.81 . 4,65} = 2,96m^3/s$

## 79.3 Entrada nos orifícios

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

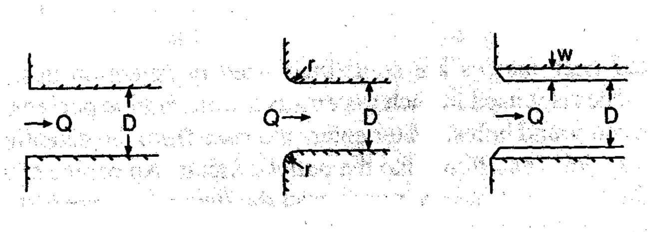


**Figura 79.4- Tipos de entrada das galerias- quadrado (r=0), redondo e chanfrado**
**Fonte: (Akan 1993).**

Em função de **r/D** sendo "r" da Figura (79.4) e de **h/D** temos os valores do coeficiente de descarga Cd 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 Cd 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 Cd para condutos extravasores com muros de ala**

| h/D | Ângulo do Muro Ala | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 30º | 45º | 60º | 75º | 90º |
| 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 orificio

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

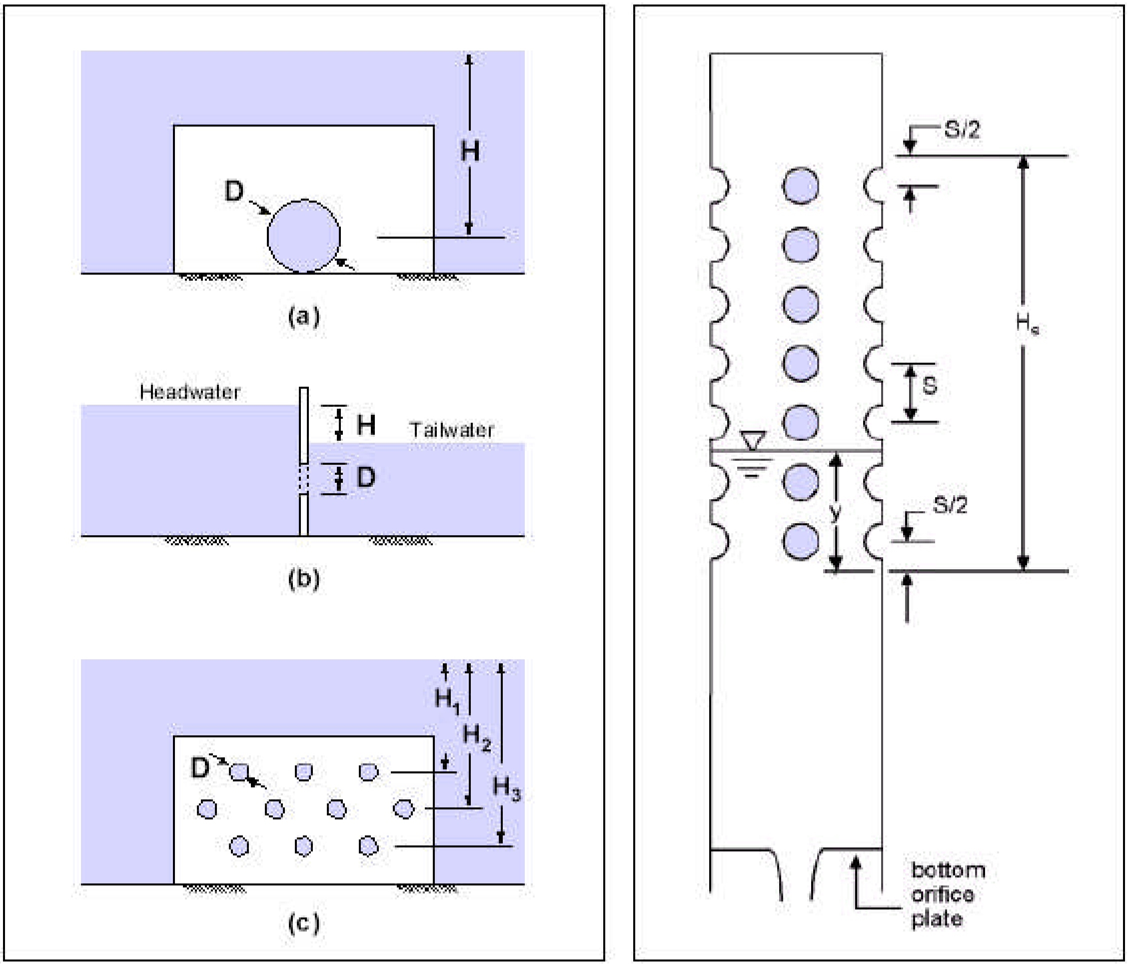


**Figura 79.5- Orificio com varias perfurações. Fonte: Georgia, 2001**

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 orificios usando a seguinte equação:

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

Sendo:
Q= vazão ($m^3$/s)
Cd= 0,62
g=9,891m/$s^2$= aceleração da gravidade
Ap= área da seção transversal de todos os orificios ($m^2$)
Hs= distância de metade do diametro (S/2) do orificioi mais baixo para a metade do orficio mais alto. É a distância entre o orificio mais baixo e o mais alto, descontado o diâmetro.
H= altura do nível de água até a média dos orificios (m)

