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

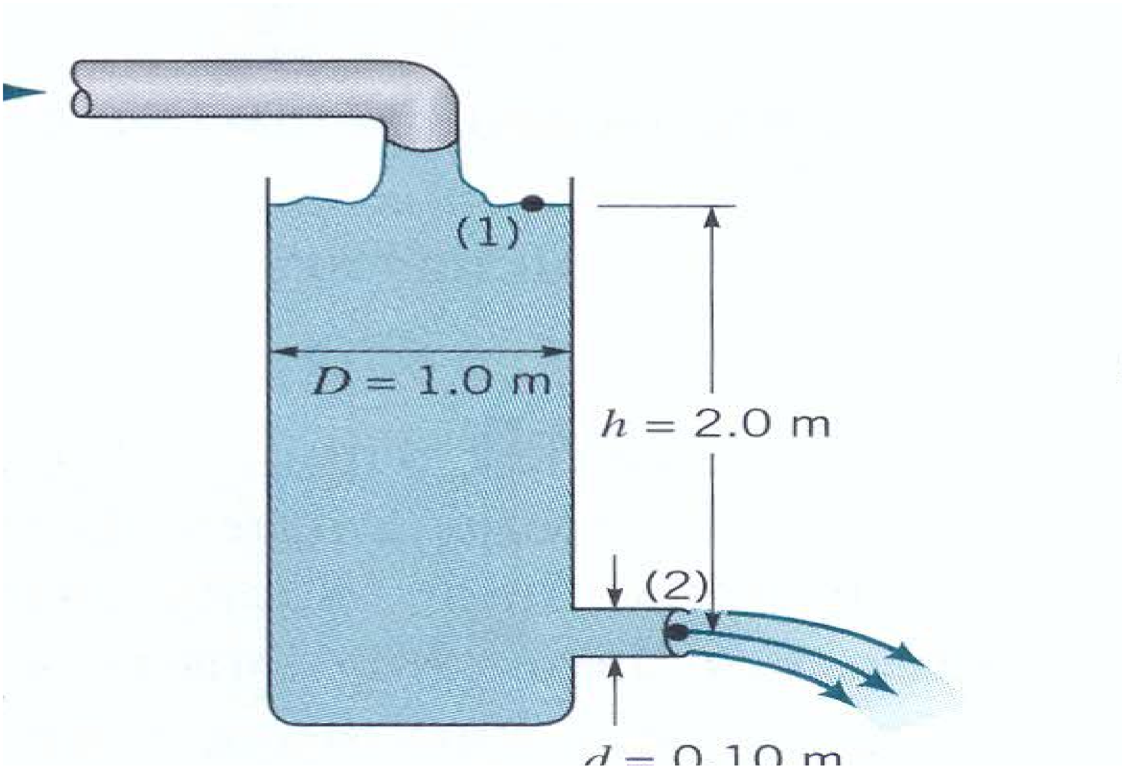


Figura 79.1- Esquema de um orificio de seção circular

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

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

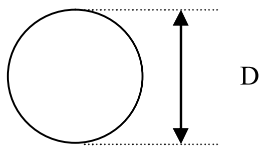


Figura 79.2- Esquema de um orificio de seção circular

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

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.

$A_0 = \pi D^2 / 4 = \pi \cdot 0{,}60^2 / 4 = 0{,}2827 m^2$

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

Orifício retangular

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

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

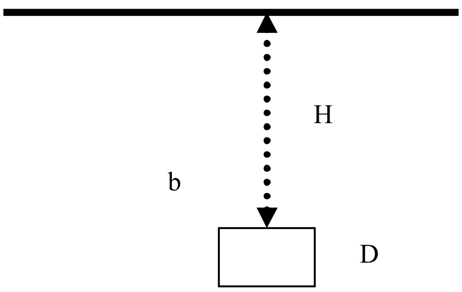


Figura 79.3- Esquema de um orificio de seção circular

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.

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

79.3 Entrada nos orifícios

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

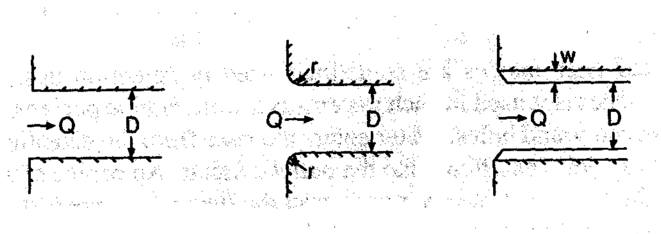


Figura 79.4- Tipos de entrada das galerias- quadrado (r=0), redondo e chanfrado
Fonte: (Akan 1993).

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

	Ângulo do Muro Ala				
h/D	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.

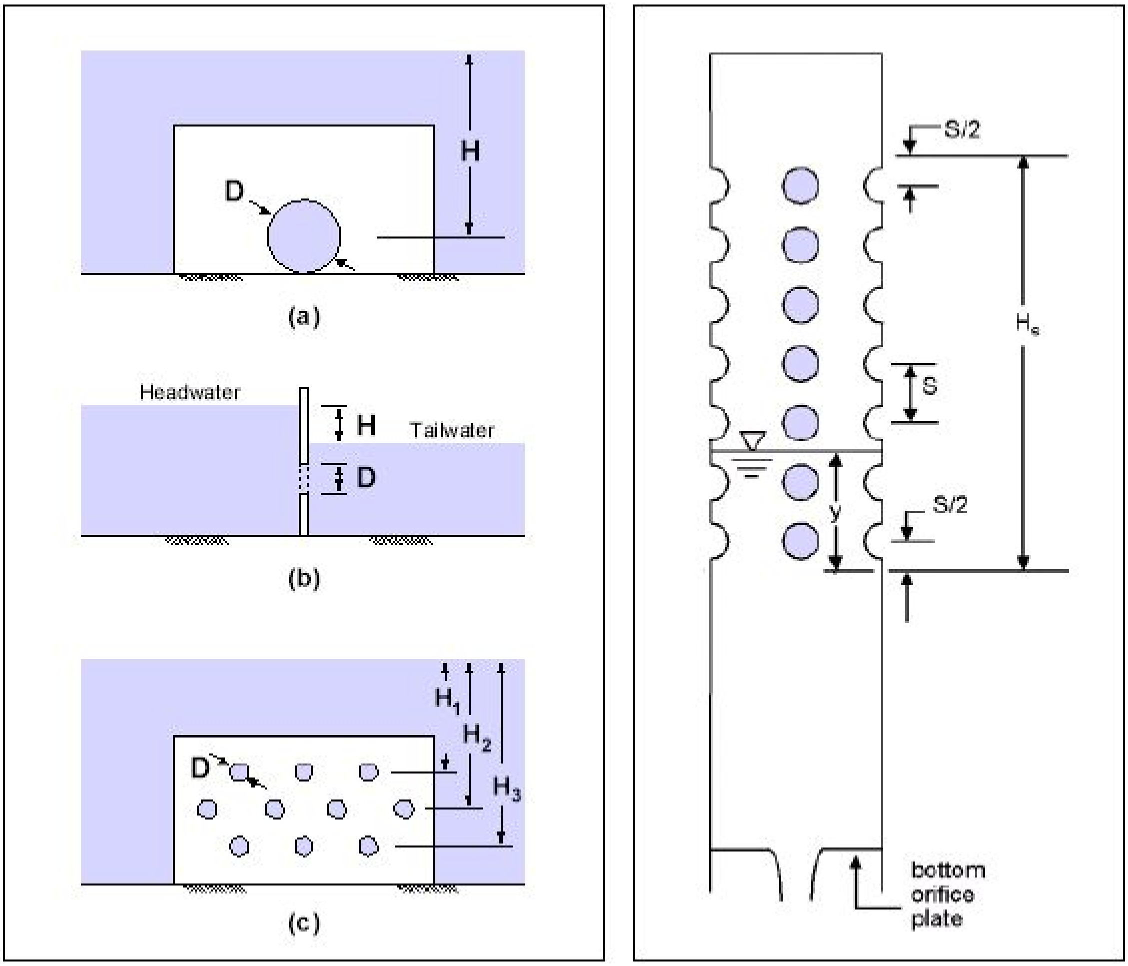


Figura 79.5- Orificio com varias perfurações. Fonte: Georgia, 2001

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:

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

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.

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

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)

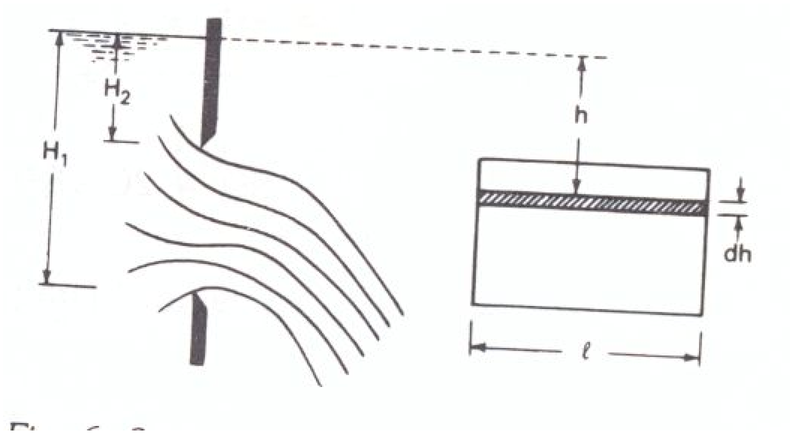


Figura 79.6- Orificio retangular de grandes dimensões
Fonte: Novais-Barbosa, 2003

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

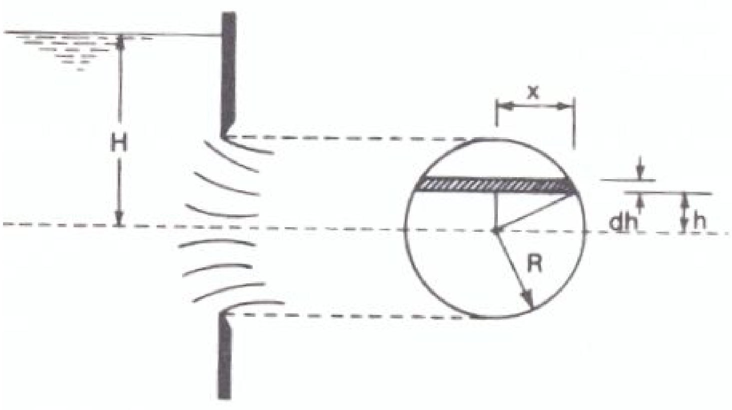


Figura 79.7- Orificio circular de grandes dimensões
Fonte: Novais-Barbosa, 2003

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:

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

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).

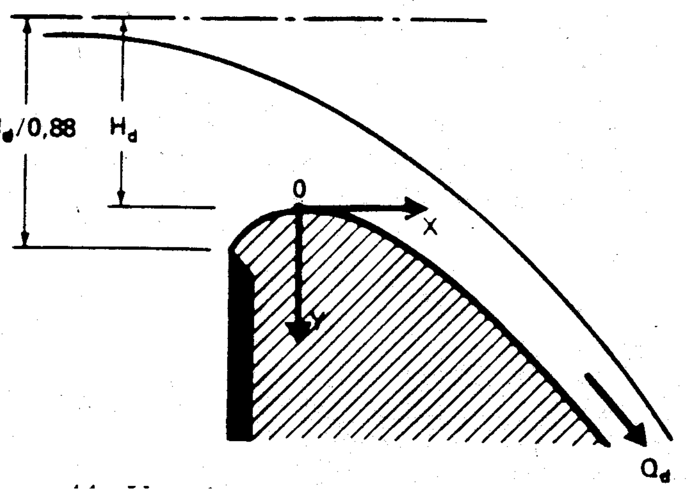


Figura 79.8-Vertedor de soleira normal para vazão Qd
Fonte: Notas de aula da EPUSP, prof. dr. Paolo Alfredini, 1998, p. 26, 1998

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

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

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).

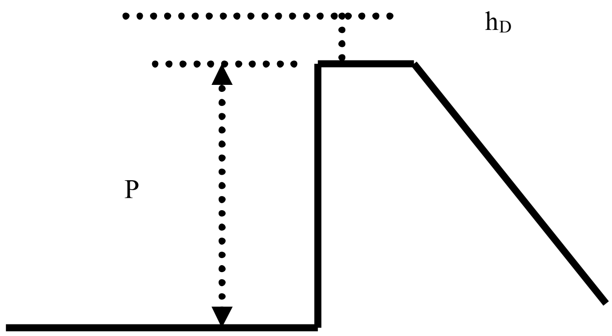


Figura 79.9- Perfil Creager

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.

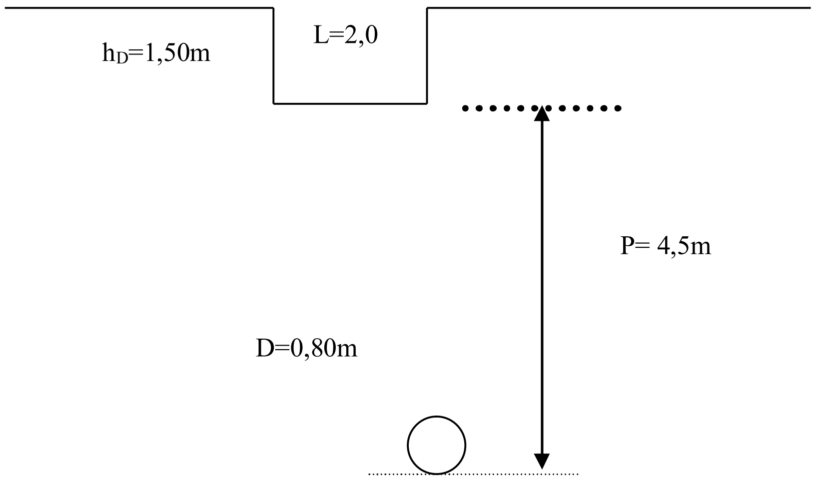


Figura 79.10- Esquema de vertedor tipo orifício no fundo e acima vertedor retangular.

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 coeficiente de escoamento K_0	Orifício Q (m^3/s)	Vertedor Coeficiente k_w	Vertedor Q (m^3/s)	Soma vazões (m^3/s)
0	0,67	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		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	0,49	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		4,34	**7,84**
5,75		3,58		6,06	**9,64**
6,00		3,65		7,97	**11,62**

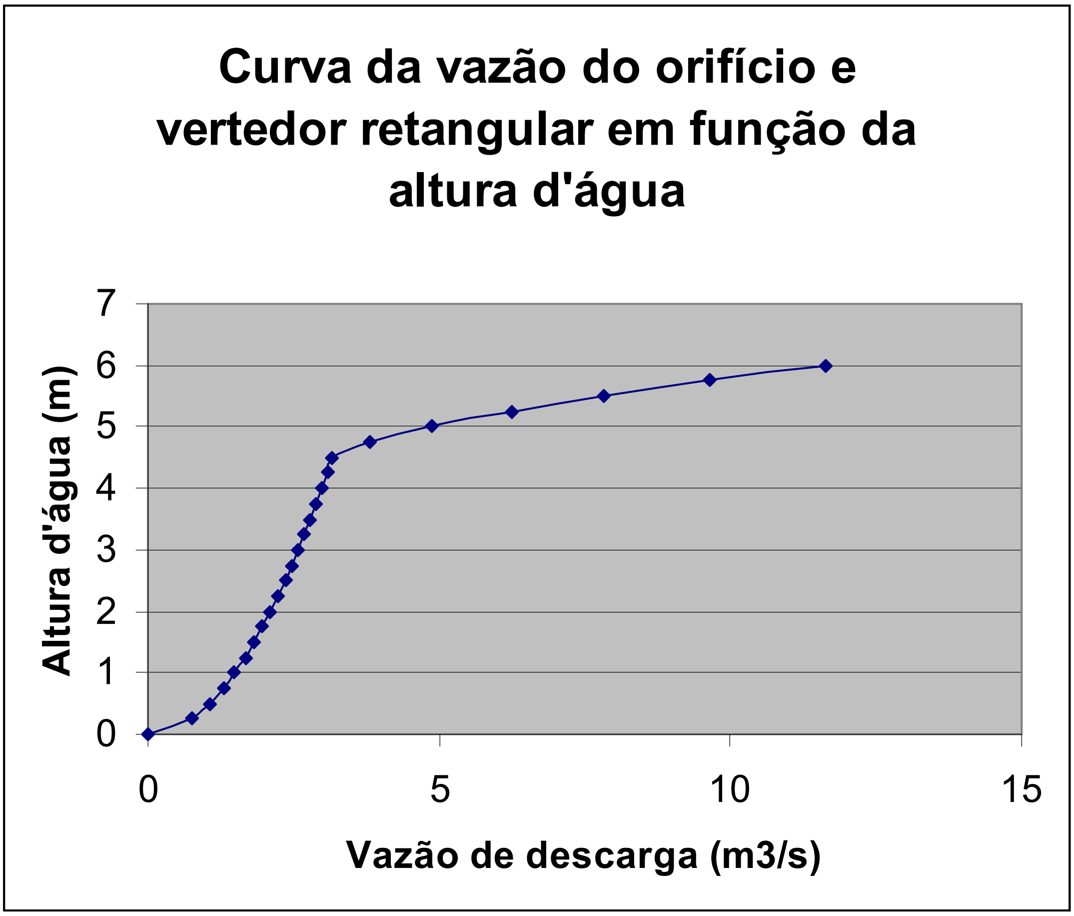


Figura 79.11- Gráfico da descarga total referente ao orifício e ao vertedor

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)

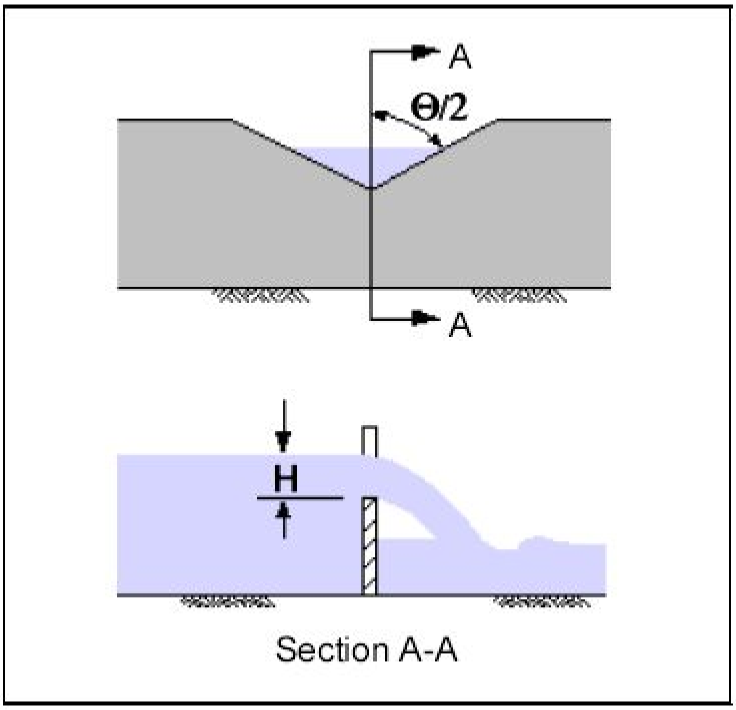


Figura 79.12- Vertedor triangular. Fonte> Georgia, 201

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

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

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.

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

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

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.

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

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).

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

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

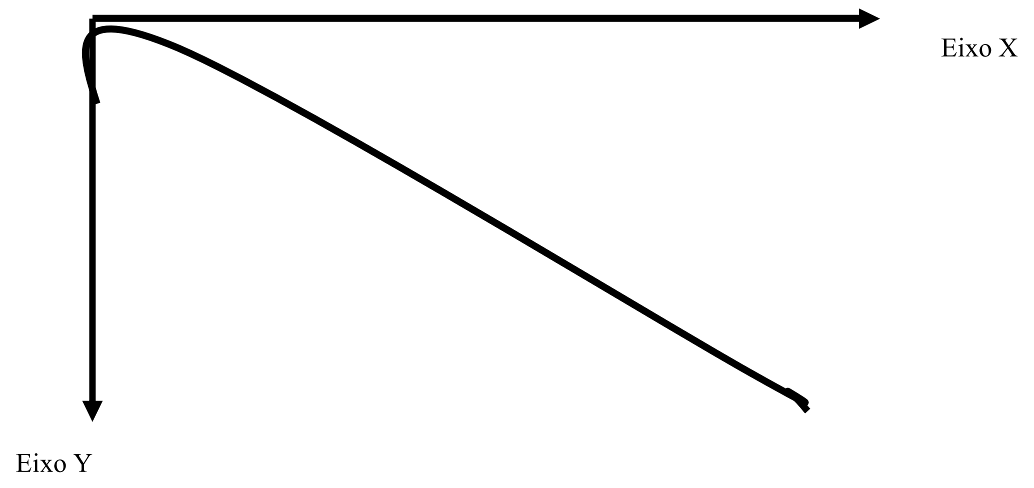


Figura 79.13- Perfil Creager com os eixos X e Y conforme Azeveto Netto et al,1998.

