

Capítulo 20

Remoção de sedimentos na faixa de filtro gramada

Sumário

Ordem	Assunto
	Capítulo 20 – Remoção de sedimentos em faixa de filtro gramada
20.1	Introdução
20.2	Remoção de sedimentos em faixa de filtro gramada
20.3	Eficiência quando se tem as faixas de distribuição das partículas
20.4	Dimensionamento de faixa de filtro gramado conforme Hann et al, 1994
20.5	Estimativa do comprimento da faixa de filtro gramado na direção do escoamento e eficiência da remoção de sedimentos.
20.6	Projeto de faixa de filtro gramada conforme Haan et al, 1994
20.7	Bibliografia e livros consultados

Capítulo 20 – Remoção de sedimentos na faixa de filtro gramada

20.1 Introdução

A *faixa de filtro gramada* (*filter strip*) é uma área ou região coberta com grama ou vegetação com objetivo de tratar o escoamento superficial sobre o solo através de infiltração no solo e filtração através da vegetação conforme se pode ver nas Figuras (20.1) a (20.4), recebendo águas pluviais de área impermeável ou permeável.

A *faixa de filtro gramada* serve também para auxiliar a recarga do manancial subterrâneo em locais onde a taxa de infiltração do solo é favorável e não haja perigo de contaminação.

Nas faixas de filtro gramadas o fluxo da água é laminar, enquanto que os canais gramados o fluxo é concentrado.

Nas faixas gramadas temos os processos de adsorção de partículas de solos pelas plantas, ação biológica e química onde as águas da chuva são *filtradas*.

As faixas de filtro gramadas são usadas como pré-tratamento de alguma BMP, localizada a jusante com objetivo de melhorar a qualidade das águas pluviais.



Figura 20.1-Exemplo de faixa de filtro gramada



Figura 20.2-Exemplo de faixa de filtro gramada

Fonte: Condado de Hall, 2002

As faixas de filtro gramadas podem ser utilizadas para coletar o escoamento urbano ao longo de ruas e estradas.



Figura 20.3 - Faixa de filtro gramada ao longo de um rio. Observar a direita às plantações.
Fonte: acessado em 25 de junho de 2006:
<http://www.sblc-mi.org/images/filterstrip.jpg>



Figura 20.4 - Faixa de filtro gramada ao longo de uma estrada.
Fonte: <http://crd.dnr.state.ga.us/assets/documents/GGG3C.pdf>

Eficiência da faixa de filtro gramada

Conforme Haan et al, 1994 a eficiência da remoção de sedimentos numa faixa de filtro gramada é **maior que 50% e chega a 90% e até 99%**. Conforme Estado da Geórgia, 2001 é considerado que as faixas de filtro gramada removem 50% de sedimentos (TSS).

Tabela 20.1-Eficiência da faixa de filtro gramada

TSS Sólidos totais em suspensão	TP Fósforo total	Metais pesados
50%	20%	40%

Fonte: Estado da Geórgia, 2001.

20.2 Remoção de sedimentos em faixa de filtro gramada

As faixas de filtro gramada possuem uma capacidade alta de remoção de sedimentos.

Consideraremos como sedimentos a serem retidos todos aqueles cujo diâmetro seja maior que $0,45\mu\text{m}$ a que chamaremos de sólidos totais em suspensão (TSS).

As partículas com diâmetro inferior a $0,45\mu\text{m}$ somente serão retidos por infiltração na zona das raízes no chamado *interflow* conforme Figura (20.5).

