PAH3307 – Hidrologia Aplicada

Universidade de São Paulo

Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental

Projeto de Pequena Barragem - Aspectos hidrológicos

Aula 14

Prof. Dr. Arisvaldo Méllo
Prof. Dr. Joaquin Bonnecarrere

Conteúdo

1ª Parte

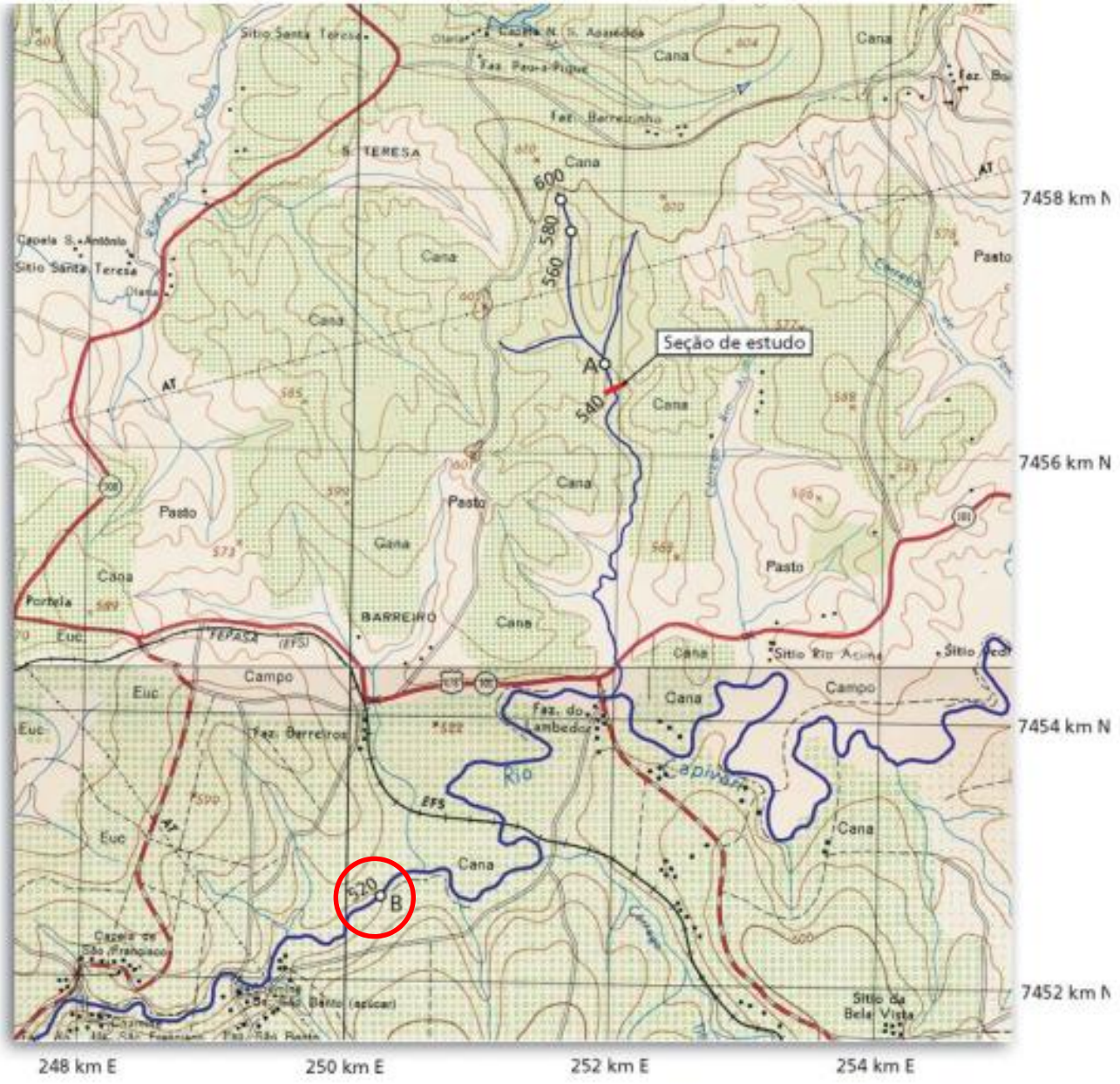
- Aspectos hidrológicos - conceitos básicos
  - Características físicas (área de drenagem, declividade do talvegue)
  - Precipitação
    - Chuva crítica
    - Intensidade, duração e frequência
  - Vazão de projeto
    - Método racional
    - Tempo de concentração
  - Período de retorno
- Barragem
  - Dimensionamento do volume útil
  - Amortecimento de onda de cheia

2ª Parte

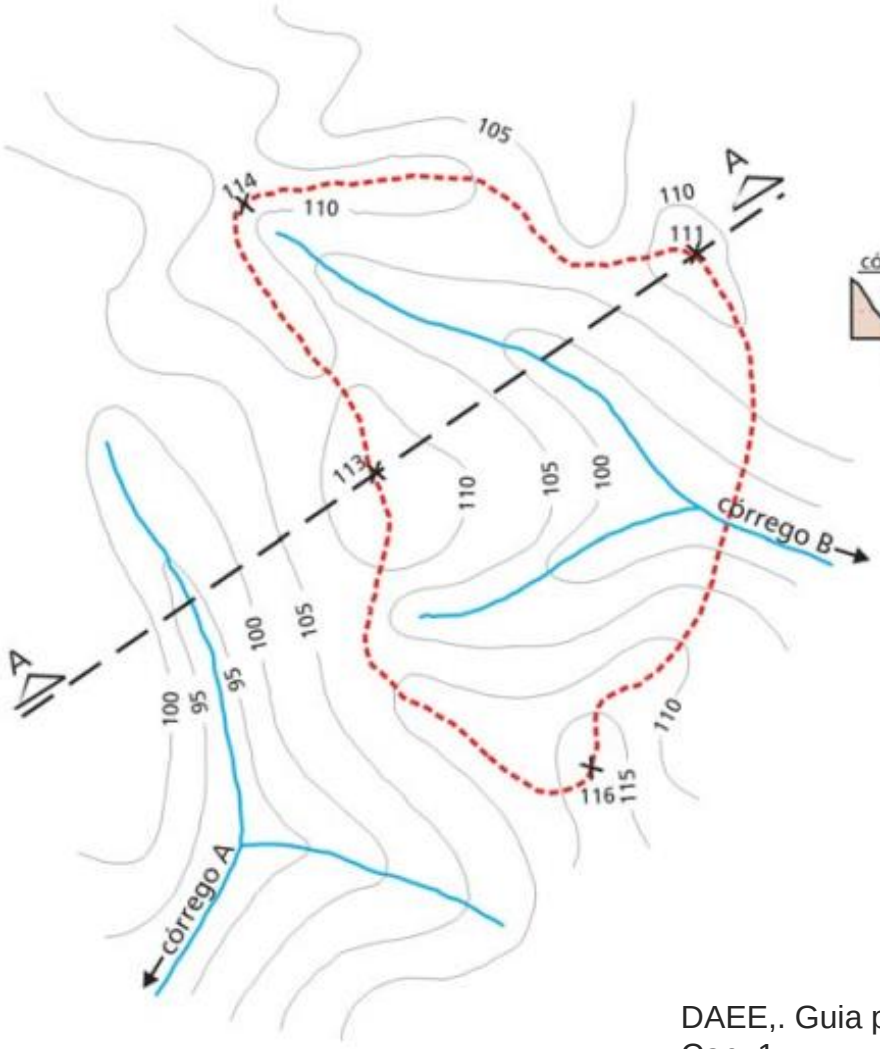
  - Largura e cota do vertedor
  - Altura da barragem
  - Cota da crista da barragem
- Aplicação (Exercício)

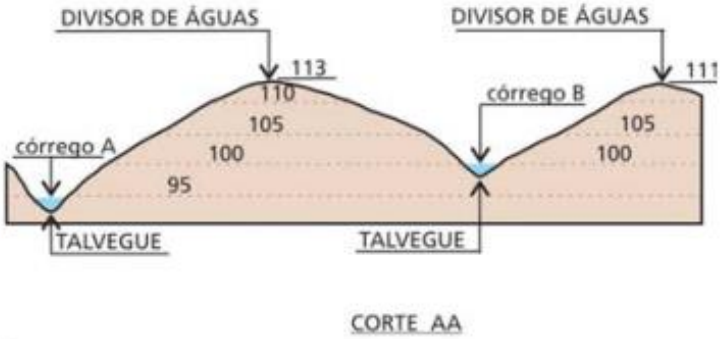
Localização

- Córrego Lambedor
- Município de Capivari, SP
- Carta planialtimétrica em escala apropriada
- Folha cartográfica de Americana (IBGE 1:50.000 SF-23-Y-A-V-3)



Divisor topográfico





CORTE AA

LEGENDA :

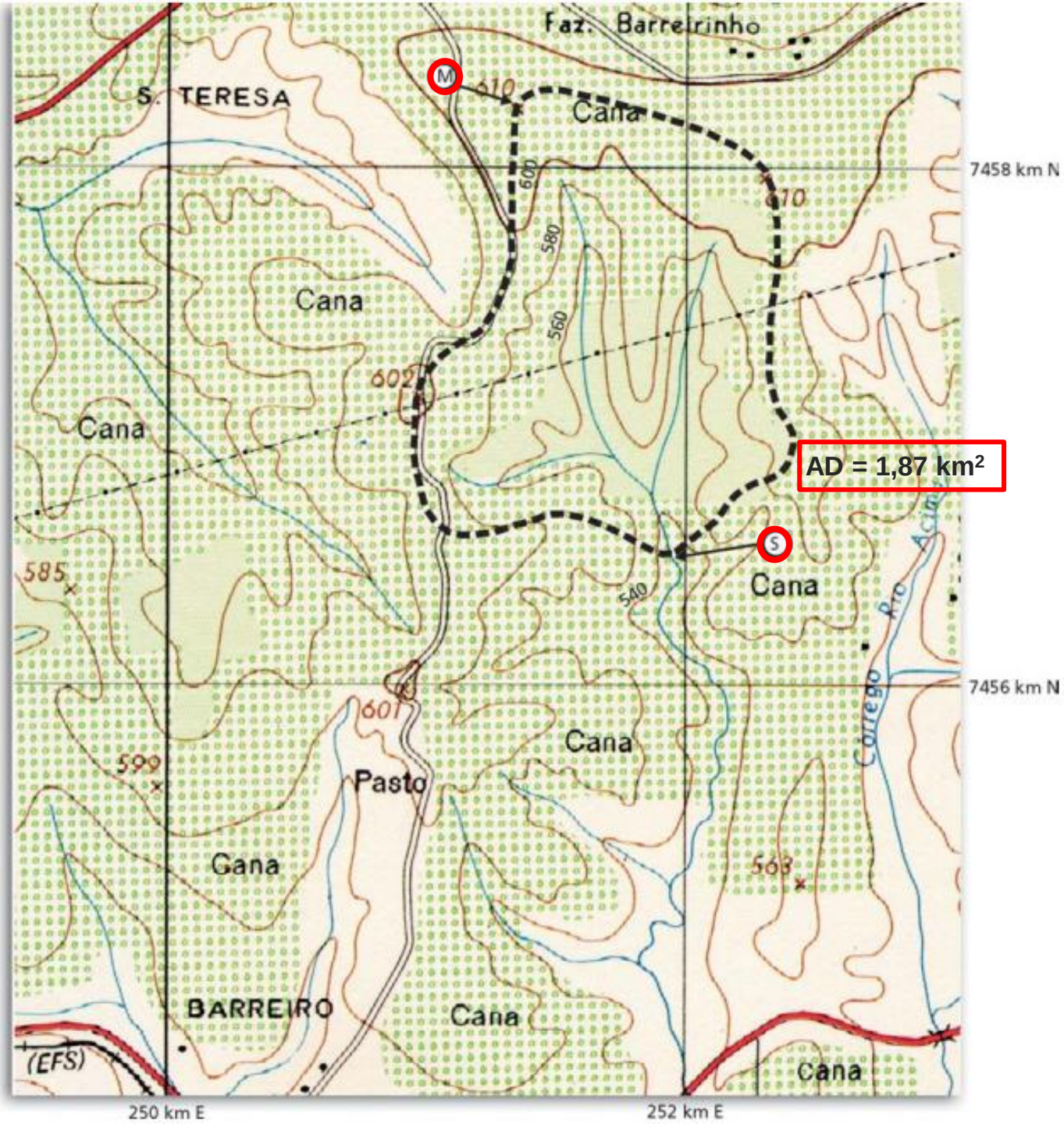
- curva de nível
- curso d'água
- divisor de águas

