

Capítulo 27-Pesquisas sobre *first flush* Sartor e Boyd, 1972

27.1 Introdução

Apesar da norma da ABNT NBR 1552707 estabelecer o *first flush* em 2mm (2 L/m² de telhado), estamos sempre estudando uma maneira de se calcular realmente o *first flush* baseado na **declividade, material e intensidade local da chuva**. Daí surgiu a idéia de usar os conceitos de Sartor e Boyd, 1972.

Infelizmente até o momento não conseguimos um método prático e simples de ser aplicado para se calcular exatamente o *first flush*.

27.2 Sartor e Boyd, 1972

Quando cai uma chuva sobre um telhado a poeira, fezes de passarinhos e animais, folhas e detritos são levados pelo *runoff* e a primeira parte da água que leva toda esta sujeira é o *first flush*.

O objetivo é aplicar a equação de Sartor e Boyd, 1972 para um determinado local em função do vão livre do telhado e estimar o *first flush* em milímetros.

Segundo Wang, 2009 a grande vantagem de se usar o telhado é que é muito mais limpo do que as estradas ou pisos, tendo menos poluição antropológica e tornando-se portanto um potencial para uso de recurso de água.

Wang, 2009 baseado em Sansalone e Cristina, 2004, define o *first flush* como a maior fração constituinte da massa ou maior concentração de parte do volume do *runoff*. Se a primeira porção do *runoff* contem uma grande quantidade de massa de poluentes, o descarte ou tratamento desta primeira porção pode ser economicamente viável em aproveitamento de água de chuva de telhados para a remoção dos poluentes.

Temos basicamente dois *first flush*:

- *First flush* dos **telhados** que geralmente é em torno de 2mm.
- *First flush* de áreas impermeáveis na superfície **do solo** que geralmente é de 25mm.

O *first flush* das áreas impermeáveis de superfície já foi resolvido com o modelo de Schueler, 1987 e que será apresentado a seguir.

Durante a chuva, os poluentes que estão no telhado são transportados pelo *runoff* da superfície para baixo. Como o vão dos telhados é relativamente curto, rapidamente os poluentes transportados chegam ao nível inferior. A carga poluente dos telhados cai rapidamente com o tempo.

Iremos supor que a carga de poluentes, ou seja, o TSS seja removido do telhado 100% aproximadamente no tempo de concentração.

De modo geral as partículas possuem diâmetro que variam de 3µm a 250µm sendo 90% são menores que 45µm. Devido a isto os dispositivos atualmente vendidos no Brasil não retêm o *first flush*, pois a malha mais fina tem 270µm.

Há acordo universal de que esta água deve ser jogada fora e a mesma é denominada de *first flush* ou carga de lavagem ou primeira água. O desacordo mundial está em quantificar a água que deve ser jogada fora, se será 0,4mm ou 1mm ou 8,5mm.

O Estado do Texas recomenda que o *first flush* seja de 0,4mm a 0,8mm, ou seja, 0,4 litros/m² de telhado a 0,8 litros /m² de telhado. Dacach, 1990 usa 0,8 a 1,5 litros/m². Na Flórida usa-se comumente 0,4litros/m²

27.3 Volume para melhoria da Qualidade das Águas Pluviais (WQ_v)

Para as áreas impermeáveis da superfície temos a aplicação do Método de Schueler.

O critério de dimensionamento de um reservatório para melhoria de qualidade WQ_v com objetivo do controle da poluição difusa específica o volume de tratamento necessário para remover uma parte significativa da carga de poluição total existente no escoamento superficial das águas pluviais.

Pelo método de Schueler, 1987 obtém-se o *first flush* com 90% das precipitações que produzem *runoff* e que ocasionará redução de 80% dos Sólidos Totais em Suspensão (TSS), bem como outros parâmetros dos poluentes.

O volume obtido será dependente do *first flush* P e da área impermeável.

Schueler usou as Equações (27.1) e (27.2) para achar o volume WQ_v.

$$R_v = 0,05 + 0,009 \cdot AI \quad \text{(Equação 27.1)}$$

$$WQ_v = (P/1000) \cdot R_v \cdot A \quad \text{(Equação 27.2)}$$

Sendo:

R_v = coeficiente volumétrico que depende da área impermeável (AI).
AI = área impermeável da bacia em percentagem sendo $AI \geq 25\%$;
A = área da bacia em m^2 sendo $A \leq 100ha$ ($1km^2$)
P = precipitação adotada (mm) sendo $P \geq 13mm$. Adotamos $P=25mm$ para a RMSP. Para regiões úmidas adotar $P=25mm$ e para regiões semi-áridas $P=13mm$.
 WQ_v = volume para melhoria da qualidade das águas pluviais (m^3).

Valor de P

Para a cidade de Mairiporã, São Paulo achamos para 90% das precipitações acima de 2mm (que produzem runoff), o valor $P=25mm$ conforme Figura (27.1) e Tabela (27.1).

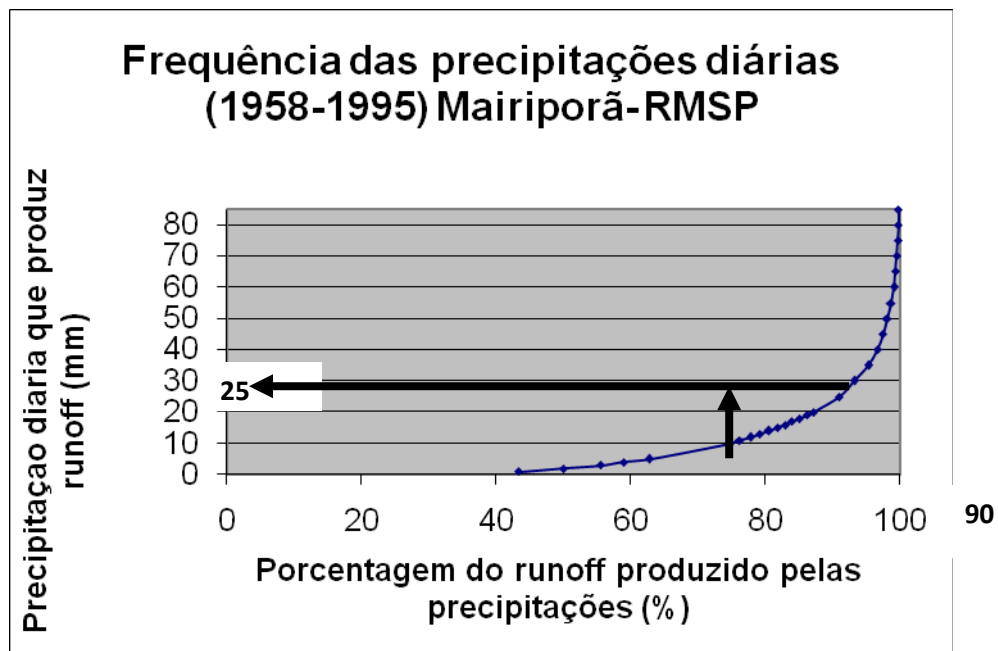


Figura 27.1 - Frequência das precipitações diárias que produzem runoff da cidade de Mairiporã, Estado de São Paulo.

Tabela 27.1 - Frequência acumulada e precipitações diárias de Mairiporã de 1958 a 1995, a remoção de sólidos totais em suspensão (TSS).

Frequência Acumulada (%)	Precipitação diária de 1958 a 1995 de Mairiporã (mm)	Remoção de sólidos totais em suspensão (TSS)
43	<i>1(não produz runoff)</i>	
50	<i>2(não produz runoff)</i>	
56	3	
59	4	
63	5	
75	10	
76	11	
78	12	
80	13	
81	14	
82	15	
83	16	
84	17	
85	18	
86	19	
87	20	
90*	25	80%**
93,22	30	
95,30	35	
96,68	40	
97,49	45	
98,13	50	
98,72	55	

99,13	60	
99,36	65	
99,56	70	
99,69	75	
99,78	80	
99,81	85	

(*) Adoptado por Schueler

(**) Estimativa

31.4 Método Simples de Schueler

O Método Simples de Schueler, 1987 é amplamente aceito e requer poucos dados de entrada e é utilizado no Estado do Texas e no *Lower Colorado River Authority*, 1998

AKAN,1993 salienta que os estudos valem para **áreas menores que 256ha** e que são usadas cargas anuais. A *equação de Schueler* é similar ao método racional. Para achar a carga anual de poluente usamos a seguinte equação:

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

Sendo:

L= carga do poluente anual (kg/ano)

P= precipitação média anual (mm)

P_j= fração da chuva que produz *runoff*. P_j =0,9 (normalmente adotado)

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

$$R_v = 0,05 + 0,009 \times AI \quad (R^2=0,71 \quad N=47)$$

AI= área impermeável (%).

