

Capítulo 19- *Riprap*

Capítulo 19- Riprap

19.1 Introdução

Primeiramente devemos salientar que o riprap tanto em avental como em bacia é um **dissipador de energia**.

Há duas posições básicas do riprap. Na primeira ele é usado sozinho sob forma de avental ou bacia e somente ele, como é usual em empreendimentos. Na segunda o riprap é usado após um dissipador de energia, ou seja, uma escada hidráulica, ou escada dentada e neste caso o seu cálculo possui algumas características diferentes que iremos ver.

Para proteger a erosão na saída de águas pluviais por tubulações, escadas hidráulicas, dissipadores de energia e transição com o canal natural é comum o uso de riprap conforme Figura (19.1).

O riprap só pode ser aplicado se:

- **Diâmetro da tubulação de 0,30m a 2,5m e**
- **Número de Froude $F \geq 2,5$.**



Figura 19.1- Riprap

O *riprap* pode se apresentar sob a forma de:

- **Avental** conforme Figura (19.2) ou
- **Bacia** conforme Figura (19.5).

Dica: o número de Froude em riprap em avental ou bacia deve ser $F \geq 2,5$.

Dica: o diâmetro da tubulação de chegada deve estar entre 0,30m a 2,5m.

Notar que não iremos calcular a velocidade de saída sobre o terreno.

São construídos em nível do terreno onde se calcula o diâmetro da pedra, a espessura do *riprap* e o comprimento conforme Figura (19.1).

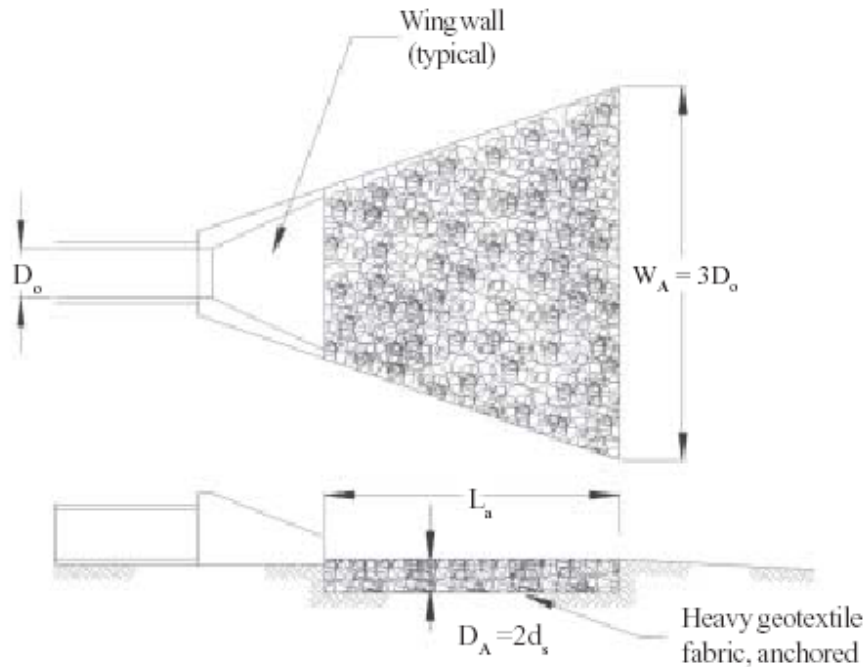


Figura 19.1- Riprap em planta e em corte

19.2 Dimensionamento do **riprap tipo avental** usado em Auckland

O *riprap* tem forma de um avental, ou seja, um trapézio, sendo a base maior igual a 3 vezes o diâmetro do tubo e deve ser instalado no plano horizontal, isto é, em nível. A espessura do *riprap* é 2 vezes o diâmetro da pedra “ d_s ”.

As fórmulas básicas são conforme Auckland:

$$d_s = 0,25 \cdot D \cdot F$$

Sendo:

d_s = diâmetro da pedra do *riprap* (m)

D = diâmetro do tubo (m)

F = número de Froude

O número de Froude é calculado da seguinte maneira:

$$F = V / (g \cdot dp)^{0,5}$$

Sendo:

F = número de Froude (adimensional) sendo $F \geq 2,5$

V = velocidade média na tubulação (m/s)

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

dp = altura da lâmina de água no tubo (m)

A altura do trapézio (aventil) é denominada L_a sendo calculado da seguinte maneira:

$$L_a = D [8 + 17 \times \log (F)]$$

Sendo:

L_a = altura do trapézio (m)

D = diâmetro do tubo (m) sendo $D \geq 2,5 \text{ m}$

F = número de Froude (adimensional). $F \geq 2,5$

Altura da água em tubulações de águas pluviais

Não existem normas da ABNT que disciplinem a relação y/D em microdrenagem nas cidades e áreas rurais. Usa-se comumente $y=D$ (seção plena) $y/D=0,80$.

Em instalações prediais de águas pluviais usa-se $y/D= 2/3$. O autor recomenda o uso $y/D=0,80$.

Exemplo 19.1

Dimensionar um *riprap* para tubo $D=1,0m$ a seção plena com velocidade de $3m/s$.

Número de Froude.

$$dp = 1,00$$

$$F = V / (g \times dp)^{0,5}$$

$$F = 3,0 / (9,81 \times 1,0)^{0,5} = \mathbf{0,96 < 2,5 \text{ OK}}$$

Diâmetro do riprap

$$ds = 0,25 \times D \times F$$

$$ds = 0,25 \times 1,00 \times 0,96 = 0,24m$$

Altura do trapézio

$$La = D [8 + 17 \times \log (F)]$$

$$La = 1,00 [8 + 17 \times \log (0,96)] = 7,70m$$

Nas Tabelas (19.1) estão as dimensões do riprap em avertal conforme Auckland para tubos variando de $0,30m$ a $2,50m$ de diâmetro funcionando com seção $y=0,25D$; $y=0,5D$; $y=0,75D$ e $y=D$ (seção plena) com declividade de $0,5\%$ e coeficiente de rugosidade de Manning $n=0,013$.

Tabela 19.1- Dimensões do avertal: La , d_{50} e espessura conforme usado em Auckland para $y=0,25D$; $y=0,5D$; $y=0,75D$ e $y=D$

$y=0,25D$									
Diâmetro	$n=0,013$	Decliv S	y	Q	V	F	La	d_{50}	Espessura
(m)		(m/m)	(m)	(m^3/s)	(m/s)		(m)	(m)	(m)
0,30	0,013	0,005	0,075	0,009	0,27	0,31	0	0	0
0,40	0,013	0,005	0,100	0,020	0,33	0,33	0	0	0
0,50	0,013	0,005	0,125	0,037	0,38	0,34	0	0	0
0,60	0,013	0,005	0,150	0,059	0,43	0,35	0,2	0,05	0,11
0,80	0,013	0,005	0,200	0,128	0,52	0,37	0,5	0,07	0,15
1,00	0,013	0,005	0,250	0,232	0,60	0,38	0,9	0,10	0,19
1,20	0,013	0,005	0,300	0,378	0,68	0,40	1,4	0,12	0,24
1,50	0,013	0,005	0,375	0,685	0,79	0,41	2,1	0,15	0,31
2,00	0,013	0,005	0,500	1,474	0,95	0,43	3,5	0,22	0,43
2,50	0,013	0,005	0,625	2,673	1,11	0,45	5,1	0,28	0,56
$y=0,5xD$									
Diâmetro	$n=0,013$	Decliv S	y	Q	V	F	La	d_{50}	Espessura
(m)		(m/m)	(m)	(m^3/s)	(m/s)		(m)	(m)	(m)
0,30	0,013	0,005	0,150	0,03	0,61	0,50	0,9	0,04	0,08
0,40	0,013	0,005	0,200	0,07	0,74	0,53	1,3	0,05	0,11
0,50	0,013	0,005	0,250	0,13	0,86	0,55	1,8	0,07	0,14

Curso de Manejo de águas pluviais
Capítulo 19- Riprap
Engenheiro Plínio Tomaz pliniotomaz@uol.com.br 27/abril/2012

0,60	0,013	0,005	0,300	0,22	0,97	0,56	2,3	0,08	0,17
0,80	0,013	0,005	0,400	0,47	1,17	0,59	3,3	0,12	0,24
1,00	0,013	0,005	0,500	0,85	1,36	0,61	4,4	0,15	0,31
1,20	0,013	0,005	0,600	1,38	1,54	0,63	5,5	0,19	0,38
1,50	0,013	0,005	0,750	2,50	1,78	0,66	7,3	0,25	0,49
2,00	0,013	0,005	1,000	5,38	2,16	0,69	10,5	0,34	0,69
2,50	0,013	0,005	1,250	0,00	2,50	0,72	13,8	0,45	0,89
y=0,75D									
Diâmetro	n=0,013	Decliv S	y	Q	V	F	La	d₅₀	Espessura
(m)		(m/m)	(m)	(m³/s)	(m/s)		(m)	(m)	(m)
0,30	0,013	0,005	0,225	0,06	0,91	0,61	1,3	0,05	0,09
0,40	0,013	0,005	0,300	0,13	1,10	0,64	1,9	0,06	0,13
0,50	0,013	0,005	0,375	0,24	1,27	0,66	2,5	0,08	0,17
0,60	0,013	0,005	0,450	0,40	1,44	0,68	3,1	0,10	0,21
0,80	0,013	0,005	0,600	0,85	1,74	0,72	4,4	0,14	0,29
1,00	0,013	0,005	0,750	1,55	2,02	0,74	5,8	0,19	0,37
1,20	0,013	0,005	0,900	2,51	2,28	0,77	7,3	0,23	0,46
1,50	0,013	0,005	1,125	4,56	2,65	0,80	9,5	0,30	0,60
2,00	0,013	0,005	1,500	9,81	3,21	0,84	13,4	0,42	0,84
2,50	0,013	0,005	1,875	17,79	3,72	0,87	17,4	0,54	1,08

Tabela 19.1-Continuação- Dimensões do avental: La, d₅₀ e espessura conforme usado em Auckland para y=D (seção plena)