Planta s/ escala

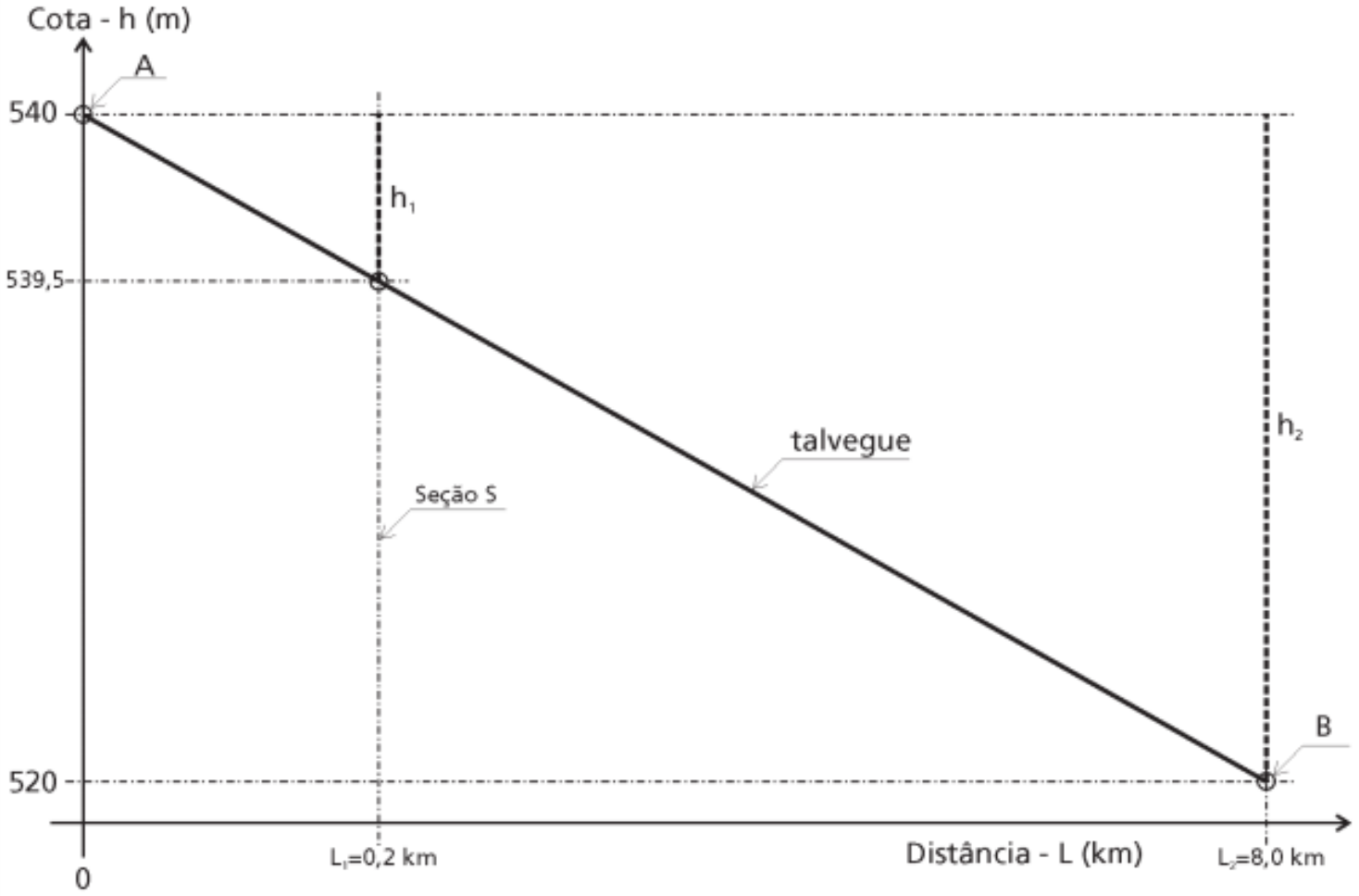
DAEE,. Guia prático para projetos de pequenas obras hidráulicas. 2005. Cap. 1.

Área de drenagem até a seção S (eixo da barragem)

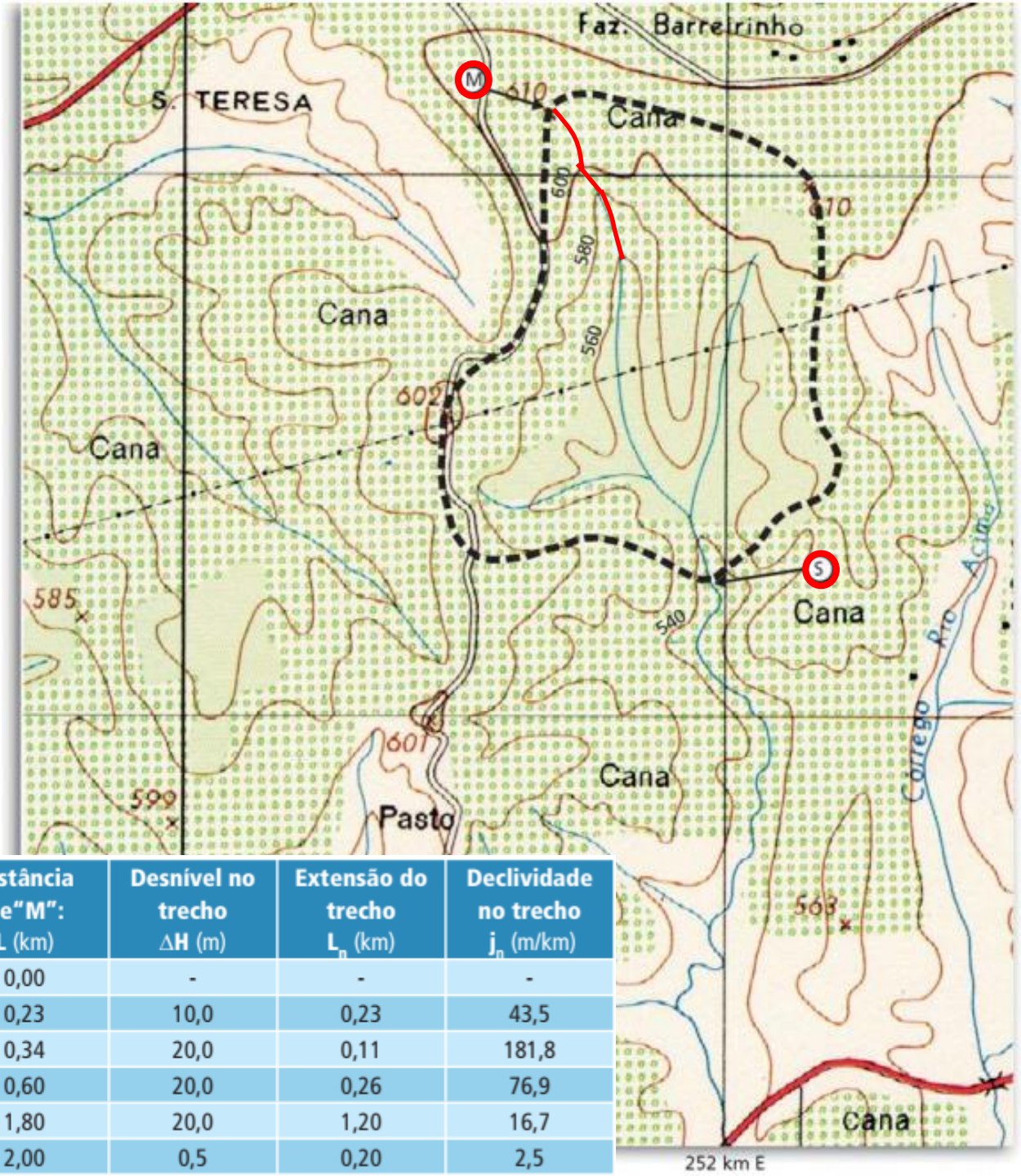
- Delimitação da bacia (o divisor de água intercepta perpendicularmente a curva de nível)
- Comprimento do talvegue principal (L = 2 km)
- Distância S e cota 540 é 0,2 km
- Distância cota 540 e cota 520 é 8 km