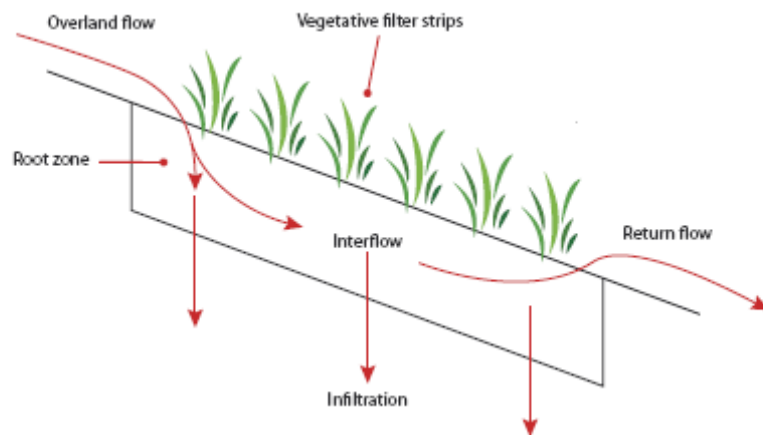


Figura 20.5-Corte de seção onde se mostra o escoamento na zona de raízes chamado Interflow numa faixa de filtro gramada.

Fonte: Grismer et al, 2006

A grama possui pedúnculos (hastes) conforme Figura (20.6) cujos diâmetros variam de 0,5 a 2,0mm conforme Gharabaghi et al, 2000.

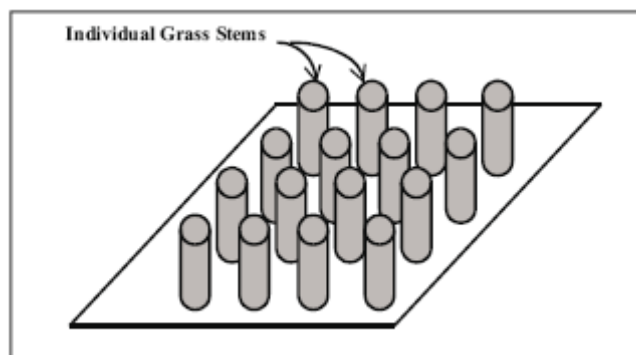


Figura 20.6- Esquema dos pedúnculos da grama

Os pedúnculos estão afastados um do outro de aproximadamente 4mm a 5mm e possuem uma densidade de grama que varia de $556/\text{m}^2$ a $5.556/\text{m}^2$ conforme Tabela (20.2).

Tabela 20.2- Propriedades das gramas

Fator de cobertura CF	Cobertura	Densidade de pedúnculos de gramas (pedúnculos/ m^2)
0,90	<i>bermudagrass</i>	5556
0,90	<i>centipedegrass</i>	5556
0,87	<i>buffalograss</i>	4444
0,87	<i>kentuchy bluegrass</i>	3889
0,87	<i>blue grama</i>	3889
0,75	<i>grass mmixture</i>	2222
0,50	<i>weeping lovegrass</i>	3889
0,50	<i>yellow bluestem</i>	2778

0,50	<i>alfafa</i>	5556
0,50	<i>lespedeza sericea</i>	3333
0,50	<i>common lespedeza</i>	1667
0,50	<i>sudangrass</i>	556

Fonte: Temple et al, 1987 in Temple et al, 2003

Após pesquisas feitas por Gharabaghi et al, 2000 concluiu que se pode estimar a remoção de sedimentos de uma faixa de filtro gramado conforme Figura (20.7), em função do comprimento da faixa na direção do escoamento e da vazão em L/s x m multiplicada por 10.

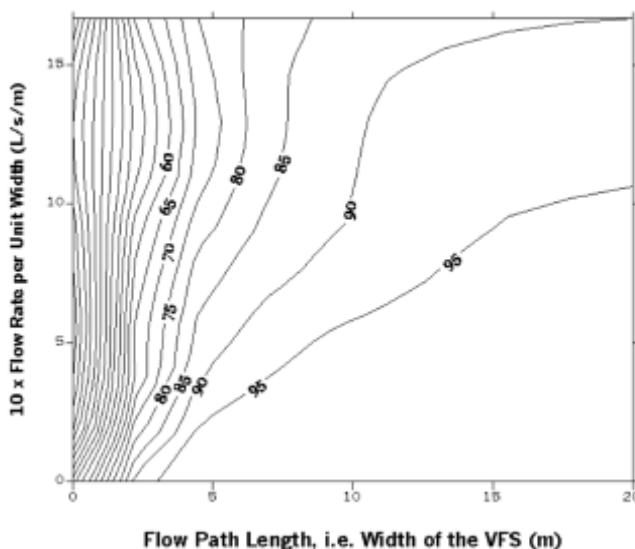


Figura 20.7 Estimativa da remoção de sedimentos em função do comprimento na direção do escoamento e 10x vazão em L/s x m. Observar que a faixa de vazão é pequena.