## 79.5 Orifício de pequenas dimensões

Orificio 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 completamento submerso, isto é, abaixo da superfície livre.

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

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

A equação do orifício é seguinte:

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

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 Orificio 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 orificio retangular de grandes dimensões de largura L.

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

Sendo:
Q= vazão ($m^3$/s)
Cd= 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)

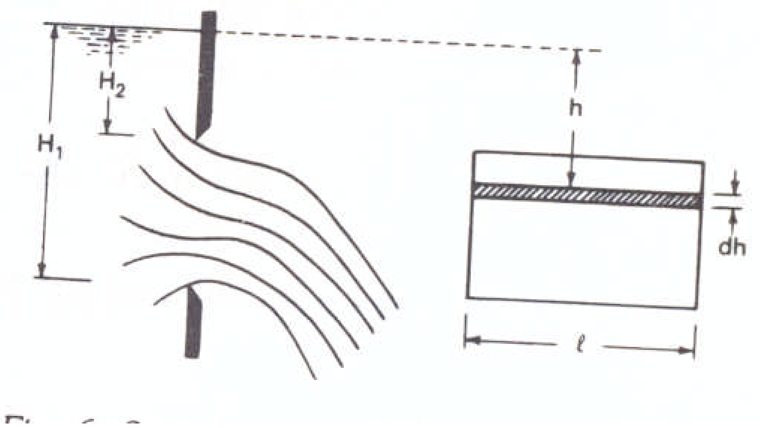


**Figura 79.6- Orificio retangular de grandes dimensões**
**Fonte: Novais-Barbosa, 2003**

## 79.7 Orificio circular de grande dimensão

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

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

Sendo:
Q= vazão ($m^3$/s)
Cd= 1,00, pois como o orificio é grande não há praticamente contração.
M= fornecido pela Tabela (27.2)
S= área do orificio ($m^2$)
H= altura da superficie 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 |

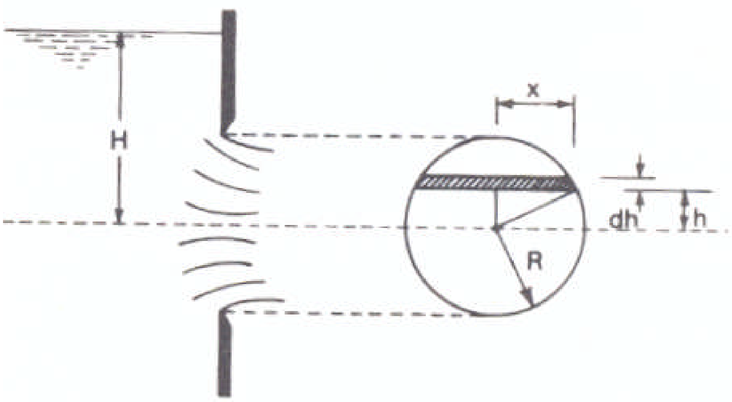


**Figura 79.7- Orificio circular de grandes dimensões**
**Fonte: Novais-Barbosa, 2003**

## 79.8 Considerando a velocidade de chegada em um canal de um orificio de grandes dimensões

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

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

A equação geral é:

$$Q = (2/3) \times Cd \times L \times (2.g)^{0,5} \left[ (H_1 + Vo^2/2g)^{3/2} - (H_2 + Vo^2/2g)^{3/2} \right]$$

Sendo:
Q= vazão ($m^3$/s)
Cd= coeficiente de descarga
L= largura do orificio (m)
g= aceleração da gravidade =9,81m/$s^2$
$H_1$=altura da água acima da base inferior do orifício (m)
$H_2$= altura da água acima da base superior do orifício (m)
Vo= velocidade da água no canal (m/s)

## 79.9 Considerando a velocidade de chegada em um canal de um orificio de pequenas dimensões

Neste caso o orificio de pequenas dimensões está no fim de um canal com velocidade Vo.

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

Sendo:
Q= vazão ($m^3/s$)
S= area da seção do orificio ($m^2$)
g=aceleração da gravidade= 9,81m/$s^2$
h= altura da superficie até o centro do orificio (m)
Vo= 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).

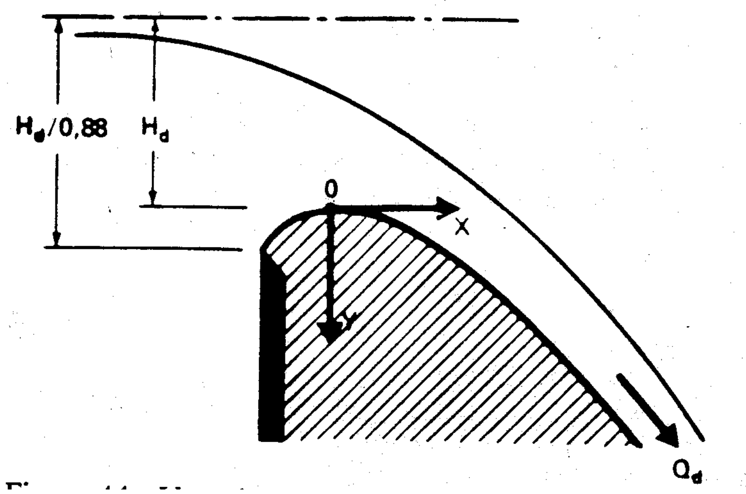


**Figura 79.8-Vertedor de soleira normal para vazão Qd**
**Fonte: Notas de aula da EPUSP, prof. dr. Paolo Alfredini, 1998, p. 26, 1998**

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

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

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).

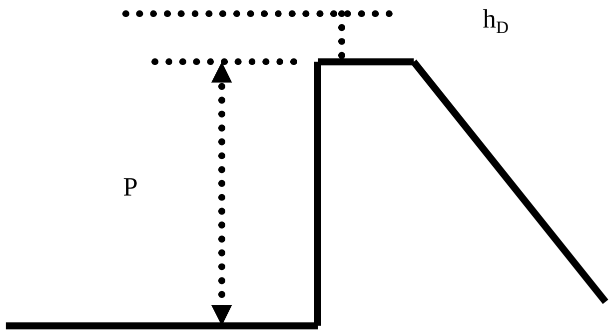


**Figura 79.9- Perfil Creager**

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=4,5m e $h_D$ =1,50m 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=2,00m, altura de 1,60m e altura do fundo de 4,65m.

$h/h_D$= 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 m/s$^2$

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

$Q_d$ 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=0,80m e a P=4,50m do fundo até a soleira do vertedor de soleira retangular com largura L=2,00m e altura $h_D$=1,50m.