Perfil longitudinal entre A e B

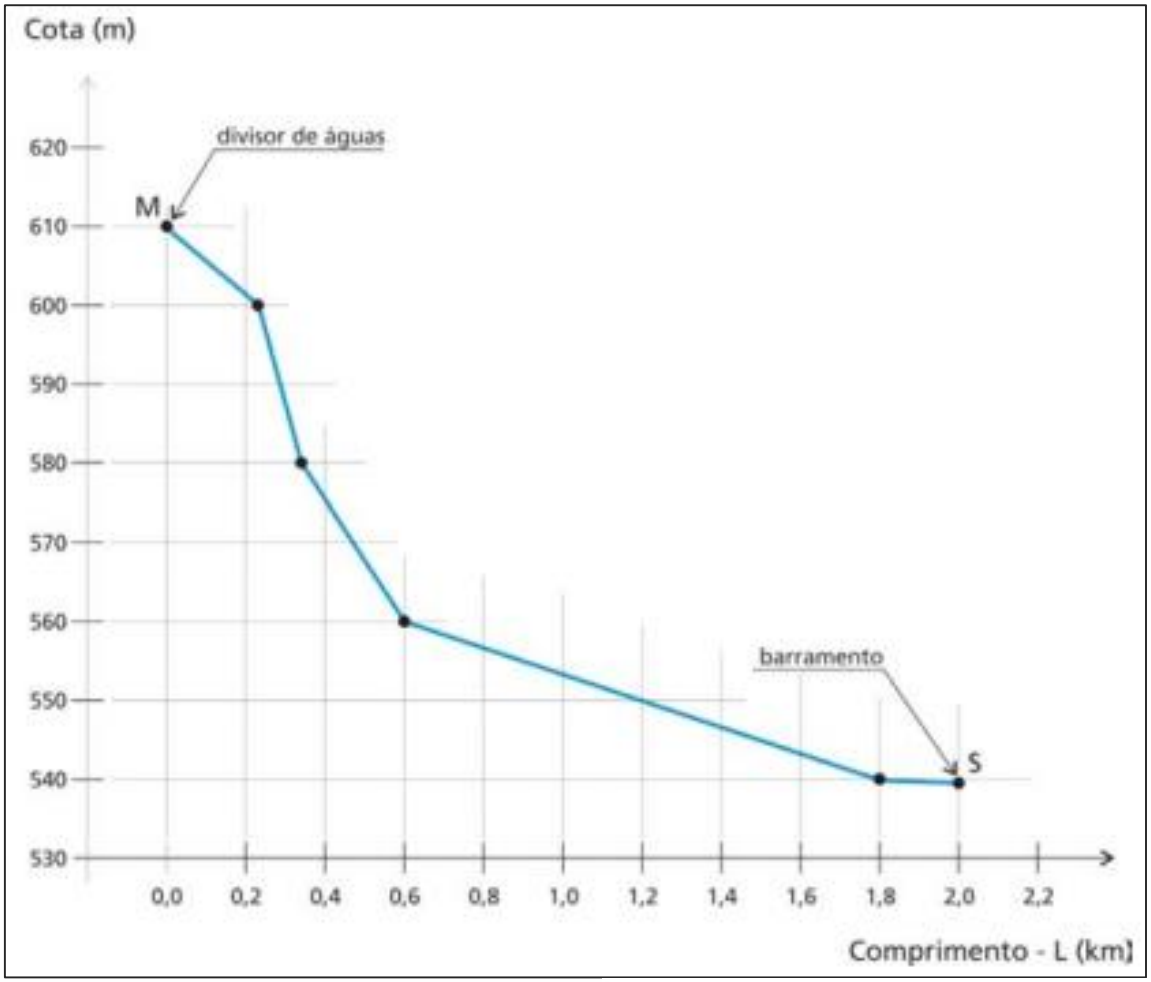


Declividade entre os pontos M e S



Ponto do talvegue	Cota H (m)	Distância de "M": L (km)	Desnível no trecho ΔH (m)	Extensão do trecho L_n (km)	Declividade no trecho j_n (m/km)
Divisor (M)	610,0	0,00	-	-	-
curva de nível	600,0	0,23	10,0	0,23	43,5
curva de nível	580,0	0,34	20,0	0,11	181,8
curva de nível	560,0	0,60	20,0	0,26	76,9
curva de nível	540,0	1,80	20,0	1,20	16,7
Seção "S" *	539,5	2,00	0,5	0,20	2,5

Perfil longitudinal do talvegue (entre os pontos M e S)



Declividade equivalente

$$I_{eq} = \left(\frac{L}{\frac{L_1}{\sqrt{j_1}} + \frac{L_2}{\sqrt{j_2}} + \frac{L_3}{\sqrt{j_3}} + \frac{L_4}{\sqrt{j_4}} + \frac{L_5}{\sqrt{j_5}}} \right)^2$$

onde

$L = L1 + L2 + L3 + L4 + L5$

$$I_{eq} = \left(\frac{2,0}{\frac{0,23}{\sqrt{43,5}} + \frac{0,11}{\sqrt{181,8}} + \frac{0,26}{\sqrt{76,9}} + \frac{1,20}{\sqrt{16,7}} + \frac{0,20}{\sqrt{2,5}}} \right)^2$$

$I_{eq} = 16,45$ m/km

Ponto do talvegue	Cota H (m)	Distância de "M": L (km)	Desnível no trecho ΔH (m)	Extensão do trecho L_n (km)	Declividade no trecho j_n (m/km)
Divisor (M)	610,0	0,00	-	-	-
curva de nível	600,0	0,23	10,0	0,23	43,5
curva de nível	580,0	0,34	20,0	0,11	181,8
curva de nível	560,0	0,60	20,0	0,26	76,9
curva de nível	540,0	1,80	20,0	1,20	16,7
Seção "S" *	539,5	2,00	0,5	0,20	2,5

Precipitação

Chuva crítica

Equações de Chuvas Intensas de SP para Piracicaba, posto D4-104R, série de 1980 a 2013 (Martinez e Piteri, 2016)

$$i_{t,T} = 44{,}52 \cdot (t + 30)^{-0{,}8972} + 23{,}53 \cdot (t + 40)^{-0{,}9506} \cdot \left[-0{,}4847 - 0{,}9062 \cdot ln \cdot ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right]$$

i é a intensidade média da chuva, mm/min
t é a duração da chuva, min
T é o período de recorrência, anos

Período de retorno para Barramento

Dimensões (m)	T (anos)
h ≤ 5 e L ≤ 200	100
5 < h ≤ 15 e L ≤ 500	1000
h > 15 ou L > 500	10000 ou PMP
Borda livre (freeboard) f ≥ 0,5 m	

h – altura do maciço a partir do talvegue
L – comprimento do maciço
PMP – precipitação máxima provável
Borda livre – desnível entre a crista do vertedor e o nível máximo maximorum

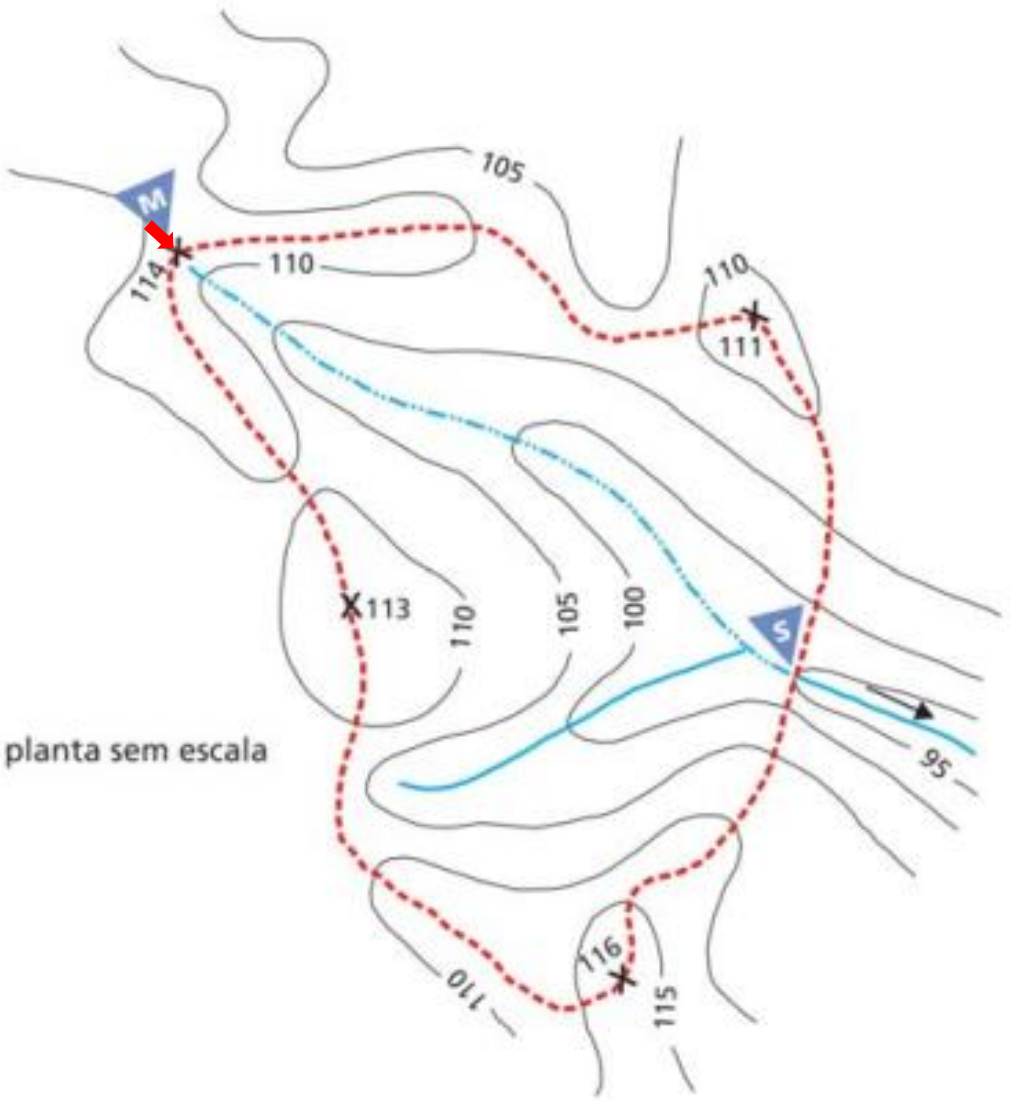
Conforme o tipo de ocupação a jusante de um barramento pode haver exigências de períodos de retorno maiores que os indicados para redução do risco de acidentes.