A= área (ha) sendo **A ≤ 256ha**

C= concentração média da carga do poluente nas águas pluviais da (mg/L)

Valor de P_j

O valor de P_j usualmente é 0,90 para precipitação média anual, mas pode atingir valor P_j =0,5 e para eventos de uma simples precipitação P_j =1,0.

A Tabela (27.2) apresenta concentrações de poluentes em diversos tipos de superfície sobre o solo, sendo a mais importante o TSS. Observar que temos área de telhados, estacionamentos, etc.

Tabela 27.2- Concentrações de poluentes em diversas áreas

Constituintes	TSS (1)	TP (2)	TN (3)	S. Coli (1)	Cu (1)	Pb (1)	Zn (1)
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(1000 col/ml)	(µg/L)	(µg/L)	(µg/L)
Telhado residencial	19	0,11	1,5	0,26	20	21	312
Telhado comercial	9	0,14	2,1	1,1	7	17	256
Telhado industrial	17	-	-	5,8	62	43	1.390
Estacionamento residencial ou comercial	27	0,15	1,9	1,8	51	28	139
Estacionamento industrial	228	-	-	2,7	34	85	224
Ruas residenciais	172	0,55	1,4	37	25	51	173
Ruas comerciais	468	-	-	12	73	170	450
Estradas rurais	51	-	22	-	22	80	80
Ruas urbanas	142	0,32	3,0	-	54	400	329
Gramados	602	2,1	9,1	24	17	17	50
Paisagismo	37	-	-	94	94	29	263
Passeio onde passam carros e pessoas (entrada de carros nas garagens)	173	0,56	2,1	17	17	-	107
Posto de gasoline	31	-	-	-	88	80	290
Oficina de reparos de carros	335	-	-	-	103	182	520
Indústria pesada	124	-	-	-	148	290	1.600
(1) Clayton e Schueler, 1996 (2) Média de Steuer et al, 1997, Bannerman, 1993 e Waschbushch,2000							
(3) Steuer et al, 1997							

Fonte: New York Stormwater Management Design Manual

Exemplo 27.1

Aplicar o método simples de Schueler para Telhado residencial com TSS = 19mg/L para A=1ha, P=1300mm/ano Pj=0,90, Rv=0,95

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

$$L=0,01 \times 1300 \times 0,9 \times 0,95 \times 19 \times 1,0= 21 \text{ kg/ha x ano}=2,1\text{g/m}^2\text{/ano}$$

27.4 *First flush* em telhados

O primeiro problema é determinar qual a quantia do *first flush* que deve ser descartada em mm. O recomendado pela ABNT quando não se dispõe de pesquisas é **2mm**.

Primeiramente salientamos que há conhecimento limitado sobre acúmulo de poeiras e poluentes em telhados.

Existe o *first flush* de telhado e de áreas impermeáveis na superfície. De modo geral, o *first flush* no piso é **14,8 vezes maior que o da área do telhado conforme Tabela (27.3)** de Brodie e Porter, Austrália. Assim para a RMSD para área de superfície de piso o *first flush* é de 25mm enquanto para o telhado é aproximadamente 1,7mm.

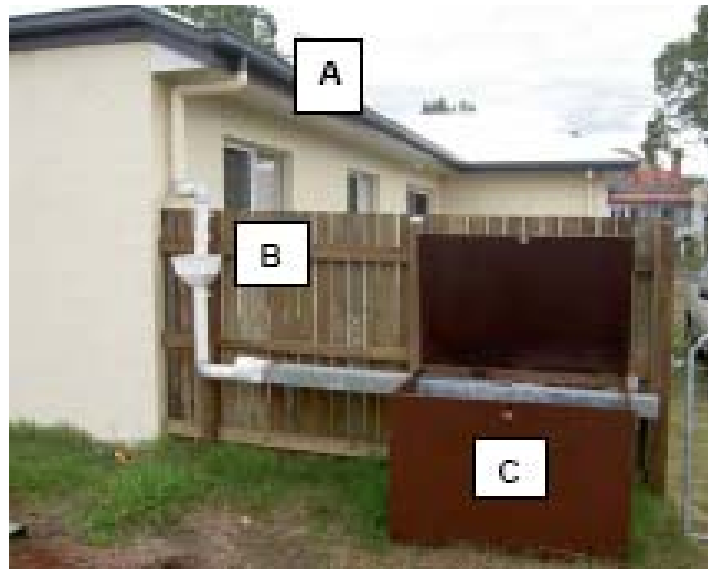


Figura 27.1- Pesquisa de Brodie e Porter

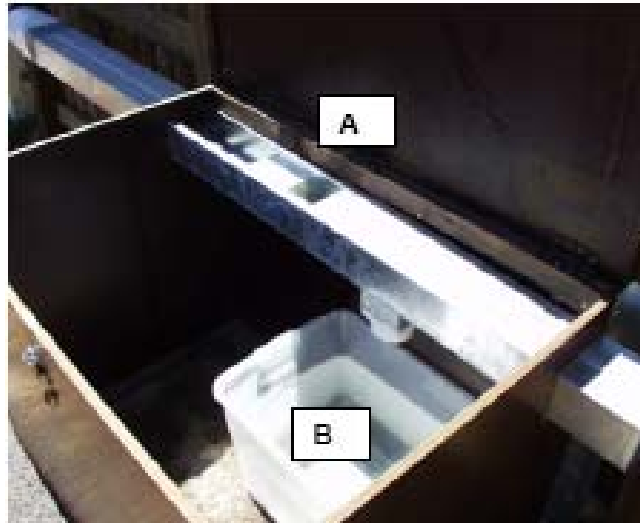


Figura 27.;1- O dispositivo A desvia o first flush para o reservatório B onde se faz a coleta para os testes. Fonte: Brodie e Porter.

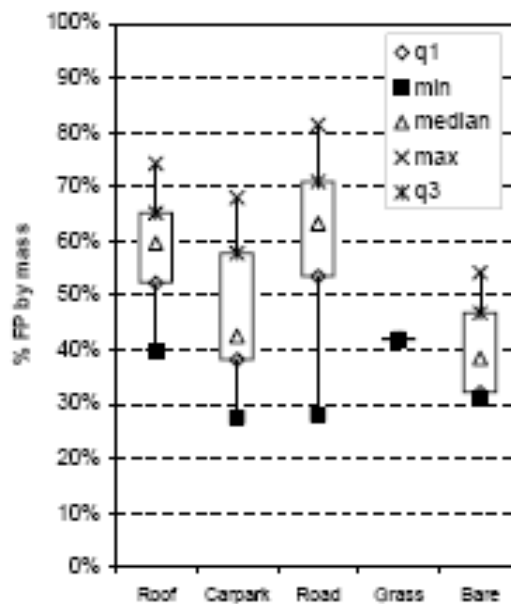


Figura 27.1- Gráfico que mostra a porcentagem em massa das partículas para cada tipo de superfície de dezembro/2004 a junho/2005 conforme Brodie e Porter sendo q1 o primeiro quartil com 25% e o terceiro quartil q3 com 75% de concentração.

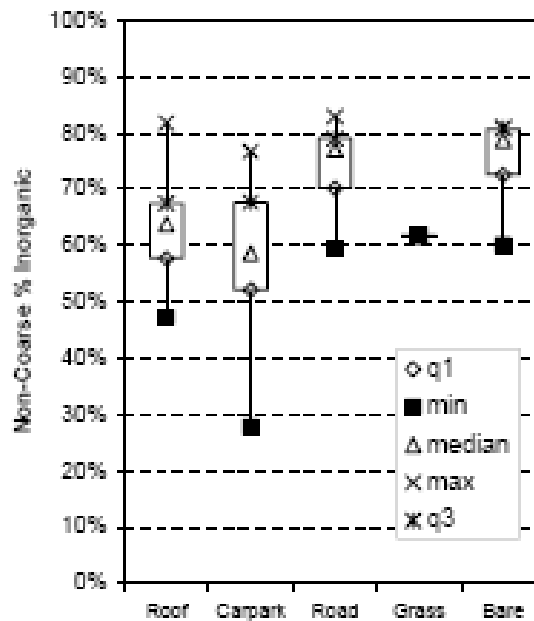


Figura 27.1- Gráfico que mostra a porcentagem de material inorgânico para cada tipo de superfície de dezembro/2004 a junho/2005 conforme Brodie e Porter sendo q1 o primeiro quartil com 25% e o terceiro quartil q3 com 75% de concentração.