Fonte: Gharabaghi et al, 2000

Exemplo 20.1

Consideremos uma faixa de filtro gramada com 1,0 L/s x m e comprimento de 10m. Achar a eficiência de remoção de sedimentos.

Conforme Figura (20.7) a eficiência é de 90%.

20.3 Eficiência quando se tem as faixas de distribuição das partículas

Gharabaghi et al, 2000 fez ainda a Figura (20.8) quando temos as faixas de distribuição das partículas do solo a montante da faixa de filtro gramada. Observar que as três primeiras figuras na parte superior são praticamente iguais.

A maneira prática é se fazer uma média da eficiência da remoção de sedimentos por faixas.

$$E = \sum f_i \times R_i$$

Sendo:

E= eficiência total (0 a 1)

f_i= fração das partículas (0 a 1)

R_i= eficiência achada no gráfico da Figura (20.8) para cada fração.

Exemplo 20.2

Consideremos uma faixa de filtro gramada com 1,0 L/s x m e comprimento de 10m. Achar a eficiência de remoção de sedimentos consideramos que temos 4 faixas de 20% cada com diâmetro das partículas variando de 2,9µm a 151µm.

Conforme Figura (20.8) eficiência para o primeiro gráfico superior a direita é de 80% e os demais são: 75, 90, 95 e 95.

$$E = \sum f_i \times R_i$$

$$E = 0,20 \times 0,80 + 0,20 \times 0,75 + 0,20 \times 0,90 + 0,20 \times 0,95 + 0,20 \times 0,95$$

$$E=0,16+0,15+0,18+0,19+0,19=0,87$$

Portanto, a eficiência total é de 87%.