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

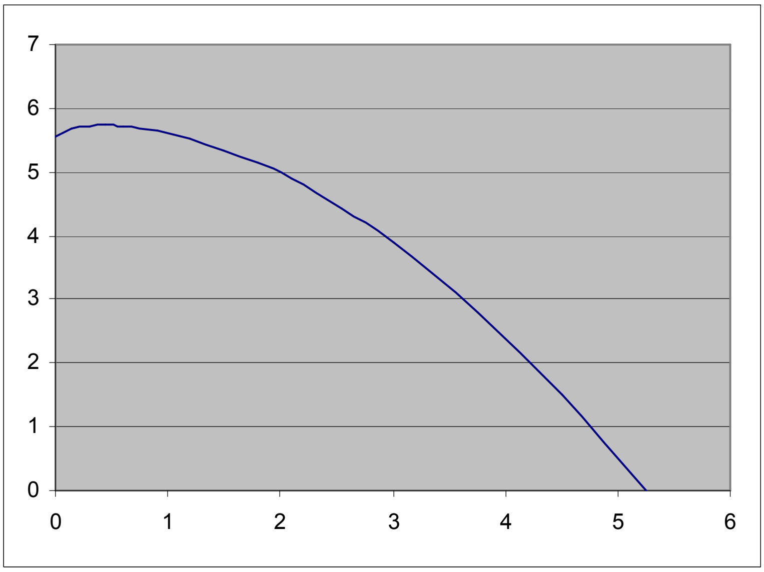


Figura 79.14- Perfil Creager com os eixos X e Y conforme Azeveto Netto et al,1998 considerando a carga de H=1,50m. O valor de y foi calculado usando (5,73-y)

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:

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

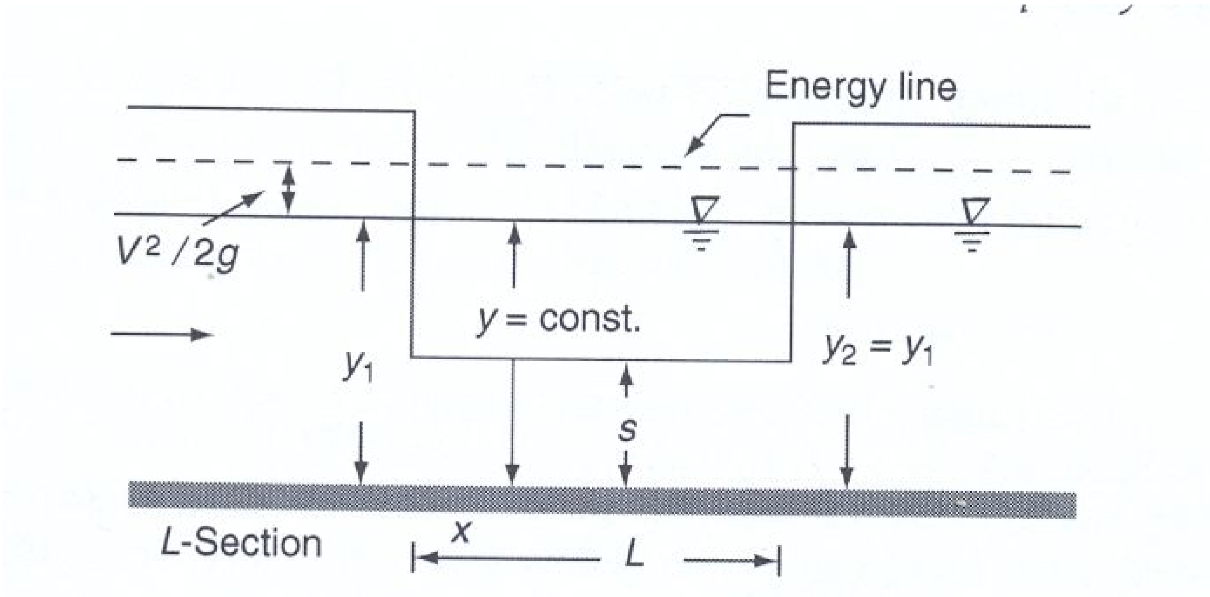


Figura 79.15- Corte do vertedor lateral. Observar a altura da crista "s" e a altura "y" e o comprimentoi L. Fonte: Subramanya, 2009

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 250.334,80m^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
	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 Ω_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 Ω_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

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

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

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

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:

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

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

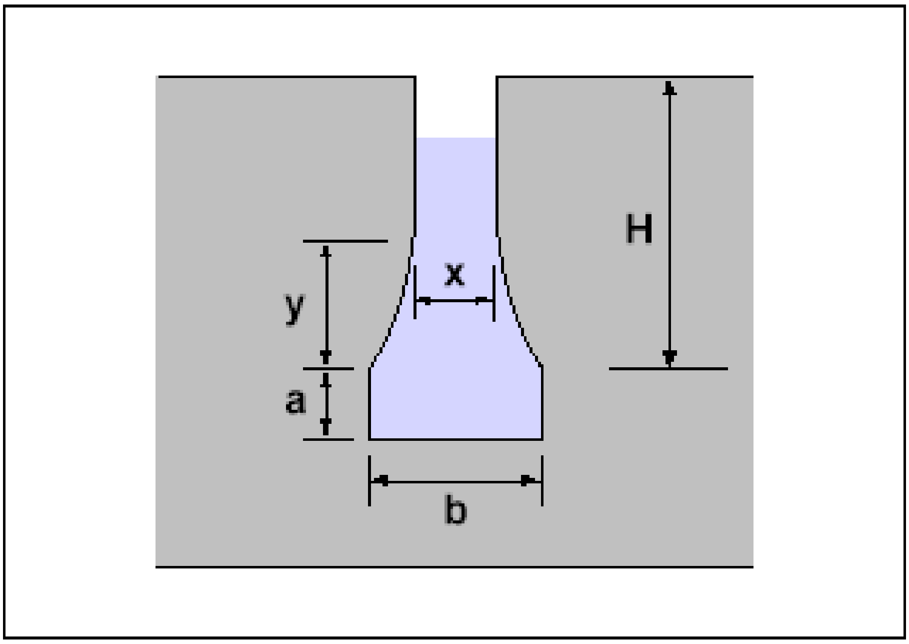


Figura 79.16- Vertedor proporcional. Fonte: Georgia, 2001

.

79.21 Equação do tronco cilíndrico cortado por um plano horizontal: úngula

Primeiramente vamos definir o que é úngula: secção ou parte de um cilindro cortado por um plano obliquo a base.

É comum o uso na sucção de tubulação de diâmetro D e assim temos que saber o volume V armazenado em função da altura d.

Na Figura (79.17) o nível varia de EL_1 até EL_o onde temos a altura da lâmina de água da seção AA.

Para a altura "d" na declividade existente, o volume do tronco cilíndrico atinge a distância de L.

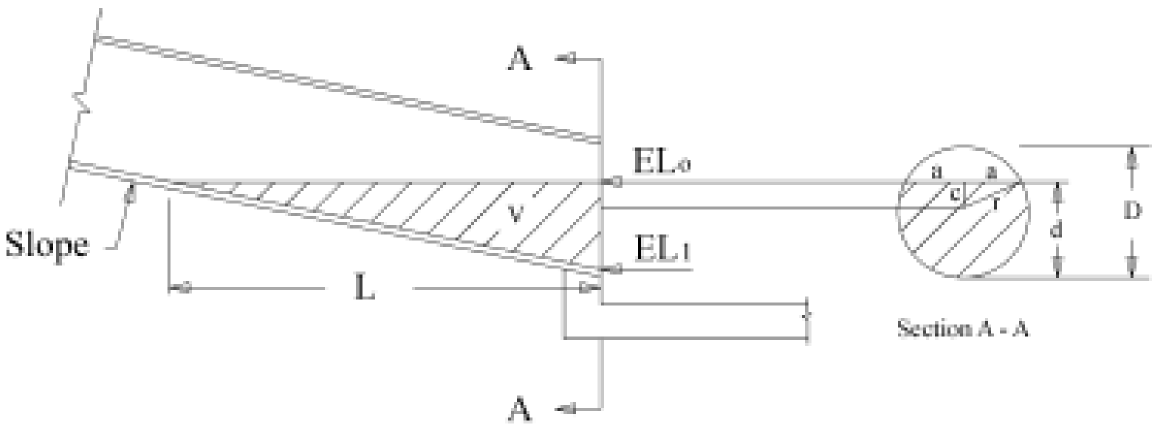


Figura 79.17 - Esquema das dimensões do tronco cilíndrico

A equação do segmento de círculo de altura "d" fornece a área A.

$$\mathbf{A= (D^2/ 8) \times \{2 \cos^{-1} (1 - 2d/D) - sen\, [2\cos^{-1} (1- 2d/D)]\}}$$

$$\mathbf{c= d - D/2}$$

$$\mathbf{a= (D^2/4 - c^2)^{0,5}}$$

Nota: $\cos^{-1}(x) = acos\,(x)$

L= altura d/ declividade da tubulação

$$\mathbf{V= L \times (2a^3/3 + c.A) / (D/2 + c)}$$

Exemplo 79.1

Seja uma tubulação com diâmetro de 1,2m com 160m de comprimento e que tenha declividade de 0,004m/m que conduz as águas pluviais a um poço molhado onde serão instaladas as bombas. Calcular o volume acumulado V na tubulação para a profundidade d=0,50m.

$$A= (D^2/ 8) \times \{2 \cos^{-1} (1 - 2d/D) - \text{sen} [2\cos^{-1} (1- 2d/D)]\}$$

$$A= (1,2^2/ 8) \times \{2 \cos^{-1} (1 - 2\times 0,5/1,2) - \text{sen} [2\cos^{-1} (1- 2\times 0,5/1,2)]\}$$

$$A= 0,446m^2$$

$$c= d - D/2$$

$$c= 0,5 - 1,2/2= -0,1m$$

$$a= (D^2/4 - c^2)^{0,5}$$

$$a= (1,2^2/4 - (-0,1^2)^{0,5}$$

$$a= 0,592m$$

Nota: $\cos^{-1}(x) = \text{acos}(x)$

L= 0,5m/0,004= 125m <160m

$$V= L \times (2a^3/3 + cA) / (D/2 + c)$$

$$V= 125 \times (2 \times 0,592^3/3 + (-0,1)\times 0,446) / (1,2/2 + (-0,1))= 23,36m^3$$

79.22 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.

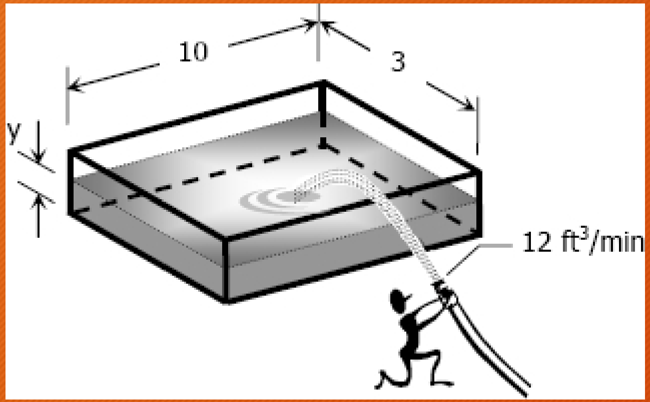
-URBONAS,BEM e STAHRE, PETER. Stormwaterwater Best Management practices and detention for water quality, drainage and CSO management. Printe Hall, 1993, New Jersey, 449 páginas

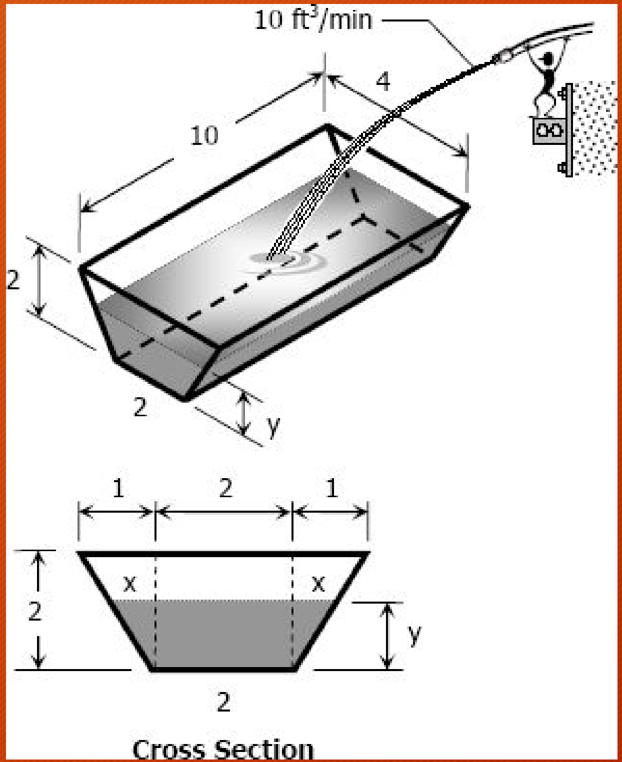
Equação de Reservatórios

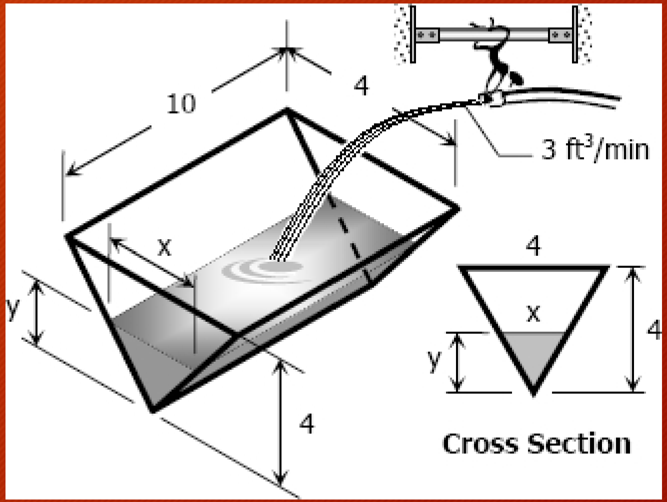
Preâmbulo

- Muitas vezes em ante-projetos de reservatórios de detenção ou retençao não temos o levantamento plani-altimétrico.
- Podemos estimar o volume com suposição aproximada de seção do reservatórios retangular (concreto), trapezoidal (mais comum) e triangular (fundo de vale).
- Serve somente para uma estimativa

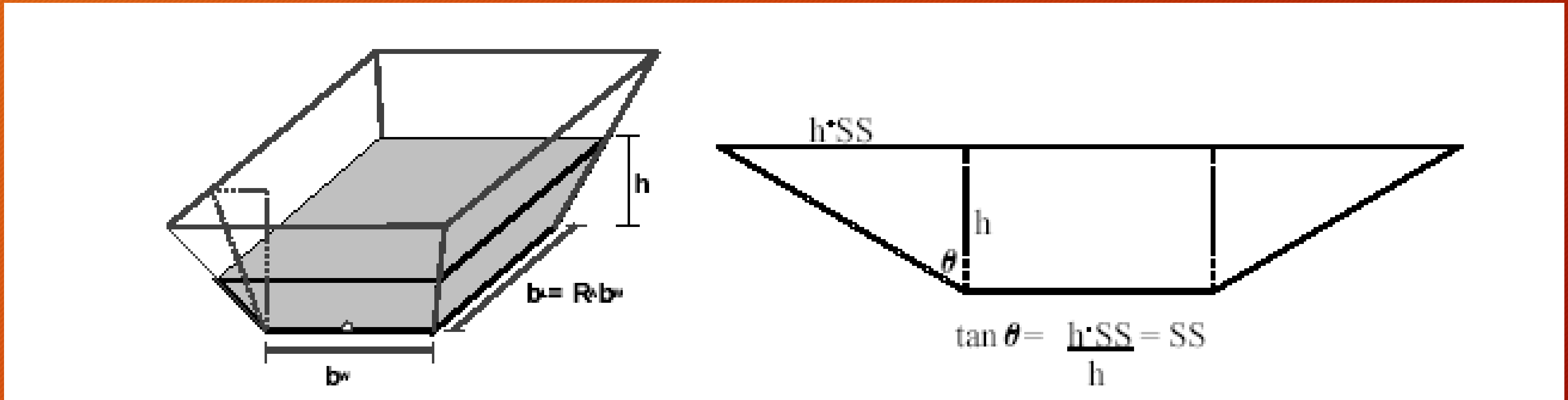
Seção transversal retangular, trapezoidal e triangular







1) Volume do prisma trapezoidal (mais usado)



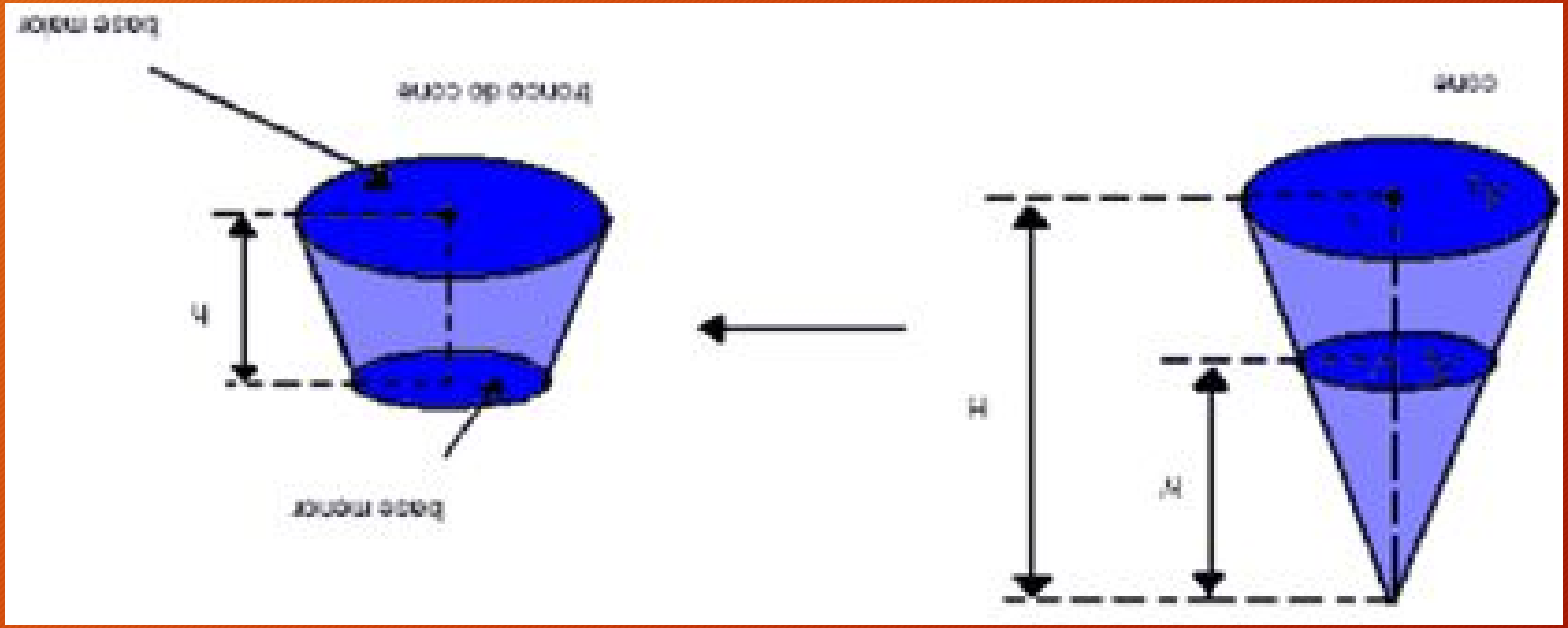
1)Volume do prisma trapezoidal (uso muito)

- Conforme Geórgia, 2001 ou *Akan* e *Paine*, 2001 o volume prismático trapezoidal é dado pela Equação (44.3).
- $V= L.W. D + (L+W)\ Z.D^2 + 4/3\ .Z^2\ .\ D^3$
  (Equação 44.3)
- Sendo:
- V= volume do prisma trapezoidal (m^3);
- L= comprimento da base (m);
- W= largura da base (m);
- D= profundidade do reservatório (m) e
- Z= razão horizontal/vertical. Normalmente 3H:1V

1) Exemplo do volume de prima trapezoidal

- Exemplo 44.3
- Dados: Largura= W= 20m, Comprimento= L=60m, Profundidade= D=3m e Z=3. Achar o volume.
- Conforme a Equação (44.3):
- $V= L.W.\ D + (L+W)\ Z.D^2 + 4/3\ .\ Z^2\ .\ D^3$
- $V= 20 \times 60 \times 3 + (20+60) \times 3 \times 3^2 + 4/3 \times 3^2 \times 3^3$
- $V= 6.084m^3$

2) Tronco de pirâmide circular cônica



2) Tronco de pirâmide circular cônica

- Conforme Geórgia, 2001 ou *DeKalb County*, 2000 temos:
- **$V = 1{,}047 \times D\ (3\ R_1^2 + 3 \times Z \times D \times R_1\ \ + Z \times D^2)$ (Equação 44.4)**
- Sendo:
- V= volume (m^3)
- D= altura da pirâmide circular cônica (m)
- R_1= raio da parte inferior (m^2)
- Z= razão horizontal/vertical.
-