Diâmetro da tubulação	Vazão a seção plena S=0,005m/m n=0,013	Área da seção	Velocidade média	Froude F	Comprimento do avental La	Diâmetro médio d₅₀	Espessura 2 x d₅₀
(m)	(m³/s)	(m²)	(m/s)	(adimensional)	(m)	(m)	(m)
0,30	0,07	0,0707	0,97	0,56	1,1	0,04	0,08
0,40	0,15	0,1257	1,17	0,59	1,6	0,06	0,12
0,50	0,27	0,1964	1,36	0,61	2,2	0,08	0,15
0,60	0,43	0,2827	1,54	0,63	2,8	0,09	0,19
0,80	0,94	0,5027	1,86	0,66	4,0	0,13	0,27
1,00	1,70	0,7854	2,16	0,69	5,3	0,17	0,34
1,20	2,76	1,1310	2,44	0,71	6,6	0,21	0,43
1,50	5,00	1,7672	2,83	0,74	8,6	0,28	0,55
2,00	10,76	3,1416	3,43	0,77	12,2	0,39	0,77
2,50	19,52	4,9088	3,98	0,80	15,9	0,50	1,00

19.3 Dimensionamento de riprap tipo avental usado pelo FHWA

O FHWA, 2006 apresenta duas equações básicas, sendo uma para tubo circular e outra para bueiro de seção retangular.

$$D_{50} = 0,2 \times D \times [Q / (3,13 \times D^{2,5})]^{4/3} \times (D/T_w) \text{ para seção circular}$$

$$D_{50} = 0,014 \times D \times [Q / (1,811 \times B \times D^{1,5})] \times (D/T_w) \text{ para seção retangular}$$

Sendo:

D_{50} = diâmetro da pedra do *riprap* (m)

D = diâmetro da galeria circular ou bueiro de seção retangular (m)

B = largura do bueiro de seção retangular (m)

Q = vazão da descarga (m^3/s)

T_w = altura do *tailwater* (m) 0,4D T_w 1,0D Sem dados adotar $T_w = 0,4D$.

Quando o escoamento tiver o regime supercrítico deverá ser feito o ajuste:

$$D' = (D + y_n) / 2$$

Sendo:

D' = diâmetro ajustado (m)

D = diâmetro do tubo (m)

y_n = profundidade normal ou profundidade crítica y_c , no caso do escoamento supercrítico (m)

A velocidade crítica de uma tubulação **circular** pode ser calculada aproximadamente pela fórmula de Braine conforme Metcalf e Eddy, 1981.

$$y_c = 0,483 \times (Q/D)^{2/3} + 0,083 \times D$$

Sendo:

y_c = altura crítica de tubulação (m)

Q = vazão na tubulação (m^3/s)

D = diâmetro da tubulação (m)

Para **seção retangular** o y_c crítico é fornecido pela equação:

$$y_c = 0,467 \times [(Q/B)^2]^{1/3}$$

DICA- o dimensionamento do riprap usando o FHWA é a maneira mais simples de calcular.

Tabela 19.2 – Comprimento e profundidade do riprap avental adaptado do FHWA

Classe	Diâmetro esférico equivalente D_{50} (mm)	Comprimento do avental (m)	Profundidade do avental (m)
1	125	4D	3,5D ₅₀
2	150	4D	3,3D ₅₀
3	250	5D	2,4D ₅₀
4	350	6D	2,2D ₅₀
5	500	7D	2,0D ₅₀
6	550	8D	2,0D ₅₀ (mínimo)

Exemplo 19.2-adaptado do FHWA, 2006

Calcular o *riprap* em avental de uma instalação com tubulação com vazão $Q=2,33\text{m}^3/\text{s}$, diâmetro $D=1,5\text{m}$ e *tailwater* $TW=0,50$.

O valor de $TW/D=0,50/1,50=0,33$

Portanto, $TW=0,33xD$ que é menor que o mínimo de $0,4D$ e adotamos então $TW=0,4xD$

Então $Tw=0,4D=0,60\text{m}$

Número de Froude

Como temos o diâmetro $D=1,50\text{m}$ e vazão $2,33\text{m}^3/\text{s}$ vamos achar a velocidade.

$$A=\text{PI} \times D^2/4=3,1416 \times 1,5 \times 1,5/4=1,77\text{m}^2$$

$$V=Q/A=2,33/1,77=1,32\text{m/s}$$

$$F=V/(g \cdot y)^{0,5}=1,32/(9,81 \times 1,50)^{0,5}=0,34 < 2,5 \text{ OK Regime subcrítico}$$

Como o regime de escoamento é subcrítico e como temos uma tubulação usamos a equação:

$$D_{50}=0,2 \times D \times [Q/(3,13 \times D^{2,5})]^{4/3} \times (D/TW)$$

$$D_{50}=0,2 \times 1,5 \times [2,33/(3,13 \times 1,5^{2,5})]^{4/3} \times (1,5/0,60)=0,13\text{m}$$

Adoto $D_{50}=0,15\text{m}$ Trata-se, portanto, da classe 2 conforme Tabela (19.2)

$$L=4 \times D=4 \times 1,50=6\text{m}$$

$$\text{Profundidade}=3,3 \times D_{50}=3,3 \times 0,15=0,50\text{m}$$

$$\text{Largura no final (maior)}=3D+(2/3)L=3 \times 1,5+(2/3) \times 6=8,5\text{m}$$

Verificação do tamanho das pedras

Equação de Peterka

$$D_{50}=0,0413 \times V^2$$

$$D_{50}=0,0413 \times 1,32^2=0,07\text{m} < 0,15\text{m (adotado) OK}$$

19.4 Falhas no *riprap*

Segundo Peterka, 2005 a causa primária das falhas de um *riprap* é o **subdimensionamento do tamanho das pedras** com o problema de serem instaladas pedras com diâmetro menor que o necessário,

Uma outra observação é que o *riprap* deve ser assentado sobre pedra graduada ficando os tamanhos maiores na parte superior.

Peterka, 1978 e Berry, 1948 apresentaram a seguinte equação:

$$D_{50}=0,0413 \times V^2$$

Sendo:

D_{50} = diâmetro da pedra (m) para densidade $2,65 \text{ g/cm}^3$

V =velocidade na saída (m/s)

Na Tabela (19.3) estão os diâmetros das pedras para serem usados no *riprap* em função da velocidade da água no *riprap* valendo a equação de Peterka até a velocidade máxima de $5,4\text{m/s}$.

Tabela 19.3- Diâmetro D_{50} da pedra em função da velocidade em m/s.

Velocidade (m/s)	Diâmetro da pedra D_{50} (m)
0,5	0,01
1,0	0,04
2,0	0,17
2,5	0,26
3,0	0,37
3,5	0,51
4,0	0,66
4,5	0,84
5,0	1,03
5,5	1,25

Conforme FHWA, 2006 Brown e Clyde, 1989 propuseram para o dimensionamento das pedras no Riprap da seguinte equação:

$$D_{50} = [0,692 / (S-1)] \times [V^2 / (2g)]$$

Sendo:

D_{50} = diâmetro das pedras (m)

S = gravidade específica das pedras no riprap

V = velocidade (m/s)

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

Outra proposta foi desenvolvida por Bohan, 1970 conforme FHWA, 2006 em que considera o tailwater Tw.

Quando o tailwater $Tw/D < 0,5$ temos:

$$D_{50} = 0,25 \times D \times F$$

Quando o tailwater $Tw/D > 0,5$ temos:

$$D_{50} = D (0,25 \times F - 0,15)$$

Sendo:

F = número de Froude sendo $F \geq 2,5$

D = diâmetro da tubulação (m) sendo $D \geq 2,5 \text{ mm}$

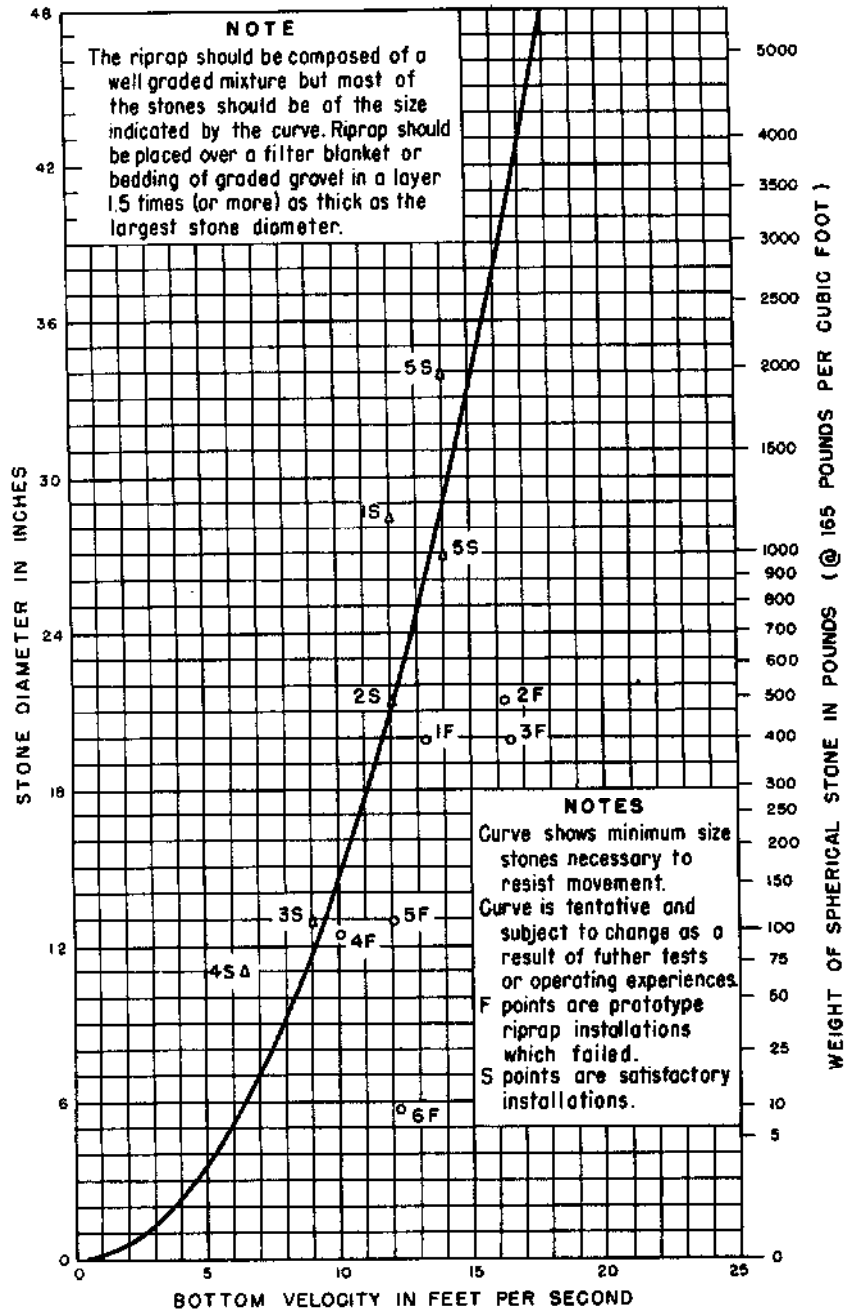


FIGURE 185. Curve to determine maximum stone size in riprap mixture

Figura 19.2- Curva para determinar o diâmetro máximo da pedra no riprap nas unidades inglesas.