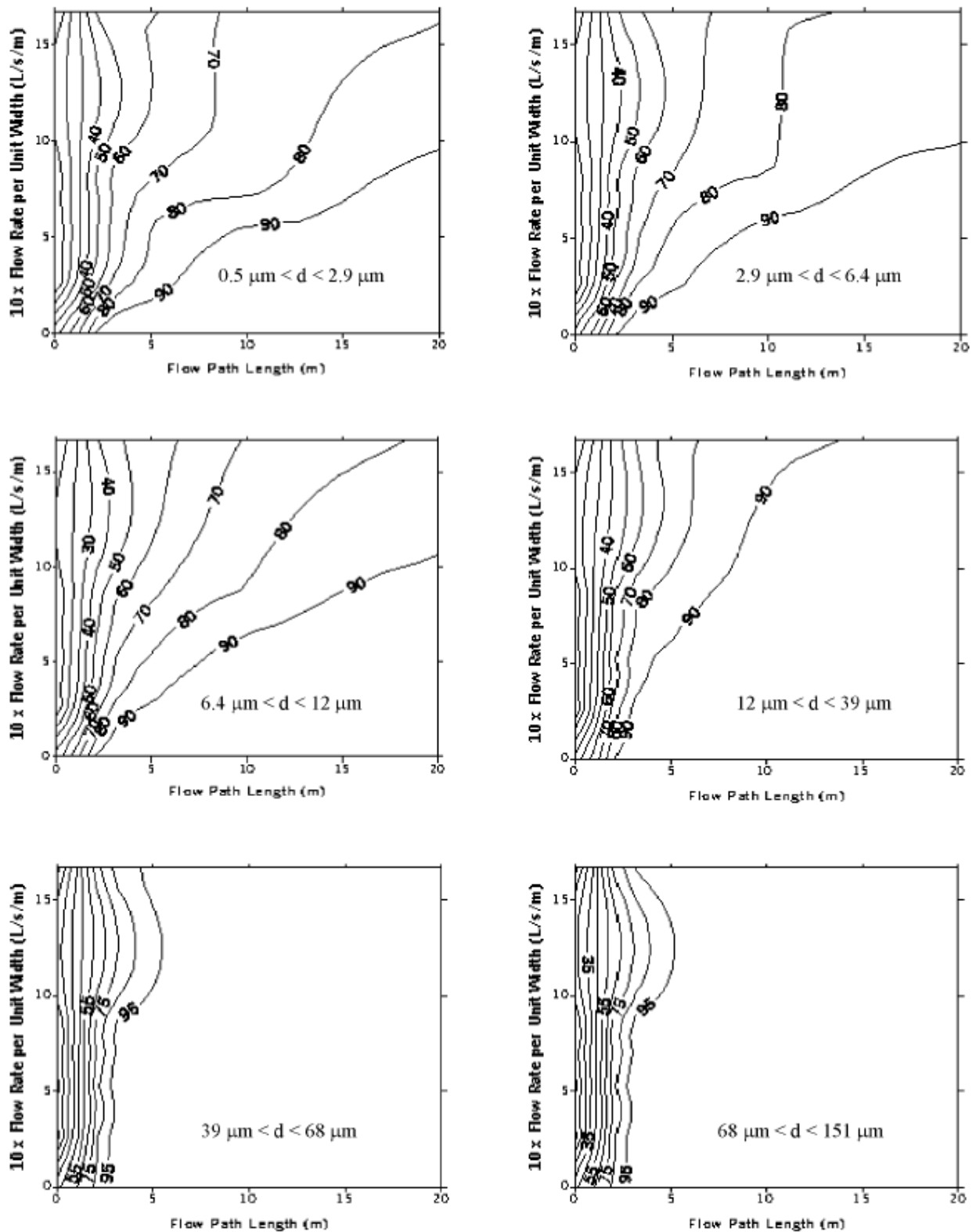


Figura 20.8-Remoção de sedimentos em faixa de filtro gramada para faixas de partículas de diâmetros diferentes

Fonte: Gharabaghi et al, 2000

20.4 Dimensionamento de faixa de filtro gramado conforme Hann et al, 1994

Vamos expor o dimensionamento de faixa de filtro gramado conforme Haan et al, 1994.

Primeiramente esclarecemos que para faixa de filtro gramado não usamos da mesma forma os tradicionais coeficiente “n” de Manning e sim os coeficientes de Manning calibrados “ns” conforme Tabela (20.3). Assim para a grama bermuda o coeficiente calibrado de Manning é ns=0,074.

A equação de Manning tem a seguinte apresentação.

$$V = (1/ns) R^{2/3} S^{1/2}$$

Sendo:

V= velocidade média (m/s)

ns= coeficiente calibrado de Manning

R= raio hidráulico (m)

S= declividade da faixa de filtro gramada (m/m)

O raio hidráulico R do escoamento no gramado é dado por:

$$R = Ss \times df / (2 df + Ss)$$

Sendo:

R= raio hidráulico (m)

Ss= espaçamento (m) conforme Tabela (20.3)

df= profundidade do escoamento (m)

Dada a vazão qw por metro linear em m³/s x m podemos ter:

$$qw = V \times df$$

Vegetação erecta ou não

Haan et al, 1994 ainda verifica se a vegetação (gramado) ficará erecta ou não após passar as águas pluviais. Para isto deverão ser usadas três equações:

$$U_{c1} = 0,0273 + 6,228 \times (MEI)^2$$

$$U_{c2} = 0,2356 (MEI)^{0,106}$$

Sendo:

U_{c1}= velocidade crítica no gramado (m/s)

U_{c2}= velocidade crítica no gramado (m/s)

MEI= tensão antes do corte da grama ou depois do corte da grama (N/m²)

$$U^* = (g \cdot df \cdot S)^{0,5}$$

Sendo:

U*= velocidade (m/s) que deve ser maior que U_{c1} e U_{c2} para que a vegetação permaneça erecta.

g= aceleração da gravidade = 9,81m/s²

df= altura da água (m)

S= declividade da faixa de filtro gramada (m/m)

Tabela 20.3- Valores do coeficiente de rugosidade de Manning calibrado para diversos tipos de grama, bem como densidade dos pedúnculos, altura de corte e tensão antes do corte e pós corte