2) Tronco de pirâmide circular cônica

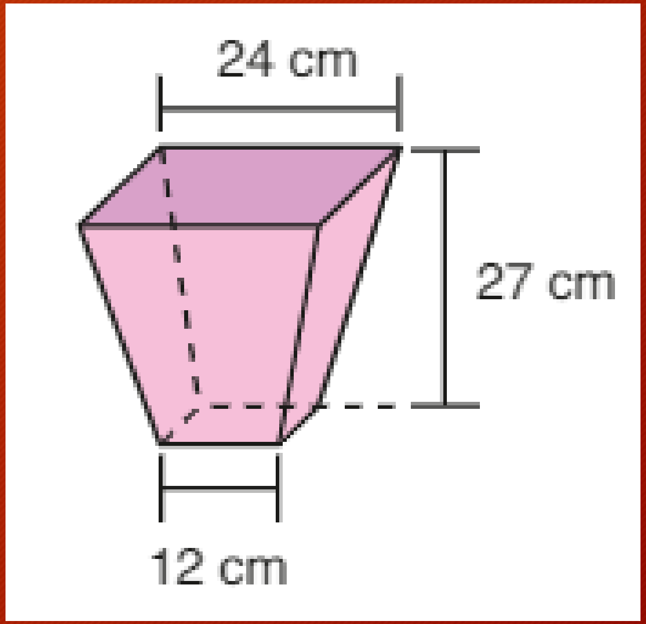
- **Exemplo 44.4**
- Calcular volume de reservatório em tronco de pirâmide circular cônica usando a Equação (44.4) sendo:
- D= 4,0m,
- R_1= 10,0m e
- Z= 3.
- $V=1{,}047 \times D\ (3\ R_1^2 + 3 \times Z \times D \times R_1 + Z \times D^2)$
- $V= 1{,}047 \times 4\ (3\ .\ 10^2 + 3 \times 3 \times 4 \times 10 + 3 \times 4^2)$
- **V= 2.877m³**

2) Volume do tronco de pirâmide circular

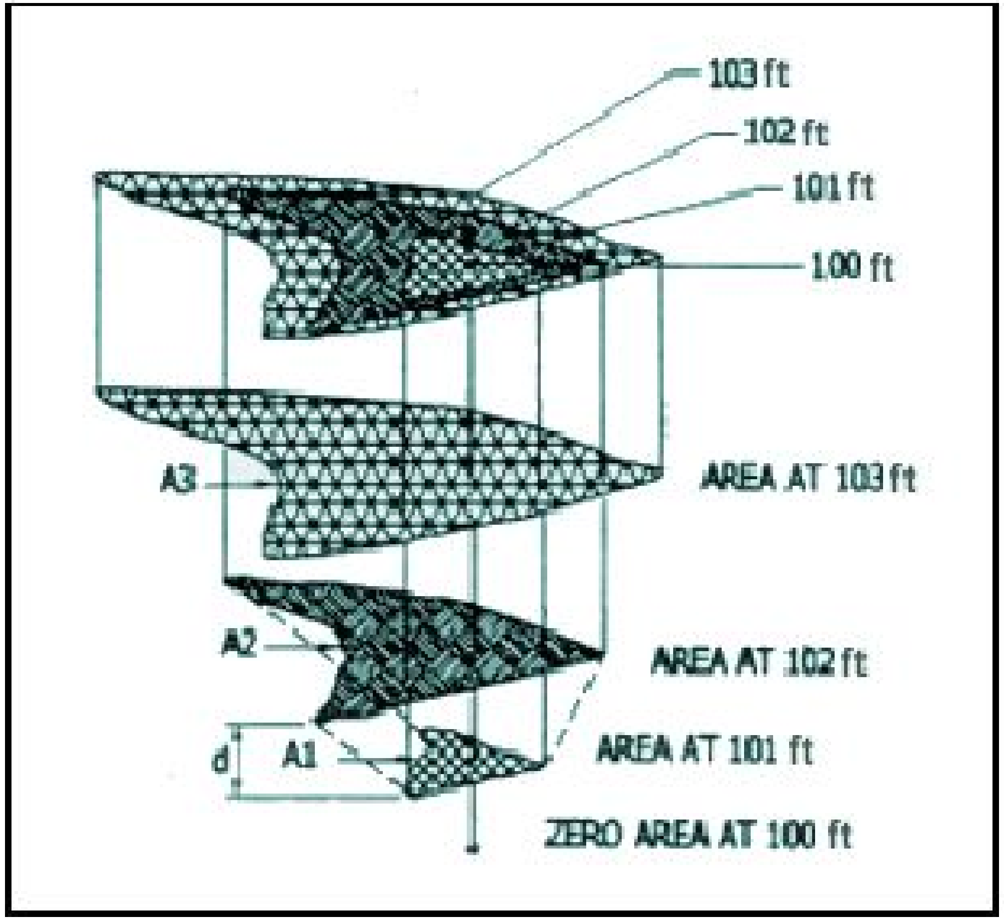
- **Exemplo 44.2**
- Seja A_1= 1000m^2 e A_2= 1500m^2 e altura d= 2,00m. Qual o volume?
- Conforme Equação (44.2), temos:
- $V = (d/3)\ [A_1 + (A_1 \times A_2)^{0,5} + A_2\ ]/3$
- $V = (2{,}00/3)\ [1000 + (1000 \times 1500)^{0,5} + 1500]/3$
- V= 828m^3

3) Volume do tronco de pirâmide

- O volume em tronco de pirâmide é dado pela expressão (Geórgia, 2001).
- $V= (d/3)\ [\mathbf{A_1} + (\mathbf{A_1} \times \mathbf{A_2})^{0,5} + \mathbf{A_2}\ ]/3$ **(Equação 44.2)**
- Sendo:
- V= volume do tronco de pirâmide (m^3);
- A_1= área 1 (m^2);
- A_2= area 2 (m^2);
- D= altura entre as áreas A_1 e A_2 (m).
-



4) Volume de um reservatório com áreas transversais variáveis (realidade)



4) Volume de um reservatório com áreas transversais variáveis

- O volume entre duas áreas A_1 e A_2 eqüidistante de “d” é calculado:
-
- $$V_{1,2} = [(A_1 + A_2)/2] \times d$$

4) Volume de um reservatório com áreas transversais variáveis

- **Exemplo 44.1**
- Calcular o volume de um reservatório com 1,00m de altura sendo fornecida as áreas (m^2) no intervalo de 0,10m.
- Usando a Equação (44.1), obtemos a Tabela (44.1).

4) Volume de um reservatório com áreas transversais variáveis

Tabela 44.1 - Volume por faixa e acumulado de um reservatório de seção transversal variável.

Altura (m)	Área transversal (m^2)	Volume Por faixa (m^3)	Volume acumulado (m^3)
0,1	2931	293	293
0,2	5861	440	733
0,3	8790	733	1465
0,4	11722	1026	2491
0,5	14655	1319	3810
0,6	17579	1612	5421
0,7	20512	1905	7326
0,8	23442	2198	9524
0,9	26424	2493	12017
1,0	29309	2787	14804

5) 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:
- $$S= b\ h^{c}$$
- Sendo:
- S= volume do reservatório
- h= lâmina d'água sobre a saída
- b, c = parâmetros constantes que dependem da forma do reservatório
-

5) Formulação matemática da curva cota - volume 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:

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

5) Formulação matemática da curva cota - volume do reservatório

- Para o valor de “b” temos:
-
- $b = 10^{[\Sigma \log S - c\,(\Sigma \log h)]\,/\,N}$

  (Equação 79.11)

Exemplo

- 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 (132.4).
- Ovolume (*Storage*) S em função da altura h é a Equação (132.3):
- **$S = b\ h^{c}$**
- Sendo c=0,999561 e b= 29331,58 teremos:
- **$S = 29331{,}58\ h^{0{,}999561}$**

Altura h N=30 (m)	log h	$(\log h)^2$	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		$S=29331,58 \cdot h^{0,999561}$	

Exemplo 132.3- Caso real

Reservatório de detençãoa no córrego São João m São Paulo.

Seja um reservatório natural com 250.334,80m^3.

A curva cota-volume foi obtida em sete intervalos, portanto N=7.

obtemos a Tabela (132.5).

Tabela 132.5- Planilha para cálculo da fórmula matemática da curva cota-volume de um reservatório natural.

Altura h N=7 (m)	log h	$(\log h)^2$	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		$S=1761{,}94 \cdot h^{2{,}78}$	

Tabela 132.5- Planilha para cálculo da fórmula matemática da curva cota-volume de um reservatório natural.

- o volume (*Storage*) S em função da altura h é a Equação (132.1):
- $S= b\ h^{c}$
- Sendo: c=2,78
- b=1761,94
- $S = 1761{,}94 \cdot h^{2{,}78}$
- $S= b.H^{c}$
- Derivando em relação a H temos:
- $dS/dH= b.c.\ H^{c-1}$
- Sendo:
- S= armazenamento (*storage)* (m^3)
- H= nível da agua (m)
- A= área do reservatório (m^2) em função de H e escreve-se A(H).
- b,c= coeficientes da análise de regressão

Obrigado !!!

- Engenheiro Plínio Tomaz
- pliniotomaz.com
- pliniotomaz@gmail.com

Interpolação Linear

Preâmbulo

- Existem muitas maneiras de interpolação de dados.
- Mas vamos usar a mais simples de todas que é :
- **Interpolação linear**
- **Planilha Excel**
- **Uso muito interpolação linear em ROUTING de reservatórios quando usamos Método de Pulz, evitando trabalho manual.**
- **Cálculo de áreas de reservatórios com curvas de níveis variando de 1 m em 1 m. Posso fazer interpolação para 0,20 m em 0,20 m.**
- **Hietogramas de chuvas**

Truque de Pulz:
Vazão efluente e [(2S/Δ T) + Q]
Plinio: uso interpolação linear

Interpolação linear na forma de Lagrange.

Achamos o valor de “y” dado x. Conhecemos x1, x2, y1 e y2.

$$y = \frac{(x - x_2)}{(x_1 - x_2)} y_1 + \frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} y_2$$

Livro: *Excel for Scientist and Engineers de* Willian J. Orvis, página 323
Dados de A4 até A24 e B4 até B24

X=Tempo (h)	Y=Hietograma acmulado em %
A4=0,0	B4=0,0
1,5	3,0
3,0	6,0
4,5	9,0
6,0	12,0
7,5	15,0
9,0	19,0
10,5	23,0
12,0	27,0
13,5	32,0
15,0	38,0
16,5	45,0
18,0	57,0
19,5	70,0
21,0	79,0
22,5	85,0
24,0	89,0
25,5	92,0
27,0	95,0
28,5	97,0
A24=30,0	B24=100,0

Resultado usando interpolação linear
Primeira linha é imput D4. Quero dados de 1 em 1

X=imput	index	Ycalc
D4=0	E4=1	F4=0,00
1	1	2,00
2	2	4,00
3	3	6,00
4	3	8,00
5	4	10,00
6	5	12,00
7	5	14,00
8	6	16,33
9	7	19,00
10	7	21,67
11	8	24,33
12	9	27,00
13	9	30,33
14	10	34,00
15	11	38,00
16	11	42,67
17	12	49,00
18	13	57,00
19	13	65,67
20	14	73,00

Interpolação linear usando Excel

- Primeira linha do index: =CORRESP(D4;$A$4:$A$24

- Linha dos cálculos:=(D4-ÍNDICE($A$4:$A$24;E4+1))*ÍNDICE($B$4:$B$24;E4)/(ÍNDICE($A$4:$A$24;E4)-ÍNDICE($A$4:$A$24;E4+1))+(D4-ÍNDICE($A$4:$A$24;E4))*ÍNDICE($B$4:$B$24;E4+1)/(ÍNDICE($A$4:$A$24;E4+1)-ÍNDICE($A$4:$A$24;E4))

Erros no método da interpolação linear

- O método da Interpolação linear é considerado um método fácil de ser usado.
- Os erros são proporcionais ao quadrado da distância entre os dados.
- Quanto mais distantes os dados, maiores são os erros.

- Erro máximo de 0,5% Sem problemas

Livros recomendados

- Livro: *Excel for Scientist and Engineers de* Willian J. Orvis, página 323
- *Numerical Analysis for engineers* de Richard Mccuen, 2016, Amazon/Kindle, capitulo 6.

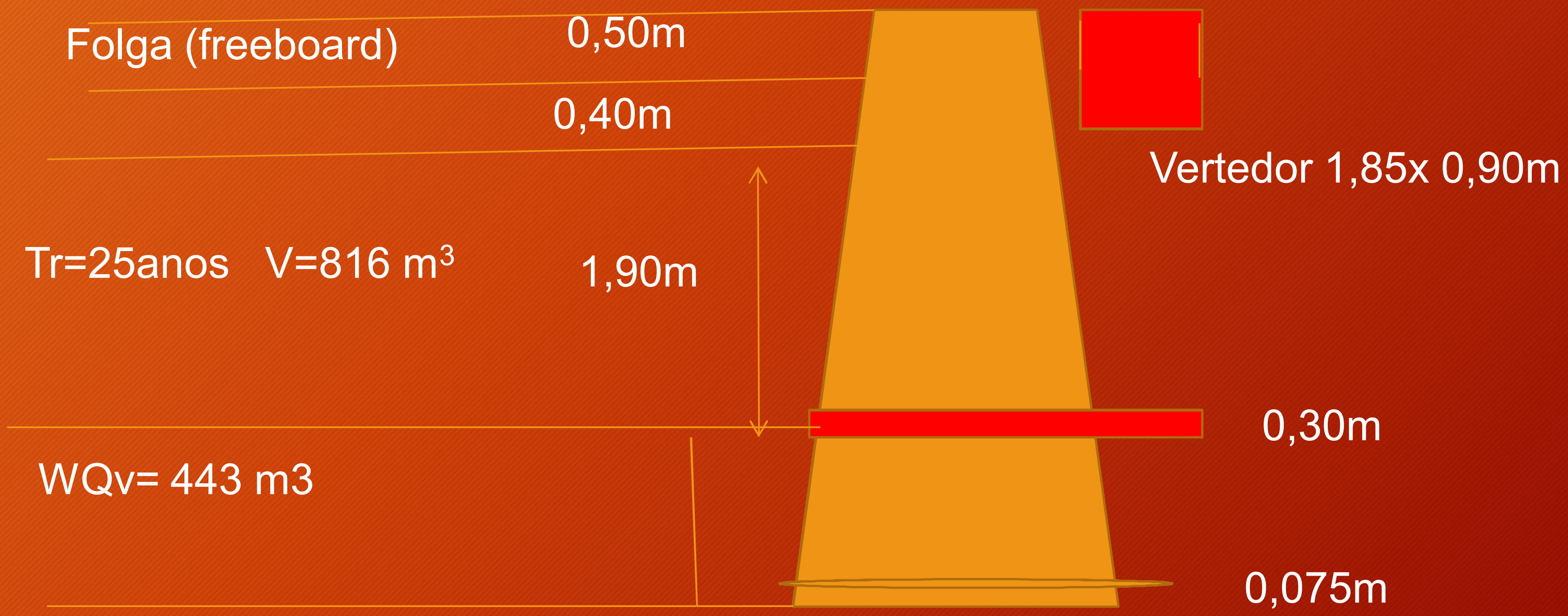
Obrigado !!!

- Engenheiro Plinio Tomaz
- pliniotomaz.com
- pliniotomaz@gmail.com

Orifícios e vertedores

- Usos comuns de orifícios e vertedor

Reservatório de detenção estendido

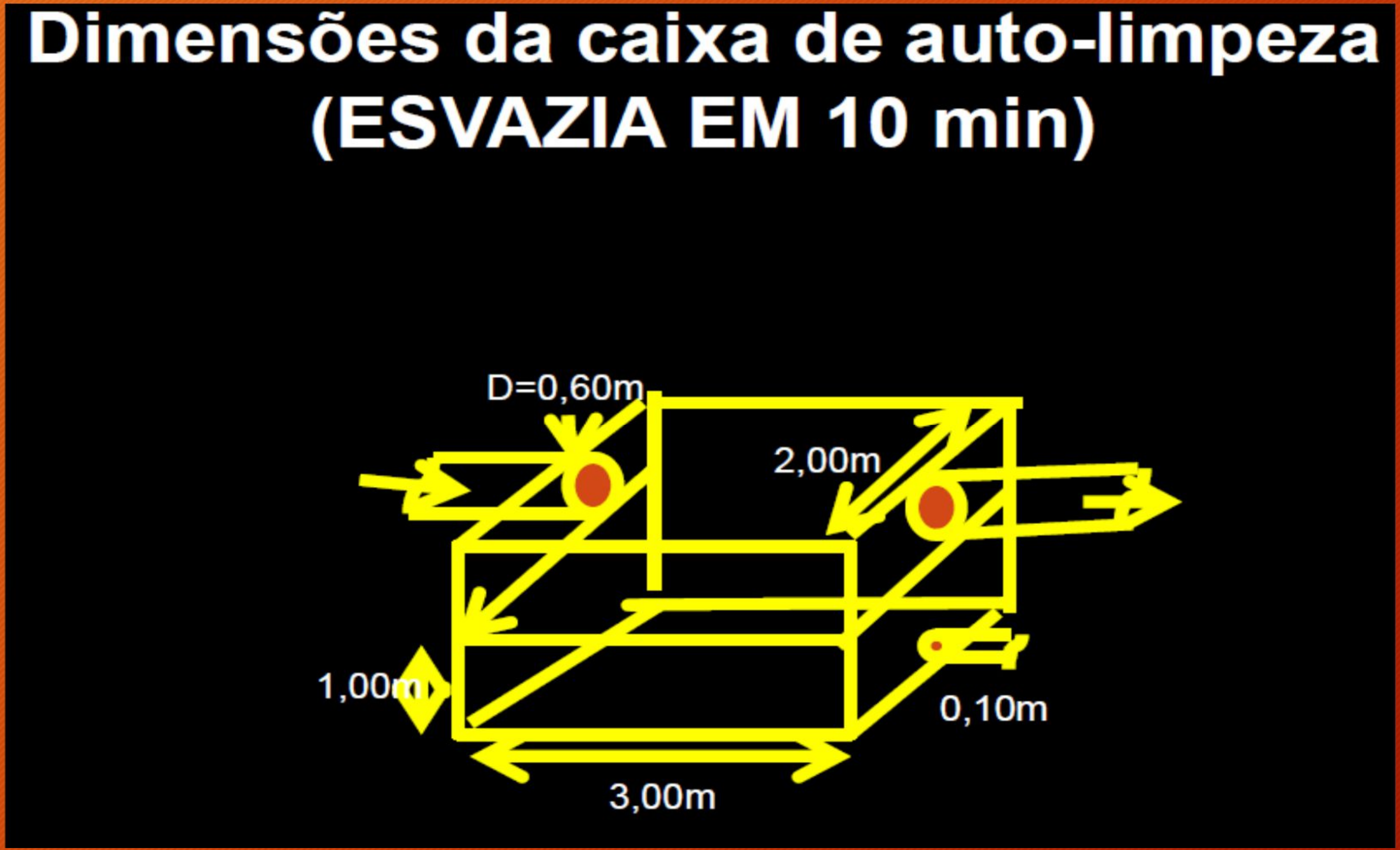


Observações:

- 1. WQv
- Tem que esvaziar em 24 horas.
- Tomamos a altura média (Truque) para dimensionamento do orifício

- 2. Volume de enchente para Tr=25anos
- Dimensionamos o orifício para a vazão de pré-dimensionamento usando a altura de 1,90m.