Fonte: Peterka, 2005

19.5 Dimensionamento em avental conforme Haan et al, 1994

Haan et al, 1994 apresenta o dimensionamento de riprap Tipo Avental que é calculado de acordo com o *tailwater*. Se o *tailwater* for menor que $0,5.D$ temos um avental pontilhado conforme Figura (19.3) e se o *tailwater* for maior que $0,5.D$ então o avental será o de linha cheia da Figura (19.3).

A largura W_a na base do trapézio é calculada da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} W_a &= D + La && \text{(para } TW < 0,5.D) \\ W_a &= D + 0,4 La && \text{(para } TW \geq 0,5.D) \end{aligned}$$

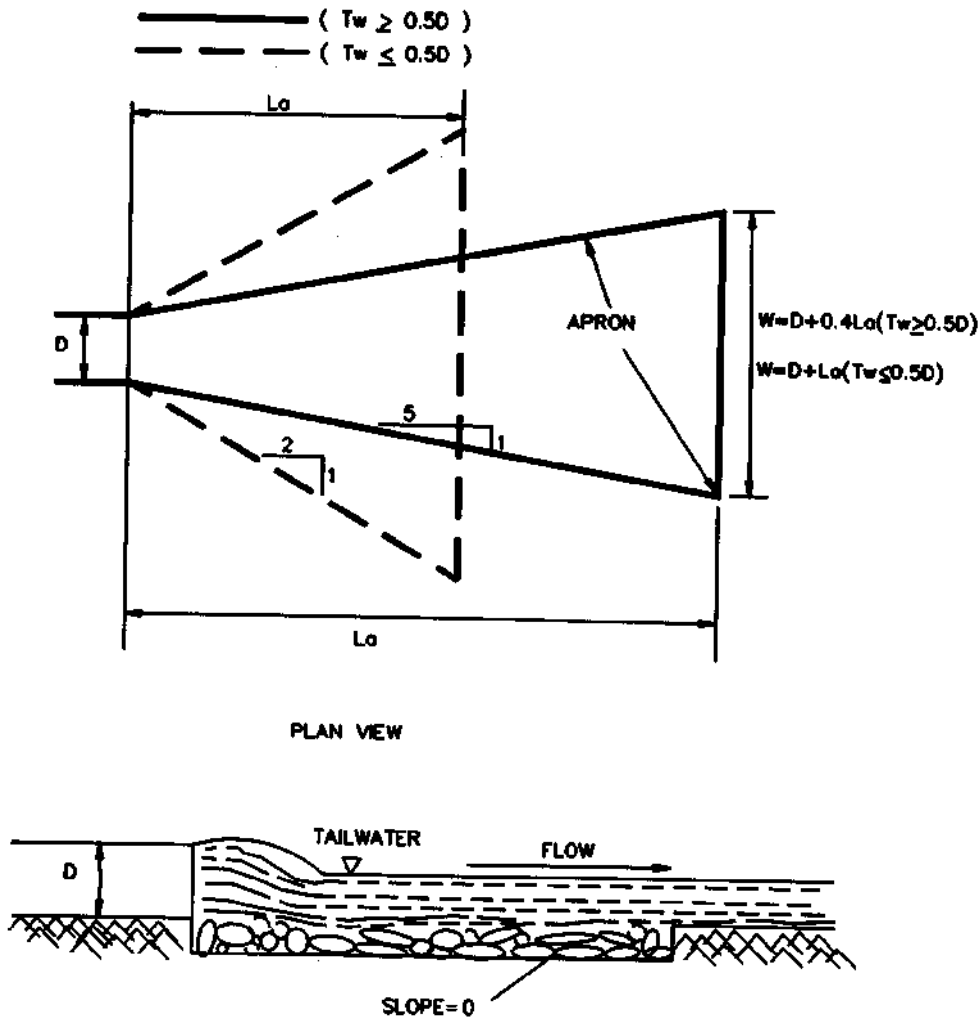


Figura 19.3-Esquema do dissipador de energia em riprap Tipo Avental conforme *Environmental Protection Agency, 1976 in Haan et al, 1994*

O valor de L_a é obtido através da Figura (19.4) onde entrando com a descarga e o diâmetro da tubulação obtemos o comprimento mínimo do riprap Tipo Avental.

A Figura (19.4) é usada de acordo com o *tailwater*, sendo para $T_w < 0,5D$ e $T_w \geq 0,5D$.

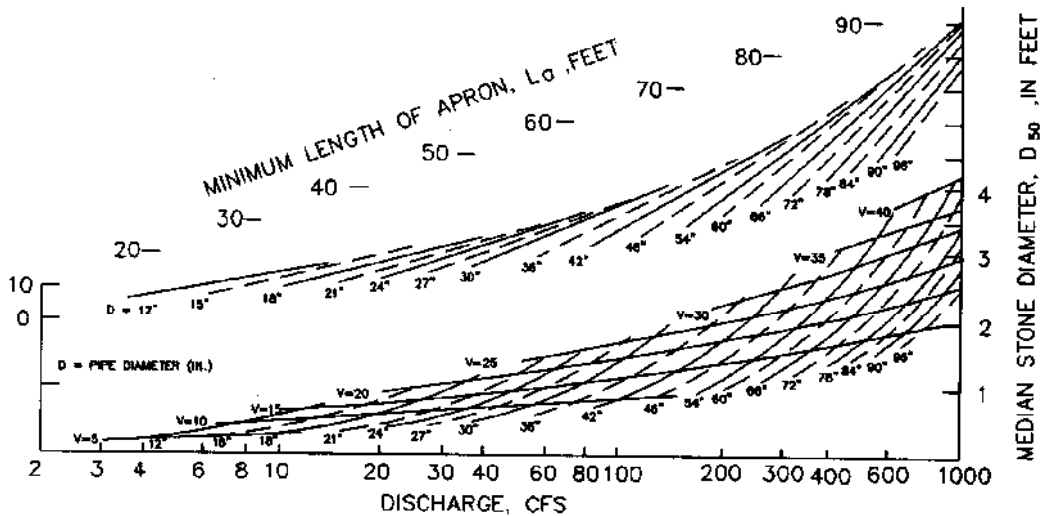


Figure 5.24 Design of outlet protection—minimum tailwater condition, $T_w < 0.5D$ (Environmental Protection Agency, 1976).

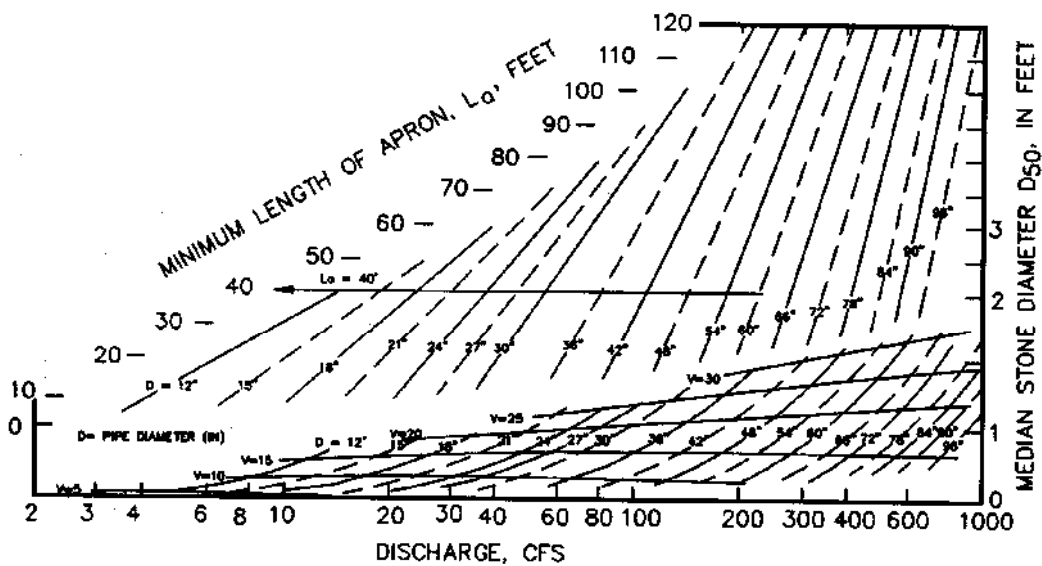


Figure 5.25 Design of outlet protection—maximum tailwater condition, $T_w \geq 0.5D$ (Environmental Protection Agency, 1976).

Figura 19.4- Esquema de dissipador de energia em riprap tipo avental conforme *Environmental Protection Agency, 1976* in Haan et al, 1994, para se obter o valor de L_a em função da descarga e do diâmetro da tubulação nas unidades inglesas sendo que o tubo funciona a seção plena com diâmetro variando de 0,3m a 2,5m.