Duração da precipitação crítica

- **Bacias com área suficientemente pequena:**
  - **Duração igual ao tempo de concentração da bacia**
  - **Condições críticas são devidas às precipitações convectivas (pequena duração e grande intensidade)**

$t = t_c \rightarrow$ se $t_c < 10$ min use IDF com $t = 10$ min

Tempo de concentração



- **Tempo em que uma gota de chuva, que cai no ponto mais distante da bacia, demora para chegar até a seção de interesse**

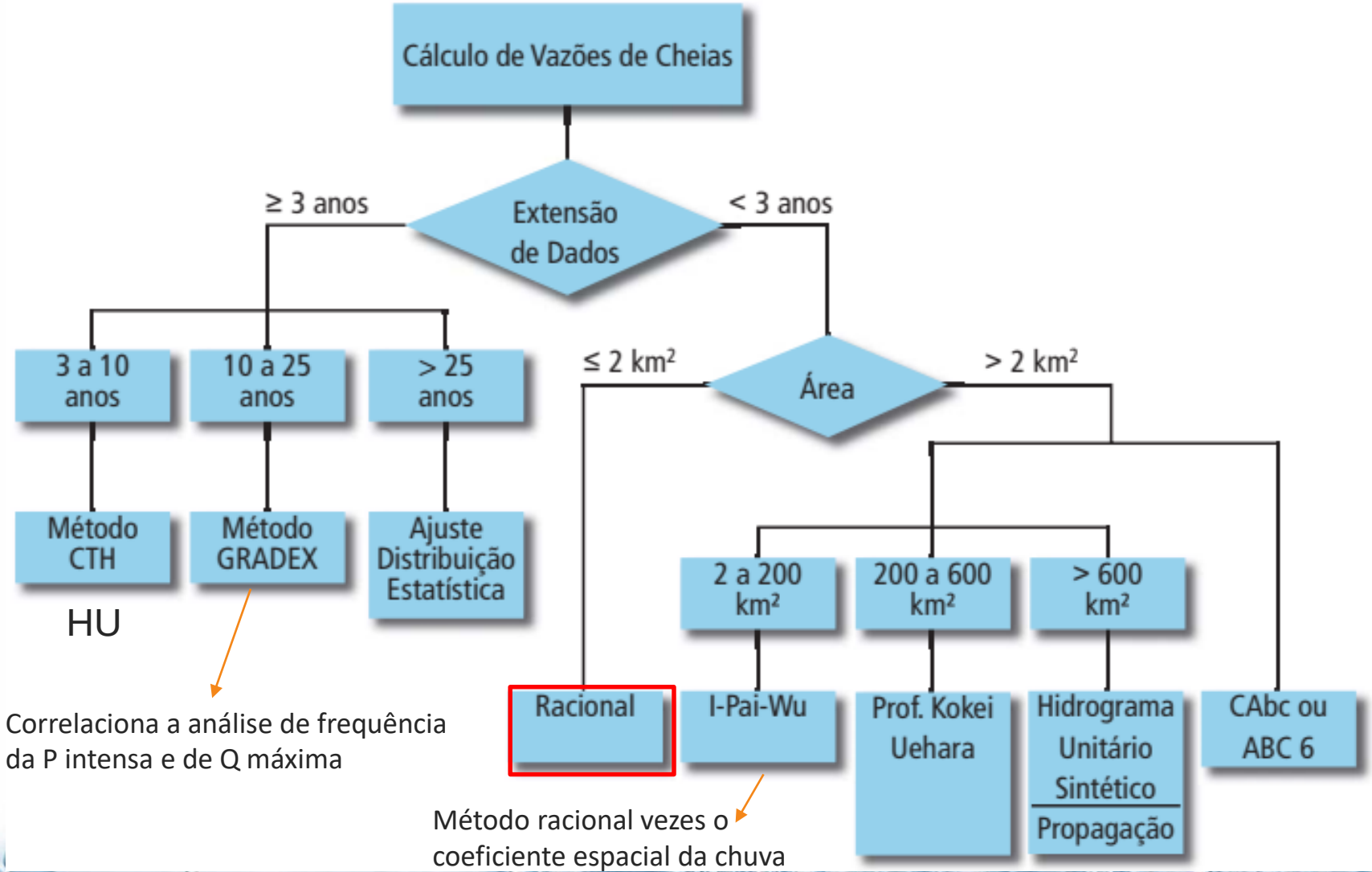
$$t_c = 57 \cdot \left(\frac{L^2}{I_{eq}}\right)^{0,385}$$

ou

$$t_c = 57 \cdot \left(\frac{L^3}{\Delta h}\right)^{0,385}$$

t_c – tempo de concentração (min)
L – comprimento do talvegue do curso d´água (km)
I_{eq} – declividade equivalente (m/km)
Δh – desnível do talvegue entre a seção e o ponto mais distante da bacia (m)

Vazão de projeto



Método Racional

$$Q = 0{,}1667 \cdot C \cdot i \cdot AD$$

Q – vazão de projeto (m^3/s)
AD – área de drenagem (ha)
C – coeficiente de escoamento superficial (runoff)
i – intensidade da precipitação (mm/min)

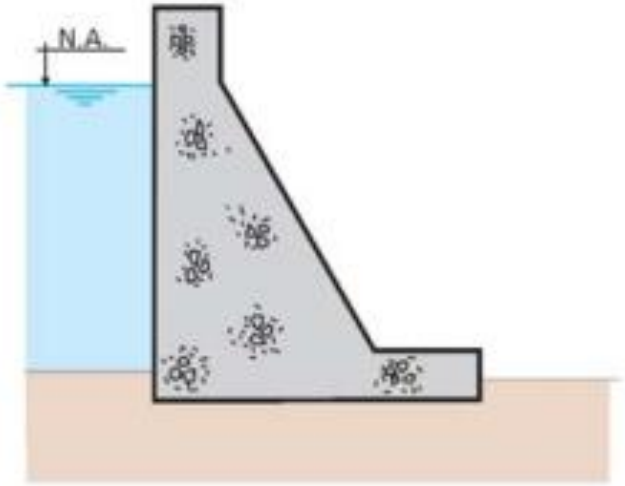
USO DO SOLO OU GRAU DE URBANIZAÇÃO	VALORES DE C	
	MÍNIMOS	MÁXIMOS
Área totalmente urbanizada	0,50	1,00
Área parcialmente urbanizada	0,35	0,50
Área predominantemente de plantações, pastos etc.	0,20	0,35

Barragem

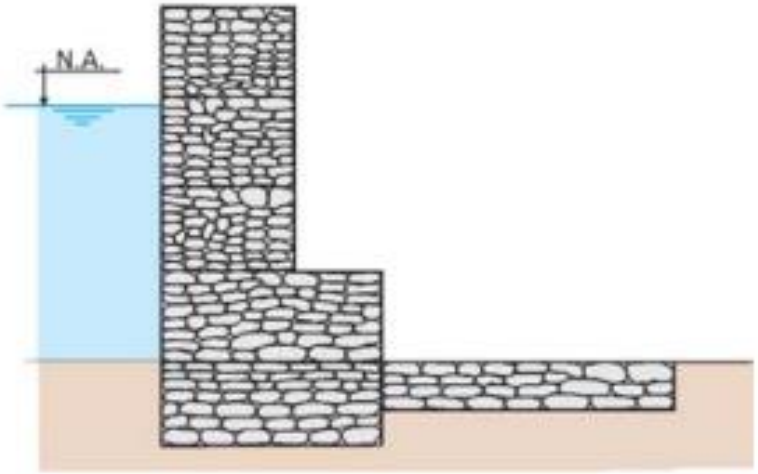
- Estruturas construídas transversalmente aos cursos d´água
- Finalidade
  - Acumular volumes: regularizar vazões
  - Controle de cheias
  - Geração de energia
  - Navegação, lazer, etc.
- Modifica fluxo, altera o nível da água