NCP= *non-coarse particles* são definidas como as partículas menores que 500µm de diâmetros. São os chamados TSS= sólido total em suspensão

Aproximadamente podemos supor que anualmente teremos $3,6 \times 2 = 7,2 \text{ g/m}^2 \times \text{ano}$, ou seja, $72 \text{ kg/ha} \times \text{ano}$. Notar que $3,6\text{g/m}^2$ é fornecido por Brodie e Porter de depósito em 6 meses.

Tabela 27.3-Carga acumulada de TSS e volume de diversas superfícies para o mês de dezembro de 2004 a junho de 2005 expressos em função da estimativa do telhado conforme Brodie e Porter, Austrália

Local	Runoff acumulado	Carga de TSS acumulada
Telhado (*)	1,0	1,0
Rua	0,98	14,8
Estacionamento de veículos	0,98	4,8
Gramado	0,14	0,6
Solo nú	0,20	14,7

(*) runoff acumulado de 349mm e TSS acumulado de $3,6\text{g/m}^2$ de telhado.

Não existe nenhum critério simples e geralmente são aceitos dados experimentais e práticos, como os 2mm adotado pela ABNT NBR 15.527/07. A tentativa deste trabalho é obter de uma maneira técnica, porém simples, um método para estimar o *first flush*.

Vamos expor alguns pontos importantes em projetos de aproveitamento de água de chuva

- Primeiramente as calhas, condutores verticais e horizontais são calculados para **vazão de pico** conforme ABNT NBR 10.844/89.
- O aproveitamento de água de chuva é feito pela **área projetada** no plano usando precipitações diárias, mensais ou anuais.
- Para o cálculo do *first flush*, isto é, o volume de água de chuva que carrega a poeira e detritos que está no telhado deve ser feito os cálculos levando em conta o seguinte:
 - **Intensidade de chuva**
 - Duração da chuva
 - Tipo de **material** em que é construído o telhado com variação do coeficiente n de Manning
 - **Área do telhado**. Quanto maior a declividade maior a área conforme a ABNT NBR 10.844/89 e Figura (27.2)
 - Situação anterior. Após 3 dias sem chuva teremos acumulação de poeira com cerca de 0,5g/m²/dia a 2 g/m²/dia.

27.5 Remoção de poeira e detritos no telhado (*washoff*)

Conforme Thomas a carga de poeira e detritos é calculada usando a equação de Sartor e Boyd, 1972 *in* Usepa, 2004 que foi elaborada para remoção de poeiras de ruas. Sugeriram uma relação exponencial entre a quantidade de sólidos disponíveis na superfície N.

A duração do tempo seco antecedente é de 3 (três) dias para telhados.

Esta aproximação foi escrita para uma série de eventos de precipitação tendo sido aceita por outros autores.

$$N = N_0 \cdot \text{EXP}(-K \cdot R \cdot t)$$

Sendo:

N= quantidade de sedimento remanescente que produz a turbidez da água de chuva no *runoff* (g)

No= quantidade da carga de sedimento inicial antes do evento (g)

K= constante de acumulação (mm⁻¹)

R= intensidade de chuva (mm/h). Suposta constante durante o intervalo de chuva para chuvas de pequena duração.

Duração do período seco antecedente = 3 dias

t= tempo de duração da chuva (h)

EXP= exponencial (e)= e=2,71828...

O valor de K varia de 0,01/mm a 0,18/mm para ruas e que varia de 0,65/mm a 1,7/mm para telhados dependendo da intensidade da chuva, da categoria da carga de poeira e da textura da categoria da rua.

Conforme Adams Thomas, Novotny para ruas propôs valores bem mais baixo da ordem de K=0,026/mm para partículas finas menores que 45µm e K=0,01/mm para partículas médias que variam de 100µm a 250µm. Pitt recomenda que o valor de K deve ser obtido localmente. Salientamos que as observações valem para piso e não para telhados.

A **taxa de acumulação de sedimentos em ruas** conforme pesquisas feitas no Rio Grande do Sul na cidade de Santa Maria variou de 7 a 20g/m²/semana (1 a 10g/m²xdia) com uma média de 14 g/m²x semana (2 g/m² x dia).

27.6 Correção de No

Sartor e Boyd confirma correlação entre a intensidade da chuva e a remoção da partícula conforme Thomas e Martinson.

Foi criado um coeficiente empírico denominado “A” que pode ser relevante em **precipitações menores que 18mm/h**. O valor máximo de “A” é igual a 1 que se dá quando R=18mm/h. Em climas tropicais como o brasileiro a correção A tem pouco significado.

Na prática temos valores maiores de intensidade de chuva que 18mm/h, sendo portanto, considerado A=1.

$$A=0,057 + 0,04 \times R^{1,1} \quad A \leq 1$$

$$N = N_o \cdot \text{EXP}(-K \cdot R \cdot t)$$

$$N = (A \cdot N_o) \cdot \text{EXP}(-K \cdot R \cdot t)$$

27.7 Área do telhado

Para o aproveitamento da água de chuva usamos chuvas diárias ou mensais usando a projeção do telhado, mas para cálculo de calhas e condutores verticais e horizontais usamos a área inclinada conforme mostra a Figura (27.2). Salientamos que tal cálculo é aproximado.

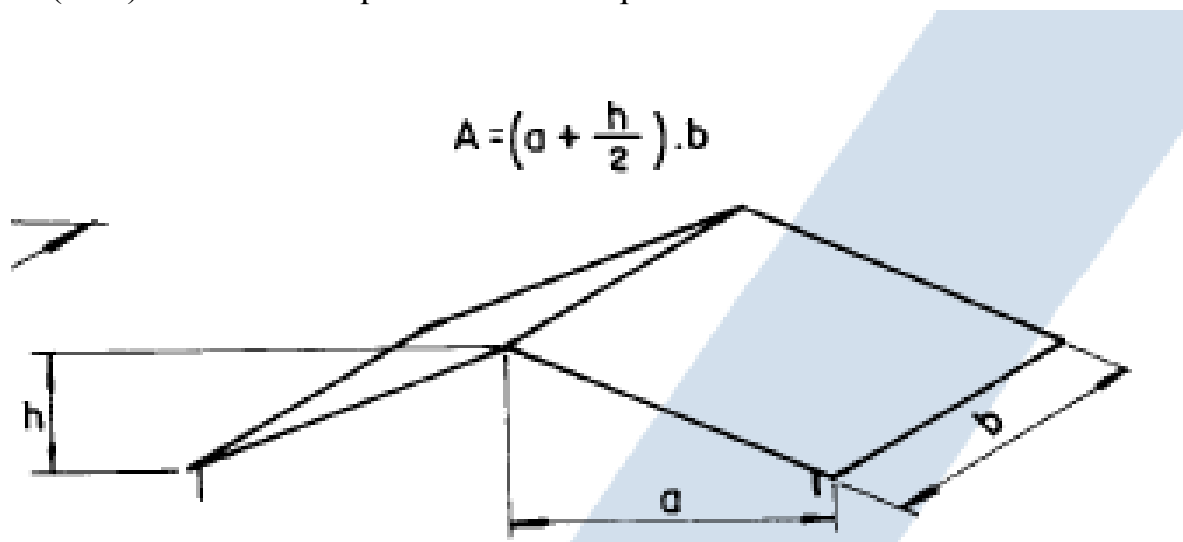


Figura 27.2- Esquema de telhado

27.8 Valores de K de Thomas e Martinson para telhado

Como os valores de K obtido por Sartor e Boyd, 1972 variou de 0,01/mm a 0,18/mm usamos o menor achado por Thomas e Martinson, em suas pesquisas que foi $K=0,65$ que pode ser considerado um valor conservativo a favor da segurança.