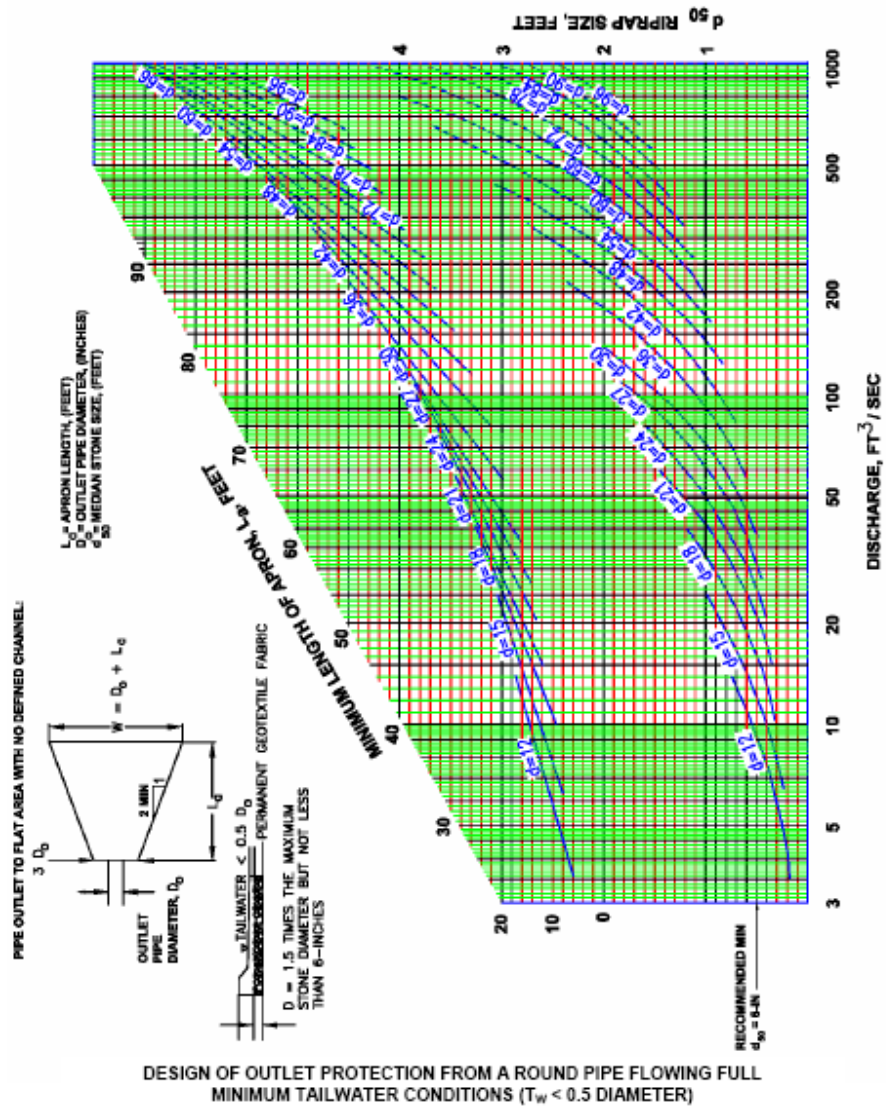


Figura 19.4-B Esquema de dissipador de energia em riprap tipo avental conforme *Environmental Protection Agency*, 1976 in Haan et al, 1994, para se obter o valor de L_c em função da descarga e do diâmetro da tubulação nas unidades inglesas sendo que o tubo funciona a seção plena com diâmetro variando de 0,3m a 2,5m.

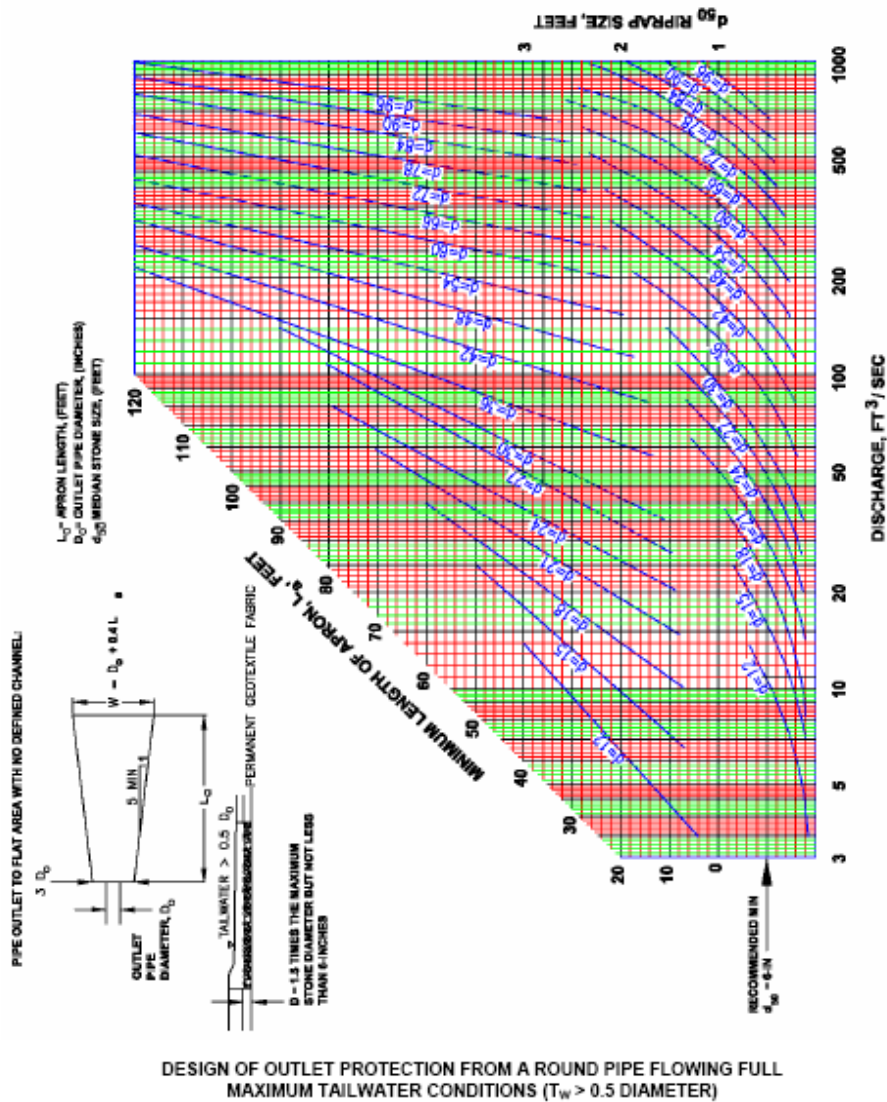


Figura 19.4-C Esquema de dissipador de energia em riprap tipo avental conforme *Environmental Protection Agency, 1976* in Haan et al, 1994, para se obter o valor de L_a em função da descarga e do diâmetro da tubulação nas unidades inglesas sendo que o tubo funciona a seção plena com diâmetro variando de 0,3m a 2,5m.

Exemplo 19.3-adaptado de Haan et al, 1994

Para uma tubulação de 36in (0,90m) de concreto escoando a seção plena com vazão de 60 cfs ($1,7m^3/s$). Supondo que o *tailwater* foi calculado por Manning é de 0,33m. Achar o diâmetro da pedra d_{50} e o comprimento e largura do riprap bem como espessura.

$$T_w = 0,33m < 0,5 \times D = 0,5 \times 0,90 = 0,45m$$

Portanto, usaremos $T_w < 0,5.D$ na Figura (19.4) e acharemos $L_a = 21ft = 6,3m$ e $d_{50} = 0,6 ft = 0,18m$.

$$W_a = D + L_a \quad (\text{para } T_w < 0,5.D)$$

$$W_a = D + L_a = 0,90 + 6,3 = 7,2m$$

A espessura do rip-rip em avental é:

$$d_{\max} = 1,5 \times d_{50} = 1,5 \times 0,18\text{m} = \mathbf{0,27\text{m}}$$

19.6 Riprap em bacias

Nas saídas de bueiros pode-se usar *riprap* em forma de bacia conforme Figura (19.5). De modo geral uma bacia de *riprap* tem comprimento total de **15x hs** sendo “hs” a profundidade da bacia.

A bacia tem a finalidade de formar um **ressalto hidráulico** e portanto a bacia de *riprap* é um **dissipador de energia**.

A bacia é revestida com pedras de **diâmetro $2d_{50}$** .

A bacia tem altura “**hs**” abaixo da geratriz inferior da tubulação.

A bacia tem dois comprimentos básicos, sendo um maior que **10x hs** e **3Wo** que é a bacia propriamente dita e os outros **5xhs** que é o (*riprap* em avental).

O comprimento total é **15hs** ou **4Wo**, sendo Wo a largura da bacia.

A razão **hs/d₅₀** deve ser mantido entre **2 e 4**.

$$2 \leq (hs/d_{50}) \leq 4$$

$$0,25 < d_{50}/y_e < 0,45$$

A altura equivalente **$y_e = (A/2)^{0,5}$**

Para o cálculo da altura equivalente y_e temos a área molhada A.

Com a dissipação de energia com a **bacia de riprap** a velocidade de saída deverá ser menor ou igual a 3m/s. Existem cálculos que são feitos usando gráficos e outros usando equações (FHWA, 2006).

Não temos nenhuma recomendação quando usar rip rap em avental e rip rap em bacia. Geralmente o rip rap em avental é para vazões relativamente pequenas enquanto que o rip rap em bacias é para vazões grandes embora não tenhamos valores recomendados.