Tipos de barramento

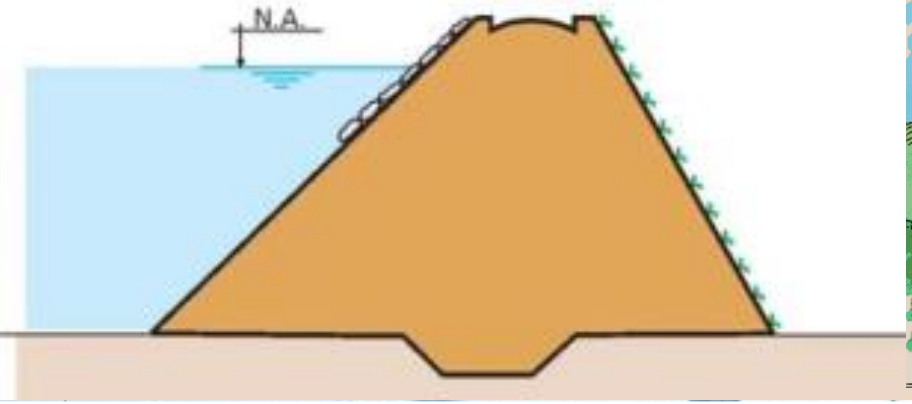
CONCRETO

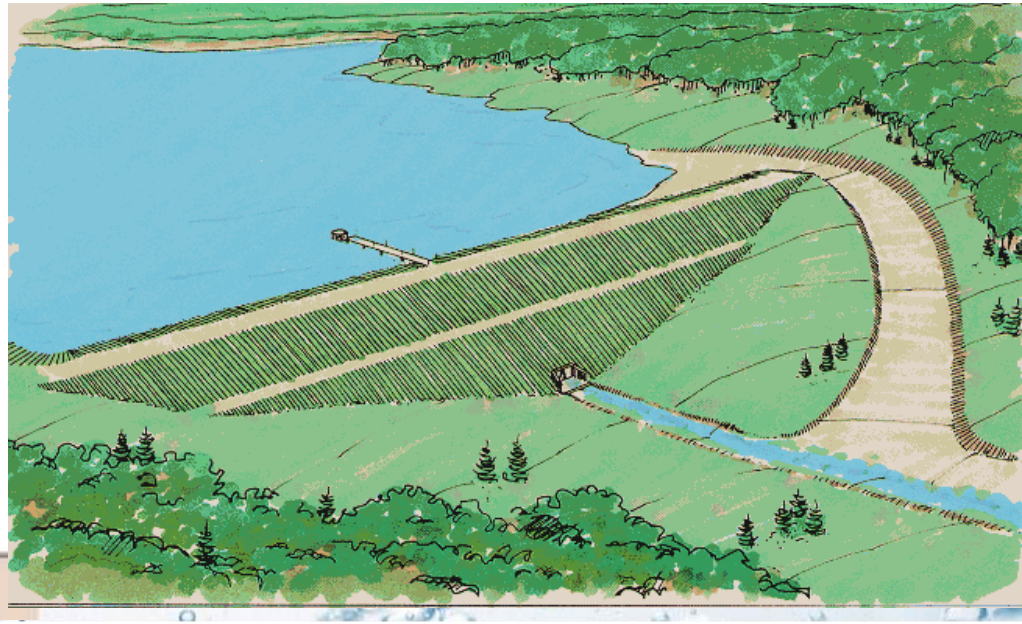


GABIÃO



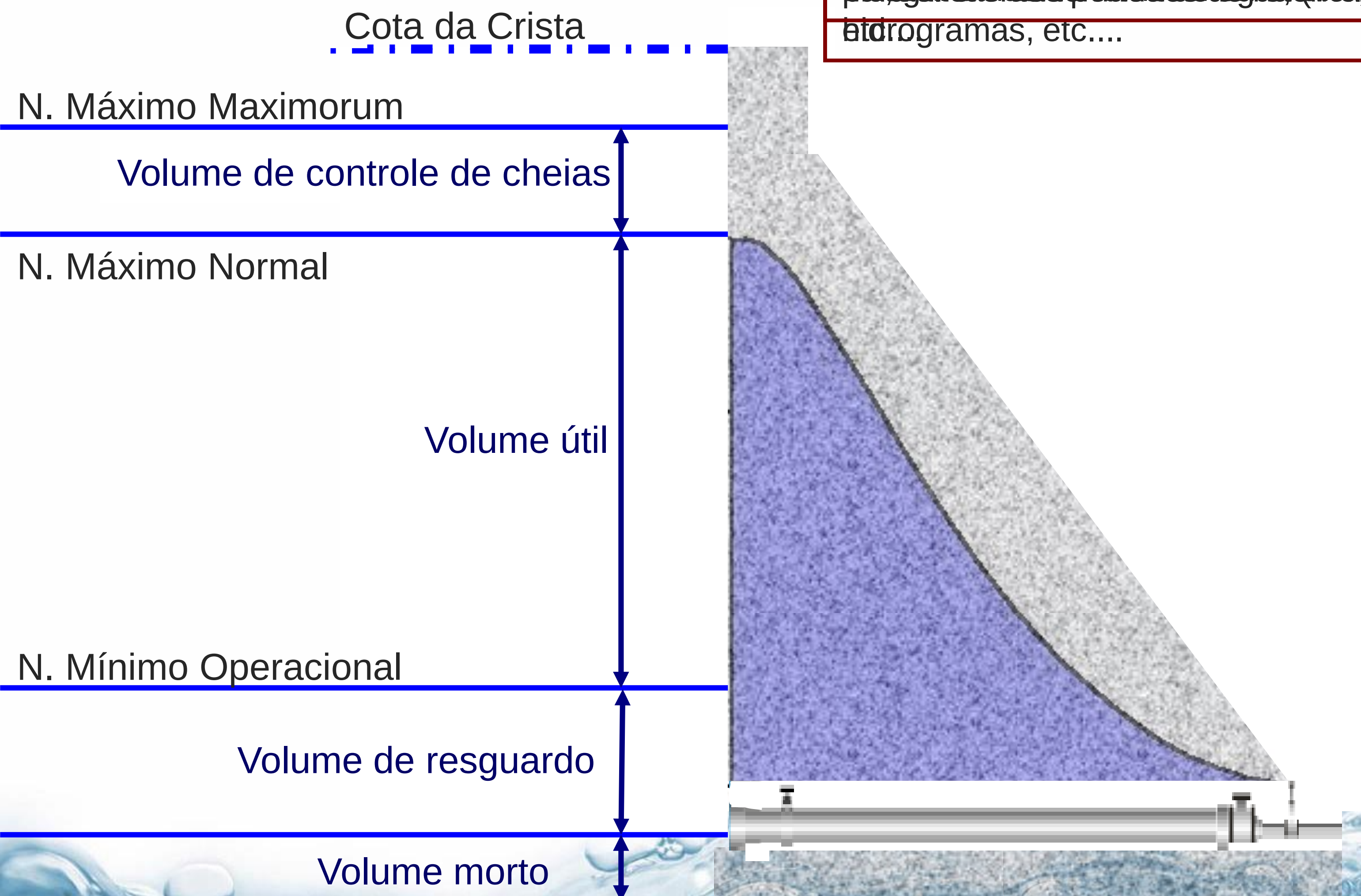
TERRA





Altura de Barragens e Volumes Operacionais

Altura da crista da barragem → hidrogramas, etc....



Dimensionamento do volume útil

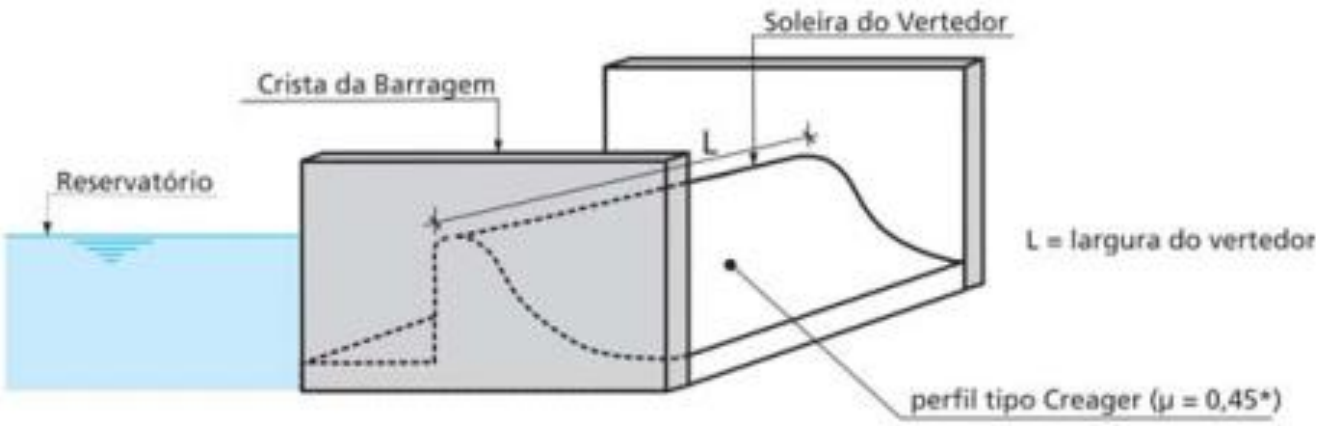
Método do reservatório semi-infinito

1. Admite-se um volume útil, a priori, com um valor muito grande
2. Processa-se um balanço hídrico no reservatório para todo o período de dados da série de vazões
3. O volume armazenado ao final de cada período de cálculo é o menor entre os dois valores seguintes:
4. Volume Final = Volume Inicial + Volume Afluente – Volume Efluente ou
   Volume Final = Volume Útil do reservatório

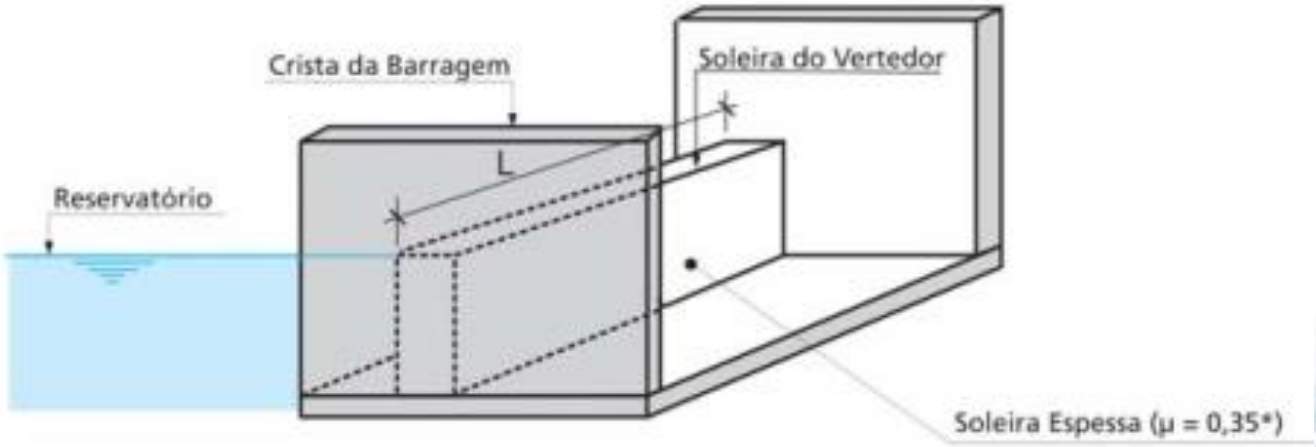
Vertedor (extravasor) de superfície

- Permite a passagem das vazões do reservatório para jusante
- Dimensionado para possibilitar o escoamento das vazões de cheia de projeto após o amortecimento, a fim de evitar o extravasamento pelo maciço da barragem

Tipos de soleiras mais comuns



PERFIL TIPO CREAGER



SOLEIRA ESPESSA

$$Q = \mu \cdot L \cdot H \cdot \sqrt{2gH}$$

$$Q = \mu \cdot L \cdot H^{3/2} \cdot \sqrt{2g}$$

Q – vazão (m^3/s)
μ - coeficiente de descarga
H – lâmina d'água sobre a soleira (m)
g – aceleração da gravidade (9,81 m/s^2)
L – largura do vertedor (m)

Projeto Básico de uma Barragem

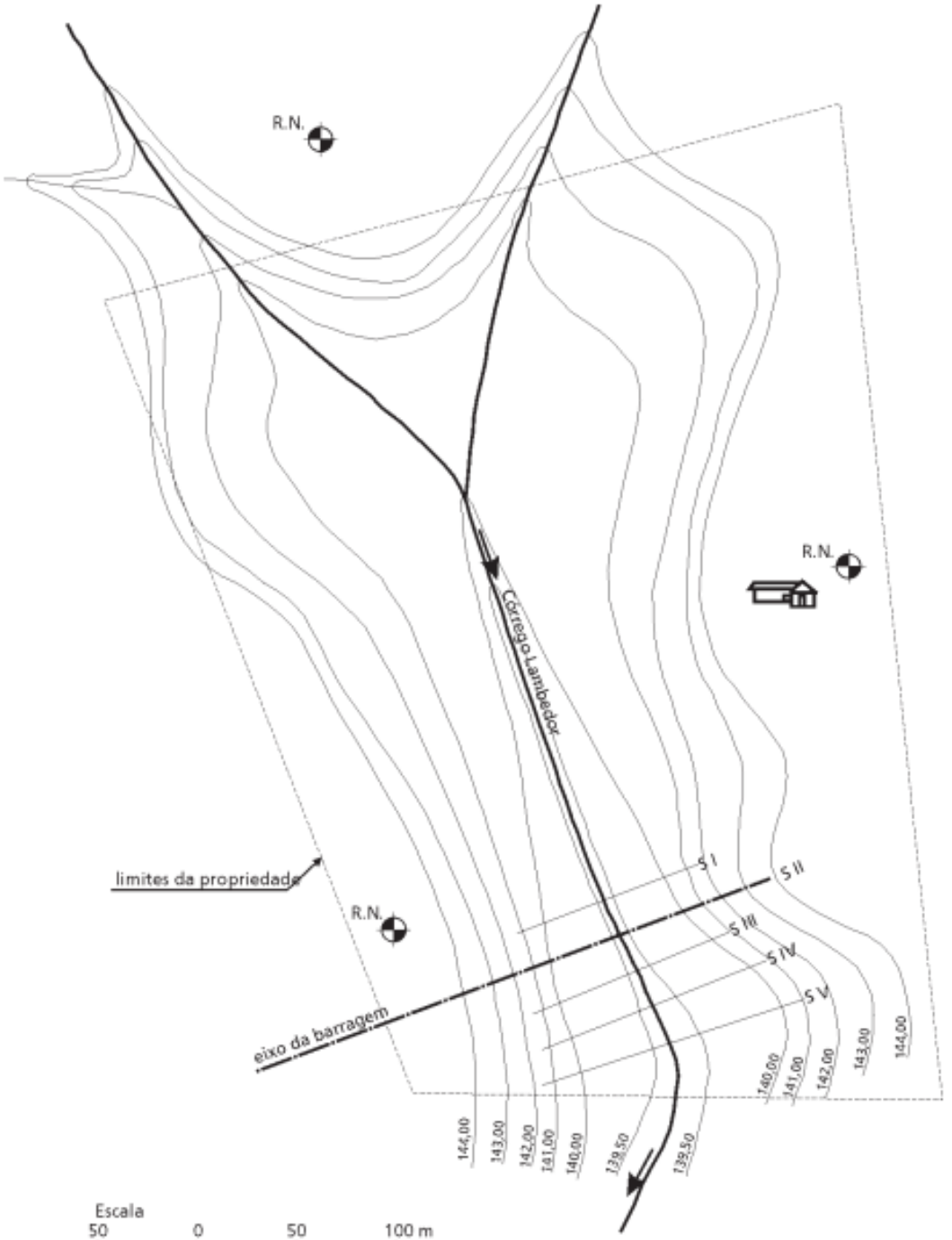
Determinar a cota da crista da barragem, o nível máximo do reservatório (para a enchente de projeto), sua área inundada, a chuva e a vazão de projeto e as dimensões da largura do vertedor