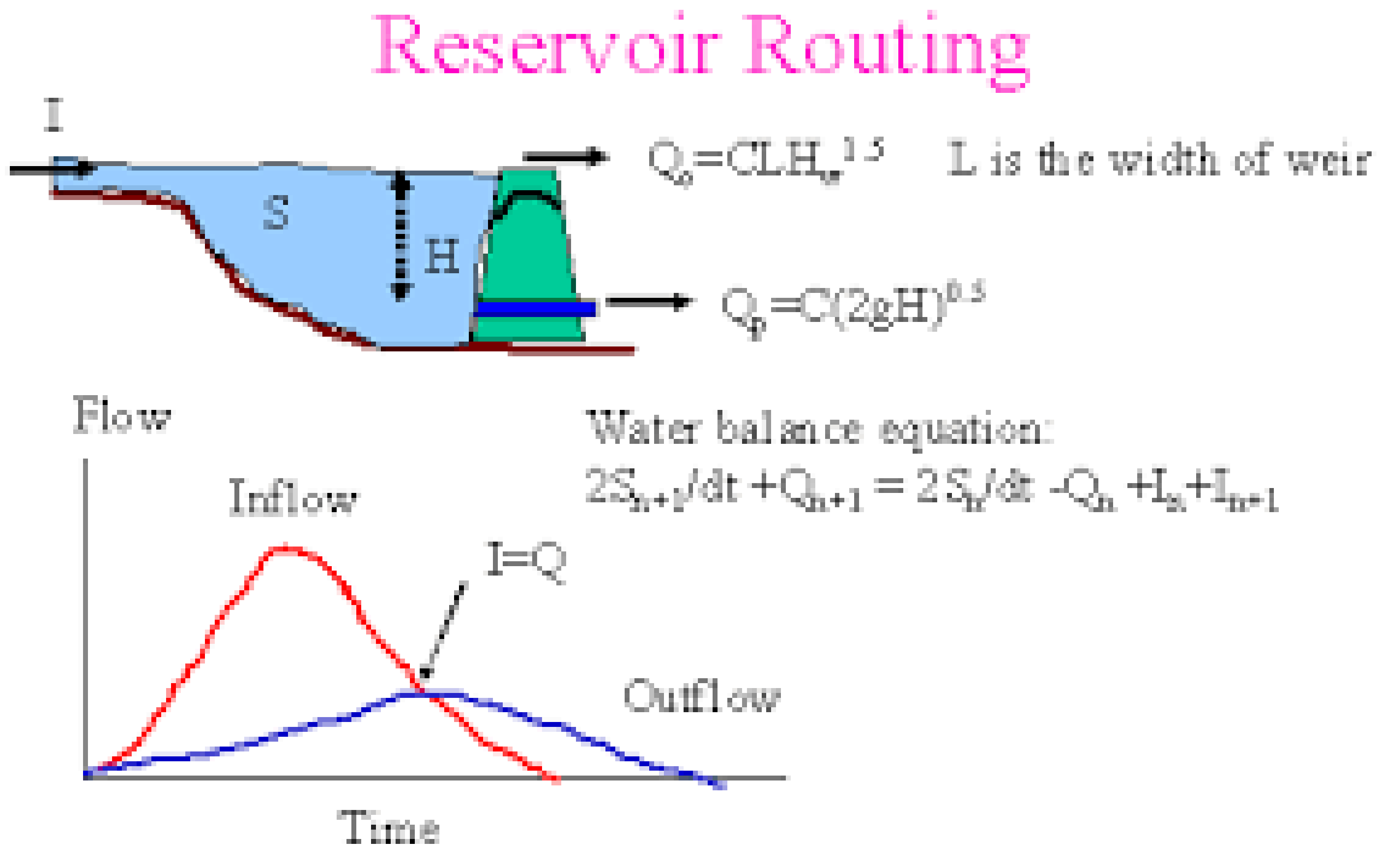
Caixa de auto-limpeza para Aproveitamento de água de chuva para fins não potáveis



Observação

- **Para dimensionamento do orifício usamos a altura média para o esvaziamento em aproximadamente 10 min.**

Routing de reservatórios



Método Modificado de Pulz, 1928

$$I - Q = dS/dt$$

Sendo:

I= vazão de entrada

Q= vazão de saída

S= volume armazenado

t= tempo

Altura do reservatório em função da vazão de saída
Notar orifício e vertedores

1	2	3	4		
	Orifício	Vertedor 0,50 x 1,00	[illegible]		delta t=150s
Altura	Q=Cd x A x (2gh)^0,5	Q=1,55 x L x H^1,5	Q=1,55. L. H^1,5	Q=1,55xLx H^1,5	Orificio+Vert.
m	(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)		Q m3/s
0					0,00
0,20					0,14
0,40					0,39
0,60	0,43				0,43
0,80	0,75				0,75
1,00	0,97				0,97
1,20	1,15				1,15
1,40	1,30				1,30
7,40	3,61		27,11	37,43	68,15

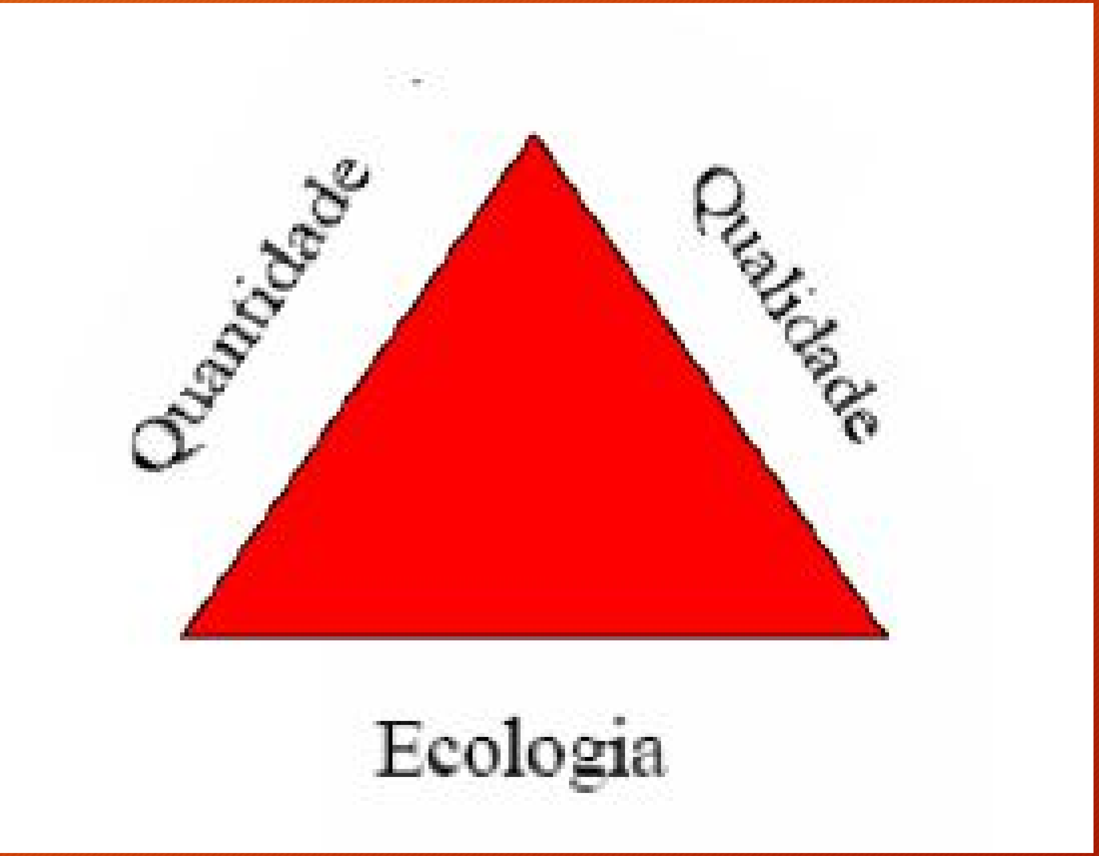
Orifício funcionando como vertedor

Vertedor comum

Orifício propriamente dito

Vertedor de emergência

Manejo de águas pluviais



Objetivo

- Uso de orifícios e vertedores em obras de manejo de águas pluviais.
- Uso em reservatórios de detenção e outros
- Não é para medição de vazão
- Bueiro: cálculos especiais baseado no FHWA
- Vertedor lateral: tem cálculos especiais baseado em Hager
- Routing de reservatórios (orifícios e vertedor)
- Irrigação usa muitos vertedores
- Vertedor tubular como Tulipa tem cálculos especiais
- Tubos de quedas também possuem cálculos especiais

- Orifícios

Orifício

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

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

Sendo:

Q= vazão de descarga (m^3/s);

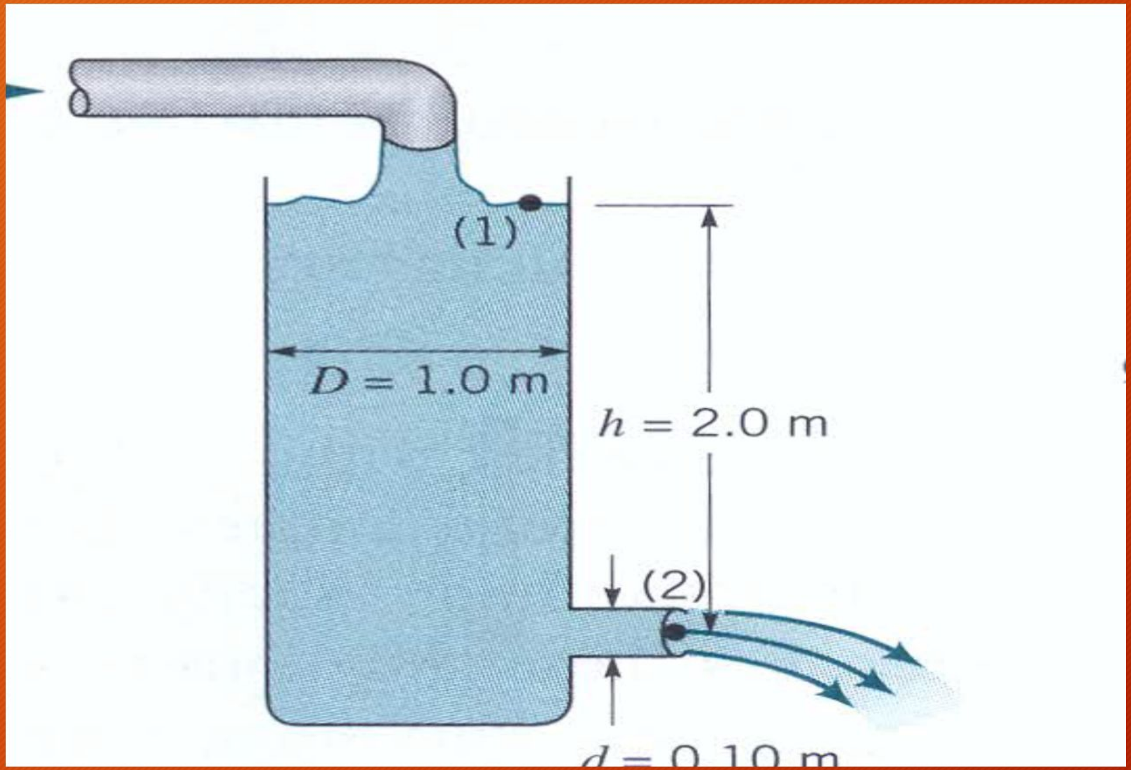
A_0 = área da seção transversal do orifício (m^2);

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

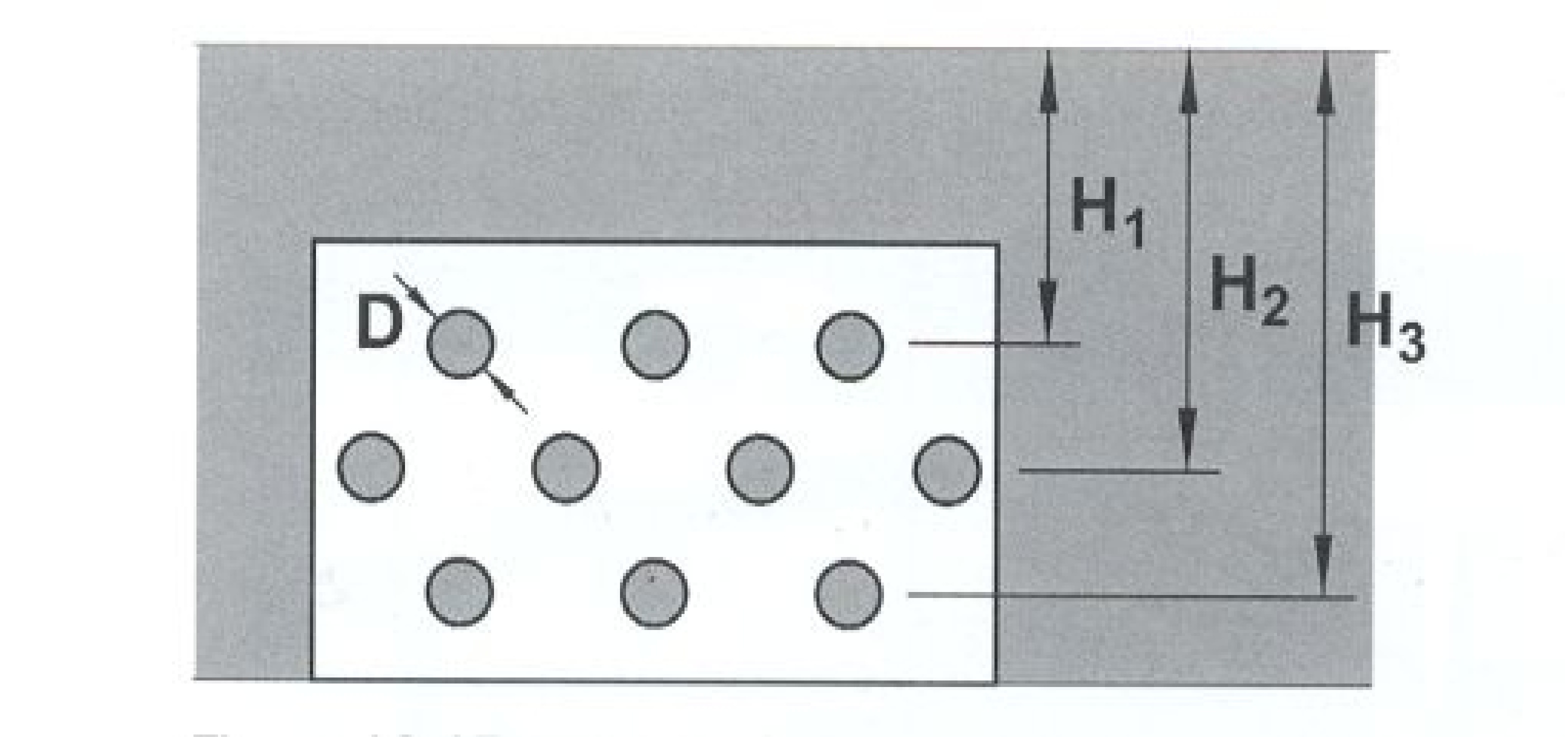
h= altura da água até o meio do orifício (m); Cuidado não errar !

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

Orifício de seção água até o meio da tubulação



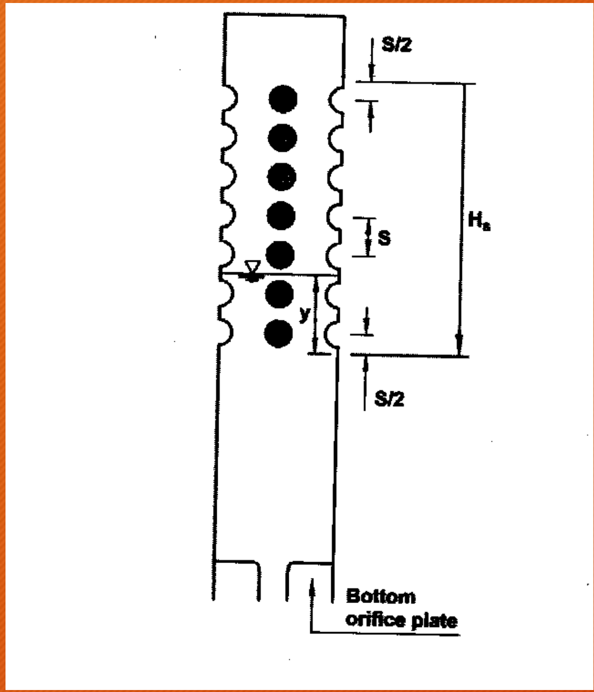
Tubos com orifícios
Placa de orifício

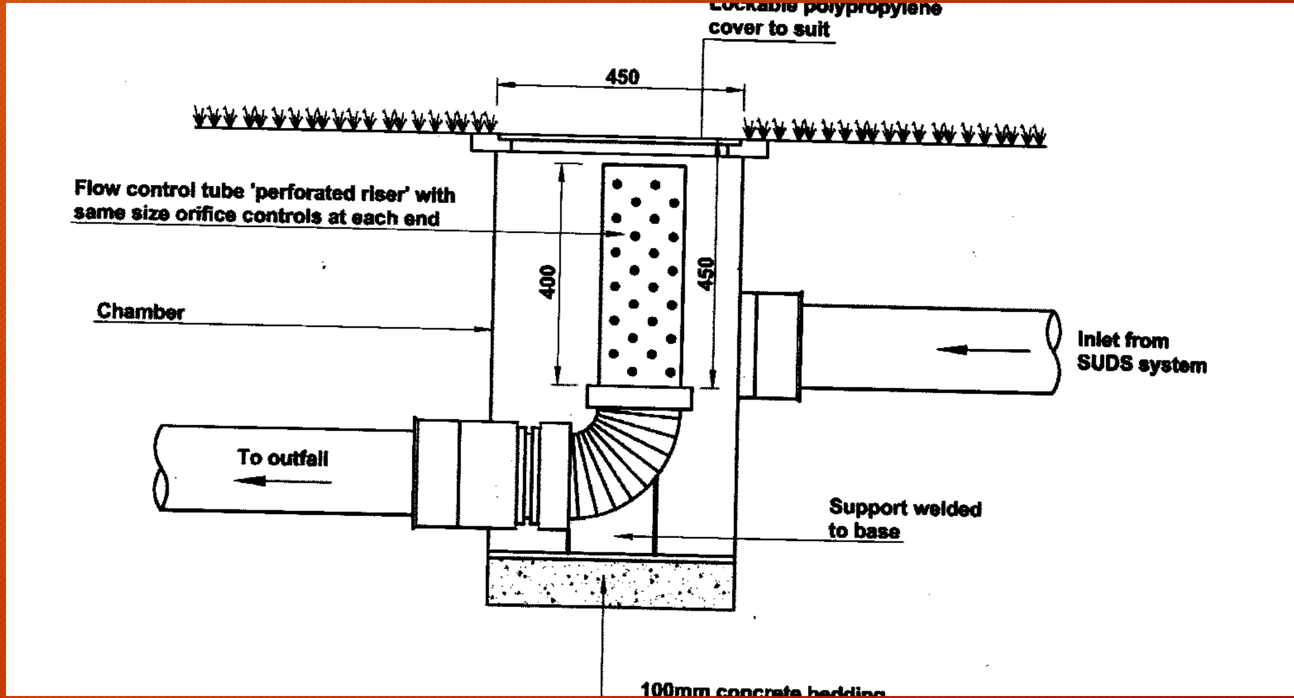


Tubos com orifícios
Placa de orifícios

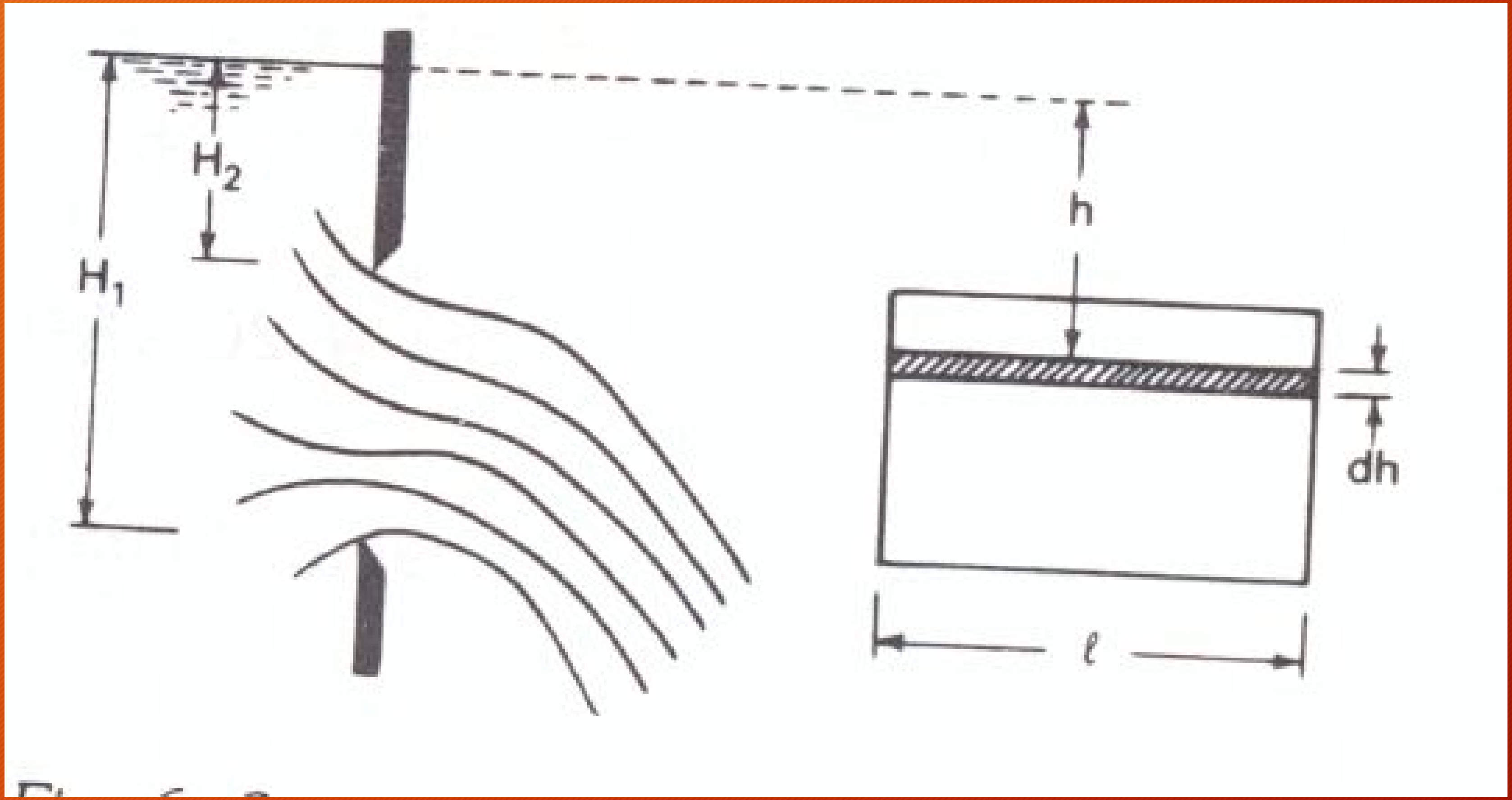
- A equação para o cálculo da vazão conforme CIRIA, 2007 é a seguinte:
- **$Q = Cp \times (2 \times Ap / 3 \times Hs) \times (2g)^{0,5} \times H^{1,5}$**
- Sendo:
- Q= vazão de descarga no orifício (m^3/s)
- Cp= coeficiente de descarga para perfuração= 0,61
- Ap= área da seção transversal de todos os orifícios (m^2)
- Hs= distancia de S/2 acima da linha de orifício mais alta até S/2 da linha de orifício mais baixa (m)
- S=distância entre os orifícios (m)
- H= altura da carga de água (m)