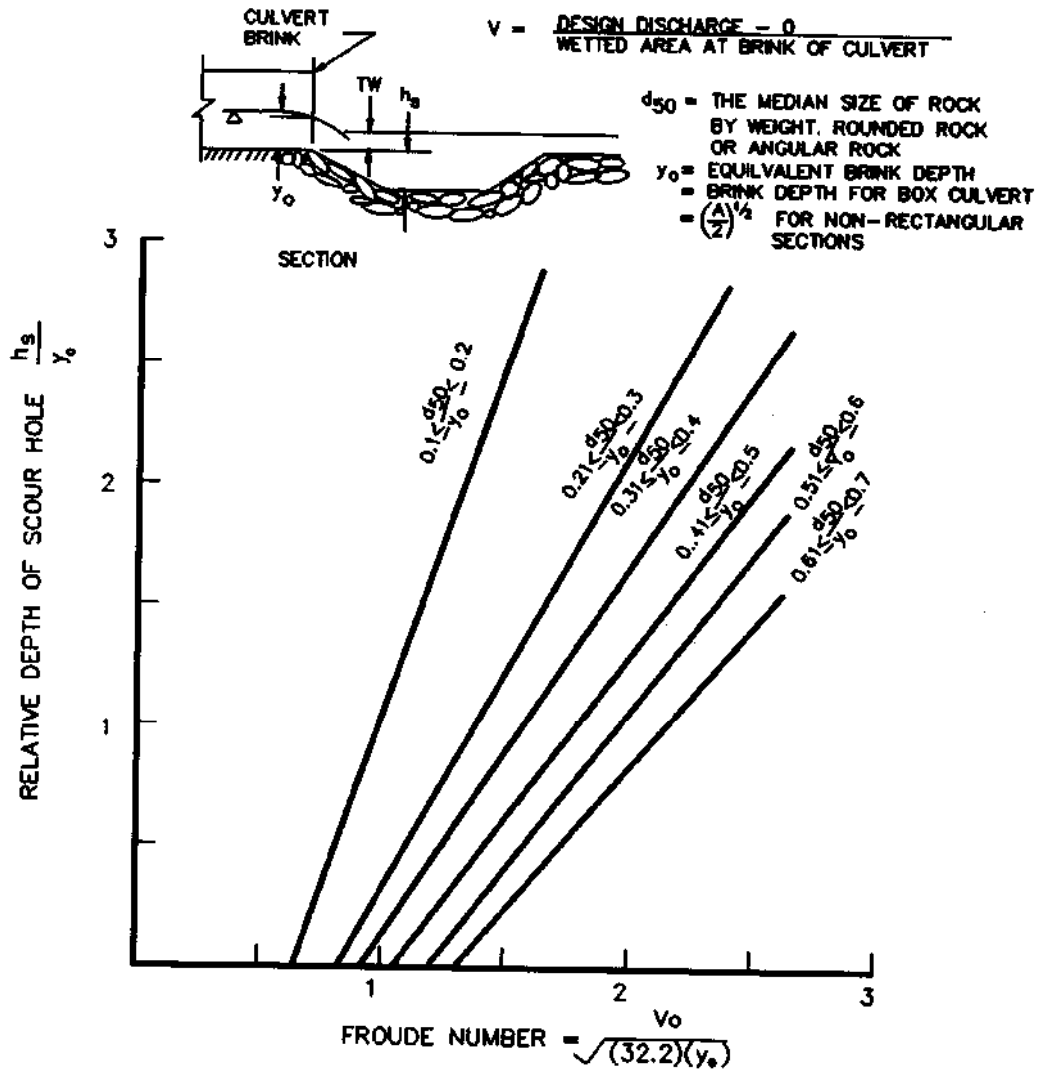


Figure 5.23. Relative depth of scour hole. Federal Highway Administration, 1975

Figura 19.5- Gráfico do número de Froude que varia de 0,7 a 2,5 em função da relação h_s/y_0 de dissipador de energia em riprap tipo bacia conforme *Federal Highway Administration*, 1975 in Haan et al, 1994, observando que o F é adimensional e que h_s/y_0 também não tem dimensões.

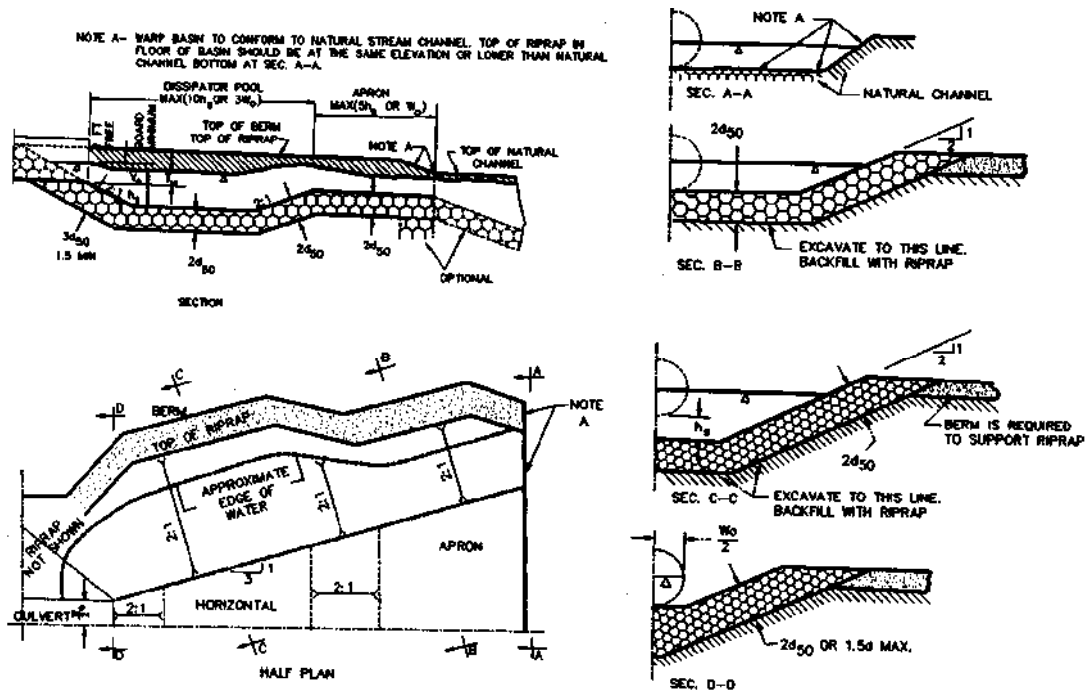


Figure 19.6 Schematic of riprap dissipator

Figura 19.6- Esquema de dissipador de energia em riprap tipo bacia conforme *Federal Highway Administration, 1973* in Haan et al, 1994.

Exemplo 19.4- adaptado da Geórgia, 2005

Calcular uma **bacia de riprap** para um bueiro com 2,40m de largura e altura=1,80m e com altura normal $y_0=1,20m$. $Q=22,64m^3/s$. $Taiwater Tw=0,84m$

$$V_0=Q/A= 22,64/(2,40 \times 1,20)=7,86m/s$$

Número de Froude

$$F=V/(g \cdot y)^{0,5}=7,86/(9,81 \times 1,20)^{0,5}=2,3 < 2,5 \text{ OK}$$

$$Tw/y_0=0,84/1,20=0,7 < Tw/y_0 < 0,75 \text{ OK.}$$

Tentativa

$$d_{50}/y_0=0,45$$

$$d_{50}=0,45 \times 1,20=0,54m$$

Da Figura (19.3) entrando com o número de Froude $F=2,3$ e escolhendo d_{50}/y_0 entre 0,41 e 0,5 achamos $h_s/y_0=1,6$

$$h_s= y_0 \cdot (h_s/y_0)=1,20 \times 1,60=1,92m$$

$$h_s/d_{50}=1,92/0,54=3,56 < 4 \text{ OK.}$$

Comprimento somente da bacia

$$L_s=10 \cdot h_s=10 \times 1,92=19,2m$$

$$L_{smin}=3 \cdot W_0= 3 \times 2,40=7,20m$$

O comprimento total da bacia + riprap em avental será:

$$L_{ytotal}= 15 \cdot h_s= 15 \times 1,92=28,80m$$

$$L_{total \text{ m\u00ednimo}}= 4 \cdot W_0= 4 \times 2,40=9,60m$$

$$\text{Espessura do riprap na entrada}=3 \cdot d_{50}=3 \times 0,54=1,62m$$

$$\text{Espessura do riprap no restante}= 2 \cdot d_{50}=2 \times 0,54=1,08m$$

Exemplo 19.5- adaptado da Geórgia, 2005

Calcular uma **bacia de riprap** para um bueiro com $W=2,40\text{m}$ de largura e altura $1,80\text{m}$ e com altura normal $y_0=1,20\text{m}$. $Q=22,64\text{m}^3/\text{s}$. *Taiwater* $T_w=1,26\text{m}$ (notar que temos um *tailwater* maior que o exemplo anterior)

$$V_0=Q/A=22,64/(2,40 \times 1,20)=7,86\text{m/s}$$

Número de Froude

$$F=V/(g \cdot y)^{0,5}=7,86/(9,81 \times 1,20)^{0,5}=\mathbf{2,3 < 2,5 \text{ OK}}$$

$$y_e=y_0=1,20\text{m}$$

$$T_w/y_e=0,84/1,20=0,7 < T_w/y_e=1,26/1,20=1,05 > 0,75$$

Tentativa

$$d_{50}/y_e=0,45$$

$$d_{50}=0,45 \times 1,20=0,54\text{m}$$

Da Figura (19.5) entrando com o **número de Froude $F=2,3 < 2,5$** **OK** e escolhendo d_{50}/y_e entre 0,41 e 0,5 achamos $h_s/y_e=1,6$

$$h_s=y_e \cdot (h_s/y_e)=1,20 \times 1,60=1,92\text{m}$$

$$h_s/d_{50}=1,92/0,54=3,56 < 4 \text{ OK.}$$

Comprimento somente da bacia

$$L_s=10 \cdot h_s=10 \times 1,92=\mathbf{19,2\text{m}}$$

$$L_{s\text{min}}=3 \times W_0=3 \times 2,40=7,20\text{m}$$

O comprimento total da bacia + *riprap* em avental será:

$$L_{\text{total}}=15 \cdot h_s=15 \times 1,92=\mathbf{28,80\text{m}}$$

$$L_{\text{total mínimo}}=4 \cdot W_0=4 \times 2,40=9,60\text{m}$$

$$\text{Espessura do riprap na entrada}=3 \cdot d_{50}=3 \times 0,54=1,62\text{m}$$

$$\text{Espessura do riprap no restante}=2 \cdot d_{50}=2 \times 0,54=1,08\text{m}$$

Temos que usar a Figura (19.7) para estimar a média da velocidade ao longo do canal.

$$A=PI \cdot D_e^2/4=y_0 \cdot W_0=1,20 \times 2,40=2,88\text{m}^2$$

$$D_e=[(2,88 \times 1,20)/3,1416]^{0,5}=1,92\text{m}$$

$$V_0=7,86\text{m/s}$$

Calculamos então por tentativas e colocamos na Tabela (19.4):

Coluna 1

Valores de $L/D_e=L/W_0$ variando de 10,15,20,21 onde há uma aproximação melhor

Coluna 2

Valor de h_s em metros

Coluna 3

Valor do comprimento $L=(L/D_e) \times h_s$ = coluna 1 x coluna 2

Coluna 4

Valores V_L/V_0 obtido no gráfico da Figura (19.7) de distribuição da velocidade onde variando os valores L/D_e obtemos valores diferentes de V_L/V_0 .