Condições e Levantamentos de campo

- Barragem de terra, com nível controlado por vertedor retangular de soleira livre e espessa
- Mapa planialtimétrico em escala 1:50.000
- Eixo da barragem nas coordenadas UTM: 7.456.480 m N e 251.950 m E
- Levantamento topográfico e cadastrais da área inundada e da faixa de 100 m para jusante do eixo previsto
  - Plantas com curva de nível de metro em metro
  - Planta geral do reservatório em escala 1: 5.000
  - Curva cota-área-volume do local
  - Planta na escala 1:500 para o posicionamento do maciço, do descarregador de fundo e do vertedor de superfície

Levantamento Topográfico e Cadastral

Arbitrário, sem amarração aos RHs IBGE



Dados da bacia

- Córrego Lambedor (sem série histórica de vazões disponível)
- Área de drenagem: AD = 1,87 km^2 (187 ha)
- Comprimento do talvegue: L = 2 km
- Cota do talvegue na seção do barramento = 137,5
- Declividade equivalente do talvegue: I_{eq} = 16,45 m/km
- Bacia rural com presença abundante de vegetação
- Volume a ser armazenado: 65.075 m^3

Cálculos

- **Tempo de Concentração e Vazão de projeto**

$$t_c = 57 \cdot \left(\frac{L^2}{I_{eq}}\right)^{0,385} = 57 \cdot \left(\frac{2^2}{16,45}\right)^{0,385} = 33 \text{ min}$$

Período de retorno: h ≤ 5 m e L ≤ 200 m $\rightarrow$ T = 100 anos

Equações de Chuvas Intensas de SP para Piracicaba, posto D4-104R, série de 1980 a 2013 (Martinez e Piteri, 2016)

$$i_{t,T} = 44,52 \cdot (t + 30)^{-0,8972} + 23,53 \cdot (t + 40)^{-0,9506} \cdot \left[-0,4847 - 0,9062 \cdot ln \cdot ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right]$$

$$i_{33,100} = 44,52 \cdot (33 + 30)^{-0,8972} + 23,53 \cdot (33 + 40)^{-0,9506} \cdot \left[-0,4847 - 0,9062 \cdot ln \cdot ln\left(\frac{100}{100-1}\right)\right]$$

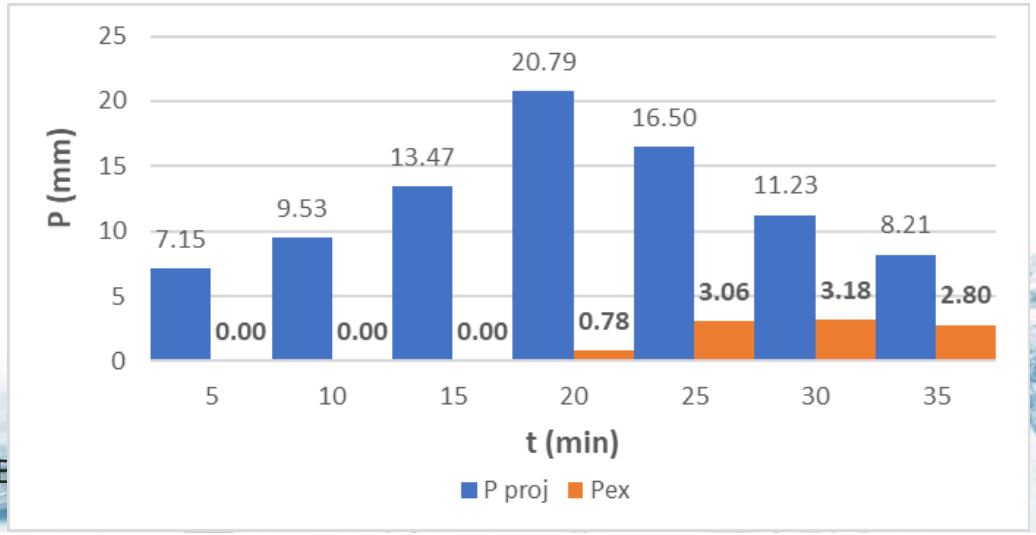
$$i_{33,100} = 2,55 \text{ mm/min}$$

Chuva de Projeto

$$i_{5,100} = 44{,}52 \cdot (5 + 30)^{-0{,}8972} + 23{,}53 \cdot (5 + 40)^{-0{,}9506} \cdot \left[-0{,}4847 - 0{,}9062 \cdot ln \cdot ln\left(\frac{100}{100 - 1}\right)\right]$$

$$i_{5,100} = 4{,}16 \text{ mm/min}$$

t (min)	i (mm/min)	Pac (mm)	P inc (mm)	P proj (mm)
5	4.16	20.79	20.79	7.15
10	3.73	37.30	16.50	9.53
15	3.38	50.76	13.47	13.47
20	3.10	62.00	11.23	20.79
25	2.86	71.53	9.53	16.50
30	2.66	79.73	8.21	11.23
35	2.48	86.89	7.15	8.21

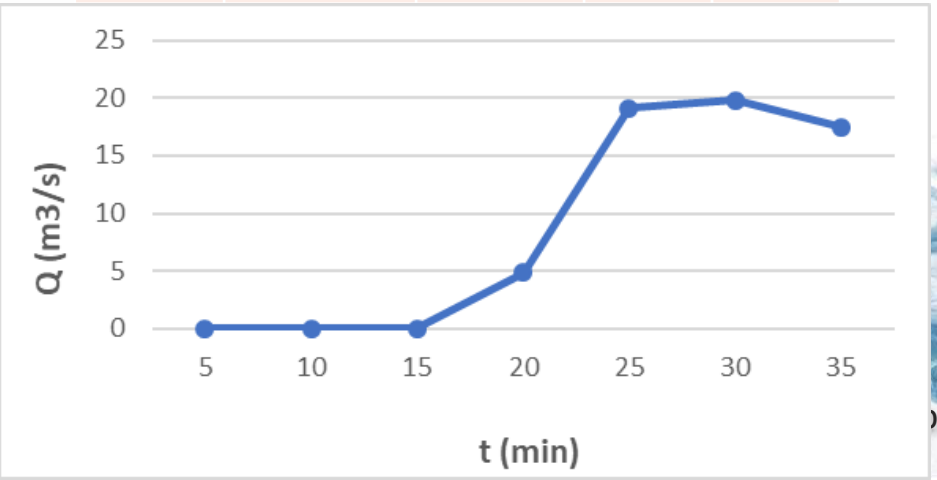


Escoamento superficial – Método NRCS e Racional

NRCS

$P_{exc} = \frac{(P-0{,}2S)^2}{((+0{,}8S)}$ para P > 0,2S $\qquad S = \frac{25400}{CN} - 254$

P proj (mm)	Pproj ac (mm)	Pex ac (mm)	Pex (mm)	Q (m^3/s)
7.15	7.15	0.00	0.00	0.00
9.53	16.69	0.00	0.00	0.00
13.47	30.15	0.00	0.00	0.00
20.79	50.94	0.78	0.78	4.86
16.50	67.45	3.84	3.06	19.09
11.23	78.68	7.02	3.18	19.81
8.21	86.89	9.82	2.80	17.45



Racional

$$Q_{Emax} = 0{,}1667 \cdot C \cdot i \cdot AD$$

$$Q_{Emax} = 0{,}1667 \cdot 0{,}25 \cdot 2{,}55 \cdot 187 = 19{,}87\ m^3/s$$

Vazão máxima afluente e Níveis do reservatório

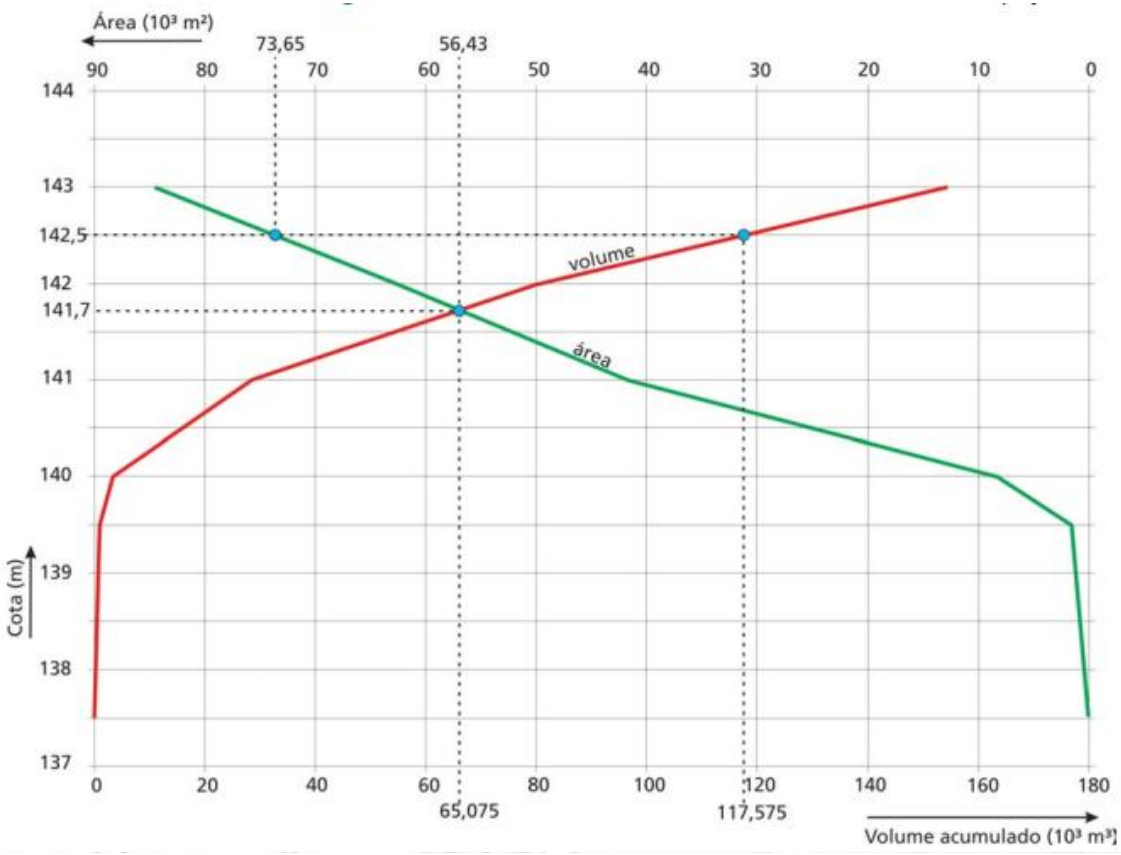
Nível máximo maximorum: com base no levantamento topográfico e cadastral, as interferências na vegetação e infraestruturas definiu-se o valor de **142,5 m**.