Gramma usado em Filter Strip	Padrão	Densidade dos pedúnculos/m ²	Altura máxima antes do corte H (cm)	Espaçamento entre Pedúnculos Sc (mm)	Coefficiente Manning Calibrado ns	Tensão MEI antes do corte/ após o corte (N/m ²)
<i>Yellow vlyuestem</i>	Bom	2778	ND	19	ND	300/0,1
<i>Tall fescue</i>	Bom	4000	38	16	0,056	20/0,1
<i>Blue grama</i>	Bom	3889	25	16	0,056	20/0,1
<i>Ryegrass (perennial)</i>	Bom	4000	18	17	0,056	20/0,1
<i>Weeping lovegrass</i>	Bom	3889	30	16	ND	20/0,1
<i>Bermudagrass</i>	Bom	5556	25	14	0,074	9/0,1
<i>Bahiagrass</i>	Bom	ND	20	ND	0,056	5/0,1
<i>Centipede grass</i>	Bom	5556	15	14	0,074	5/0,1
<i>Kentucky bluegrass</i>	Bom	3889	20	16	0,056	5/0,1
<i>Grass mixture</i>	Bom	2222	18	22	0,050	5/0,1
<i>Buffalograss</i>	Bom	4444	13	15	0,056	0,1/0,1
<i>Alfafa</i>	Bom	1111	36	30	0,037	20/0,05
<i>Sericea lespedeza</i>	Bom	667	41	39	0,037	5/0,05
<i>Common lespedeza</i>	Bom	333	13	56	0,037	0,1/0,05
<i>Sudangrass</i>	Bom	111	ND	97	0,037	0,1/0,05

Na coluna 2 da Tabela (20.3) foi adotado o padrão “Bom”, mas estudos feitos por Temple et al, 1987 in Haan et al, 1994 para converter a densidade dos pêndulos, os valores devem ser multiplicados por 1/3; 2/3; 1, 4/3 e 5/3 para as condições chamadas: ruim, mais ou menos, bom; muito bom; excelente. Note que para a condição chamada bom o valor é 1.

Exemplo 20.3

Calcular a altura da água na faixa de filtro gramado usando a grama *Tall fescue* da Tabela (20.3) conforme Haan et al, 1994. Sendo dados:

$$S=0,08\text{m/m}$$

$$qw=0,0021 \text{ m}^3/\text{s} \times \text{m}$$

Verificar também se a grama ficará erecta ou não após passar as águas pluviais.

Consultando a Tabela (20.3) achamos:

$$\text{MEI} = 20 \text{ N/m}^2 \text{ para antes do corte do gramado}$$

$$\text{MEI} = 0,1 \text{ N/m}^2 \text{ para depois do corte do gramado}$$

$$H = 38\text{mm} = \text{altura antes do corte} = 0,038\text{m}$$

$$S_s = 16\text{mm} = \text{espaçamento entre os pedúnculos} = 0,016\text{m}$$

$$n_s = 0,056 = \text{rugosidade calibrada de Manning}$$

Usaremos nos cálculos as três equações abaixo que serão resolvidas simultaneamente.

$$qw = V \times df$$

$$V = (1/n_s) R^{2/3} S^{1/2}$$

$$R = S_s \times df / (2 df + S_s)$$

Vamos substituir pelos valores conhecidos.

$$0,0021 = V \times df$$

$$V = (1/0,056) R^{2/3} \times 0,08^{1/2}$$

$$R = 0,016 \times df / (2df + 0,016)$$

Temos 3 equações e 3 incógnitas que serão resolvidas por tentativas para calcular df.

$$V = 0,0021/df$$

$$0,0021/df = (1/0,056) R^{2/3} \times 0,08^{1/2}$$

$$0,0021/df = (1/0,056) [0,016 \times df / (2df + 0,016)]^{2/3} \times 0,08^{1/2}$$