Tabela 27.4- Valores de K para diversos materiais conforme Terry Thomas e Brett Martinson publicado na University of Warwick Coventry-UK.

Material do telhado	Valor de K
Telhado de telhas cerâmicas perto da estrada	0,8
Telhado de telhas cerâmicas longe da estrada	1,4
Telhado de asbestos longe da estrada	1,7
Telhado de asbestos perto da estrada	0,80
Telhado revestido com asfalto perto da estrada	2,2
Telhado revestido com asfalto longe da estrada	2,2
Telhado de aço galvanizado perto da estrada	0,65 a 0,80
Telhado de aço galvanizado longe da estrada	1,4
Valor mínimo obtido por Thomas e Martinson	0,65
Valor baixo conservativo	0,7
Valor adotado neste trabalho	1,4

Adotaremos $K=1,4/\text{mm}$ em nosso trabalho.

27.9 Taxa de poeira 0,5 a 2 g/m²/dia

Não possuímos dados corretos de qual taxa de poeira usar e como os valores variam entre 0,5g/m²/dia a 2g/m²/dia adotamos o valor maior a favor da segurança.

Pesquisa feita na Austrália por Brodie e Porter mostraram que durante seis meses acumulou-se 3,6g/m² de telhado de TSS (sólido total em suspensão). Em telhados em 22 eventos medidos achou-se a média de 0,09g/m² sendo que os dados variaram de 0,032g/m² a 1,18g/m² de telhado de TSS por chuva.

Urbonas e Doerfer de Denver, Colorado, USA fizeram observações sobre poeiras que caem na cidade de Denver. No período de 5anos a 7anos acumulou-se no telhado na área de 9,3m² cerca de 5,5kg de TSS o que resulta na taxa de 977 kg/ha que pode ser comparado a poeira da atmosfera que caem nos telhados de Denver que é de 785 kg/ano por ano.

Não foi medida a quantidade de sólidos que foi levado pelo *runoff* no telhado. Urbonas comenta que Beecham, 2001 em Sidney, Austrália achou em 93m² a geração por casa de 5kg/ ano de sedimentos (TSS) que fornece 538 kg/ha x ano e que ele achou em Denver 52g/m²xano provindo do telhado.

27.10 Escoamento superficial pelo método SCS TR-55

Para o escoamento superficial em florestas, gramas, asfaltos etc o TR-55 apresenta o tempo de trânsito “t” o qual adaptado para as unidades SI é o seguinte:

$$t = [5,46 \cdot (n \cdot L)^{0,8}] / [(P_2)^{0,5} \cdot S^{0,4}]$$

Sendo:

t= tempo de trânsito do escoamento superficial (min);

n= coeficiente de rugosidade de Manning

S= declividade (m/m);

L= comprimento (m) sendo $L < 90m$ e

P_2 = precipitação de chuva de 24h para período de retorno de 2anos (mm).

Nota: o valor 5,46 foi obtido assim: $5,46 = 60s \times 0,091$

Exemplo 27.2

Calcular o escoamento superficial em concreto sendo $n=0,015$, comprimento do trecho de 15m, declividade de 10% e precipitação de 24h para período de retorno da cidade de São Paulo de 64,1mm.

$$t = [5,46 \cdot (n \cdot L)^{0,8}] / [(P_2)^{0,5} \cdot S^{0,4}]$$
$$t = [5,46 \cdot (0,015 \cdot 15)^{0,8}] / [(64,1)^{0,5} \cdot 0,1^{0,4}] = \mathbf{0,52min}$$

27.11 Fórmula da *Federal Aviation Agency* (FAA,1970)

Esta fórmula foi desenvolvida para uso de drenagem em campos de aviação nos Estados Unidos (McCuen,1998).

É válida para pequenas bacias onde o **escoamento superficial** sobre o solo predomina. O comprimento, declividade e o coeficiente de *runoff* são para o escoamento principal do talvegue.

$$t_c = 0,65 \cdot (1,1 - C) \cdot L^{0,5} \cdot S^{-0,33}$$

(Equação 27.3)

Sendo:

t_c = tempo de concentração (min);

C= coeficiente de runoff do método racional para período de retorno de 5 a 10 anos.

L= comprimento (m) máximo do talvegue deverá ser de 150m;

S= declividade média (m/m)

Exemplo 27.3 calcular o tempo de concentração em uma bacia pequena com comprimento do talvegue de 15m, declividade $S=0,1m/m$ e coeficiente de escoamento superficial (coeficiente de runoff) do método racional $C=0,95$.

$$t_c = 0,65 \times (1,1 - C) \times L^{0,5} \times S^{-0,33} = 0,69 \times (1,1 - 0,95) \times 15^{0,5} \times 0,10^{-0,33} = 0,85min$$

27.12 **Fórmula da onda cinemática 1971**

A equação da onda cinemática feita por Ragam, 1971 e Fleming, 1975 *in* Wanielista, 1997, deve ser usada para a estimativa do tempo de concentração quando existe a velocidade da onda (velocidade não muda com a distância mas muda no ponto).

A fórmula é feita somente para o cálculo de escoamento superficial. Isto deve ser entendido quando a chuva corre sobre um gramado, uma floresta, um asfalto ou concreto. Está incluso o impacto das gotas de água, os obstáculos dos escoamentos como os lixos, vegetação e pedras e transporte de sedimentos.

O comprimento máximo do escoamento superficial deve ser de 30m a 90m (McCuen, 1998, p.45). Na prática é usada a fórmula para comprimentos um pouco abaixo de 30m e um pouco acima de 90m sem problemas.

$$t = \frac{6,99 \cdot (n \cdot L / S^{0,5})^{0,60}}{i^{0,4}} \quad \text{(Equação 27.4)}$$

Sendo:

t= tempo de escoamento superficial (min);

n= coeficiente de Manning para escoamento superficial;

L= é o comprimento (m) do ponto mais distante, medido paralelamente a declividade até o ponto a ser alcançado;

S= declividade (m/m);

i= intensidade de chuva (mm/h);

O grande inconveniente é que temos uma equação e duas incógnitas. Uma incógnita é o tempo “ t ” do escoamento superficial e outra a intensidade de chuva “ I ”.

O cálculo na prática deve ser feito por *tentativas* que é a maneira mais simples, usando um gráfico IDF (intensidade-duração-frequência) ou a equação das chuvas. Deve ser arbitrado um valor do tempo de escoamento “ t ”, calcular o valor de “ I ” e achar novamente o valor de “ t ” e conferir com o valor inicial, até que as diferenças atinjam uma precisão adequada.

Exemplo 27.4: aplicação do tempo de escoamento superficial.

Considere um telhado com rugosidade $n=0,015$ com 15m de comprimento, e declividade de 0,10m/m. Queremos determinar o valor do tempo e da intensidade de chuva para tempo de retorno de 25anos.

Sendo $n=0,015$ $L=15m$ $S=0,10m/m$

$$t = \frac{6,99 \times (n \times L / S^{0,5})^{0,60}}{i^{0,4}}$$

substituindo teremos:

$$t = \frac{6,977 \times (0,015 \times 15 / 0,1^{0,5})^{0,60}}{i^{0,4}}$$

$$t = 5,65 / i^{0,4} \quad \text{(Equação 27.5)}$$

Portanto, temos uma equação e duas incógnitas. A solução é introduzir mais uma equação, ou seja a equação da intensidade da chuva. Tomamos então a equação da chuva de Paulo Sampaio Wilken para São Paulo com as unidades em mm/h:

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

Como é fornecido o período de retorno $T=25$ anos, teremos para a intensidade da chuva

$$I = \frac{1747,9 \times 25^{0,181}}{(t + 15)^{0,89}} = \frac{3130}{(t + 15)^{0,89}} \quad \text{(Equação 27.6)}$$

A resolução das Equações (27.5 e (27.6) é feita por tentativas.

Arbitra-se um valor de ‘t’ e calcula-se o valor de “i “ e em seguida recalcula-se o valor de “t” através da Equação (5.11).

Usa-se o valor do resultado da Equação (27.5) até que os valores praticamente coincidam.