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

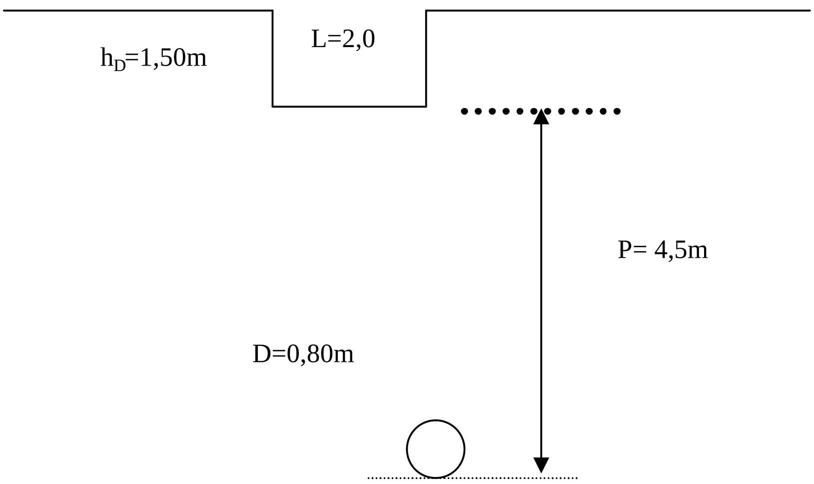


**Figura 79.10- Esquema de vertedor tipo orifício no fundo e acima vertedor retangular.**

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

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

Como D=0,80m a área $A_0$ será:

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

O valor de h irá variar de 0 até 4,50m.

Escolhido o raio do chanfro, por exemplo, de 3cm=0,03m 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 Cd =0,67 , o qual será constante.

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

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

A largura do vertedor retangular L=2,00m 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 $h_D$ =1,50m 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** |