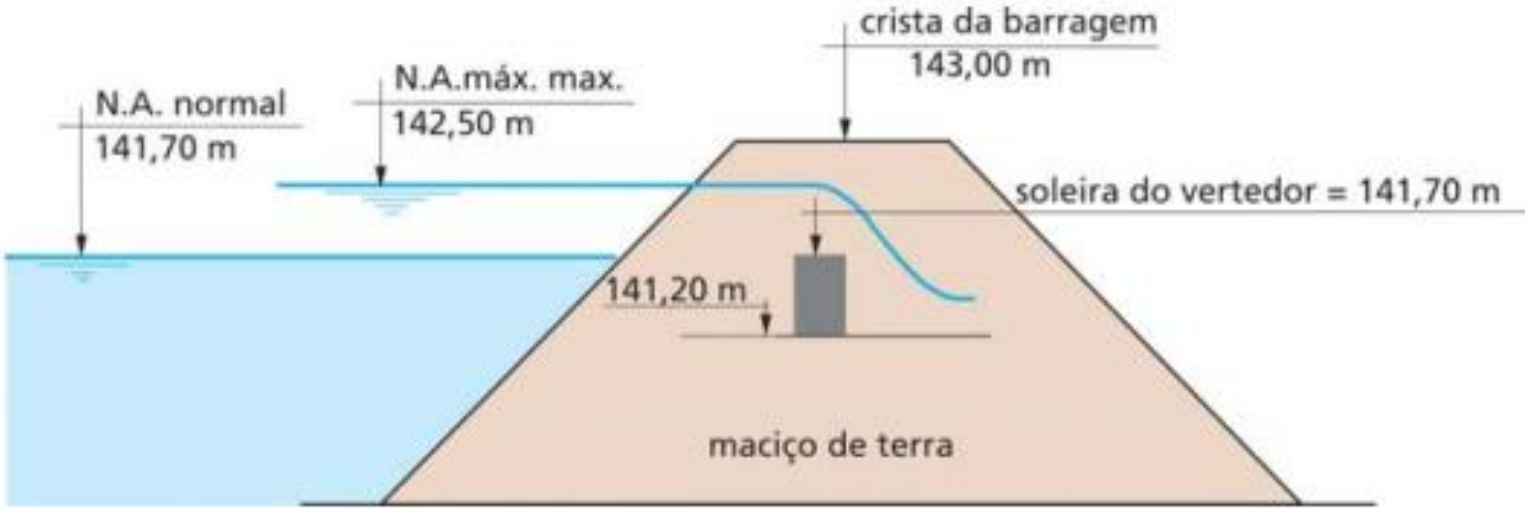
Cota da crista do maciço: NA máx max = 142,5 + Borda livre (0,5 m) = **143,0 m**

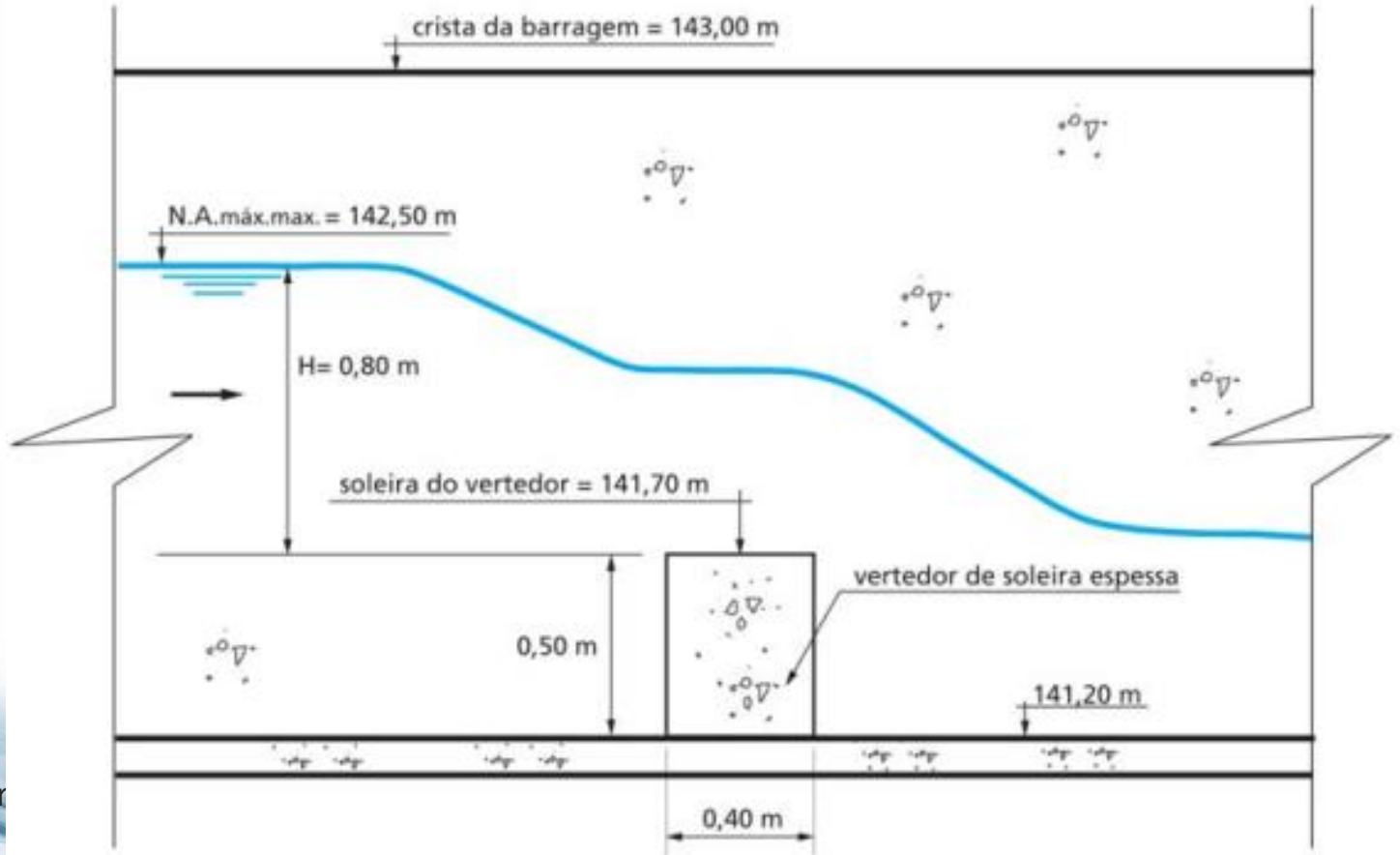
Cota da soleira do vertedor: NA normal

C (m)	A (m^2)	V (m^3)
137.5	0	0
139.5	1500	1000
140	8300	3450
141	41800	28500
142	62700	80750
143	84600	154400

141,7 ➡ ⬅ 65075

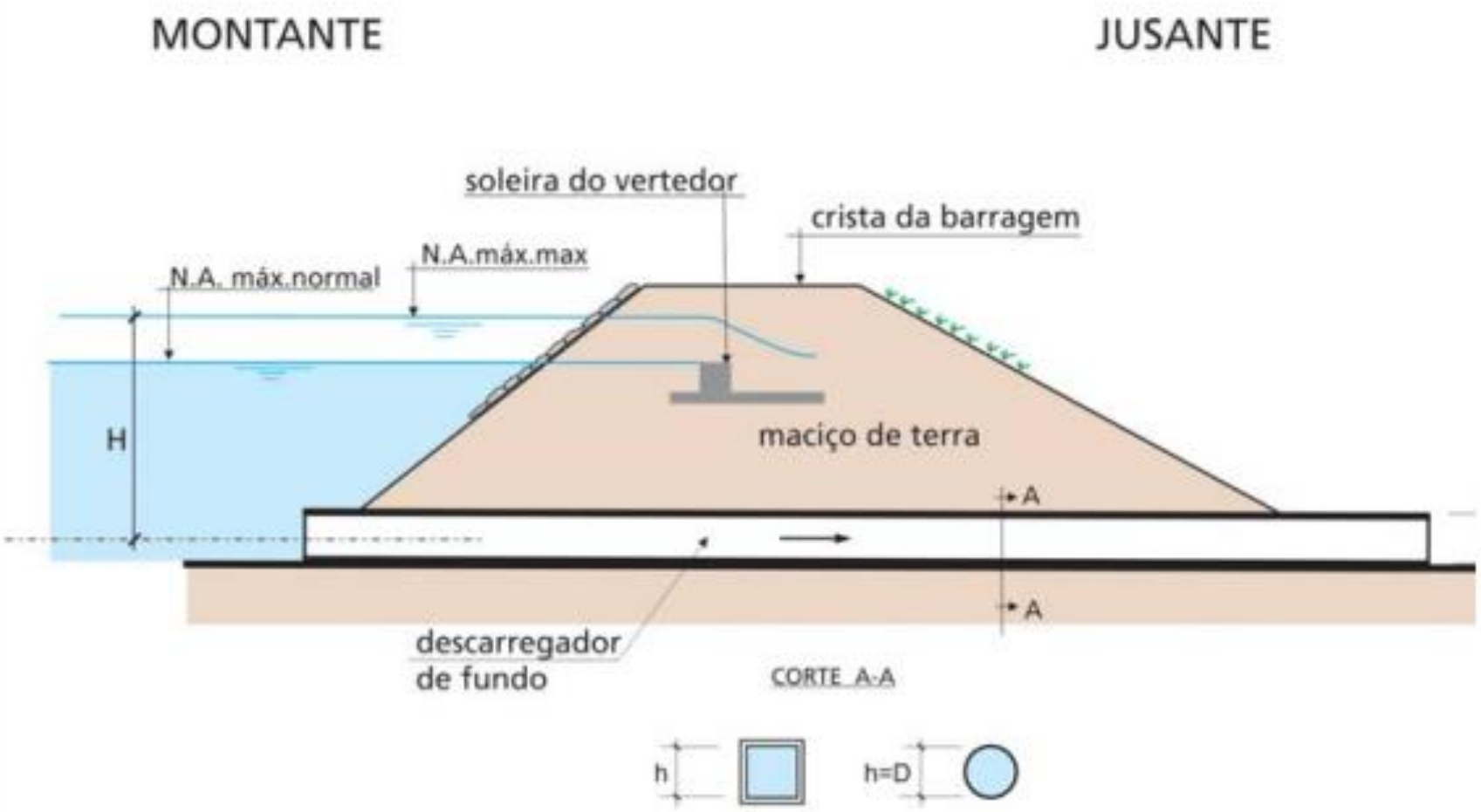



crista da barragem
143,00 m
N.A. normal
141,70 m
N.A.máx. max.
142,50 m
soleira do vertedor = 141,70 m
141,20 m
maciço de terra


crista da barragem = 143,00 m
N.A.máx.max. = 142,50 m
H= 0,80 m
soleira do vertedor = 141,70 m
vertedor de soleira espessa
0,50 m
141,20 m
0,40 m

Continua na 2ª Parte...