Arbitrando um valor de $t=1$ min na Equação (27.6) achamos:

$$I = \frac{3130}{(t + 15)^{0,89}} = \frac{3130}{(1+15)^{0,89}} = 265,5$$

Com o valor de I=265,5 entra-se na Equação (27.5):

$$t = 5,65 / i^{0,4} = 5,65 / 265,5^{0,4} = 0,61 \text{min}$$

Como o valor arbitrado foi de 1min e achamos 0,61min,

recalculamos tudo novamente, usamos t=0,61min.

$$i = \frac{3130}{(t + 15)^{0,89}} = \frac{3130}{(0,61+15)^{0,89}} = 272,2 \text{mm/h}$$

$$t = 5,65 / i^{0,4} = 5,65 / 272,2^{0,4} = \mathbf{0,60 \text{min}}$$

Portanto, que o tempo de concentração é de 0,6min.

27.13 Fórmula da onda cinemática conforme FHWA, 1984

Um método que é mais realista para estimar o tempo de concentração de escoamento superficial é do FHWA, 1984. A única alteração é a introdução do coeficiente C de runoff, ficando assim:

$$t = \frac{6,92 \times L^{0,6} \times n^{0,6}}{(C \times I)^{0,84} \times S^{0,3}}$$

Sendo:

t= tempo de concentração do escoamento superficial (min)

L= comprimento do escoamento superficial (m)

n= coeficiente de rugosidade de Manning

C= coeficiente de *runoff*

S= declividade média da área de escoamento superficial (m/m)

I= intensidade da chuva (mm/h)

O método é resolvido da mesma maneira do anterior, isto é, por tentativas.

27.14. Método da onda cinemática conforme Yen e Chow, 1983

Yen e Chow, 1983 eliminaram a necessidade de iteração da intensidade da chuva I e elaboraram a seguinte equação:

$$t_c = K \cdot [(N \cdot L / S_o^{0,5})^{0,6}]$$

Sendo:

t_c = tempo de concentração (min)

N= adimensional fornecido por tabela e semelhante ao “n” de Manning

L= comprimento (m)

S_o = declividade (m/m)

Tabela 27.5- Valores de K conforme o tipo de chuva

Chuva leve	Chuva moderada	Chuva pesada
< 20mm/h	Entre 20 a 30mm/h	>30mm/h
3,0	2,2	1,4

Tabela 27.6- Valores de N

Tipo de superfície	Valor médio de N
Superfície de concreto	0,015
Superfície lisa	0,013

Exemplo 27.5

Calcular o tempo de concentração de um telhado com 15m de comprimento e declividade $S_o=0,35\text{m/m}$ e $N=0,014$. Considerar chuva forte $K=1,4$

$$t_c = K \cdot [(N \cdot L / S_o^{0,5})^{0,6}]$$


$$t_c = 1,4 \cdot [(0,014 \times 15 / 0,35^{0,5})^{0,6}]$$

$$t_c = 0,75\text{min}$$

27.15 Declividade do telhado

Na Tabela (27.7) apresentamos valores do ângulo de inclinação do telhado em graus e em porcentagem.

Tabela 27.7 – Valores de ângulos e declividades de telhados

α°  $d\%$

α°	$d\%$	α°	$d\%$
1,0	1,7	17,8	32,0
1,7	3,0	20,0	36,4
5,5	9,6	25,0	46,6
5,7	10,0	26,6	50,0
8,6	15,0	30,0	57,7
10,0	17,6	35,0	70,0
11,3	20,0	40,0	83,9
15	26,8	45,0	100,0

Exemplo 27.6

Calcular uma equação que fornece o *first flush* em função do vão livre do telhado usando a equação de Sartor e Boyd, 1972 para a Região Metropolitana de São Paulo, para telhado com declividade $S=0,35\text{m/m}$; constante de acumulação $K=14/\text{mm}$; coeficiente de *runoff* $C=0,98$; período de retorno de 25 anos para telhados com vãos variando de 2m a 30m e carga de telhado inicial de sólidos totais em suspensão (TSS) de $2\text{g/m}^2/\text{dia}$.

Tabela 27.8 Aplicação de Sartor e Boyd, 1972

Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
Coefficiente C	Vão (m)	Declividade (m/m)	Tempo de concentração (min)	Período de retorno (anos)
0,98	2,00	0,35	0,16	25
0,98	5,00	0,35	0,25	25
0,98	10,00	0,35	0,35	25
0,98	15,00	0,35	0,43	25
0,98	20,00	0,35	0,49	25
0,98	25,00	0,35	0,55	25
0,98	30,00	0,35	0,60	25

Tabela (27.8)

Coluna 1: Coeficiente de runoff C

Adotamos o coeficiente de runoff C=0,98.

Coluna 2: Vão do telhado

O vão do telhado é a projeção horizontal do telhado e é medido em metros. Fizemos variação de 2m a 30m.

Coluna 3: Declividade do telhado

A declividade do telhado é fornecida em metro/metro. Adotamos uma declividade média S=0,35m/m que corresponde a 35% usada na maioria dos telhados.

Coluna 4: Tempo de concentração

O tempo de concentração normalmente adotado em telhados é de 5min, mas faremos o calculo do mesmo de uma maneira mais exata e para evitar o uso de tentativas usada no método cinemático, usaremos a equação do *Federal Aviation Agency*, 1970.

$$tc = 0,65 \cdot (1,1 - C) \cdot L^{0,5} \cdot S^{-0,33}$$

Para a linha correspondente ao vão de 15m teremos:

$$tc = 0,65 \cdot (1,1 - C) \cdot L^{0,5} \cdot S^{-0,33}$$
$$tc = 0,65 \cdot (1,1 - 0,98) \cdot 15^{0,5} \cdot 0,35^{-0,33} = 0,43min$$

Coluna 5: Período de retorno

Adotaremos o período de retorno de 25anos.

Tabela 27.9 Aplicação de Sartor e Boyd, 1972

Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
Intensidade (mm/h)	Material acumulado em 3 dias (g/m ²)	Constante de acumulação K	Valor de Δt	Quantidade remanescente de TSS
I	No	(mm ⁻¹)	(h)	N (g/m)
278,50	12,7	1,4	0,0026	4,6
277,03	31,8	1,4	0,0041	6,5
275,38	63,6	1,4	0,0058	6,8
274,14	95,4	1,4	0,0071	6,2
273,10	127,1	1,4	0,0082	5,5
272,19	158,9	1,4	0,0092	4,8
271,37	190,7	1,4	0,0101	4,2

Tabela (27.9)

Coluna 6: Intensidade de chuva (mm/h)

Para efeito de exemplo, adotaremos a equação de chuva da Região Metropolitana de São Paulo devida a Paulo Sampaio Wilken.

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

Como é fornecido o período de retorno T=25 anos, teremos para a intensidade da chuva

$$I = \frac{1747,9 \times 25^{0,181}}{(t + 15)^{0,89}} = \frac{3130}{(t + 15)^{0,89}}$$

Para a linha referente ao vão livre de 15,00m que estamos fornecendo como exemplo, temos o tempo de concentração tc=0,43min

$$I = \frac{3130}{(0,43 + 15)^{0,89}} = 274,14 \text{ mm/h}$$

Observar na coluna 6 que a média de I é de 274mm/h.

Coluna 7: Material acumulado em 3 dias (g/m²/dia)

Pelas pesquisas em trabalhos executados encontramos valores da taxa de material acumulado em 3 dias variando de 0,5g/m²/dia a 2g/m²/dia. Adotaremos o maior valor a favor da segurança. Ressaltamos que não conhecemos pesquisas no Brasil em material acumulado em telhados.

Portanto, vamos considerar a taxa de 2g/m²/dia de sólidos totais em suspensão (TSS) acumulado em 3 dias. Para a faixa de telhado temos que multiplicar a área do telhado pela largura unitária de um metro. Para o exemplo que estamos dando, a área do telhado por metro é de 15,89m².

Portanto, a carga será:

$$\text{Carga inicial} = N_0 = 15,89 \text{ m}^2 \times 2 \text{ g/m}^2/\text{dia} \times 3 \text{ dias} = 96,4 \text{ g}$$

Coluna 8: Constante de acumulação K

A constante de acumulação K usada por Sartor e Boyd, 1972 tem a unidade mm⁻¹.

Adotaremos K= 1,4/mm que corresponde a telhas cerâmicas ou telhados de aço com chapas galvanizadas.