Coluna 5

Velocidade $V_0=7,86\text{m/s}$

Coluna 6

Valor de V_L

$$V_L = (V_L/V_0) \times V_0$$

Coluna 7

Valores de V_L em ft/s

Coluna 8

Valores de d_{50} obtido conforme Figura (19.8)

Coluna 9

Valores de d_{50} em metros

Tabela 19.4- Comprimento do riprap, velocidade e diâmetro da pedra d_{50}

L/De	hs (m)	L (m)	V_L/V_0	V_0 (m/s)	V_L (m/s)	V_L (ft/s)	d_{50} (ft)	d_{50} (m)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	1,92	19,2	0,59	7,86	4,6	15,5	1,4	0,42
15	1,92	28,8	0,37	7,86	2,9	9,7	0,6	0,18
20	1,92	38,4	0,30	7,86	2,4	7,9	0,4	0,12
21	1,92	40,32	0,28	7,86	2,2	7,3	0,4	0,12

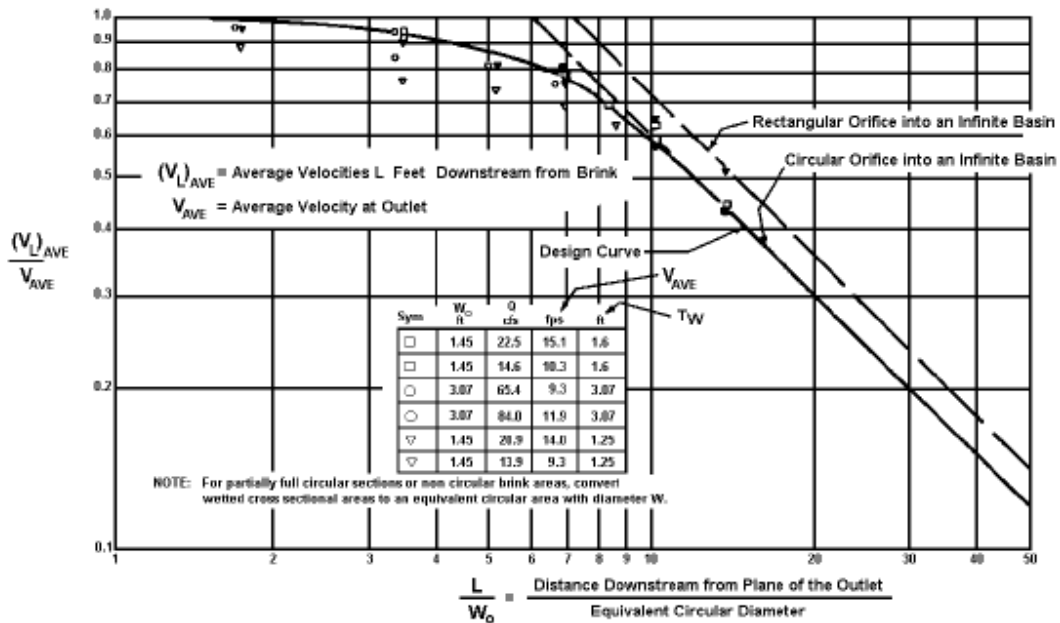


Figura 19.7- Distribuição da velocidade em função de $L/W_0=L/De$ e achamos $V/V_{médio}$. Fonte: Geórgia, 2005

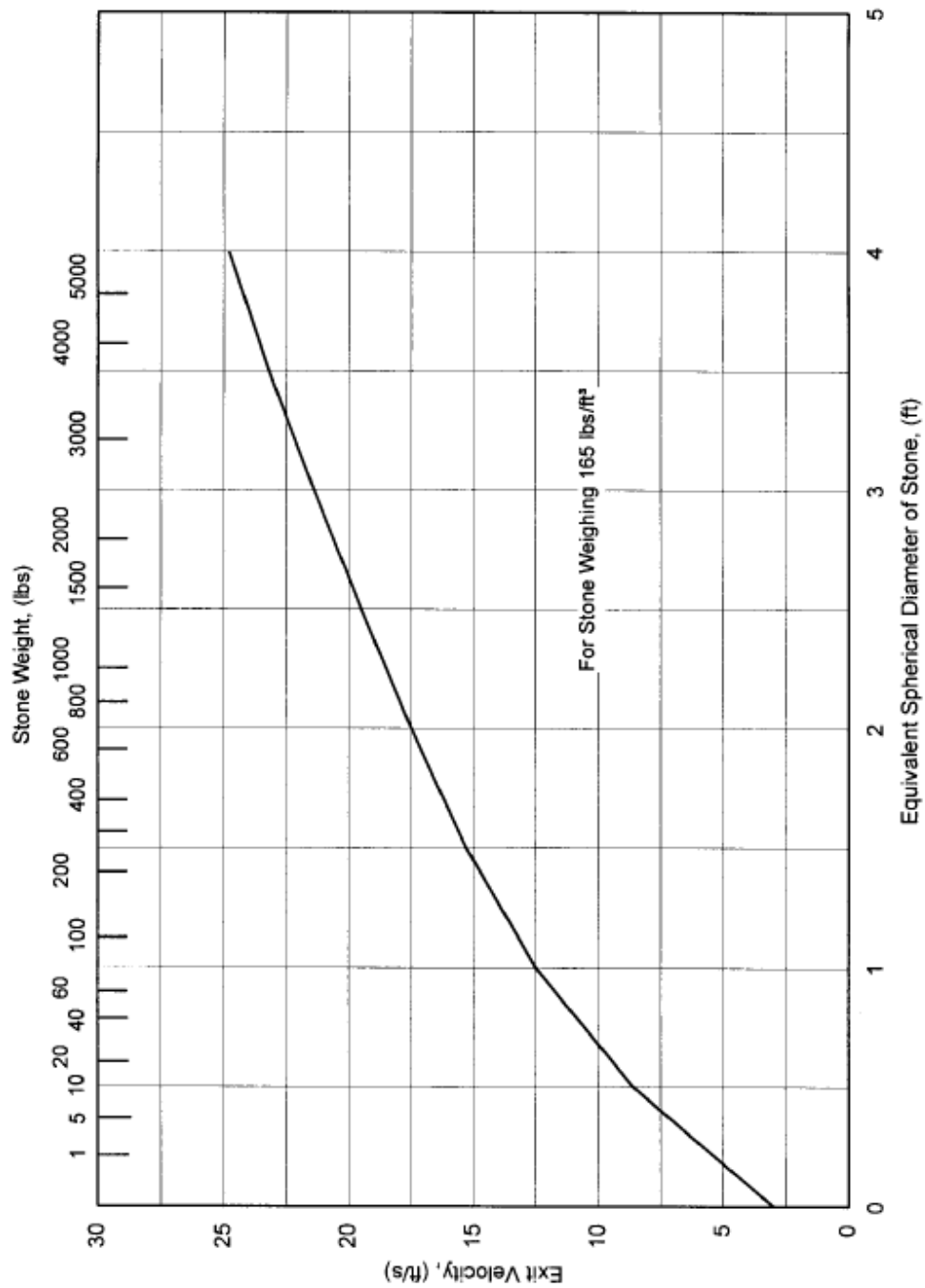


Figura 19.8- D_{50} em função da velocidade nas unidades inglesas
Fonte: Geórgia, 2005

19.7 Riprap em bacia

Apresentamos modelo de riprap em bacias conforme Asce, 1992

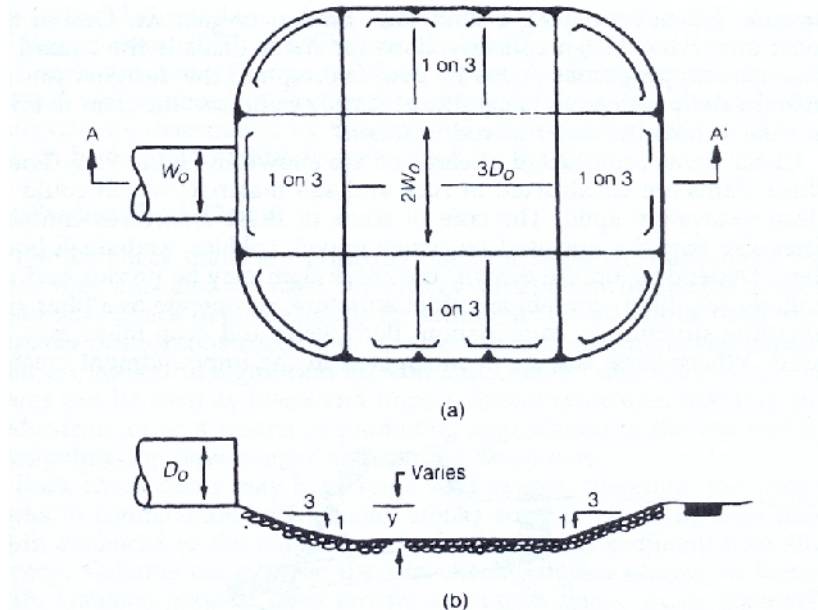


Figura 19.9- Riprap em bacia. Notar que W_o é a largura e D_o a altura
Fonte: ASCE, 1992

Dimensionamento do riprap em **bacia** conforme ASCE, 1992

O riprap em bacia é usado em lugares onde os riprap em avental planos são impraticáveis de serem construídos devido ao espaço.

O diâmetro das pedras do riprap em bacia depende da profundidade da bacia Y da Figura (19.5).