Placa de orifícios protegida para pequenos lagos Fonte: CIRIA, 2007





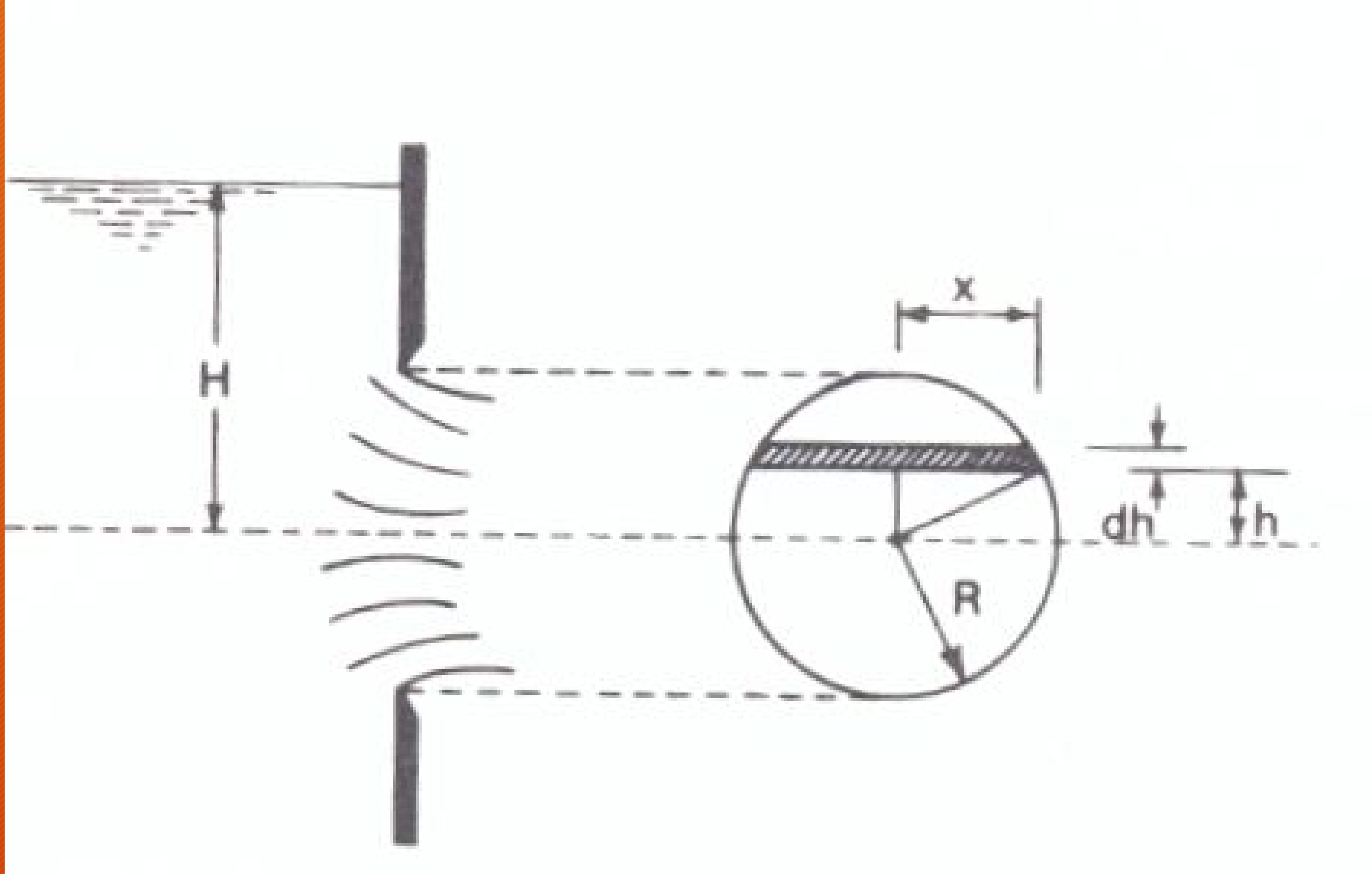
Orifício retangular de grandes dimensões
Fonte: Novais-Barbosa, 2003



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

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

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



Orificio circular de grande dimensão

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

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

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

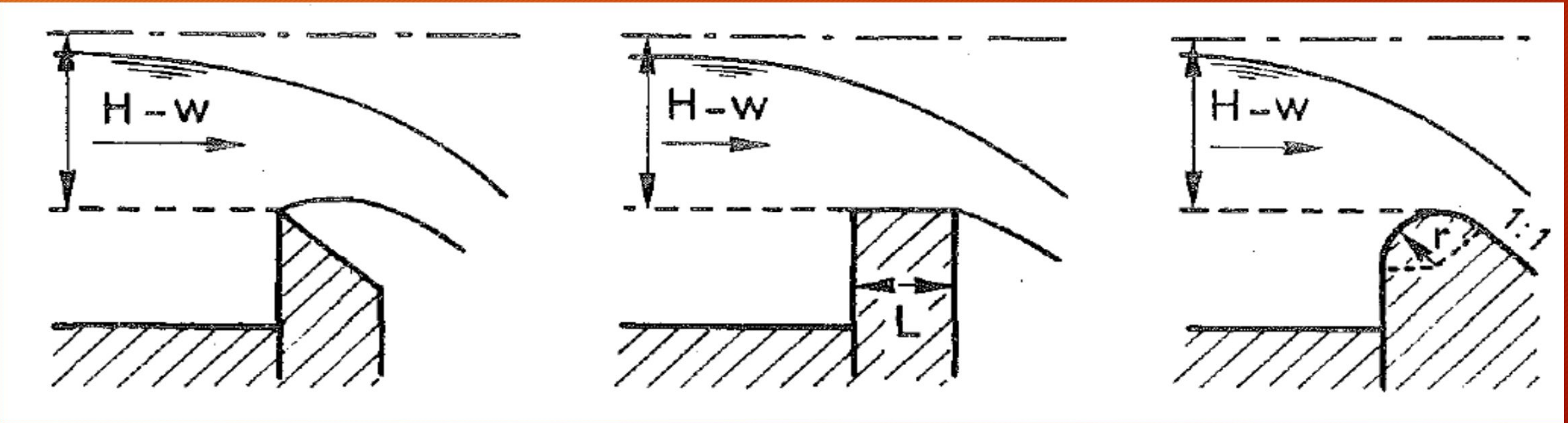
- $Q = (2/3) \times Cd \times L \times (2.g)^{0,5} \left[\left(H_1 + Vo^2/2g \right)^{3/2} - \left(H_2 + Vo^2/2g \right)^{3/2} \right]$
-
- Sendo:
- Q= vazão (m^3/s)
- Cd= coeficiente de descarga
- L= largura do orificio (m)
- g= aceleração da gravidade =9,81m/s^2
- H_1=altura da água acima da base inferior do orifício (m)
- H_2= altura da água acima da base superior do orifício (m)
- Vo= velocidade da água no canal (m/s)

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

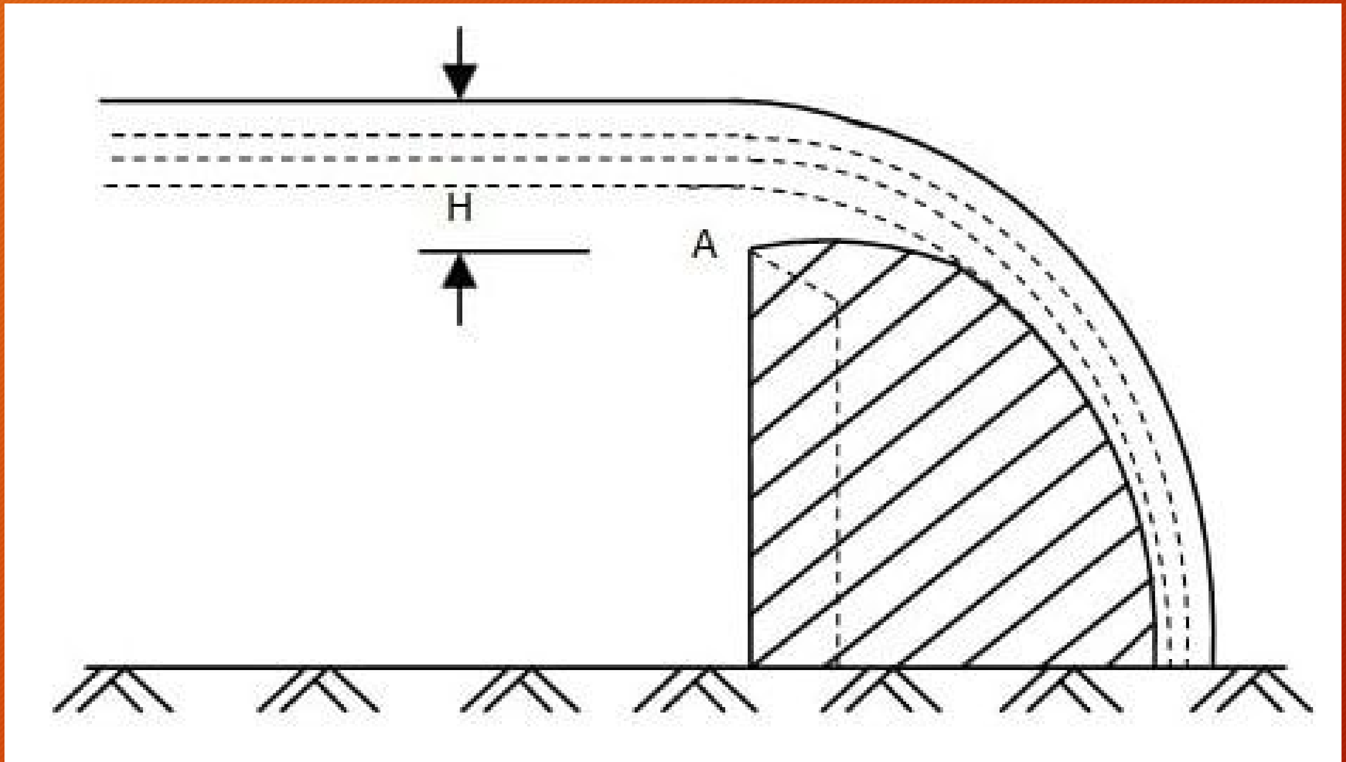
- **$Q= Cd \times S\ [(2g\ (\ h + Vo^2/2g)]^{0,5}$**
- Sendo:
- Q= vazão (m^3/s)
- S= area da seção do orificio (m^2)
- g=aceleração da gravidade= 9,81m/s^2
- h= altura da superficie até o centro do orificio (m)
- Vo= velocidade da água no canal.

- Vertedores

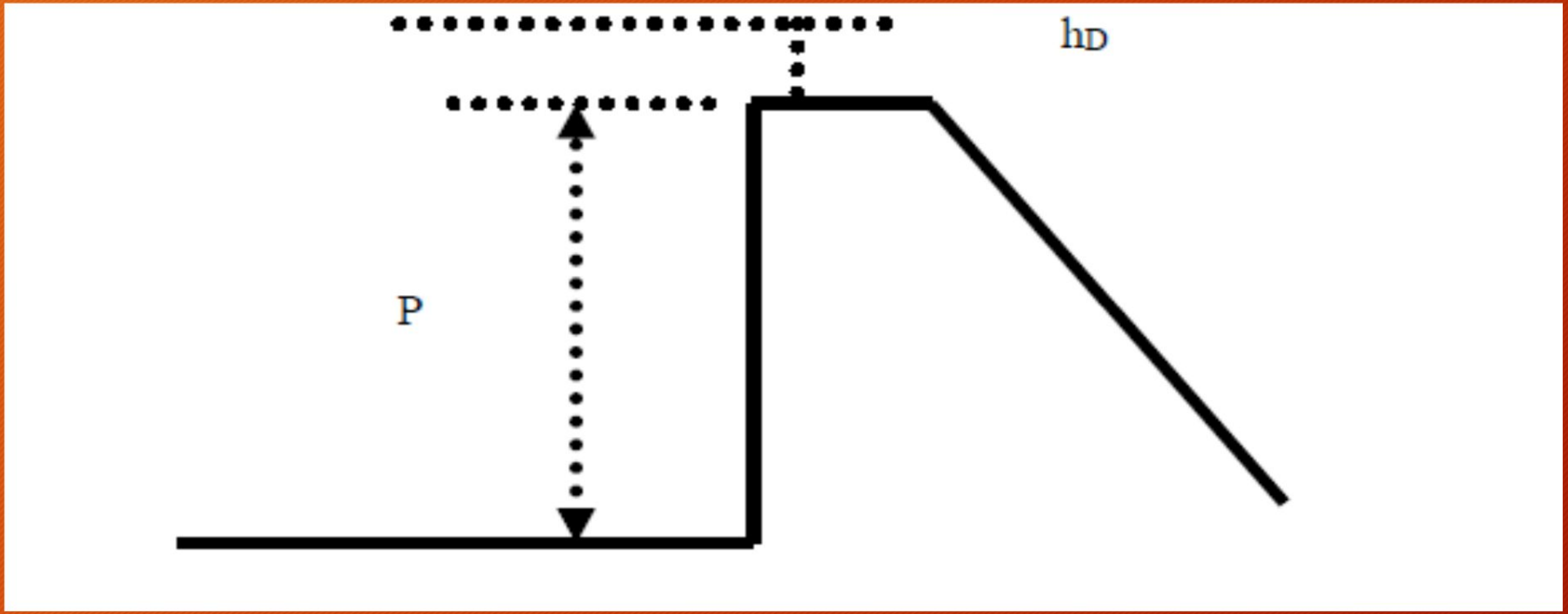
Vertedor de parede fina, parede espessa e canto arredondado (Ogee).
Fonte: Hager, 2010



Vertedor Ogee
(não vamos detalhar)



Vertedor de soleira espessa



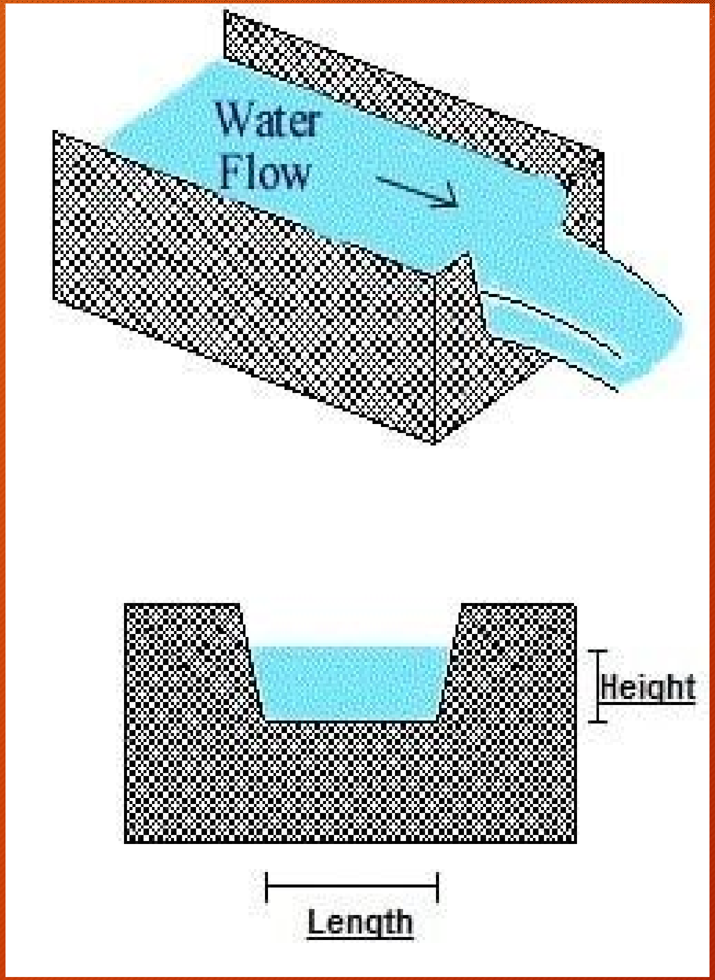
Vertedor de soleira espessa Usado pelo DAEE

- 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.

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

- 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)
- 1,55= coeficiente de descarga do vertedor retangular sem contração para unidades SI.
- H= altura da crista do vertedor em relação ao fundo (m).

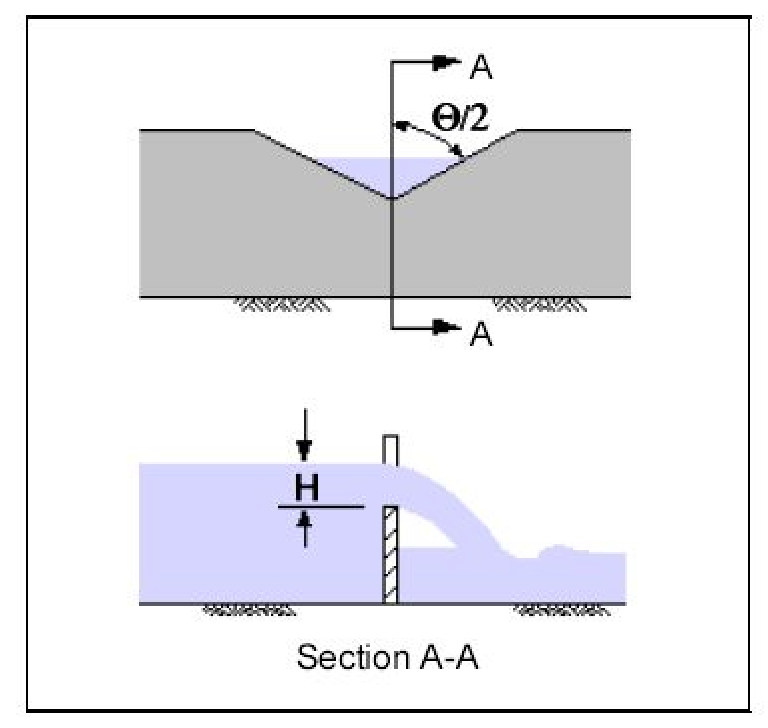
Vertedor trapezoidal



Vertedor trapezoidal

$$Q = \frac{2}{3} C_d \times L \times \sqrt{2g} \times H^{\frac{3}{2}} + \frac{8}{15} C_d \times \mathrm{Tan}\,\frac{\theta}{2} \times \sqrt{2g} \times H^{\frac{5}{2}}$$

Vertedor triangular
(muito usado em medições, fácil de medir)



Vertedor triangular (entopem muito)

- Os vertedores triangulares não são usados devido ao problema de depósito de lixo e sujeira nos mesmos.
- Urbanas e Stare, 1993 apresentam a equação:
- $$\mathbf{Q = Ct \cdot h^{5/2} \tan(\theta/2)}$$
- 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)

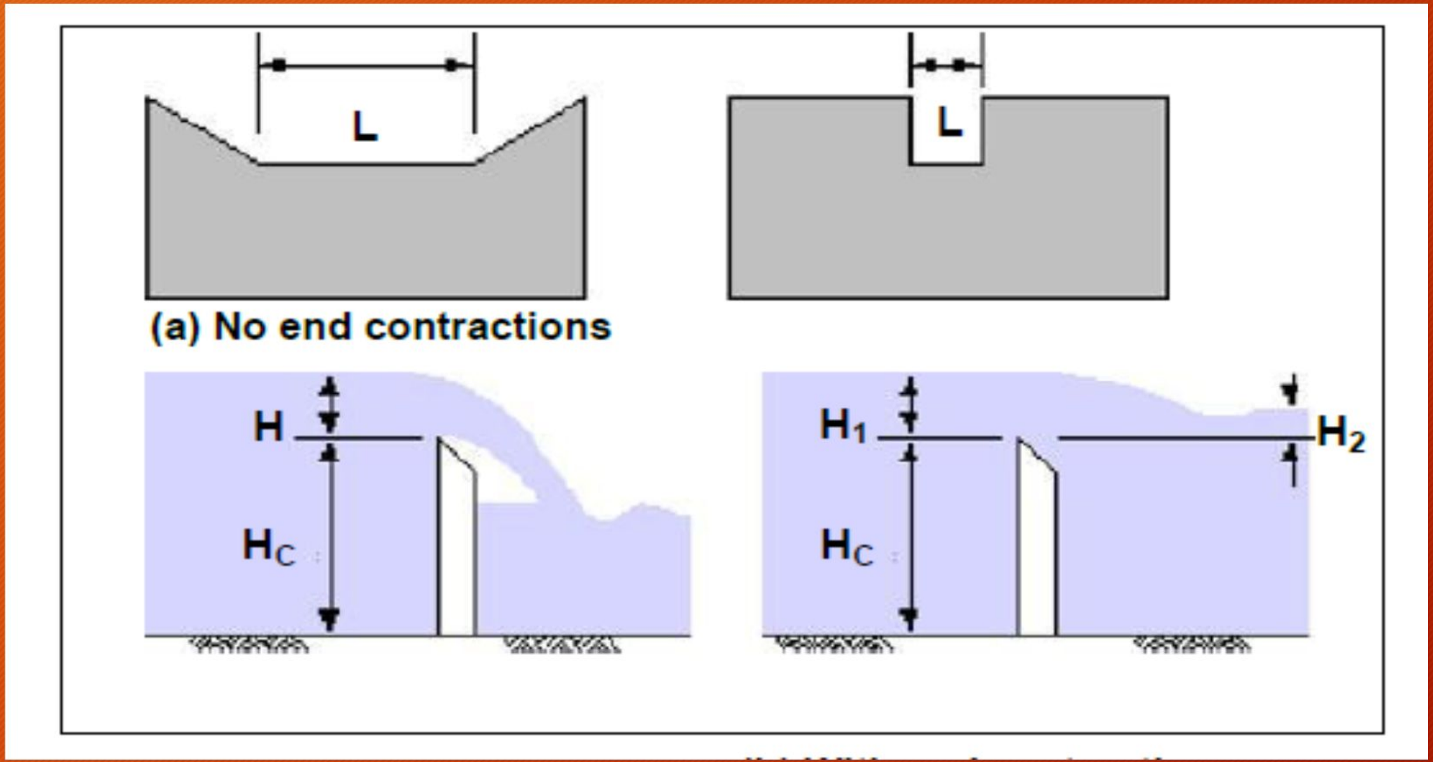
Vertedor triangular
Valores de Ct conforme Urbonas, 1993

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

Vertedor circular em parede vertical (entope muito, difícil manutenção)

- São raramente empregados e a fórmula é a seguinte (Vianna,1997, p. 539), tem como vantagem dispensar o nivelamento da soleira.
- **$Q = 1{,}518 \cdot D^{0{,}693} H^{1{,}807}$**
-
- Sendo Q em m^3/s, D e H em metros.