Coluna 9: Valor de Δt (h)

No uso da equação de Sartor e Boyd, 1972 que é a base do nosso trabalho, é considerado um intervalo de tempo constante no tempo de concentração. Supomos que durante o trajeto da água pelo telhado inclinado no tempo de concentração seja lavado o telhado e removido o TSS. Tal suposição fica um pouco a favor da segurança, pois realmente a remoção da poeira e detritos se dará num tempo um pouco menor que o tempo de concentração.

Para a vão de 15m que estamos adotando o tempo de concentração de 0,43min ficará:

$$\Delta t = 0,43 \text{ min} / 60 = 0,0071 \text{ h.}$$

Coluna 10: Quantidade de TSS remanescente (g)

Carga inicial = $N_0 = 15,89\text{m}^2 \times 6 \text{ g/m}^2 \times \text{dia} = \mathbf{95,4 \text{ g}}$

O valor da carga após decorrer o tempo de concentração, isto é, após este tempo a água já sai fora do telhado, é dado pela equação de Sartor e Boyd, 1972 que é a base do nosso trabalho.

$$N = N_0 \cdot \text{EXP}(-K \cdot R \cdot t)$$

$K = 14/\text{mm}$ (adotado)

$R = \text{intensidade da chuva} = I = 274,14\text{mm/h}$ (admitido constante no intervalo de 0,0071h)

$t = t_c = 0,43\text{min} = 0,0071\text{h}$

$$N = N_0 \cdot \text{EXP}(-K \cdot R \cdot t)$$

$$N = 95,4 \times \text{EXP}(-14 \times 274,4 \times 0,0071) = \mathbf{6,2 \text{ g}}$$

Tabela 27.10 Aplicação de Sartor e Boyd, 1972

Coluna 11	Coluna 12	Coluna 13	Coluna 14	Coluna 15	Coluna 16
Redução (%)	Área inclinada (m^2/m)	Vazão Q ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)	Volume V (m^3/m)	First flush P (mm)	Vão livre L (m)
63,7	2,12	0,00016	0,0015	0,71	2,00
79,7	5,30	0,00040	0,0059	1,12	5,00
89,4	10,59	0,00079	0,0166	1,57	10,00
93,5	15,89	0,00119	0,0304	1,91	15,00
95,7	21,19	0,00158	0,0466	2,20	20,00
97,0	26,49	0,00196	0,0649	2,45	25,00
97,8	31,78	0,00235	0,0851	2,68	30,00

Tabela (27.10)

Coluna 11: Redução da carga com a lavagem da água de chuva

Nesta coluna apresenta a redução da carga.

A carga foi calculada da seguinte maneira: admitimos que se deposita diariamente no telhado poeira e detritos no valor de $2 \text{ g/m}^2/\text{dia}$. Conforme pesquisas existentes aparece a poeira após 3 dias sem chuvas e então multiplicando $2 \text{ g/m}^2/\text{dia} \times 3\text{dias}$ obtemos 6 g/m^2 de carga.

Como o telhado tem área de $15,89\text{m}^2$ então a carga na faixa unitária de telhado será:

$$\text{Carga inicial} = N_0 = 15,89\text{m}^2 \times 6 \text{ g/m}^2 \times \text{dia} = \mathbf{95,4 \text{ g}}$$

O valor da carga após decorrer o tempo de concentração, isto é, após este tempo a água já sai fora do telhado, é dado pela equação de Sartor e Boyd, 1972 que é a base do nosso trabalho.

$$N = N_0 \cdot \text{EXP}(-K \cdot R \cdot t)$$

K= 14/mm (adotado)

R= intensidade da chuva = I=274,14mm/h (admitido constante no intervalo de 0,0071h)

t= tc= 0,43min=0,0071h

$$N = N_0 \cdot \text{EXP}(-K \cdot R \cdot t)$$

$$N = 95,4 \times \text{EXP}(-14 \times 274,14 \times 0,0071) = 6,2 \text{ g}$$

A redução será:

$$\text{Redução} = (N_0 - N) \times 100 / N_0$$

$$\text{Redução} = (95,4 - 6,2) \times 100 / 95,4 = 93,5\%$$

Coluna 12: Área (m²/m)

É a área do telhado inclinado em m² por metro de telhado. Supomos que o vão do telhado tem comprimento L e declividade S. Então calculamos a hipotenusa C:

$$C = [L^2 + (S \cdot L)^2]^{0,5}$$

Então para a linha com L=15,00m teremos:

S=0,35m/m

$$C = [L^2 + (S \cdot L)^2]^{0,5}$$

$$C = [15^2 + (0,35 \times 15)^2]^{0,5} = 15,89 \text{ m}^2$$

Coluna 13: Vazão Q (m³/s/m)

É a vazão em m³/s por metro de largura de telhado obtida usando o Método Racional.

$$Q = C \cdot I \cdot A / 360$$

Sendo:

C= 0,98= coeficiente de *runoff* (adimensional). Adotado.

I= 274,14mm/h calculado pela equação de intensidade de chuva da RMSP

A= 15,89m²/10000 (área da faixa de telhado em hectares)=0,001589ha

$$Q = C \cdot I \cdot A / 360$$

$$Q = 0,98 \times 274,4 \times 0,0015,89 / 360 = 0,00119 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} = 1,19 \text{ L/s/m}$$

Coluna 14: V (m³/m)

É o volume escoado no telhado de largura unitária considerando o tempo de concentração e a vazão calculada na coluna 13.

$$V = \text{tempo de concentração} \times 60s \times Q$$

$$t_c = 0,43 \text{min}$$

$$V = 0,43 \times 60 \times 0,00119 = 0,0304 \text{m}^3/\text{m} = 30,4 \text{L/m}$$

Coluna 15: P (mm)

É o *first flush*, isto é, o volume de água dividido pela área em que se dará a redução de carga de 93,5% conforme coluna 11.

O *first flush* designamos pela letra P.

$$P = V / (\text{área} \times 1000)$$

$$P = 0,0304 \text{m}^3/\text{m} / (15,89 \text{m}^2/\text{m} \times 1000) = 1,91 \text{mm}$$

Portanto, para um telhado com vão de 15m o *first flush* será de 1,91mm

Coluna 16: Vão livre

O vão livre é a repetição da coluna 1, que fica ai colocado para dar melhor visão à planilha.

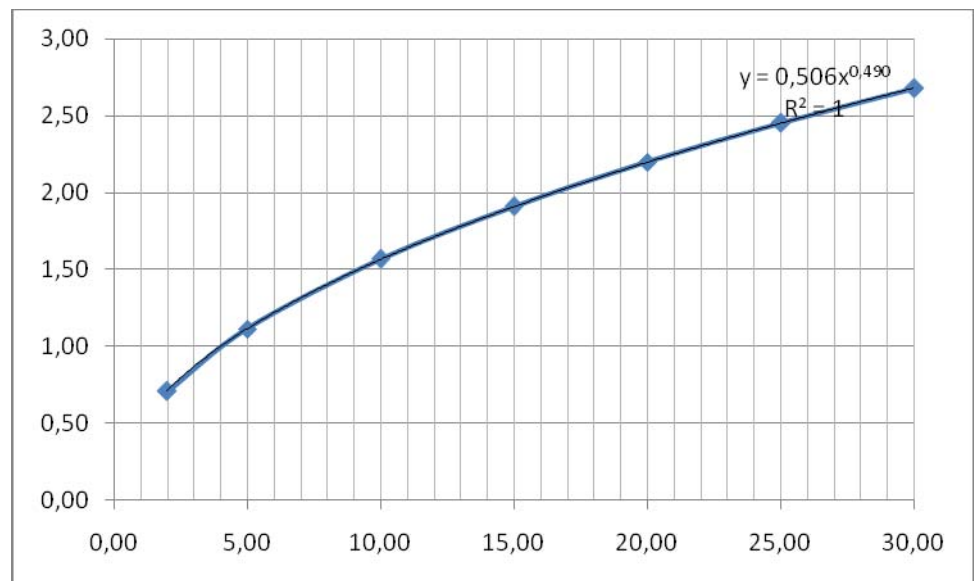


Figura 27.3- Gráfico do *first flush* em função do comprimento do telhado considerando 3 dias sem chuva, carga de $2 \text{g/m}^2 \times \text{dia}$; declividade do telhado de $0,35\text{m/m}$ (35%); coeficiente $K=1,4/\text{mm}$, Intensidade de chuva de $274,14\text{mm/h}$ para a RMSP; período de retorno de 25anos e coeficiente de *runoff* $C=0.98$.