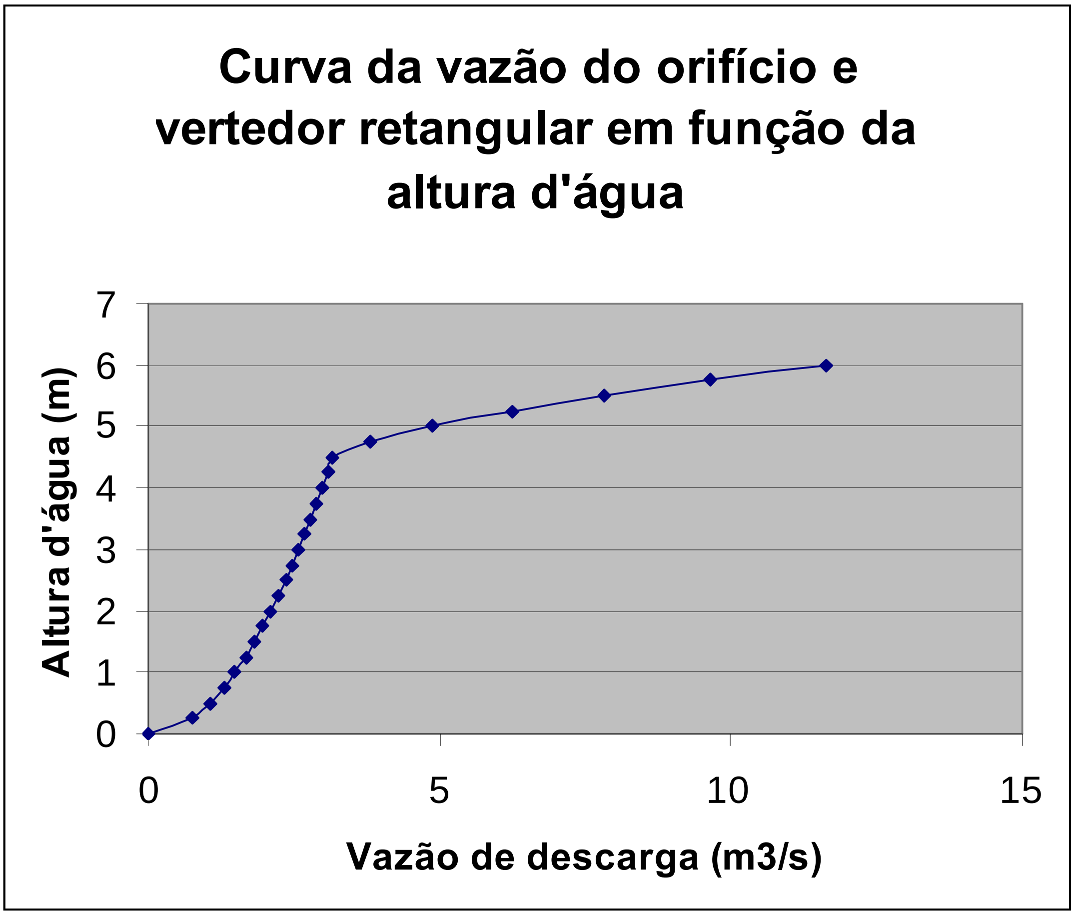


**Figura 79.11- Gráfico da descarga total referente ao orifício e ao vertedor**

## 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 contanto 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.

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

Sendo:
Q= vazão ($m^3/s$)
L= comprimento da crista do vertedor retangular (m)
h= altura do nível de água do vertedor retangular a partir da crista do vertedor (m)
Cw= 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 Cw de vertedor retangular sem contração.**

| | **Altura h do vertedor em relação a crista (m)** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **H/h** | **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= 0,90m desde o fundo até a crista e altura do nível de água, a contar da crista do vertedor h= 0,18m.

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

Entrando na Tabela (79.5) com H/h= 5 e h= 0,18m, estimamos o valor Cw= 1,82

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

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

## 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:

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

Sendo:

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

h= carga desde o vértice até o nivel de água )m)

θ= ângulo de abertura do vertedor triangular

Ct= fornecido pela Tabela (79.6)

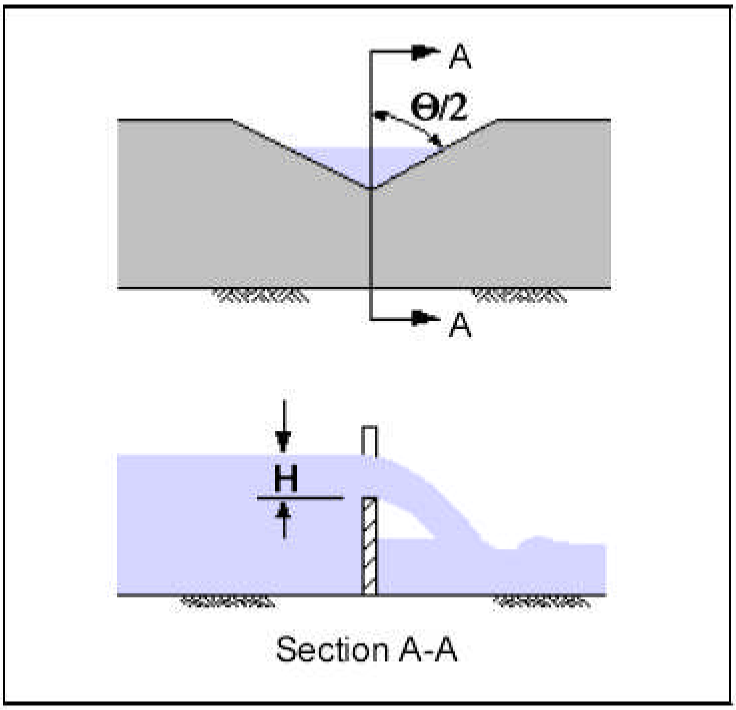


**Figura 79.12- Vertedor triangular. Fonte> Georgia, 201**

**Tabela 79.6- Valores de Ct conforme Urbonas, 1993**

| **Profundidade h (m)** | **Ângulo de 45º** | **Ângulo de 60º** | **Ângulo de 90º** |
|---|---|---|---|
| 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 90º**

Calcular a descarga em $m^3/s$ 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.

$$\mathbf{Q= 1,518 \cdot D^{0,693} \; H^{1,807}} \qquad \textbf{(Equação 79.6)}$$

Sendo Q em $m^3/s$, 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 Extravasor 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.