Por tentativas achamos $df=0,0140\text{m}$

$$R = 0,016 \times df / (2 \times df + 0,016)$$

$$R = 0,016 \times 0,014 / (2 \times 0,014 + 0,016) = 0,0051\text{m}$$

$$V = (1/0,056) \times 0,0051^{2/3} \times 0,08^{1/2} = \mathbf{0,15\text{m/s} < 0,27\text{m/s OK}}$$

Conferindo:

$$q_w = V \times df = 0,15 \times 0,014 = 0,0021 \text{ m}^3/\text{s} \times \text{m OK}$$

Número de Reynolds Re

$$Re = V \times R / \nu = 0,15 \times 0,0051 / 0,000001 = 765$$

Vamos checar se a vegetação permanece erecta ou não após passar as águas pluviais.

MEI = 20 N/m^2 para antes do corte do gramado

MEI = $0,1 \text{ N/m}^2$ para depois do corte do gramado

$$U_{c1} = 0,0273 + 6,228 \times (\text{MEI})^2$$

$$U_{c1} = 0,0273 + 6,228 \times (20)^2$$

$$U_{c1} = 2512\text{m/s}$$

$$U_{c2} = 0,2356 (\text{MEI})^{0,106}$$

$$U_{c2} = 0,2356 (20)^{0,106}$$

$$U_{c2} = 0,32\text{m/s}$$

Portanto, $U_c = 0,32\text{m/s}$.

$$U_{c1} = 0,0273 + 6,228 \times (\text{MEI})^2$$

$$U_{c1} = 0,0273 + 6,228 \times (0,1)^2$$

$$U_{c1} = 0,09\text{m/s}$$

$$U_{c2} = 0,2356 (\text{MEI})^{0,106}$$

$$U_{c2} = 0,2356 (0,1)^{0,106}$$

$$U_{c2} = 0,18\text{m/s}$$

Portanto, $U_c = 0,18\text{m/s}$

$$U^* = (g \cdot df \cdot S)^{0,5}$$

$$U^* = (9,81 \times 0,014 \times 0,08)^{0,5}$$

$$U^* = \mathbf{0,10\text{m/s}}$$

Portanto, a vegetação permanecerá erecta antes do corte e depois do corte, pois U^* é menor $U_c = 0,32\text{m/s}$ ou menor que $U_c = 0,18\text{m/s}$.

20.5 Estimativa do comprimento da faixa de filtro gramado na direção do escoamento e eficiência na remoção de sedimentos.

Vamos seguir os ensinamentos de Haan et al 1994. O máximo adotado de deposição é de $0,15\text{m}$ na vida útil de 10anos.

Exemplo 20.4

Vamos adotar que em 10anos teremos deposição máxima de 15cm de sedimentos sobre o gramado.

Supomos de reduzir os sedimento de $12,5 \text{ ton/ha} \times \text{ano}$ para $2,5 \text{ ton/ha} \times \text{ano}$.

A eficiência será $f_{to} \geq 10,0/12,5 = 0,80$.

Vamos supor que a montante temos a distância de 60m de área perturbada (mexida) onde queremos deter os sedimentos.

Área a montante

$$A = 60\text{m} \times 60\text{m} = 3.600\text{m}^2 = 0,36\text{ha}$$

Cálculo da carga de sedimentos a ser detida em 10anos

$$0,8 \times (12.500\text{kg/ha} \times \text{ano}) \times 10\text{anos} \times 0,36\text{ha} / 60\text{m} = 600\text{kg/m}$$

Considerando ainda que temos a densidade 1.733 kg/m^3 .

Adotando a altura máxima de sedimentos de $0,15\text{m}$

Para uma faixa de $1,00\text{m}$ de largura e comprimento L e altura $0,15\text{m}$ teremos que deter 600kg/m .

$$L \times 0,15\text{m} \times 1.733 \text{ kg/m}^3 = 600 \text{ kg/m}$$

$$L=2,3\text{m}$$

Portanto, precisamos somente de 2,3m do comprimento da faixa de filtro gramada na direção do escoamento.