A equação potencial que está na Figura (27.3) calcula o *first flush* em função do vão do telhado com as considerações feitas.

$$P = 0,506 \times L^{0,49} \quad \text{com } R^2=1.0$$

Sendo:

P=first flush em milímetros

L= vão do telhado em metros em projeção

Exemplo 27.7

Calcular o first flush para um telhado com vão L=15m localizado na RMSP.

$$P = 0,506 \times L^{0,49}$$

$$P = 0,506 \times 15^{0,49} = \mathbf{1,90\text{mm}}$$

27.16 Escoamento superficial cinemático

Vamos tratar do escoamento superficial cinemático em um plano retangular com uniformidade de características conforme Akan, 1993.

Pode ser escrito:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = i - f \quad (\text{Equação 27.5})$$

Sendo:

t= o tempo

q= descarga por unidade de largura

y=altura do escoamento

x= distância na direção do escoamento

i=taxa de intensidade de chuva

f=perda de água da chuva

Supomos que a declividade do plano S_o seja igual a perda de carga S_f .

Então teremos:

$$q = \alpha \cdot y^m \quad (\text{Equação 27.6})$$

Onde α e $m=5/3$ dependem da equação de resistência adotada e no caso adotamos a equação de Manning.

$$\alpha = (1/n) S_o^{0,5} \quad (\text{Equação 27.7})$$

Podemos obter uma solução analítica usando as Equações (27.5) e (27.6) simultaneamente se fizermos $(i - f)$ constante. Conforme Akan, 1993 os detalhes da solução são facilmente encontrados. A solução foi obtida usando o método das características e aqui são apresentados somente os resultados.

Um parâmetro muito importante é o tempo em que o escoamento superficial alcança o equilíbrio sob intensidade de chuva constante que é chamado de tempo de equilíbrio.

$$t_e = L^{1/m} / (\alpha \cdot i_o^{m-1})^{1/m} \quad (\text{Equação 27.8})$$

Sendo:

t_e = tempo de equilíbrio

L = comprimento do plano do escoamento superficial

$i_o = i - f$ = intensidade de chuva suposta constante.

$m = 5/3$

Temos uma variável muito importante que é o tempo de equilíbrio t_e e que é chamado também de tempo de concentração t_c . O significado físico é que quando tiver ocorrido o tempo de equilíbrio t_e , a altura do escoamento será constante pelo menos durante um certo tempo que dependerá do tempo de duração da chuva t_d .

O tempo de equilíbrio t_e será menor ou igual ao tempo de duração da chuva ou maior.

$$t_e \leq t_d \quad \text{ou} \quad t_e > t_d$$

Podemos fazer um hidrograma do tempo na abscissa e vazão por metro na ordenada. O hidrograma terá uma parte de ascensão, um trecho reto quando atingir o tempo de equilíbrio t_e e uma parte descendente.

Quando $t_e \leq t_d$ vamos determinar a parte ascendente usando a seguinte equação conforme Akan, 1993.

$$q_L = \alpha \cdot (i_o \cdot t)^m \quad \text{para } t \leq t_e \quad (\text{Equação 27.9})$$

Sendo:

q_L = descarga por metro de largura no fim do plano

t = tempo. Sendo $t \leq t_e$

$m = 5/3$

i_o = intensidade de chuva = constante

$$\alpha = (K/n) S_o^{0,5}$$

Quando $t_e < t < t_d$ o escoamento estará em equilíbrio, pois já decorreu o tempo t_e e teremos a equação:

$$q_L = i_o \cdot L \quad \text{para } t_e < t < t_d \quad (\text{Equação 27.10})$$

A curva de descendência começa após o tempo t_d , isto é, $t > t_d$ e teremos:

$$t = t_d + [L / (\alpha \cdot y_L^{m-1}) - y_L / i_o] / m \quad \text{(Equação 27.11)}$$

Sendo:

y_L = altura do escoamento superficial no fim do plano inclinado.

$$y_L = (q_L / \alpha)^{1/m} \quad \text{(Equação 27.12)}$$

Se $t_e > t_d$ então cessa a chuva antes de alcançar o equilíbrio e teremos:

$$q_L = \alpha \cdot (i_o \cdot t_d)^m \quad \text{para } t_d < t \leq t_p \quad \text{(Equação 27.13)}$$

Sendo t_p igual a:

$$t_p = t_d - t_d / m + L / [m \cdot \alpha \cdot (i_o \cdot t_d)^{m-1}] \quad \text{(Equação 27.14)}$$

Teremos a recessão, isto é, a descendência quando $t > t_p$ e usamos as Equações (27.11) e 27.12).

No patamar do gráfico, isto é, após atingir o tempo de equilíbrio t_e a vazão por metro linear de largura q_L será calculada da seguinte maneira:

$$q_L = i_o \cdot L$$

Exemplo 27.8

Vamos calcular o hidrograma de um telhado com rugosidade de Manning $n=0,014$, declividade $S_o=0,35\text{m/m}$, comprimento $L=15,00\text{m}$ e com intensidade de chuva constante $i_o=148,90\text{mm/h}$ calculada para a RMSP com $T_R=25\text{anos}$ e com tempo de duração da chuva $t_d=15\text{min}=900\text{s}$.

Primeiramente calculemos o valor de α que ficará constante.

$$\alpha = (1/n) S_o^{0,5}$$

$$\alpha = (1/0,014) \times 0,35^{0,5} = 42,26$$

$$m = 5/3 = 1,67$$

O tempo de equilíbrio t_e será:

$$i_o = 148,90\text{mm/h} = 0,00004136\text{m/s}$$

$$t_e = L^{1/m} / (\alpha \cdot i_o^{m-1})^{1/m}$$
$$t_e = 15^{1/1,67} / (42,26 \cdot 0,00004136^{1,67-1})^{1/1,67} = 30,44 \text{ s} = 0,51\text{min}$$

Como o tempo de equilíbrio $t_e=30,44\text{s}$ é maior que $t_d=900\text{s}$ então $t_e < t_d$ e usaremos as equações correspondentes.

Vamos calcular a parte ascendente do hidrograma usando a equação:

$$q_L = \alpha \cdot (i_o \cdot t)^m$$

$$q_L = 42,26 \cdot (0,00004136 \cdot t)^{1,67}$$

Temos, portanto, a equação q_L em função do tempo t de ascendência que será menor que t_e .

Portanto, $t < t_e$.

Como o tempo de equilíbrio é de $30,44 \text{ s}$ podemos dividir o trecho em quatro intervalos iguais:

Para a **estimativa do tempo** até $30,44\text{s}$, dividimos $30,44 \times K/4$ e variamos o coeficiente $K=0, 1, 2, 3$ e 4 .

$$30,44 \times 0/4 = 0$$

$$30,44 \times 1/4 = 7,61\text{s}$$

$$30,44 \times 2/4 = 15,22\text{s}$$

$$30,44 \times 3/4 = 22,83\text{s}$$

$$30,44 \times 4/4 = 30,44\text{s}$$

Para $t=0$

$$q_L = 42,26 \cdot (0,35 \cdot t)^{1,67} = 0$$

Para $t=7,61s$

$$q_L = 42,26 \cdot (0,35 \cdot t)^{1,67} \\ = 0,000062m^3/s/m$$

Para $t=15,22s$

$$q_L = 42,26 \cdot (0,35 \cdot t)^{1,67} = 0,000195 \\ m^3/s/m$$

Para $t=22,83s$

$$q_L = 42,26 \cdot (0,35 \cdot t)^{1,67} \\ = 0,000384m^3/s/m$$

Para $t=30,44$

$$q_L = 42,26 \cdot (0,35 \cdot t)^{1,67} \\ = 0,0006204m^3/s/m$$

Quando o hidrograma chega no topo, a vazão é constante e igual a $0,00062m^3/s/m$ até chegar ao tempo de duração da chuva t_d e a partir daí, isto é, dos 900s faremos o cálculo da recessão, isto é, da parte descendente do hidrograma.