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

**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 |

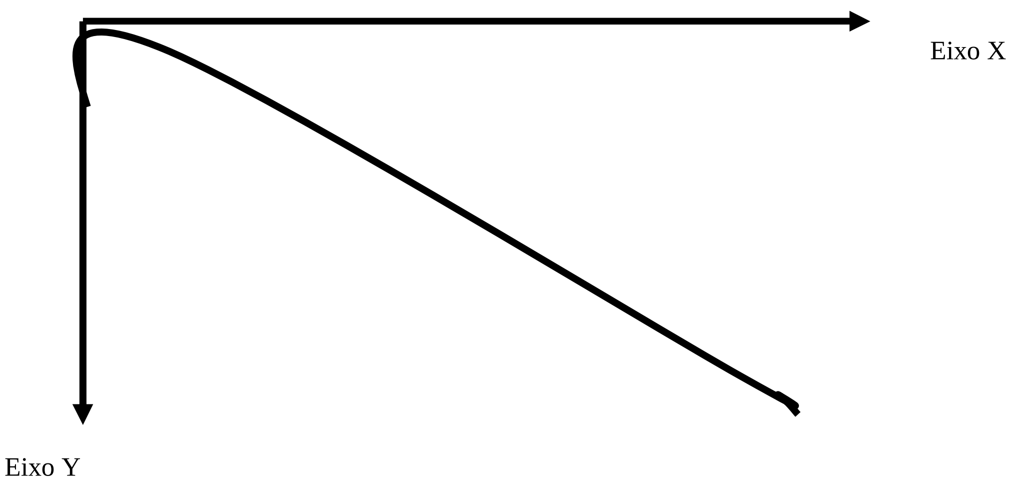


**Figura 79.13- Perfil Creager com os eixos X e Y conforme Azeveto Netto et al,1998.**

**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 |

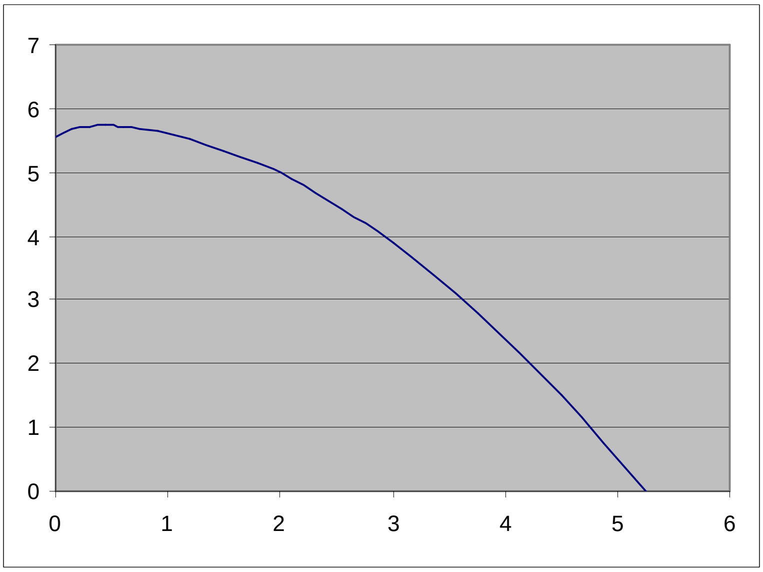


**Figura 79.14- Perfil Creager com os eixos X e Y conforme Azeveto Netto et al,1998 considerando a carga de H=1,50m. O valor de y foi calculado usando (5,73-y)**

## 79.16 Vertedor lateral conforme Subramanya, 2009

Subramanya, 2009 para vertedor lateral considera a seguinte equação:

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

Sendo:
Qs= vazão que passa pelo vertedor de largura L, altura da crista s e altura y desde o piso até o nivel de água.
s= altura da crista do vertedor lateral (m)
y= altura do nivel 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 temos:

$$C_M= 0,36-0,008.F_1$$

$F_1$= número de Froude
Para $F_1$<1 temos:

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

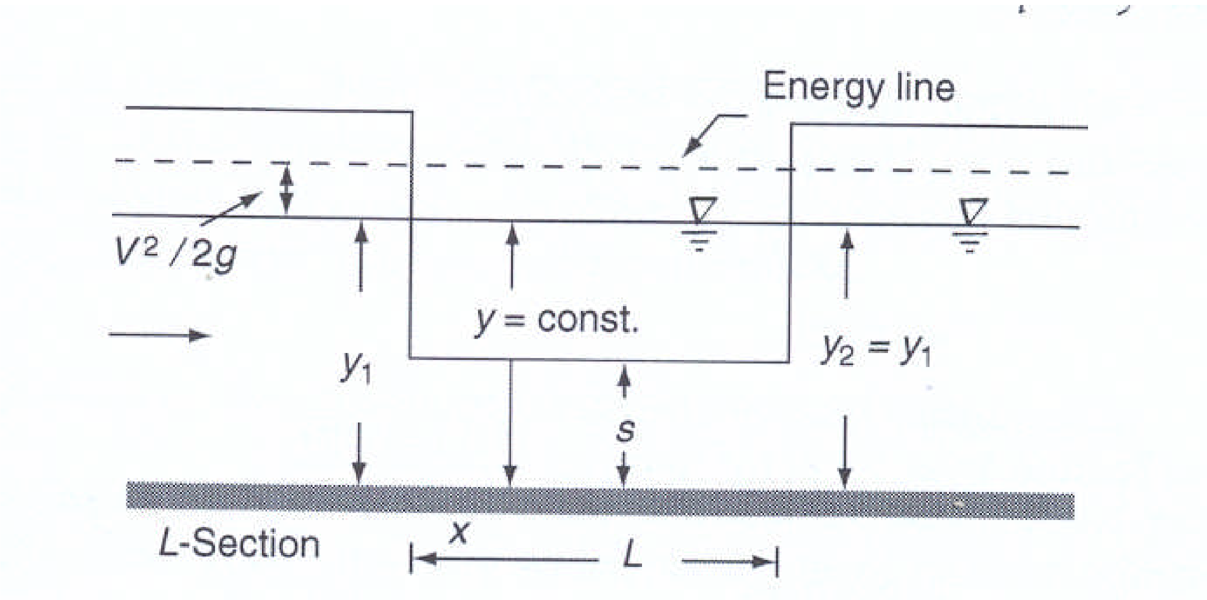


**Figura 79.15- Corte do vertedor lateral. Observar a altura da crista "s" e a altura "y" e o comprimentoi L. Fonte: Subramanya, 2009**

## 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:

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

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 constante *b, c* podem ser achadas através de análise de regressão:

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

Para o valor de b temos:

$$\mathbf{b = 10^{\,[\Sigma \log S \,-\, c\,(\Sigma \log h\,)\,]\,/\,N}} \qquad \textbf{(Equação 79.11)}$$

**Exemplo 79.10**

Seja um reservatório natural com 87.990m$^3$. 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):

$$\mathbf{S = b\ h^{c}}$$

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 |
| | Σ= 2,424 | Σ= 4,152 | | Σ= 136,443 | Σ= 14,979 |
| c= 0,999561 | | b=29331,58 | | $S=29331,58*h^{0,999561}$ | |

**Exemplo 79.11- Caso real**

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

Seja um reservatório natural com 250.334,80m³. 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 |
| | Σ= 3,15 | Σ= 2,19 | | Σ= 31,48 | Σ= 16.31 |
| **c= 2,78** | | **b=1761,94** | | **$S=1761,94 . h^{2,78}$** | |