Diâmetro das pedras para riprap em bacia com altura $Y = D_o/2$

$$d_{50} = 0,041 Q^{(4/3)} / (TW \times D_o)$$

Diâmetro das pedras para riprap em bacia com altura $Y = D_o$

$$d_{50} = 0,027 Q^{(4/3)} / (TW \times D_o)$$

Espessura do riprap

A espessura do riprap usual é $2 \times d_{50}$.

Exemplo 19.6

Dimensionar um *riprap* em **bacia** para tubo $D=2,0\text{m}$ a seção plena com velocidade de $3,43\text{m/s}$ e vazão de $10,76\text{m}^3/\text{s}$.

Vamos adotar $Y = D_0/2 = 2/2 = 1,00\text{m}$

$$d_{50} = 0,041 Q^{(4/3)} / (TW \times D_0)$$

Adotando *tailwater* $TW = D_0/2 = 2/2 = 1\text{m}$

$$d_{50} = 0,041 \times 10,76^{(4/3)} / (1,00 \times 2,0) = 0,49\text{m} \text{ (igual ao Peterka abaixo)}$$

Peterka

$$D_{50} = 0,0413 \times V^2$$

$$D_{50} = 0,0413 \times 3,43^2$$

$$D_{50} = 0,49\text{m}$$

$$\text{Espessura do riprap} = 2 \times d_{50} = 2 \times 0,49 = 0,98\text{m}$$

19.8 Riprap em bacia conforme Modelo do FHWA

Vamos explicar o dimensionamento do Riprap em bacias conforme modelo do FHWA usando exemplos práticos. A grande vantagem deste método é podermos calcular a **velocidade da água após a saída do dissipador** e a comparar com a **velocidade máxima admitida superficialmente**.

Temos um barramento com torre de captação de água e descarregador de fundo em aduelas de 4,00m de largura por 2,00m de altura.

A jusante do descarregador de fundo será feito um canal com gabiões cuja velocidade máxima é 2,5m/s conforme DAEE SP.

Como as velocidades de saída nos bueiros estão acima de 2,5m/s temos que fazer um dissipador de energia e escolhemos **riprap em bacia**, usando modelo do FHWA.

Dimensionamento da bacia em riprap

O riprap em bacia está esquematizado na Figura (19.10), onde se destaca o comprimento L_B e L_S .

A altura da bacia é h_s e a espessura é $2 \times D_{50}$ na parte plana e na parte do talude.

O talude tem 1V: 2H.

O dimensionamento como de praxe em engenharia hidráulica é feito por **tentativas** até obtermos uma velocidade de saída menor do que aquela que fixamos que no caso é 2,5m/s para gabião.

Primeiramente verificamos **duas condições impostas**:

$$h_s/D_{50} \geq 2 \text{ e que } D_{50}/y_e > 0,1$$

Sendo:

d_{50} = diâmetro da pedra em metros,

h_s = profundidade da bacia do *riprap* em metros e

y_e = altura do nível de água em metros.

O *tailwater* T_w também tem que ser verificado, pois, existe o valor C_o que depende da relação do TW/y_e .

Se $TW/y_e < 0,75$ então $C_o = 1,4$

Se $TW/y_e > 1,0$ então $C_o = 2,4$

Se $0,75 < TW/y_e < 1,0$ então $C_o = 4x (TW/y_e) - 1,6$

Conforme FHWA a relação h_s/y_e é dada pela equação:

$$h_s/y_e = 0,86 \times (D_{50}/y_e)^{-0,55} \times (V_o/(g \cdot y_e)^{0,5}) - C_o$$

Sendo:

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

V_o = velocidade de entrada (m/s)

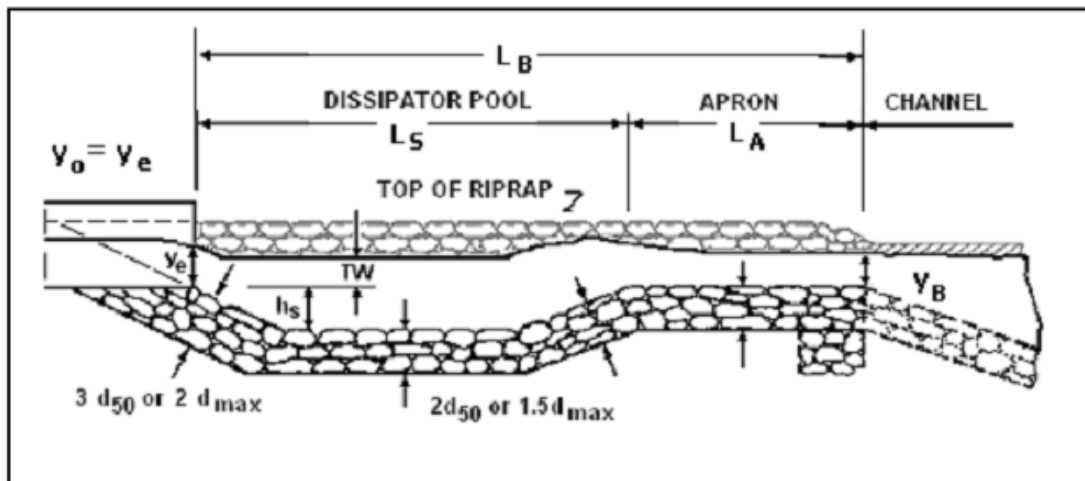


Figure 10.1. Profile of Riprap Basin

Figura 19.10- Esquema de perfil da bacia em riprap conforme modelo do FHWA.

Para achar a altura $y_B=y_C$ na saída conforme Figura (19.10) e para termos a velocidade $V_B=V_C$ temos que comparar com a **velocidade de saída admissível que no caso é 2,5m/s.**

A altura crítica y_c é achada por tentativas com a seguinte equação para as condições críticas:

$$Q^2 \cdot T_c / (g \cdot A_c^3) = 1$$

$$Q^2/g = (A_c)^3/T_c = [y_c(W_B+Z \cdot y_c)]^3 / (W_B+2 \cdot Z \cdot y_c)$$

Sendo:

Q = vazão de pico (m^3/s)

y_c = altura crítica (m)

Z = talude =2

W_B = largura da bacia do riprap (m)

A_c = área crítica (m^2)

T_c = largura da superfície (m)

y_c = altura crítica (m) obtida por tentativas

Extensão do riprap

Existe ainda outra possibilidade que é de ser fazer ou não uma **extensão do riprap**. Isto dependerá da relação TW/ye , pois caso $TW/ye < 0,75$ então não precisamos fazer mais nada, mas caso $TW/ye > 0,75$ precisamos fazer uma extensão do riprap usando a Figura (19.11).

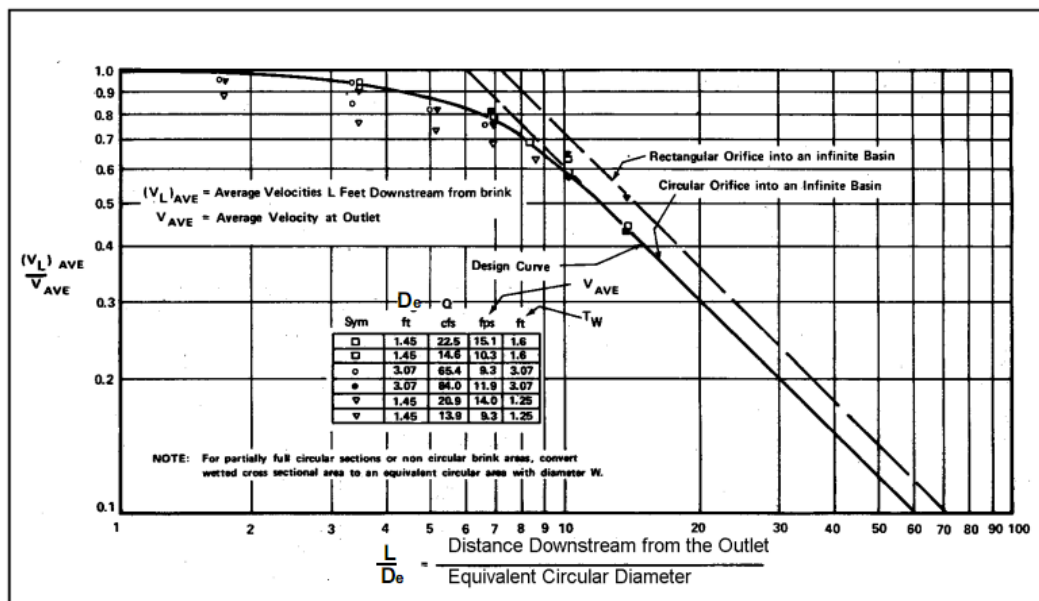


Figure 10.3. Distribution of Centerline Velocity for Flow from Submerged Outlets

Figura 19.11- Gráfico de L/De e V_L/V_o

A primeira condição para se entrar no gráfico da Figura (19.11) é achar o diâmetro equivalente De de uma **seção circular**.

Sendo a área com água no bueiro é:

$$A = y_o \times W_o$$

$$Area = A = \pi \times De^2 / 4$$

$$De = (A \times 4 / \pi)^{0,5}$$

Exemplo 19.1

Dimensionar um riprap em bacia usando modelo do FHWA para vazão de 9,02m³/s, bueiro em aduela com 2,00m de altura por 4,00m de comprimento, altura de água dentro do bueiro ye=1,64m e velocidade na saída do bueiro de 2,75m/s conforme Tabela (19.5). Supomos que existe um tailwater TW=0,40m e que o talude do riprap em bacia é Z=2,0 e que após o bueiro temos um canal com gabiões cuja velocidade máxima admitida pelo DAEE/SP é de 2,50m/s. Queremos fazer um riprap em bacia de maneira que a velocidade de saída do riprap em bacia seja menor que 2,50m/s.

Tabela 19.5- Dados dos três barramentos

Vazão (m ³ /s)	Altura (m)	Largura (m)	Nível água (m) ye	Velocidade saída bueiro (m/s)
9,02	2	4	1,64	2,75

Numero de Froude

$$F = V / (g \times ye)^{0,5} = 2,75 / (9,81 \times 1,64)^{0,5} = 0,69$$

Calculo de TW/ye

$$TW/ye = 0,40 / 1,64 = 0,24$$

Escolha do valor de Co

Como TW/ye < 0,75 então Co = 1,4

Cálculo de hs/ye

Como a maioria dos problemas em hidráulicos a resolução do problema é por tentativas.