Vertedor de parede delgada (fina)



Vertedor retangular de parede delgada Fonte: Azevedo Neto

- $Q= 1{,}838.\ L.\ H^{(3/2)}$
- Sendo>
- Q= vazão (m3/s)
- L= largura do vertedor (m)
- H= altura da agua sobre a soleira (m)

Vertedor proporcional

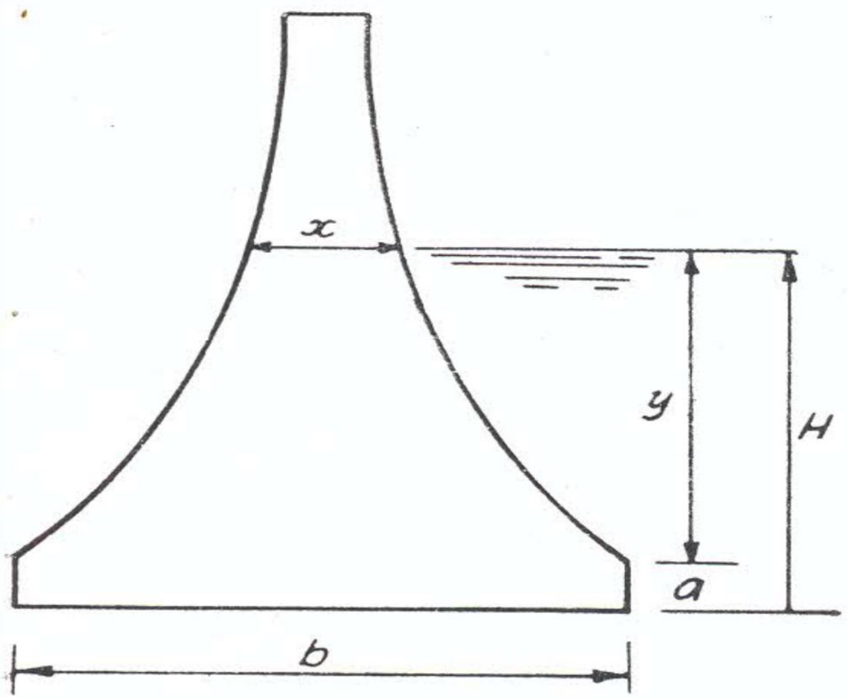


Fig. 9-23

Vertedor proporcional

- No vertedor proporcional a vazão é proporcional a altura do nível de água. Isto facilita a dosagem de alguns produtos químicos.
- É usado em engenharia hidráulica, engenharia química e agricultura.Usado em tratamento de esgotos conforme Azevedo Neto.

Vertedor proporcional Fonte: Azevedo Neto

- **Q= 2,74. a^0,5.b (H-a/3)**
- Sendo:
- Q= vazão (m3/s)
- a= altura mínima (m)
- b= largura da base (m)
- H= altura da água (m)
- x/b=1=(2/Pi)arctg(y/a)^0,5
- PI=3,1416

Pré-dimensionamento de vertedor lateral

- Vou apresentar um modelo que serve somente para um pré-dimensionamento.
- Q= Cd.L. (2.g)^0,5 .(h-w)^(3/2)
- Sendo:
- Q= vazão que queremos sair pelo vertedor lateral (m3/s)
- L= comprimento do vertedor lateral (m)
- g= aceleração da gravidade= 9,81 m/s^2
- h= altura do nível de agua do canal a montante (m)
- w= altura da base do vertedor lateral (m)

Pré-dimensionamento de vertedor lateral

- Cd= coeficiente de descarga (adimensional)
- Eu já contei 17 modelos de cálculo de Cd.
- Conforme Nadesamoorthu e Thomson, 1972 in Hager, 2010 o valor de Cd é em função do número de Froude F:
- Cd=0,407.[(2+F^2)/(2+4F^2)]^0,5
- Sendo:
- Cd= coeficiente de descarga (adimensional)
- F= número de Froude.

Vertedor Lateral de Hager, 2010 (é um cálculo especial)

- Vamos apresentar o dimensionamento do vertedor lateral conforme Hager, 2010.
- Hager apresenta basicamente duas equações, uma no seno e outra da vazão unitária Q´(Q linha).
- Sen(ϴ) =[(y-W) /(3-2y-W)]^0,5 .{ 1-λ.[(3(1-y))/(y-w)]^0,5 }

Vertedor Lateral de Hager, 2010

- θ = ângulo de desvio do vertedor lateral em radianos
- y= h/H (adimensional)
- h= altura do nível de água no canal a montante (m)
- H=altura específica do canal (m)
- $H= h + V^2/(2g)$
- V=velocidade média no canal a montante do vertedor lateral (m/s)
- W=w/h (adimensional)

Vertedor Lateral de Hager, 2010

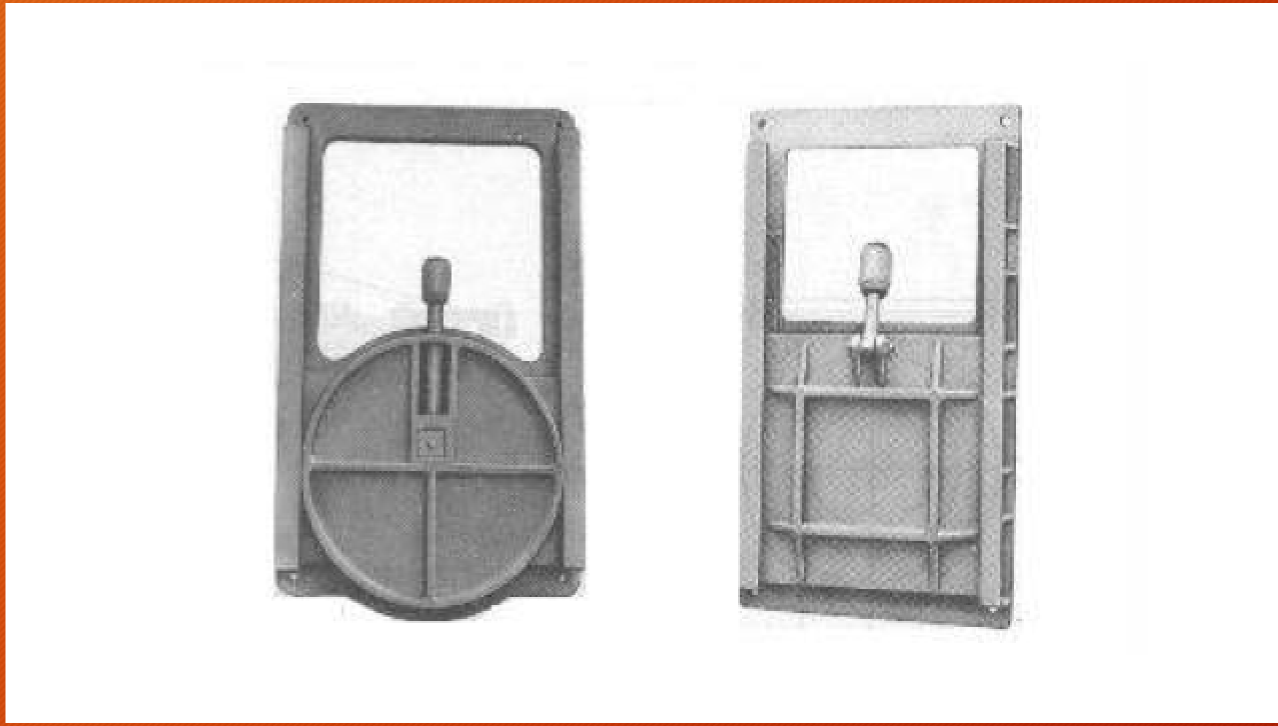
- w= altura do vertedor lateral desde o fundo do canal até a crista do vertedor (m)
- $\lambda = (\theta + S_o)/2$ que é um valor <<1
- θ = ângulo de contração do canal em radianos
- So= declividade do canal a montante (m/m)

Vertedor Lateral de Hager, 2010

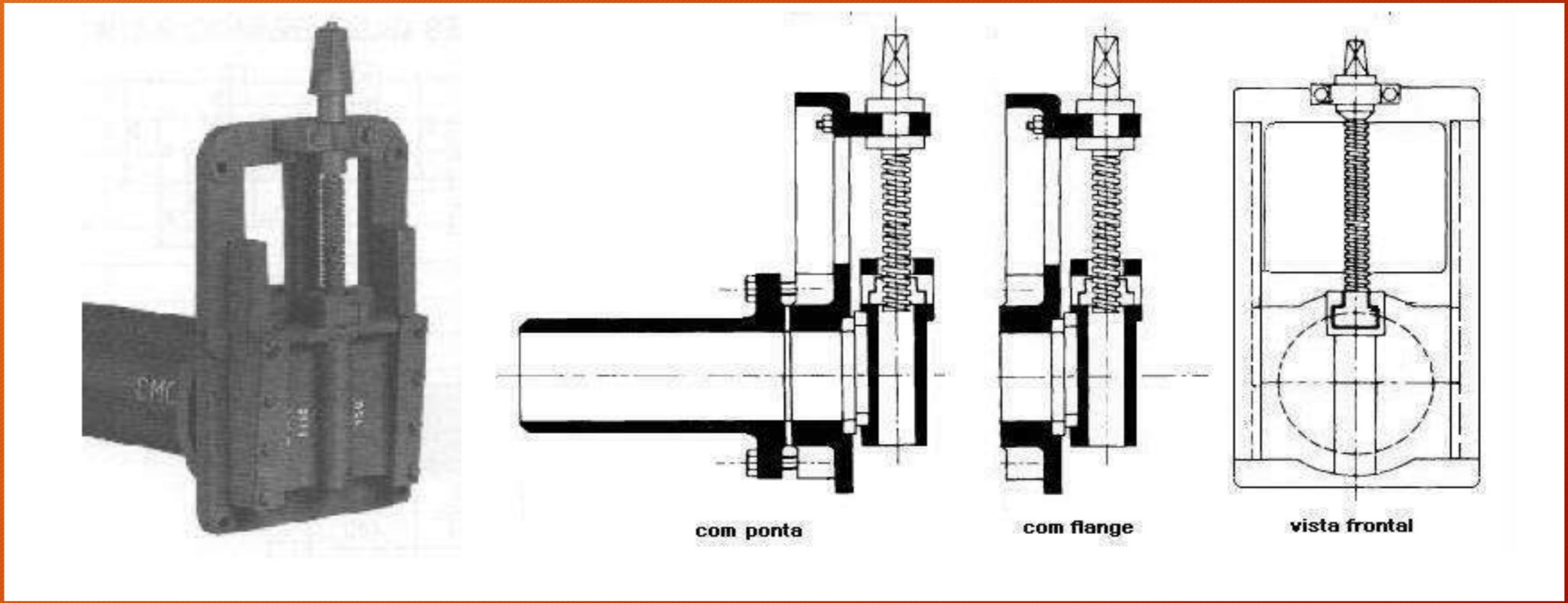
- O valor da vazão unitária Q´ (Qlinha) é dada pela equação:
- Q´= (3/5) n*.c. (g.H^3)^0,5 . (y-W)^(3/2) .[(1-W)/(3-2y-W)]^0,5 .
- { 1-(ɵ + So)[(3 (1-y))/(y-W)]^0,5}
- Sendo:
- Q´= vazão unitária que sai pelo vertedor lateral (m3/s/m)
- n*=numero de saídas lateral. Pode ser n¨=1 ou n*=2.
- C= influência da crista do vertedor. C=1 para vertedor com saída delgada (sharp-crested) conforme Figura (281.1). Quando a altura do vertedor for zero então C= (8/7). Para parede espessa uso também c=1.

- Comportas e adufas
- (calcula-se como orifício)

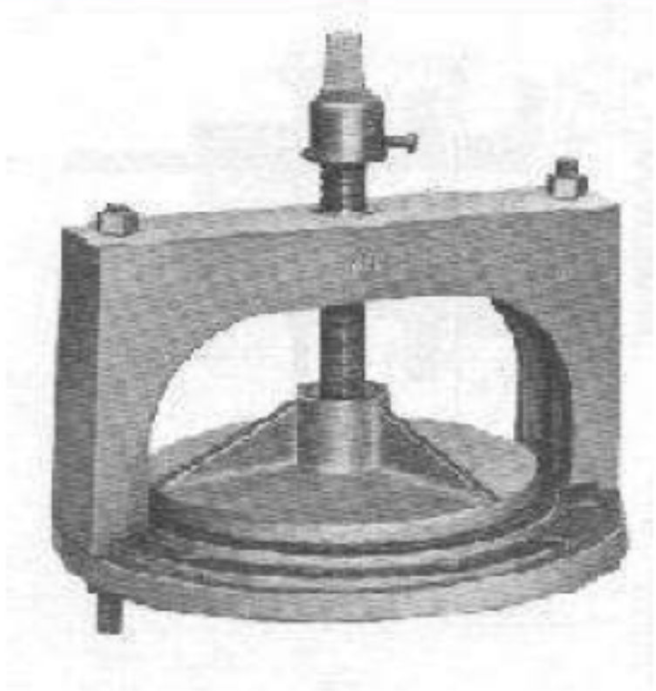
Comporta de fundo circular e quadrada
Máximo 10 mca (0,1 Mpa) 100mm a 1600mm
Comporta de baixa pressão

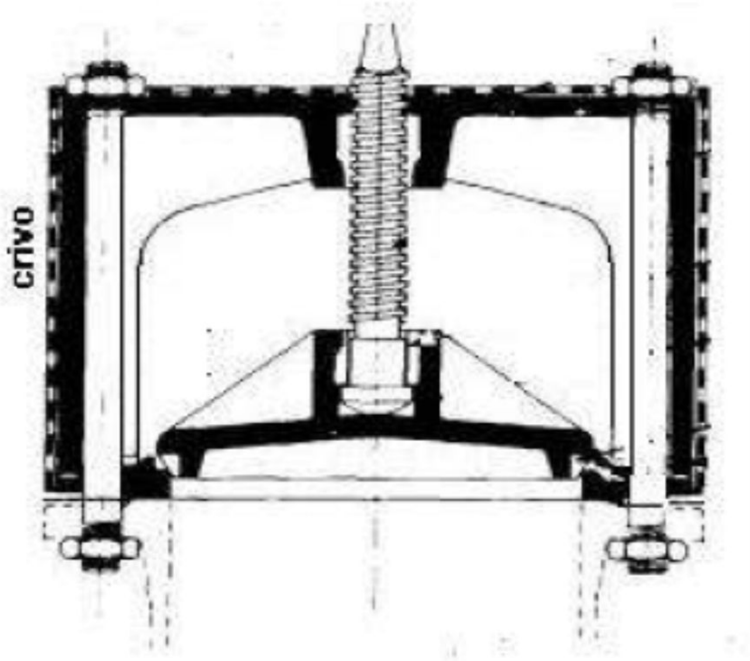


Adufa de parede



Adufa de fundo

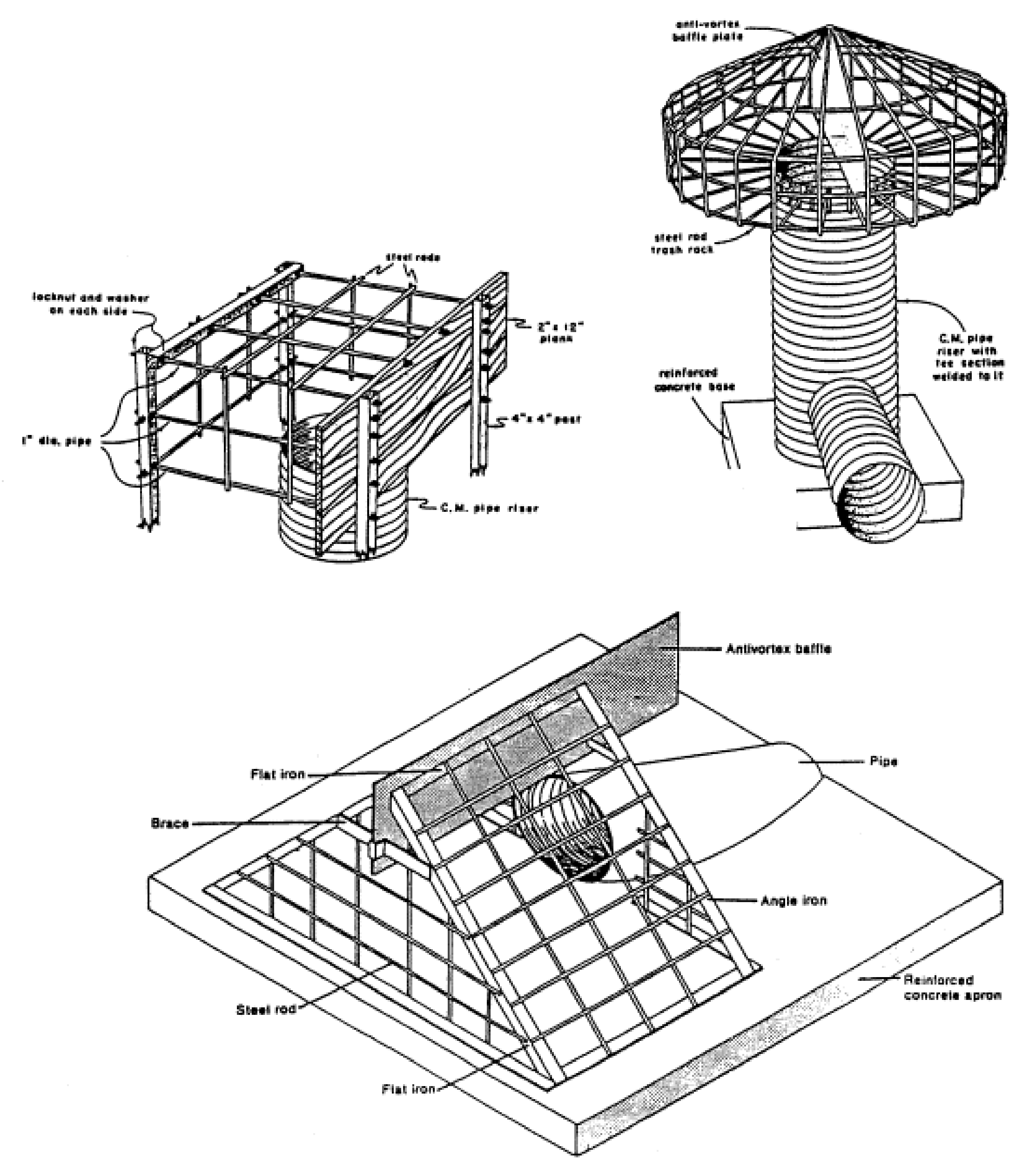




Esvaziamento de reservatório

- $t = [2 \cdot As \cdot (y_1^{0,5} - y_2^{0,5})] / [C_d \cdot Ao \cdot (2.g)^{0,5}]$
-
- Sendo:
- A_o= área da seção transversal do orifício (m^2);
- C_d= 0,62 coeficiente de descarga;
- As= área transversal do reservatório na profundidade y (m^2);
- t= tempo de esvaziamento (segundos);
- y_1= altura da água no inicio (m);
- y_2= altura do nível de água no fim (m) e
- g= aceleração da gravidade ($g=9,81 m/s^2$)