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

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

## 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.

$$Q= K_0\, A_0\, \sqrt{2\, g\, h}$$

$$\Omega^2{}_Q = \Omega_k{}^2 + (1/2)^2 .\ \Omega_h{}^2$$

$$\Omega^2{}_Q = \Omega_k{}^2 + (1/4).\ \Omega_h{}^2$$

**Exemplo 79.12**

$$\Omega^2{}_Q = 0{,}20^2 + + (1/4).\ 0{,}05^2$$

$$\Omega^2{}_Q = 0{,}040625$$

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

## 79.19 Análise de incerteza do vertedor retangular

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

$$\Omega^2{}_Q = \Omega_k{}^2 + (3/2)^2 .\ \Omega_h{}^2$$

$$\Omega^2{}_Q = \Omega_k{}^2 + (9/4).\ \Omega_h{}^2$$

**Exemplo 79.13**

$$\Omega^2{}_Q = 0{,}20^2 + (9/4).\ 0{,}05^2$$

$\Omega_Q$ = 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 deficil construção, mas que permite uma descarga linear apesar da altura variar.

A equação básica do vertedor proporcional é:

$$\mathbf{Q= 4{,}97.\ a^{0{,}5}.\ b\ (H-a/3)}$$

$$\mathbf{x/b= 1- (1/3 \times 17)\ (arctang\ (y/a)^{0{,}5})}$$

Sendo:
Q= vazão em (cfs)
Dimensões a, b, H e x mostradas na Figura (79.11)

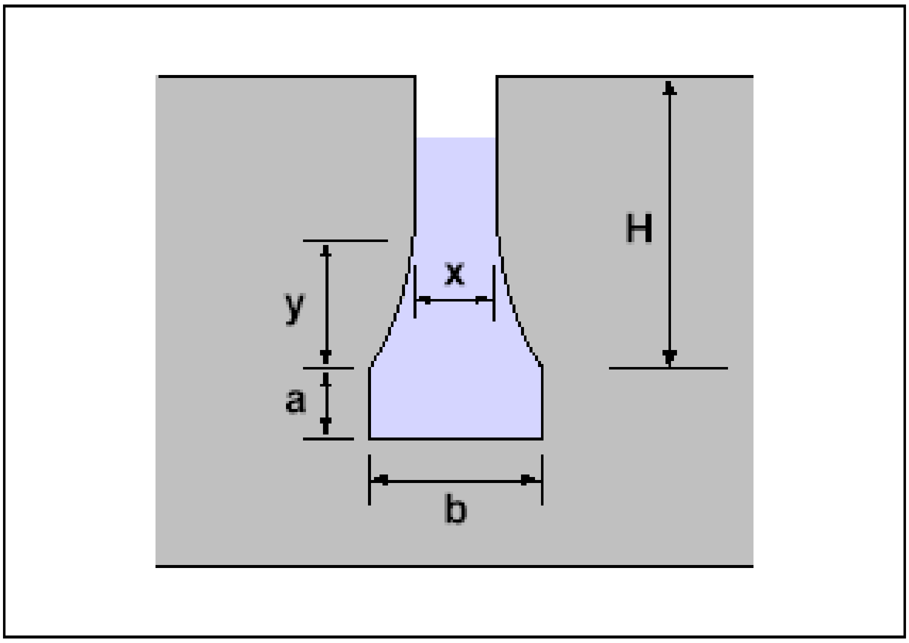


**Figura 79.16- Vertedor proporcional. Fonte: Georgia, 2001**

## 79.21 Bibliografia e livros consultados

-OUTLET STRUCTURES. Georgia. acessado em 14 de outrubro de 2010 http://www.georgiastormwater.com/vol2/2-3.pdf

-SUBRAMANYA, K. *Flow in open channels*. 3a ed. 548páginas.

**-**URBONAS,BEM e STAHRE, PETER. Stormwaterwater Best Management practices and detention for water quality, drainage and CSO management. Printe Hall, 1993, New Jersey, 449 páginas.