Como o hidrograma é espelhado tomamos os valores decrescente:

0,0006204

0,0003841

0,0001954

0,00006155

0,00000080

Falta somente obter o tempo t que será calculado com o auxílio das Equação (27.12) y_L e Equação (27.11) do valor de t .

$$y_L = (q_L / \alpha)^{1/m}$$

$$y_L = (q_L / 42,26)^{1/m}$$

Para $q_L=0,0006204m^3/s/m$ teremos

$$y_L = (0,0006204 / 42,26)^{1/1,67} = 0,001259m$$

Para $q_L=0,0003841\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ teremos

$$y_L = (0,0003841 / 42,26)^{1/1,67} = 0,000944\text{m}$$

Para $q_L=0,0001954\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ teremos

$$y_L = (0,0001954 / 42,26)^{1/1,67} = 0,000630\text{m}$$

Para $q_L=0,00006155\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ teremos

$$y_L = (0,00006155 / 42,26)^{1/1,67} = 0,000315\text{m}$$

Para $q_L=0,0000080\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ teremos

$$y_L = (0,0000080 / 42,26)^{1/1,67} = 0,000023\text{m}$$

O cálculo de t será sempre maior que t_d e será usada a equação:

$$t = t_d + [L / (\alpha \cdot y_L^{m-1}) - y_L / i_0] / m$$

Como temos os valores de y_L facilmente calcularemos os valores de t

Para $y_L=0,0012259\text{m}$

$$t = 900 + [15 / (42,26 \cdot 0,0012259^{1,67-1}) - 0,0012259 / 0,35] / 1,67 = 900\text{s}$$

Para $y_L=0,000944\text{m}$

$$t = 900 + [15 / (42,26 \cdot 0,000944^{1,67-1}) - 0,000944 / 0,35] / 1,67 = 908\text{s}$$

Para $y_L=0,00063\text{m}$

$$t = 900 + [15 / (42,26 \cdot 0,00063^{1,67-1}) - 0,00063 / 0,35] / 1,67 = 920\text{s}$$

Para $y_L=0,000315\text{m}$

$$t = 900 + [15 / (42,26 \cdot 0,000315^{1,67-1}) - 0,000315 / 0,35] / 1,67 = 941\text{s}$$

Para $y_L=0,000023\text{m}$

$$t = 900 + [15 / (42,26 \cdot 0,000023^{1,67-1}) - 0,000023 / 0,35] / 1,67 = 1161\text{s}$$

No trecho do patamar quando chega o tempo de equilíbrio te.

$$q_L = i_o \cdot L$$

$$q_L = (148,9/1000/3600) \cdot 15,00 = 0,00062 \text{ m}^3/\text{s/m}$$

Tabela 27.11- Cálculos do escoamento superficial de um telhado de 15m de largura usando Akan, 1993.

Subida do gráfico	Subida do gráfico	Subida do gráfico	Subida do gráfico	Subida do gráfico	Subida do gráfico
t=	0	7,61	15,22	22,83	30,44
Vazão (m ³ /s/m)=q _L subida=	0,000000	0,000062	0,000195	0,000384	0,000620
Descida do gráfico					
q _L =descida	0,0006204	0,0003841	0,0001954	0,00006155	0,00000080
y _L (m)=	0,001259	0,000944	0,000630	0,000315	0,000023
t (s)=	900	908	920	941	1161
Δt (h)	0,00	0,002114	0,002114	0,002114	,002114
K=1,4/mm	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40
Intensidade (mm/h)	0,00	110,8	241,0	339,6	425,4
Sartor e Boyd No =12,6 g	12,60				
N=	12,600	9,077	4,449	1,628	1,628
Remoção (%) na ascensão =	0,00	27,96	64,69	87,08	87,08

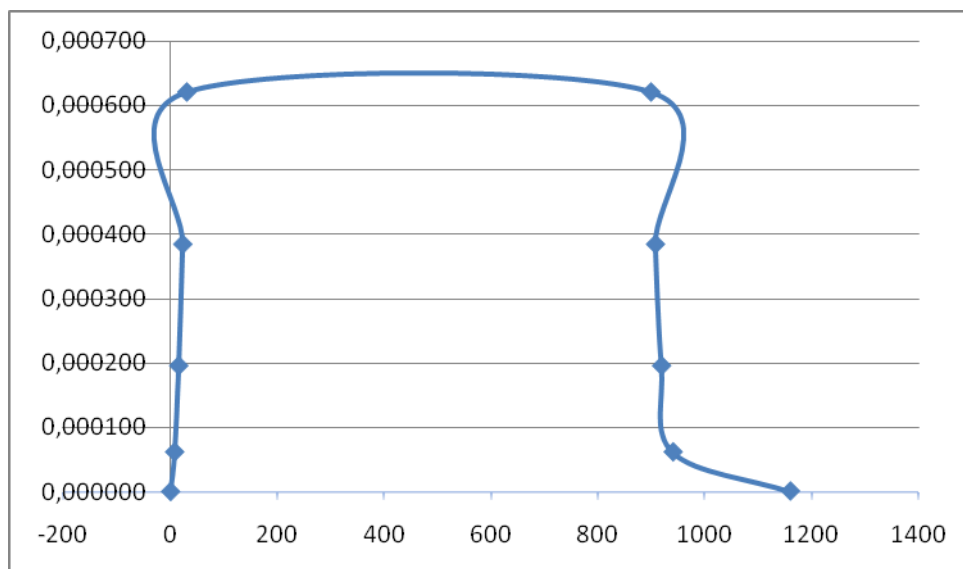


Figura 27.4- Hidrograma do escoamento no telhado de 15m de vão com 0,35m/m declividade e intensidade de chuva de 148,90mm/h suposta constante.

Na Figura (27.4) está o hidrograma, isto é, a vazão em m^3/s por metro de largura do telhado que tem 15m de vão. Notar que quando chega 30,44s atingimos o tempo de equilíbrio e vazão será constante com o passar do tempo até o fim da duração da chuva de 900s (15min). Daí começa a vazão a decrescer até chegar a zero.

Redução da carga poluente do telhado

Para a aplicação da fórmula de Sartor e Boyd, 1972 precisamos da intensidade de chuva para um certo intervalo de chuva, o valor de $K=1,4/mm$ e o tempo em horas do intervalo. Tudo está detalhado na Tabela (27.11).

Obtemos o intervalo entre os trechos, bem como o volume no intervalo e achamos a intensidade de chuva.

Observarmos então que quando atingimos o fim do telhado em 30,44s é que teremos o equilíbrio de vazão constante até o término da chuva de 15min. Na ascendência até o ponto de a remoção será de 87,08% e depois no patamar teremos a redução total de 100%.

27.17 Bibliografia e livros consultados

- ADAMS, THOMAS R. e al. *Recurrence interval/ Rainfal intensity- a Sensible alternative to the first flush as design parameter*. 1997, Vortechincs, Portland, Maine.
- AKAN, A. OSMAN. *Urban Stormwater Hydrology*. Lanscater, 1993, ISBN 0-87762-967-6.
- BRODIE, J.M. e PORTER, M.A. *Stormwater particle characteristics of five different urban surfaces*. Austrália
- DOTTO, CINTIA BRUM SIQUEIRA. *Acumulação e balanço de sedimentos em superfície asfálticas em área urbana de Santa Maria*. RS, Dissertação de Mestrado, 2006.
- MAYS, LARRY W. *Hydraulic design handbook*. McGraw-Hill, 1999.
- PITT, ROBERT et al. *Sources of pollutants in urban areas*. Universidade de Alabama.
- THOMAS, TERRY e MARTINSON, BRETT. *Quantifying the first flush phenomenon*. University of Warwick. UK.
- TOMAZ, PLINIO. *Poluição Difusa*; Navegar, 2006.
- TOMAZ, PLINIO. *Cálculos hidrológicos e hidráulicos para obras municipais*. Editora Navegar, 2002.
- URBONAS, BEN R. e DOERFER, JOHN T. *Some observations on atmospheric dust fallout in the Denver, Colorado area of United States*.
- WANG, BIAO. *Theoretical relationship between first flush of roof runoff and influencing factors*. Abril, 2009



Figura 27.5- Simulação de chuva em telhado



Figura 27.6- Simulação de chuva na rua



Figura 27.7- Coleta do runoff da chuva artificial



Figura 27.8- Coleta do runoff em vasilhame de polietileno



Figura 27.9- Tomada de amostra na superfície da rua



Figura 27.10- Contador de partícula Malvern Mastersizer