Trash rack



locknut and washer on each side
steel rods
2" x 12" plank
1" dia. pipe
4" x 4" post
C.M. pipe riser
anti-vortex baffle plate
steel rod trash rack
C.M. pipe riser with tee section welded to it
reinforced concrete base
Antivortex baffle
Pipe
Flat iron
Brace
Angle iron
Reinforced concrete apron
Steel rod
Flat iron

Trash rack

- $A_{trash} / A_{outlet} = R = 77 \times (e^{-0,124D})$
- ou para D em milímetros temos:
- **$A_{trash} / A_{outlet} = 77 \times (e^{-0,00488D})$**
- Válida até tubo de 500mm.
- Acima de 600mmm adotar **At/Ao=4**

Relação da
Área do trash rack/ Área do orifício

D (mm)	At/Ao
50	60,33
75	53,40
100	47,27
150	37,03
200	29,01
250	22,73
300	17,81
400	10,93
500	6,71
600	4,00
1000	4,00
1500	4,00
2000	4,00

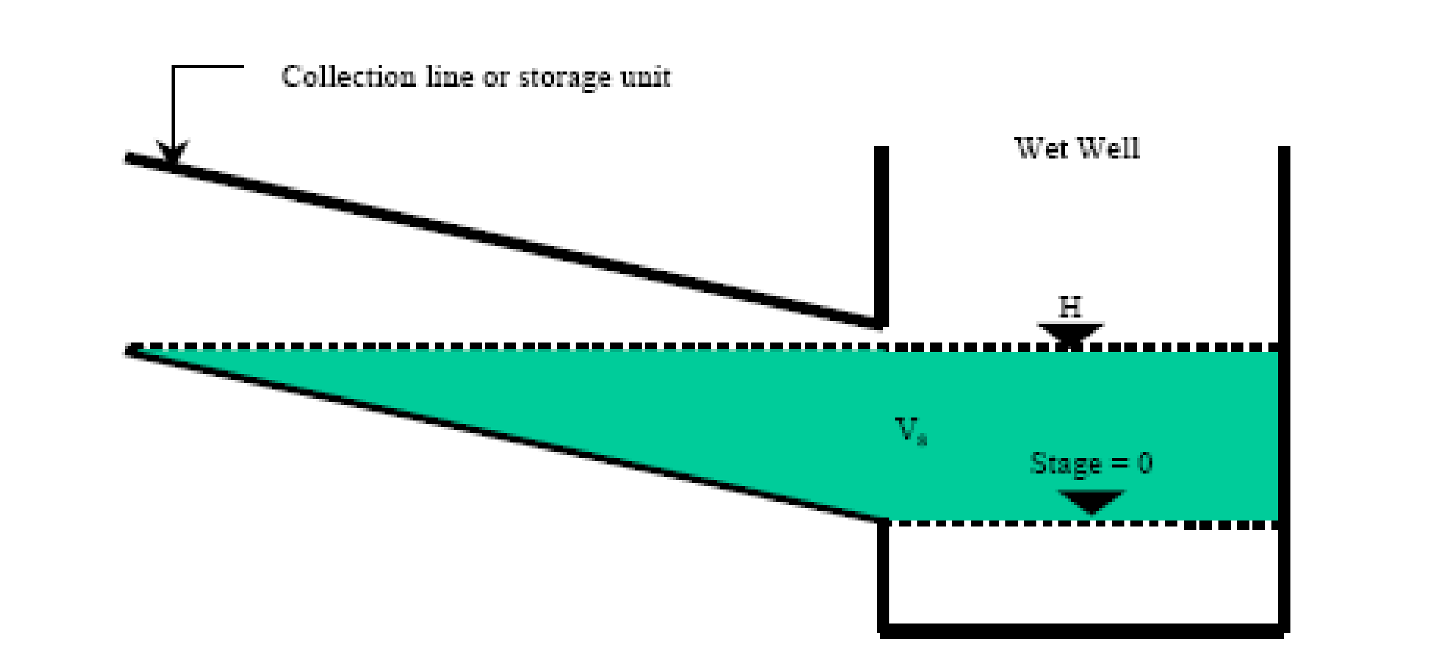
Grades

- As grades podem ser verticais ou inclinadas. Geralmente as grades são inclinadas para facilitar a retirada da sujeira que fica aderida à mesma.
- A grade poderá ser retirada manualmente ou mecanicamente para facilitar a limpeza.
- As vezes as grades podem ser dimensionadas para sofrerem colapso quando contiverem muita carga de lixo ou quando pessoas ficam presas as mesmas.

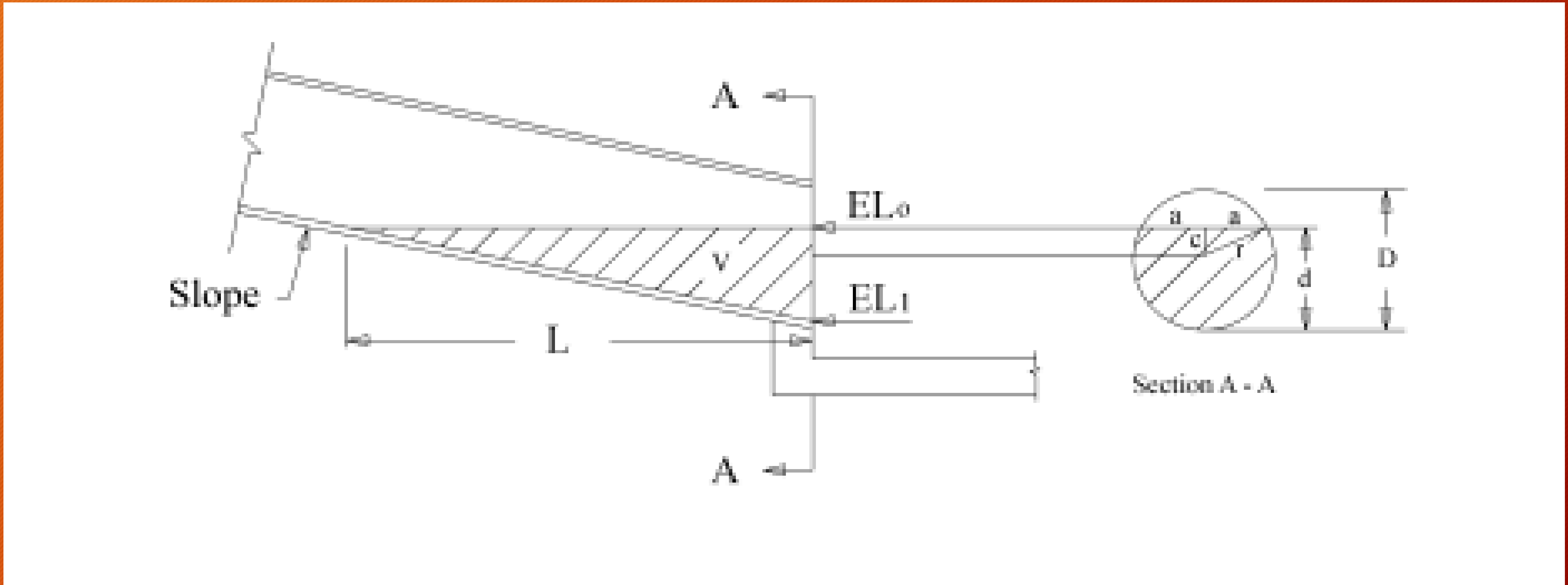
Manutenção das grades de trash racks

- De modo geral as grades são dimensionadas para carga viva maiores que 1.389 kg/m^2.
- Guo informa que grades inclinadas é muito melhor que grades verticais, pois, as grades verticais sob ação da força hidrostática pode ser 16 vezes maior do que uma grade inclinada. Assim é mais fácil retirar um objeto de uma grade inclinada do que uma grade vertical.
-

Úngula



Ungula
Esquema das dimensões do tronco cilíndrico



Úngula

- A equação do segmento de círculo de altura “d” fornece a área A.
- $A = (D^2/8) \times \{2 \cos^{-1}(1 - 2d/D) - \text{sen}\,[2\cos^{-1}(1 - 2d/D)]\}$
- $c = d - D/2$
- $a = (D^2/4 - c^2)^{0,5}$
- Nota: $\cos^{-1}(x) = \text{acos}\,(x)$
- L=altura d/ declividade da tubulação
- $V = L \times (2a^3/3 + c.A) / (D/2 + c)$

Exemplo de Úngula

- **Seja uma tubulação com diâmetro de 1,2m com 160m de comprimento e que tenha declividade de 0,004m/m, que conduz as águas pluviais a um poço molhado onde serão instaladas as bombas.**
- **Calcular o volume acumulado V na tubulação para a profundidade d=0,50m.**

- $A = (D^2/8) \times \{2 \cos^{-1}(1 - 2d/D) - \text{sen}\,[2\cos^{-1}(1- 2d/D)]\}$
- $A = (1{,}2^2/8) \times \{2 \cos^{-1}(1 - 2x\,0{,}5/1{,}2) - \text{sen}\,[2\cos^{-1}(1- 2x\,0{,}5/1{,}2)]\}$
- $A = 0{,}446 m^2$
- $c = d - D/2$
- $c = 0{,}5 - 1{,}2/2 = -0{,}1 m$

Úngula

- $a = \left(D^2/4 \ - c^2 \right)^{0,5}$
- $a = \left(1,2^2/4 \ - (-0,1^2) \right)^{0,5}$
- $a = 0,592m$
- Nota: $\cos^{-1}(x) = \text{acos}\ (x)$
- **L= 0,5m/0,004= 125m <160m de comprimento**
- $V = L \ x \ (2a^3/3 + cA) \ / \ (D/2 + c)$
- $V = 125 \ x \ (2 \ x0,592^3/3 + (-0,1)x0,446) \ / \ (1,2/2 + (-0,1)) = 23,36m^3$

Bibliografia e livros consultados-

- -OKIISHI, MUNSON YOUNG, *Fundamentals of fluid mechanics*. 3ª Edição,ano 1998, 877 páginas
- -OUTLET STRUCTURES. Georgia. acessado em 14 de ourubro 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.
- -Erbisti, Paulo. *Comportas Hidráulica*. Editora Interciência,ano 1992,394 páginas.
- -HAGER, WILLI H. *Lateral overflow over side Weir*. ASCE, 2010

Obrigado !!!

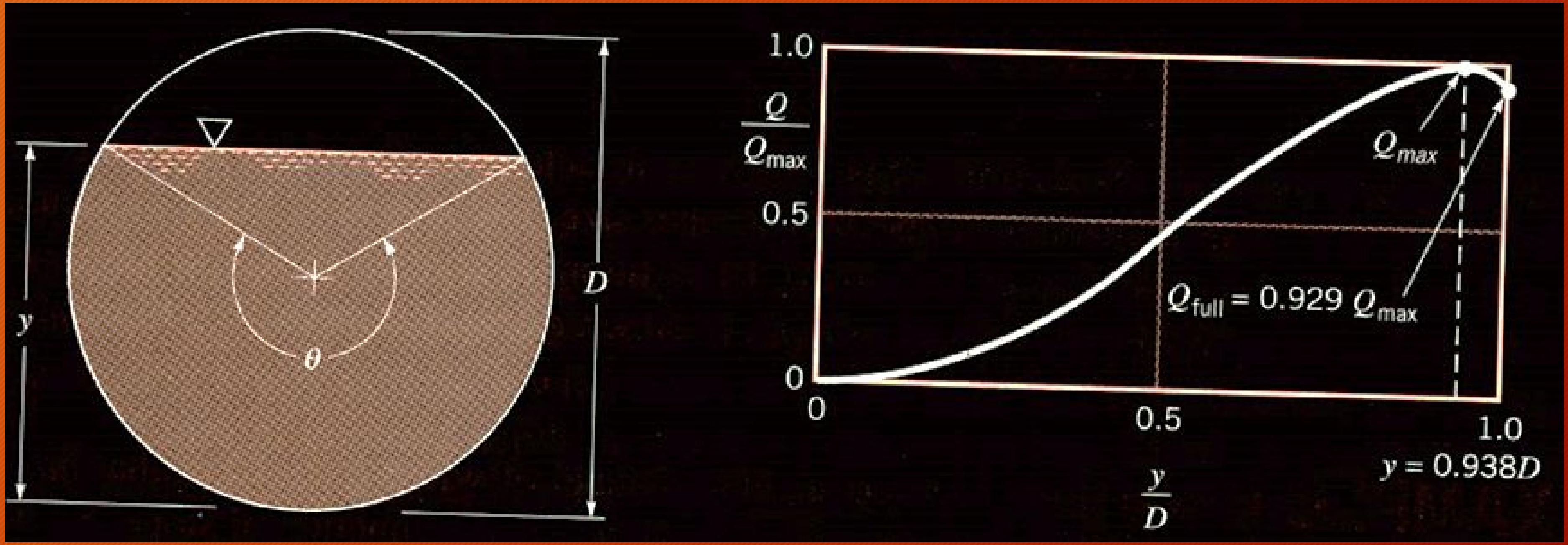
- Engenheiro Plinio Tomaz
- pliniotomaz.com
- pliniotomaz@gmail.com

Seção circular parcialmente cheia

Objetivo: para águas pluviais

- **Objetivo:**
- **Altura y na seção circular**
- **Velocidade média**
- **Velocidade crítica**

Vazão máxima
0,929D
(Munson Young Okiihi)



- Dimensionamento usando tabela e gráfico

Tabela do Metcalf&Eddy, 1981

Altura máxima da lâmina de y/D= 0,80

Valores de K´ para seção circular K´=0,305

$\frac{d^b}{D}$	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	. . . .	0.000047	0.00021	0.00050	0.00093	0.00150	0.00221	0.00306	0.00407	0.00521
0.1	0.00651	0.00795	0.00953	0.0113	0.0131	0.0152	0.0173	0.0196	0.0220	0.0246
0.2	0.0273	0.0301	0.0331	0.0362	0.0394	0.0427	0.0461	0.0497	0.0534	0.0572
0.3	0.0610	0.0650	0.0691	0.0733	0.0776	0.0820	0.0864	0.0910	0.0956	0.1003
0.4	0.1050	0.1099	0.1148	0.1197	0.1248	0.1298	0.1349	0.1401	0.1453	0.1506
0.5	0.156	0.161	0.166	0.172	0.177	0.183	0.188	0.193	0.199	0.204
0.6	0.209	0.215	0.220	0.225	0.231	0.236	0.241	0.246	0.251	0.256
0.7	0.261	0.266	0.271	0.275	0.280	0.284	0.289	0.293	0.297	0.301
0.8	0.305	0.308	0.312	0.315	0.318	0.321	0.324	0.326	0.329	0.331
0.9	0.332	0.334	0.335	0.335	0.335	0.335	0.334	0.332	0.329	0.325
1.0	0.312									

[a]Adapted from Ref. 2

Normas da ABNT

- Dentro da propriedade privada (existe norma da ABNT)
- d/D= 0,67 ABNT NBR 10844/89 Instalações prediais pluviais
- d/D= 1 PMSP, USA e outras

- Logradouro público (não existe norma da ABNT)
- d/D= 0,8 Plinio

Profundidade máxima deve ser 0,8D (Plinio adota)

Subramanya, 2009 as profundidades acima de 0,82D apresentam duas profundidades normais em uma tubulação circular e é devido a isto que se deve adotar como altura máxima 0,8D para evitar a região em que temos duas profundidades normais.

Dica: adotar que a altura máxima em uma tubulação circular que seja de 0,80D.

Diâmetro da tubulação
Exemplo 1

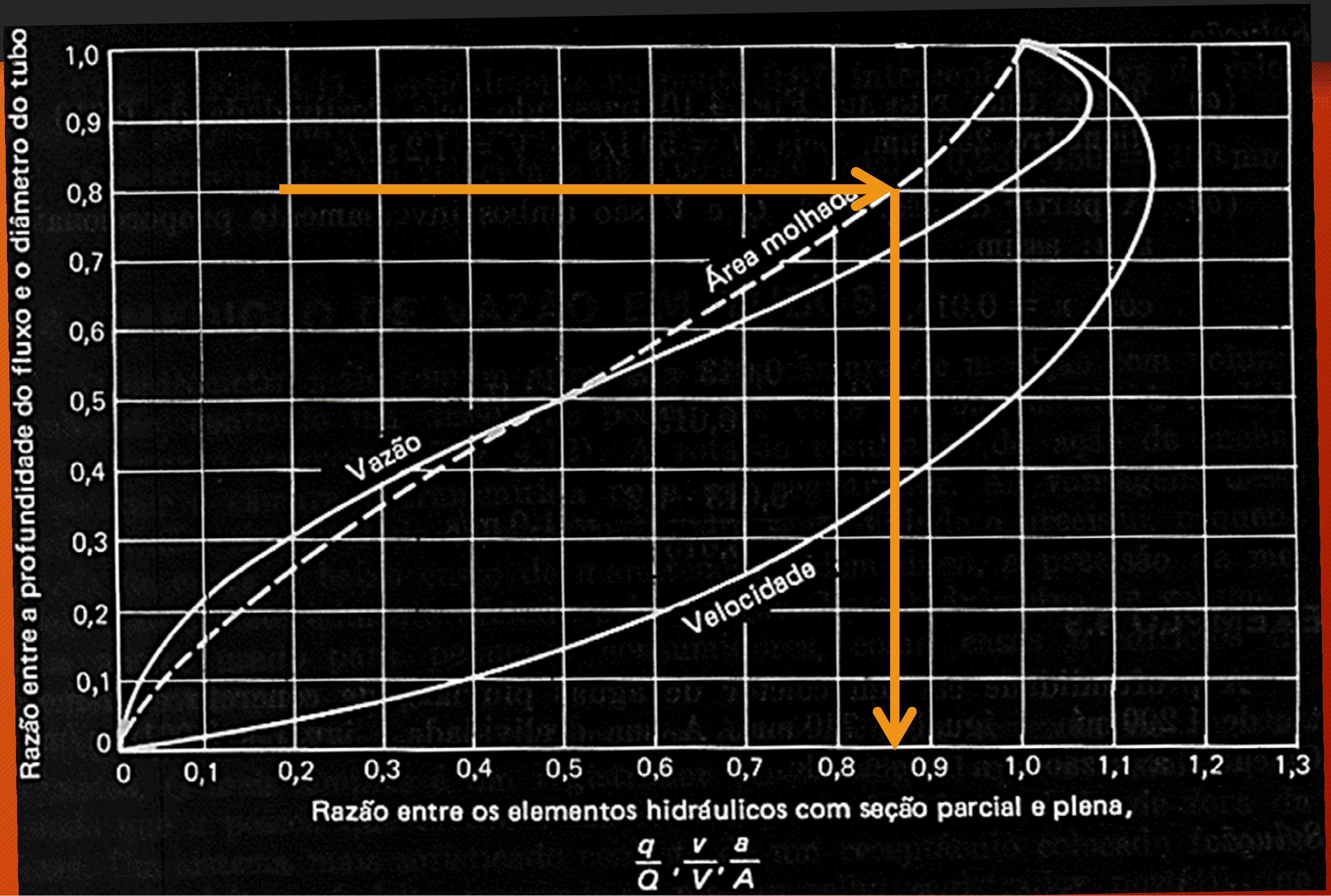
- $d/D = 0{,}80$
- $Q = (K´ /n)\, D^{8/3} \,.\, S^{1/2}$
- **$K´ = (Q.n) / [D^{8/3} \,.\, S^{1/2}]$**
- $D = [(Q.n) / (K´ \,.\, S^{1/2})]^{3/8}$
- $Q=0{,}70m^3/s$ $n=0{,}015$ (concreto) $S=0{,}005m/m$
  $K´=0{,}305$
- $D = [(0{,}7 \times 0{,}015) / (0{,}305 \times 0{,}005^{1/2})]^{3/8}$
- $D=0{,}76m$
- Adoto $D=0{,}80m$

Achar a Velocidade

- Do gráfico adiante, entrando com y/D=0,80 obtemos
- para área molhada Am/Atotal= 0,85
- Área total= PI x $0,80^2$/ 4=0,5027m^2
- Amolhada = 0,85 x 0,5027= 0,4273m^2
- Q=A x V
- V= Q/A= 0,7/ 0,4273= 1,64m/s> 0,75m/s OK
- Tubos de concreto: 0,75 m/s a 5 m/s

Elementos da seção circular

seção parcial e plena (p/velocidade)