Adotando a altura máxima de sedimentos de **0,05m**

Para uma faixa de 1,00m de largura e comprimento L e altura 0,05m teremos que deter 600kg/m.

$$L \times 0,05\text{m} \times 1.733 \text{ kg/m}^3 = 600 \text{ kg/m}$$

$$L=6,92\text{m}$$

Portanto, o comprimento da faixa de filtro gramada na direção do escoamento é de **6,92m**.

20.6 Projeto de faixa de filtro gramada conforme Haan et al, 1994

Haan et al, 1994 recomenda para o **projeto de uma faixa de filtro gramada** o seguinte:

- A declividade da faixa de filtro gramada deve estar entre 1% a 10%. Haverá problemas se a declividade for menor que 1% ou maior que 10%.
- A vegetação deve ser selecionada para ser densa de maneira a se evitar a canalização das águas pluviais. Deverá ser consultado especialistas em gramados para a escolha adequada da vegetação.
- O comprimento da faixa de filtro gramado é um parâmetro importante no projeto.

Para achar o **comprimento da faixa de filtro gramada** em direção ao escoamento segundo Haan et al, 1994 deve ser adotado as seguintes recomendações:

- Recomenda adotar o período de retorno de 10anos conforme Hayes e Dillaha, 1991 in Haan et al 1994.
- O comprimento deve ser dimensionado para que no máximo de 10anos atinja a altura de 15cm de sedimentos, mas pode acontecer que seja muito grande e então teremos que adotar comprimento menor.
- Deve ser feita uma estimativa da redução pretendida mesmo que não haja legislação.
- O comprimento da faixa de filtro gramada não precisa considerar as bordas onde há menos deposição.

Exemplo 20.5

Seja uma área comercial com 30m de largura (direção do fluxo) por 45m de comprimento e área de 0,14ha (1400m²), com AI= 70% e declividade é S=0,04m/m (4%).

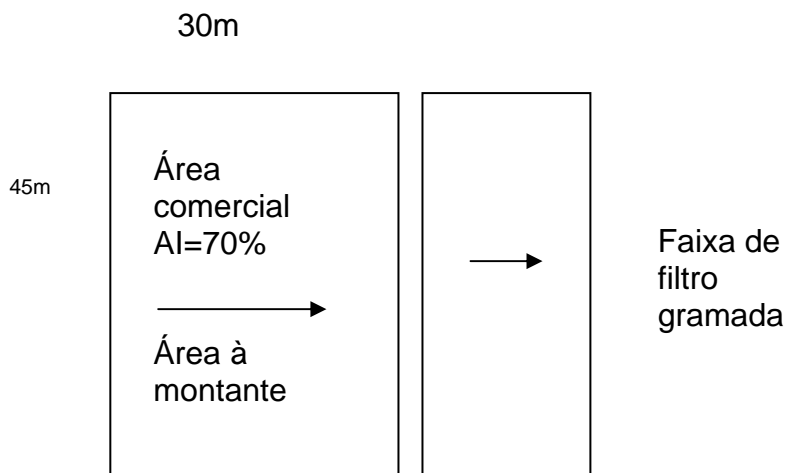


Figura 20.9- Croquis de uma área comercial a direita lançando as águas pluviais numa faixa de filtro gramada a direita.

Equação das chuvas intensas da RMSP de Paulo S. Wilken

$$I = \frac{1747,9 \cdot T_r^{0,181}}{(t + 15)^{0,89}} \quad (\text{mm/h})$$

Método Racional

Tempo de concentração adotado= 10min
 $R_v = 0,05 + 0,009 \times AI = 0,05 + 0,009 \times 70 = 0,68 = C$
 $C = 0,68$
 $A = 0,14\text{ha}$
 $Q = CIA/360$

Tabela 20.4- Cálculos usando o método Racional para Tr=2anos e Tr=10anos

Período de retorno (anos)	Tc (min)	I (mm/h)	C	A (ha)	Q (m ³ /s)	Largura (m)	q (m ³ /s x m)
2	10	113	0,68	0,14	0,030	45	0,00066
10	10	151	0,68	0,14	0,040	45	0,00089

Adotando grama bermuda da Tabela (20.3) conforme Haan et al, 1994 temos:

$S = 0,04\text{m/m}$
 $qw = 0,00089 \text{ m}^3/\text{s} \times \text{m}$ para período de retorno de 10anos
 $S_s = 14\text{mm} = \text{espaçamento entre os pedúnculos} = 0,014\text{m}$
 $ns = 0,074 = \text{rugosidade calibrada de Manning}$

Usaremos nos cálculos as três equações abaixo que serão resolvidas simultaneamente.

$$qw = V \times df$$

$$V = (1/ns) R^{2/3} S^{1/2}$$

$$R = (S_s \times df) / (2 df + S_s)$$

Vamos substituir pelos valores conhecidos.

$$0,00089 = V \times df$$

$$V = (1/0,074) R^{2/3} \times 0,04^{1/2}$$

$$R = 0,014 \times df / (2 df + 0,014)$$

Temos 3 equações e 3 incógnitas que serão resolvidas por tentativas para calcular df .

$$V=0,00089/df$$

$$0,00089/df= (1/0,074) R^{2/3} \times 0,04^{1/2}$$

$$0,00089/df= (1/0,074) [0,014 \times df/ (2df+0,014)]^{2/3} \times 0,04^{1/2}$$

Por tentativas achamos **$df=0,01218m$**

$$R= 0,014 \times df/ (2 df + 0,016)$$

$$R= 0,016 \times 0,01218/ (2 \times 0,01218 + 0,014)=0,0044m$$

$$V= (1/0,074) \times 0,0044^{2/3} \times 0,04^{1/2} =\mathbf{0,073m/s}$$

Conferindo:

$$qw= V \times df=0,073 \times 0,0118=0,00089 \text{ m}^3/\text{s} \times \text{m} \quad \text{OK}$$

Número de Reynolds Re

$$Re= V \times R/ \nu = 0,073 \times 0,0044/ 0,000001= 321$$

Eficiência na remoção de sedimentos

$$L=0,01 \times P \times P_j \times R_v \times C \times A$$

Sendo:

L = carga do poluente anual (kg/ano)

P = 1498mm=precipitação média anual

P_j = 0,9=fração da chuva que produz *runoff*.

R_v = *runoff* volumétrico obtido por análise de regressão linear.

AI = 70% =área impermeável

A = 1,54ha

C = 4000mg/L=concentração média da carga do poluente nas águas pluviais da (mg/L) para área em construção.

$$L=0,01 \times 1498 \times 0,9 \times 0,68 \times 4000 \times 0,14=\mathbf{5134kg/ano}$$

Por metro linear

$$\mathbf{5134kg/45m=114kg/m \times ano}$$

Vamos supor que queremos eficiência de 90%

Teremos que deter $0,9 \times 114kg/ano= 103kg/ano$ de sedimentos na faixa de filtro gramada

Comprimento da faixa no sentido do escoamento da faixa de filtro gramada

Peso específico= $1500kg/m^3$

W = largura da faixa (m)=1,00m

L = comprimento da faixa na direção do escoamento (m)

Carga $103kg/m \times ano \times m$

h =altura de sedimento $\leq 0,15m$

$$103kg/m \times ano \times 10anos= L \times W \times 1500kg/m^3 \times h$$

$W=1,00m$

$$1030kg=L \times 1500 \times h$$

Adotando $h=0,15m$

$$1030=L \times 1500 \times 0,15$$

$L=4,6m$

Portanto, o comprimento na direção do fluxo será de 4,6m para eficiência de 90%.

20.7 Bibliografia e livros consultados

- GHARABAHI, B. et al; *Sediment removal efficiency of vegetative filter strip*. Guelph Turfgrass Institute, 2000, ASAE Sacramento Convention Center Sacramento, California, USA.
- GRISMER, MARK E. et al. *Vegetative filter strip for nonpoint source pollution control in agriculture*. University of California, Division of Agriculture and Natural Resources, 2006.
- HAAN, C. T. et al. *Design hydrology and sedimentology for small catchments*. Academic Press, 1994, 588 páginas.
- TEMPLE, DARREL M. et al. *Design of grass-lined channels: procedures and software update*. Julho de 2003.