Primeiramente supomos que o diâmetro da pedra D_{50} seja igual a:

$$D_{50} = 0,18\text{m}$$

$$hs/ye = 0,86 \times (D_{50}/ye)^{-0,55} \times (Vo/(g \cdot ye)^{0,5}) - Co$$

$$hs/ye = 0,86 \times (0,18/1,64)^{-0,55} \times (2,75/(9,81 \times 1,64)^{0,5}) - 1,4 = 0,59$$

$$hs = 0,59 \times ye = 0,59 \times 1,64 = 0,96\text{m}$$

Verificações

É importante que sejam atendidas as duas verificações que iremos mostrar e caso não aconteça, mudar o diâmetro D_{50} .

Primeira verificação:

$$hs/D_{50} \geq 2$$

$$0,96/0,18 = 5,33 > 2 \text{ OK}$$

Segunda verificação:

$$D_{50}/ye > 0,1$$

$$0,18/1,64 = 0,11 > 0,1 \text{ OK}$$

Atendida as duas verificações podemos continuar os calculos.

Comprimento L_s

$$L_s = 10 \times hs = 10 \times 0,96 = 9,6\text{m}$$

$$L_s \text{ minimo} = 3 W_o = 3 \times 4 = 12,00$$

Escolhemos o valor maior, isto é, $L_s = 12,00\text{m}$

Comprimento L_B

$$L_B = 15 h_s = 15 \times 0,96 = 14,46\text{m}$$

$$L_B \text{ minimo} = 4 W_o = 4 \times 4 = 16,00\text{m}$$

Escolho o valor maior $L_B = 16,00\text{m}$

Largura da bacia W_B

$$W_B = W_o + 2 (L_B/3) = 4,00 + 2 (16/3) = 14,67\text{m}$$

Talude da bacia $z=2$

Cálculo da altura crítica y_c

O cálculo é feito por tentativas como usual em hidráulica, fornecendo-se valores de y_c até achar a vazão bem próxima da vazão do bueiro.

Por tentativa fazendo $y_c = 0,34\text{m}$

$$Q^2/g = [y_c(W_B + z \cdot y_c)]^3 / (W_B + 2 \cdot z \cdot y_c)$$

$$Q^2/g = [0,34(14,67 + 2 \cdot 0 \cdot 0,34)]^3 / (14,67 + 2 \cdot 2 \cdot 0,34) = 8,86$$

$$Q = (8,86 \times 9,81)^{0,5} = 9,33\text{m}^3/\text{s} \text{ OK}$$

Tendo o valor $y_c = 0,34\text{m}$ vamos calcular a área crítica A_c .

$$A = [y_c(W_B + z \cdot y_c)]^3 / (W_B + 2 \cdot z \cdot y_c)$$

$$A = [0,34(14,67 + 2 \cdot 0 \cdot 0,34)]^3 / (14,67 + 2 \cdot 2 \cdot 0,34) = 5,22\text{m}^2$$

$$V_B = V_C$$

$$V_C = Q / A_c = 9,02\text{m}^3/\text{s} / 5,22 = \mathbf{1,74\text{m/s} < 2,50\text{m/s} \text{ OK}}$$

Como $TW/y_c < 0,75$ não precisamos fazer extensão do riprap.

Caso precisássemos fazer extensão do riprap depois da bacia de riprap deveríamos proceder da seguinte maneira:

Primeiramente temos que fazer com que a area retangular se transforme numa circular:

$$\text{Area molhada } A = y_e \times W_o = 1,64 \times 4,00 = 6,56\text{m}^2$$

Diametro equivalente circular D_e

$$D_e = (Ax4/\pi)^{0,5}$$

$$D_e = (6,56x4/3,1416)^{0,5}$$

$$D_e = 2,89\text{m}$$

Por tentativas, fazemos $L = 10,00\text{m}$ e obtemos $L/D_e = 10/2,89 = 3,46$

Entrando no gráfico da Figura (19.11) com $L/D_e = 3,46$ achamos $V/V_o = 0,95$.

$V_o = 1,74\text{m/s}$ = velocidade de saída do riprap em bacia

$$V = 0,95 \times 1,74 = 1,64\text{m/s}$$

Diâmetro das pedras D_{50}

$$D_{50} = [0,692 / (S-1)] \times (V^2/2g)$$

$$S = 2,65$$

$$D_{50} = [0,692 / 1,65] \times (1,64^2/2 \times 9,81) = 0,06\text{m}$$

19.7 Riprap após dissipador de energia

O riprap é geralmente colocado na saída de uma tubulação de águas pluviais em um sistema de microdrenagem ou na saída de um bueiro de seção circular ou retangular e também é colocado riprap em pilares e bases de pontes. Desta maneira o riprap age como um dissipador de energia.

Quando já foi feito um dissipador de energia como uma escada hidráulica ou uma bacia horizontal Tipo I do USBR ou um dissipador de impacto Tipo VI do USBR, colocamos riprap de uma maneira diferente.

O DAEE de São Paulo adota os seguintes valores da rugosidade de Manning n que estão na Tabela (103.1) e velocidades limites que estão na Tabela (103.2).

Tabela 103.1- Valores recomendados para o coeficiente de rugosidade de Manning n

Tipo de superfície ou de revestimento	n
Terra	0,035
Gramma	
Rachão	
Gabião	0,028
Pedra argamassada	0,025
Aço corrugado	0,024
Concreto	0,018

Fonte: DAEE, Instrução DPO 002/2007

Tabela 103.2- Limites superiores para velocidade em canais

Revestimento	V _{max} (m/s)
Terra	1,5
Gabião	2,5
Pedra argamassada	3,0
Concreto	4,0

Fonte: DAEE, Guia Prático para Projeto de Pequenas Obras Hidráulicas, 2005

Critério do FHWA

O critério usado pelo FHWA é o dimensionamento das pedras com a mesma equação usada em pilares de pontes elaborado por Searcy, 1967 que é usado somente após um DISSIPADOR DE ENERGIA.

$$D_{50} = [0,692 / (S-1)] \times (V^2 / 2g)$$

Sendo:

D₅₀ = diâmetro médio da pedra (m)

S = gravidade específica da rocha. Adotamos S = 2,65

V = velocidade na saída do dissipador de energia (m/s)

$$D_{50} = [0,692 / (2,65-1)] \times (V^2 / 2g) = 0,021 V^2$$

$$D_{50} = 0,021 V^2$$

Observemos que o valor do diâmetro das pedras é menor que o diâmetro das pedras obtido por Peterka.

Espessura do colchão de riprap: adotamos 2 x D₅₀

Exemplo 103.1

Sendo: V= 2,47m/s. Achar D₅₀ ?

$$D_{50} = 0,021 \times 2,47^2$$

$$D_{50} = 0,13\text{m}$$

$$\text{Espessura} = 2 \times D_{50} = 2 \times 0,13 = 0,26\text{m}$$

Não há uma regra fixa, mas conforme FHWA, 2006 o comprimento do riprap deve ser proporcional a velocidade de saída do dissipador que é a velocidade admitida máxima no terreno. Se a velocidade que sai do dissipador é menor que a velocidade admitida no solo, não precisa de riprap.

O critério que vamos estabelecer é que o comprimento calculado La deve ser multiplicado pelo fator X.

Fator X= (Velocidade de entrada – velocidade máxima no terreno)/ Velocidade de entrada sendo no **máximo X=1**.

Conforme Auckland temos:

$$F = V / (g \cdot y_1)^{0,5} \quad F \quad 2,5$$

$$La = D [8 + 17 \times \log (F)]$$

Sendo:

La=altura do trapézio (m)

D= diâmetro do tubo (m) sendo D = 2,5m. Considero a altura de água como D.

F= número de Froude (adimensional).

$$L = K \times La \quad K \quad 1$$

Exemplo 103.2

Na saída do basin Tipo I do USBR temos:

$$V = 2,47\text{m/s} \quad F = 1,4$$

A velocidade admitida máxima no solo de terra conforme DAEE na Tabela (103.2) é V= 1,50m/s e então conforme FHWA o comprimento do riprap é proporcional a diferença.

$$K = (2,47 - 1,50) / 2,47 = 0,39 \quad (39\%)$$

A altura do trapézio (aental) é denominada La sendo calculado da seguinte maneira:

$$La = D [8 + 17 \times \log (F)]$$

Sendo:

La=altura do trapézio (m)

D= diâmetro do tubo (m) sendo D = 2,5m

F= número de Froude (adimensional). $F \quad 2,5$

$$La = D [8 + 17 \times \log (F)]$$

$$D = 1,14\text{m} \quad F = 1,4 < 2,5 \text{ OK}$$

$$L_a = 1,14 [8 + 17 \times \log (1,4)] = 12,00\text{m}$$

Portanto, adotamos como comprimento

$$L = K \times L_a = 0,39 \times 12,00 = 4,7\text{m}$$

19.8 Bibliografia e livros consultados

- ASCE- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEER. *Design and construction of urban stormwater management systems*. ASCE, 1992, ISBN 1-881369-21-8
- CIDADE OF AUCKLAND. *Stormwater Management devices: design guidelines manual*. 2a ed. May, 2003, 250 p.
- ESTADO DA GEORGIA, 2001. *Georgia Stormwater Management Manual*. August 2001. Volume 1, Volume 2.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). *Hydraulics Design of Highway Culverts*, september 2001, Publication FHWA NHI 01-020, U. S. Department of Transportation, 480 p.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). *Introduction to Highway Hydraulics*, august 2001, Publication FHWA NHI 01-019, U. S. Department of Transportation, 280 p.
- HAAN, C. T. *Design Hydrology and sedimentology for small catchments*. Academic Press, 1994, 588páginas.
- PETERKA**, A. J. *Hydraulic design of stilling basins and energy*. Hawaii, 2005. US Department of the Interior-Bureau of Reclamation. ISBN 1-4102-2341-8. Nota: é uma reimpressão do original.