Exemplo 2

- Dados: Q=1,0 m3/s S=0,005 m/m n=0,01 (PVC) D=1,00m
- K´= (Q.n) / [D $^{8/3}$. S ^{½}]
- K´= (1x0,01) / [1 $^{8/3}$ x0,005 ^{½}]
- K´=0,1414
- Olhando a Tabela de Metcalf&Eddy
- Achamos d/D= 0,48
- Y= 0,48 x 1,00= 0,48m
- No gráfico da velocidade, entrando com d/D=0,48
- Achamos 0,50
- A= Pi x D^2/4= 0,785 m2
- Am= 0,785 x 0,5= 0,39m2
- Q=Am.V
- V= Q/am= 1,00/ 0,39= 2,56 m/s < 7m/s OK   PVC 0,9 m/s a 7 m/s

Seção circular :aproximação com erro máximo de 8%
Sem precisar do gráfico da velocidade

- Se $y/D < 0,4$
- $A = (D \cdot y^3)^{0,5} / 0,8$

- Se $y/D \geq 0,4$
- $A = (y/D) \times (3,1416 \times D^2/4)$

- Se $y/D \geq 0,4$
- $A = (y/D) x (3,1416 \text{ x } D^2/4)$
- $A = (0,48/1,00) x (3,1416 \text{ x } 1^2/4) = 0,48x0,785 = 0,38$ m2
- Q=Am.V
- V= Q/am= 1,00/ 0,38= 2,63 m/s < 7m/s OK

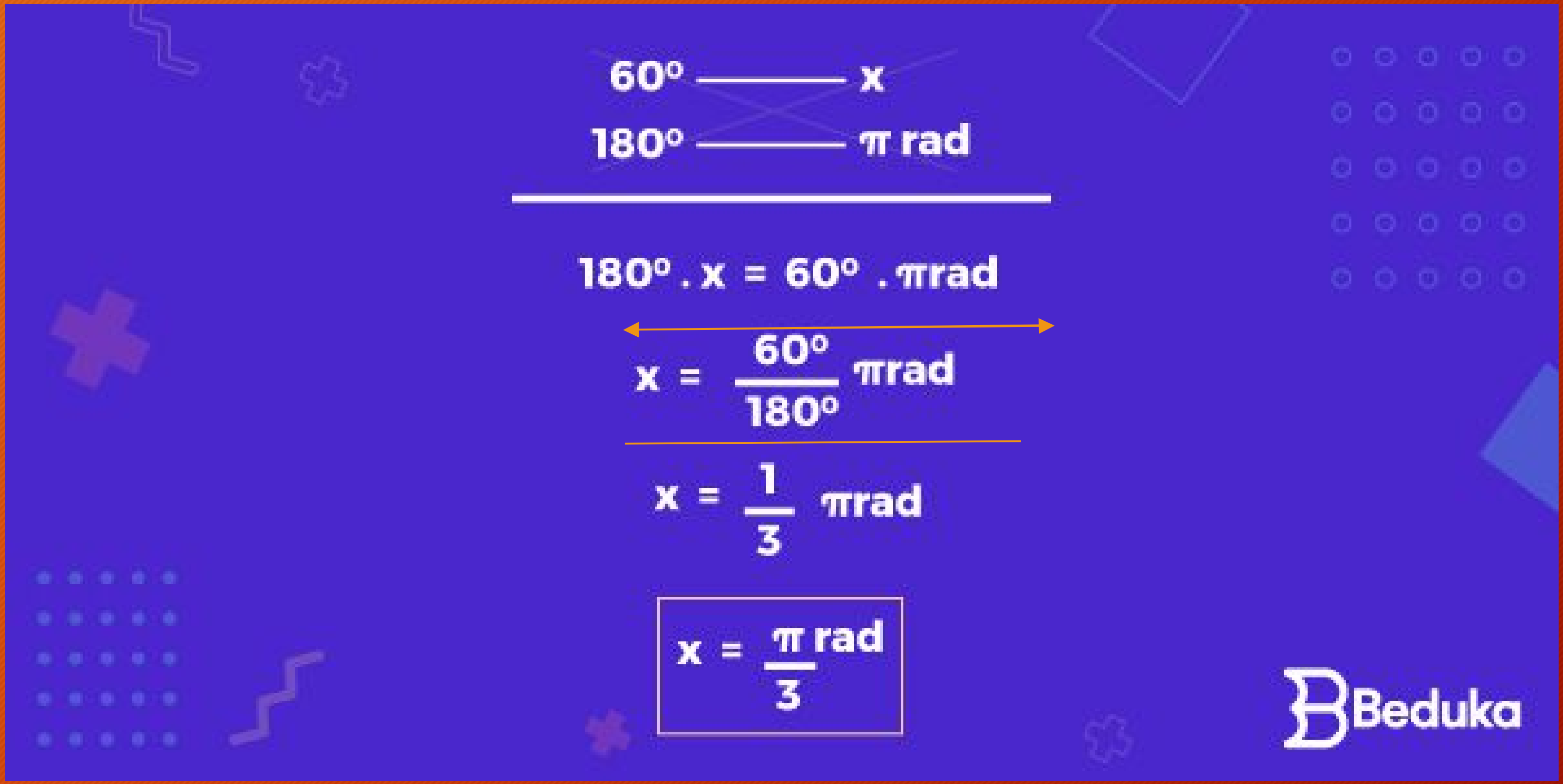
- **Dimensionamento de seção circular parcialmente cheia sem usar tabela e nem gráfico conforme Akgiray, 2014**

Radiano é o nome dado à medida do arco de uma circunferência de raio r.
Simbolo: rad

- A circunferência pode ser dividida em:
- Graus (0 a 360 graus) Sumérios
- Grados (0 a 400 grados)
- Radianos (0 a 2PI)   Criado em 1864
- PI=3,1416..
- Usaremos radianos como a planilha Excel

Transformar graus em radianos

Excel: radianos (60)= 1,04719755



MANNING EQUATION APPLIED TO PARTIALLY FILLED CIRCULAR PIPES
Dr. Ömer Akgiray

BASIC EQUATIONS

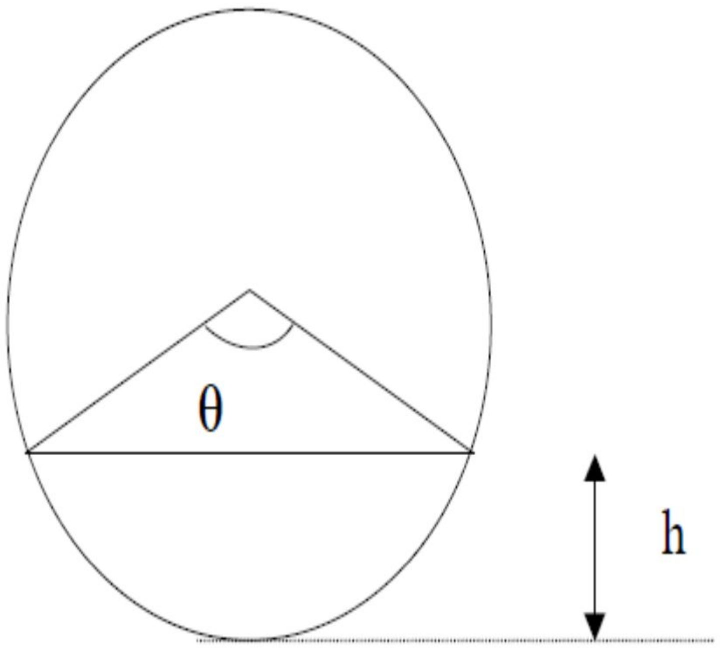
$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

$$Q = \frac{A}{n} R_h^{2/3} S^{1/2} \quad (2)$$

$$\theta = 2\cos^{-1}(1 - \frac{2h}{D}) \quad (3a)$$

$$A = \frac{D^2}{8}(\theta - \sin\theta) \quad (4)$$

$$R_h = \frac{D}{4}\left(\frac{\theta - \sin\theta}{\theta}\right) \quad (5)$$



Note that the angle θ is expressed in radians. Equation (3a) can be rewritten as follows:

$$\frac{h}{D} = \frac{1}{2}\left(1 - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right) \quad (3b)$$

DEFINITION OF *K*

$$Q = \frac{K}{n} D^{8/3} S^{1/2} \qquad (6)$$

$$K = \frac{Qn}{D^{8/3} S^{1/2}} \qquad (7)$$

NOTE-1: Metcalf & Eddy (Table 2-5) use the symbol K' for what we denote by K here.

NOTE-2: Metcalf & Eddy use the symbol θ (in Figure 2-25) for half of the surface angle θ.

NOTE-3: In what follows, we will assume the use the metric system (m/sec for V, m for D, and m^3/sec for Q).

TYPES OF PROBLEM THAT REQUIRE ITERATIONS

Iterative calculations are required when h/D is not known in advance. This happens in the following four types of problem:

Type I : Given Q, D, S; find h/D and V.

Type II : Given Q, D, V; find h/D and S.

Type III: Given V, D, S; find h/D and Q.

Type IV: Given Q, V, S; find h/D and D.

Cálculos conforme Akgiray, 2014- Tipo I (+ comum).

- Exemplo 3:
- Q= 0,48 m3/s   n=0,015 (concreto)
- D =0,8m   S=0,006m/m
- $K= (Q.n) / [D^{8/3} . S^{½}]$
- $K = (0,48x0,015) / [0,8^{8/3} x0,006^{½}] =$
- = 0,161715 <0,335282 OK

Verificação importante

- Se K>0,335282 Não tem solução
- Fazer mudanças em parâmetros.

Cálculos conforme Akgiray, 2014- Tipo I (+ comum)

- Cálculo do ângulo ϴ
- ϴ = 2x6^(5/13)x K ^(3/13)x[1+0,431xasen(2,98xK)]
- Nota:
- Sen(-1)(2,98 x K) = asen(2,98xK)
- asen() = função no Excel
- Exemplo: achar ângulo ϴ , dado K= 0,161715
- ϴ = 2x6^(5/13)x ^0,161715 ^(3/13)x[1+0,431xasen(2,98x0,161715)] = 3,18 rad
- Nota: asen(2,98x0,161715)=0,5

Cálculos conforme Akgiray, 2014
Tipo I (+ comum)

- Cálculo de y/D
- Quando K >0,335282 não tem solução
- **y/D= 0,5(1-cos(ϴ /2))**
- Não precisa de Tabela (muito bom!)
- y/D=0,5x(1-cos(3,18/2))= 0,51
- Cálculo do raio hidráulico R
- R=(D/4). { 1 - [seno (ϴ)] / ϴ}
- R=(0,8/4). { 1 - [seno (3,18] / 3,18} = 0,20m

Cálculo da velocidade V

- W= (2.K/ ϴ)^(2/5)
- W= (2x.0,1617/ 3,18)^(2/5) =0,40

- V= (W.D^(2/3).S^0,5/n
- V= (0,40x0,8^(2/3).x0,006^0,5/0,015 =1,8m/s
- Conferir adiante Q=A.V

Cálculos conforme Akgiray, 2014- Tipo I (+ comum)

- Verificação de Q
- Q= A.V   Equação da continuidade
- Falta A= área molhada (m2)
- A= (D^2/8) [ϴ - sen(ϴ)]
- A= (0,8^2/8) [3,18 -sen(3,18)] =0,2580 m2
- Q= A.V=0,2589 x 1,80=0,48 m3/s OK confere

Cálculo da altura crítica de tubo parcialmente cheio

- **Nota: alguns problemas em hidráulica exigem o cálculo da velocidade crítica, para sabermos que tipo de escoamento**

- Número de Froude F
- F=1   regime de escoamento crítico
- F>1 regime de escoamento supercrítico
- F<1 regime de escoamento subcrítico

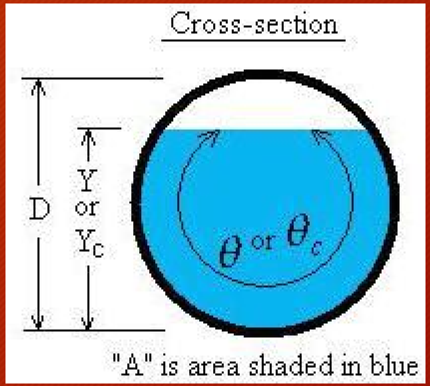
Conceito

- Energia específica E
- E= y + Q^2/(2g.A^2)
- Quando a energia específica é mínima e se obtém fazendo a derivada de E e igualando a zero.
- Obteremos o número de Froude
- F=1
- F= V/ (g.y)^0,5

Ângulo crítico (iteração) LMNO Engineering,2013

$$16Q\left[\frac{2}{g}\ \sin\left(\frac{\theta_c}{2}\right)\right]^{1/2} = D^{5/2}\ \left[\theta_c - \sin(\theta_c)\right]^{3/2}$$

$$Y_c = \frac{D}{2}\left[1 - \cos\left(\frac{\theta_c}{2}\right)\right]$$



- Exemplo 4: Achar yc e vc ?
- Q= 0,48 m3/s   n=0,015 (concreto)
- D =0,8m   S=0,006m/m

Cálculo do ângulo crítico

- O cálculo do ângulo crítico é feito por tentativas.
- Arbitra-se um valor e verificamos se a equação iguala a zero.
- 0= 16Q((2/g). sen(ϴc))^0,5- D^(5/2). (ϴc – sen(ϴc))^0,5]
- 0= 16x0,48((2/9,81). sen(ϴc))^0,5- 0,8(5/2). (ϴc – sen(ϴc))^0,5
- Nota: observar que na equação só entra a vazão Q e o Diâmetro do tubo D. Não entra a rugosidade "n" e nem a declividade S.

Usando planilha Excel e por tentativas achamos ϴc= 3,25 rad

Cálculo da altura crítica yc

- Yc =(D/2). (1- cos (ϴc/2))
- Yc =(0,8/2). (1- cos (3,25/2)) =0,42m

´Cálculo aproximado da altura crítica Yc

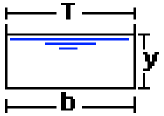
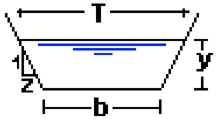
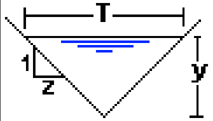
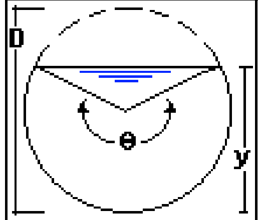
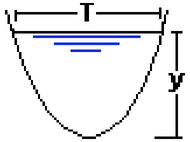
- Cálculo da velocidade crítica
- Primeiramente acho a altura critica yc
- Yc=0,483 (Q/D)^(2/3) + 0,083 . D
- Yc=0,483 (0,48/0,8)^(2/3) + 0,083x0,8
- Yc=0,3448+0,0664=0,41m

Seção circular.
Altura crítica (yc)
Straub, 1978 in Digman et al, 2018

- $yc/ D = 0{,}567\ Q^{0{,}506} / D^{1{,}264}$
- Intervalo de aplicação:
- $0{,}02 < yc/D \leq 0{,}85$

- D= diâmetro da tubulação (m)
- Q= vazão (m3/s)

Figuras geométricas importantes

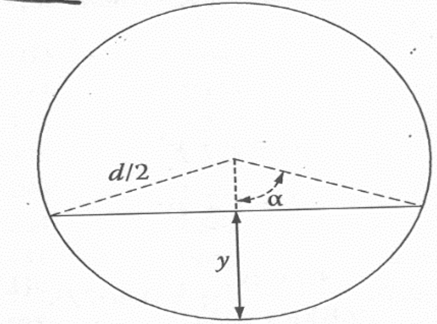
Tipo de sección	Área A (m2)	Perímetro mojado P (m)	Radio hidráulico Rh (m)	Espejo de agua T (m)
 Rectangular	by	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	b
 Trapezoidal	$(b+zy)y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b+2zy$
 Triangular	zy^2	$2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$	$2zy$
 Circular	$\frac{(\theta-\text{sen}\theta)D^2}{8}$	$\frac{\theta D}{2}$	$\left(1-\frac{\text{sen}\,\theta}{\theta}\right)\frac{D}{4}$	$(\text{sen}\frac{\theta}{2})\,D$ ó $2\sqrt{y(D-y)}$
 Parabólica	$2/3\ Ty$	$T+\frac{8y^2}{3T}$	$\frac{2T^2y}{3T+8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$

- Cálculo da velocidade crítica e altura crítica usando tabela e gráficos

Altura crítica em tubos Pazwash, 2016
Urban Stormwater Management

- Kc= Q/(g ^{0,5} . D $^{5/2}$)
- Exemplo:
- Q = 1m3/s
- D=1,00m
- Kc= 0,32

- Tabela: yc/D= 0,57
- Yc= 0,57 x 1,00= 0,57m

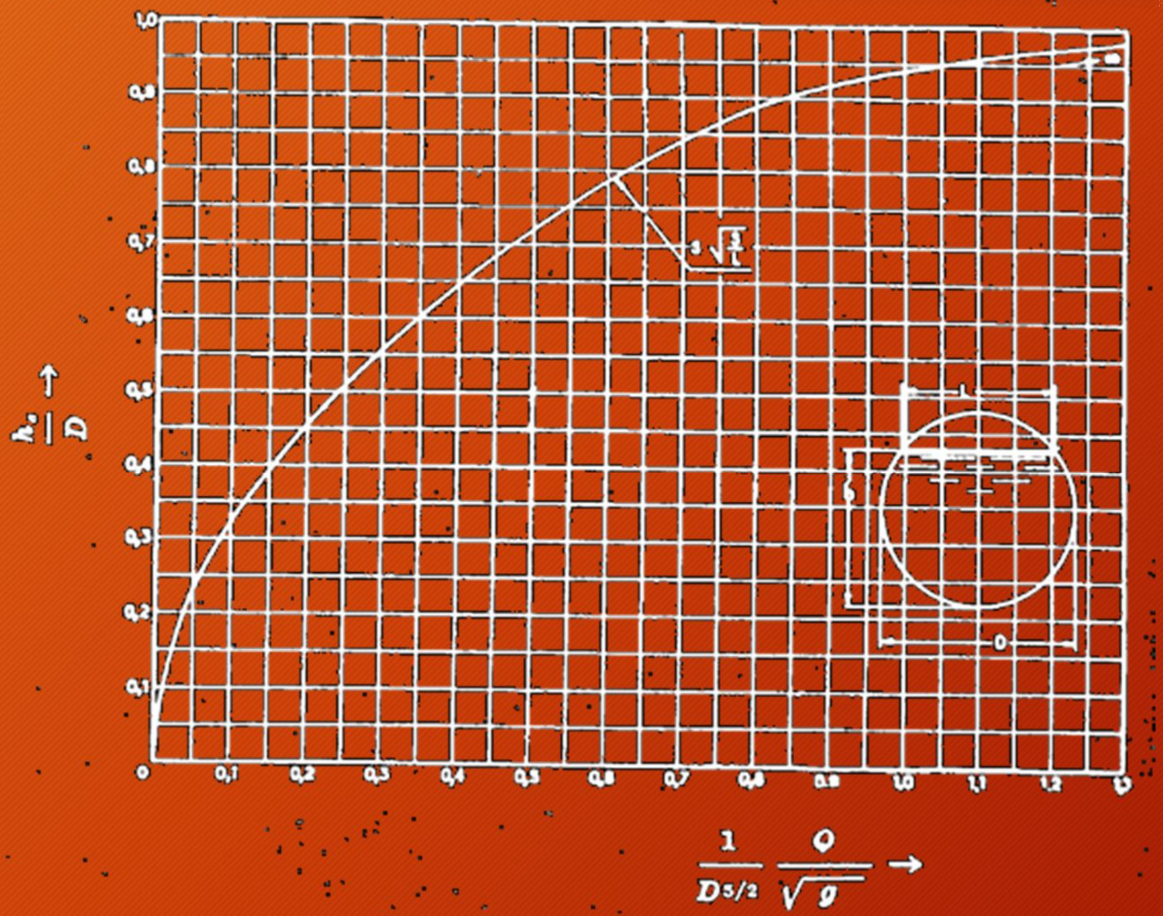


y_c/D	α^a	K_c
0.05	25.84	0.0027
0.10	36.87	0.0107
0.15	45.57	0.0238
0.20	53.13	0.0418
0.25	60.00	0.0647
0.30	66.42	0.0921
0.35	72.54	0.1241
0.40	78.46	0.1605
0.45	84.26	0.2012
0.50	90.00	0.2461
0.55	95.74	0.2952
0.60	101.54	0.3487
0.65	107.46	0.4068
0.70	113.58	0.4700
0.75	120.00	0.5397
0.80	126.87	0.6181
0.85	134.43	0.7102
0.90	143.13	0.8294
0.92	147.14	0.8923
0.94	151.64	0.9731
0.96	156.93	1.0895
0.98	163.74	1.3060

[a] $\alpha = \cos^{-1}(1 - 2\,y/D)$.

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{1-2y_c}{D}\right)$$

Altura crítica em condutos circulares conforme Lencastre
(mais exato)



Obrigado !!!

- Engenheiro Plínio Tomaz

- pliniotomaz.com

- pliniotomaz@gmail.com