Descarregador de fundo



Descarregador de fundo – Dimensionamento hidráulico

- Escoamento em regime uniforme e permanente

Conduto Livre

$$Q = \frac{1}{n} \cdot {R_H}^{2/3} \cdot i^{1/2} \cdot A_m$$

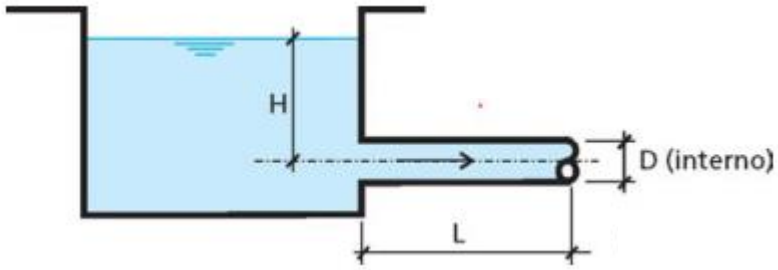
$$R_H = \frac{A_m}{P_m}$$

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

Q – vazão (m^3/s)
n – coeficiente de rugosidade de Manning
R_H – raio hidráulico (m)
i – declividade média (m/m)
A_m – área molhada (m^2)
P_m – perímetro molhado (m)
Δh – diferença de cotas de montante e jusante (m)
L – comprimento do tubo

Conduto Forçado

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2gH}$$

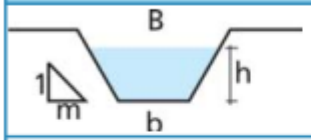
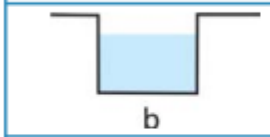
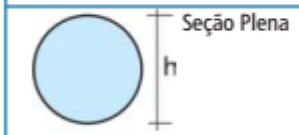
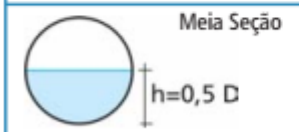
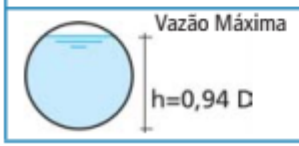


Para tubo curto ($3D \leq L < 500D$), com descarga livre
Q – vazão (m^3/s)
A – área da seção transversal (m^2)
g – aceleração da gravidade (9,81 m/s^2)
H – carga sobre o descarregador (m)
C_d – coeficiente de descarga (0,6 para L/D até 60)

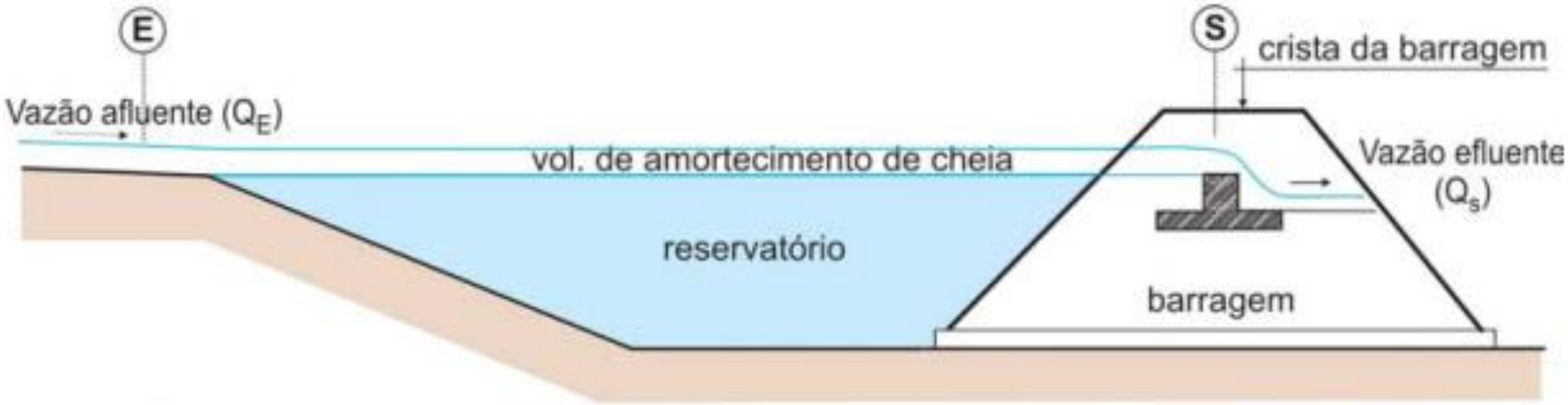
n de Manning e características hidráulicas de seções transversais

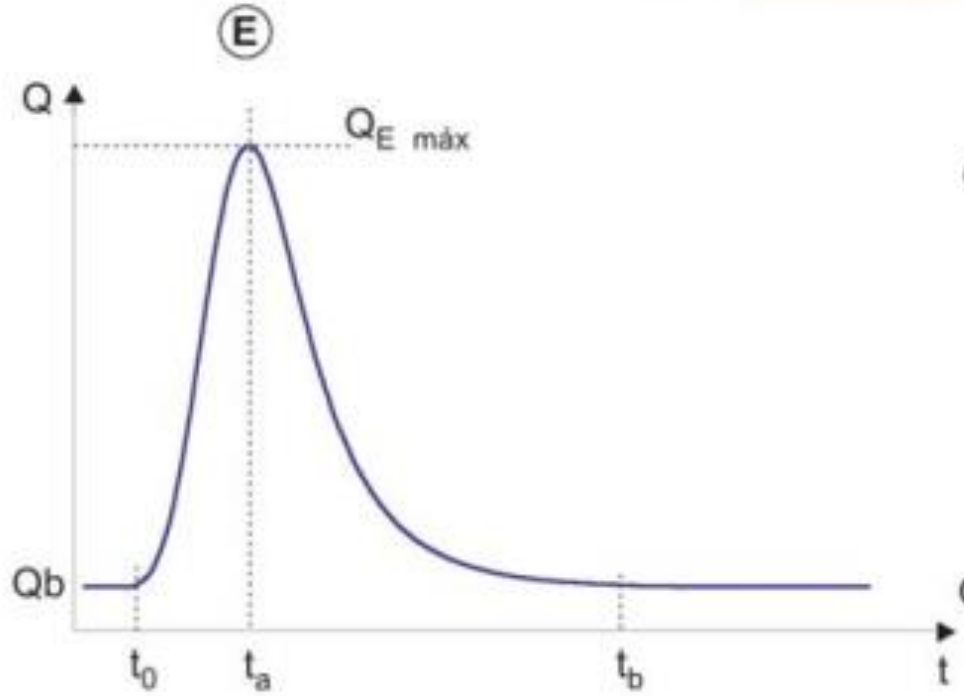
REVESTIMENTO	n
Terra	0,035
Rachão	0,035
Gabião	0,028
Pedra argamassada	0,025
Aço corrugado	0,024
Concreto[6]	0,018

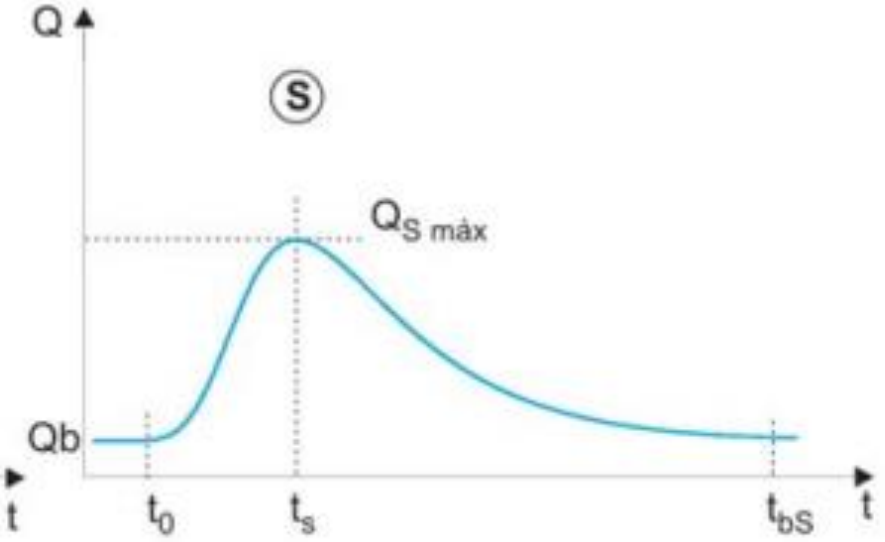
6) n= 0,013 para concreto bem acabado, de traçado retilíneo, com águas limpas

Geometria da Seção	Área Molhada (A_m)	Perímetro Molhado (P_m)	Raio Hidráulico (R_H)	Largura Superficial (B)
	(b+mh)h	$b+2h\sqrt{1+m^2}$	$\frac{(b+mh)h}{b+2h\sqrt{1+m^2}}$	b+2mh
	b . h	b+2h	$\frac{b \cdot h}{b+2h}$	b
	$\frac{\pi . D^2}{4}$	$\pi . D$	$\frac{D}{4}$	----
	$\frac{\pi . D^2}{8}$	$\frac{\pi . D}{2}$	$\frac{D}{4}$	----
	$0,7662 . D^2$	$2,6467 . D$	$0,2895 . D$	----

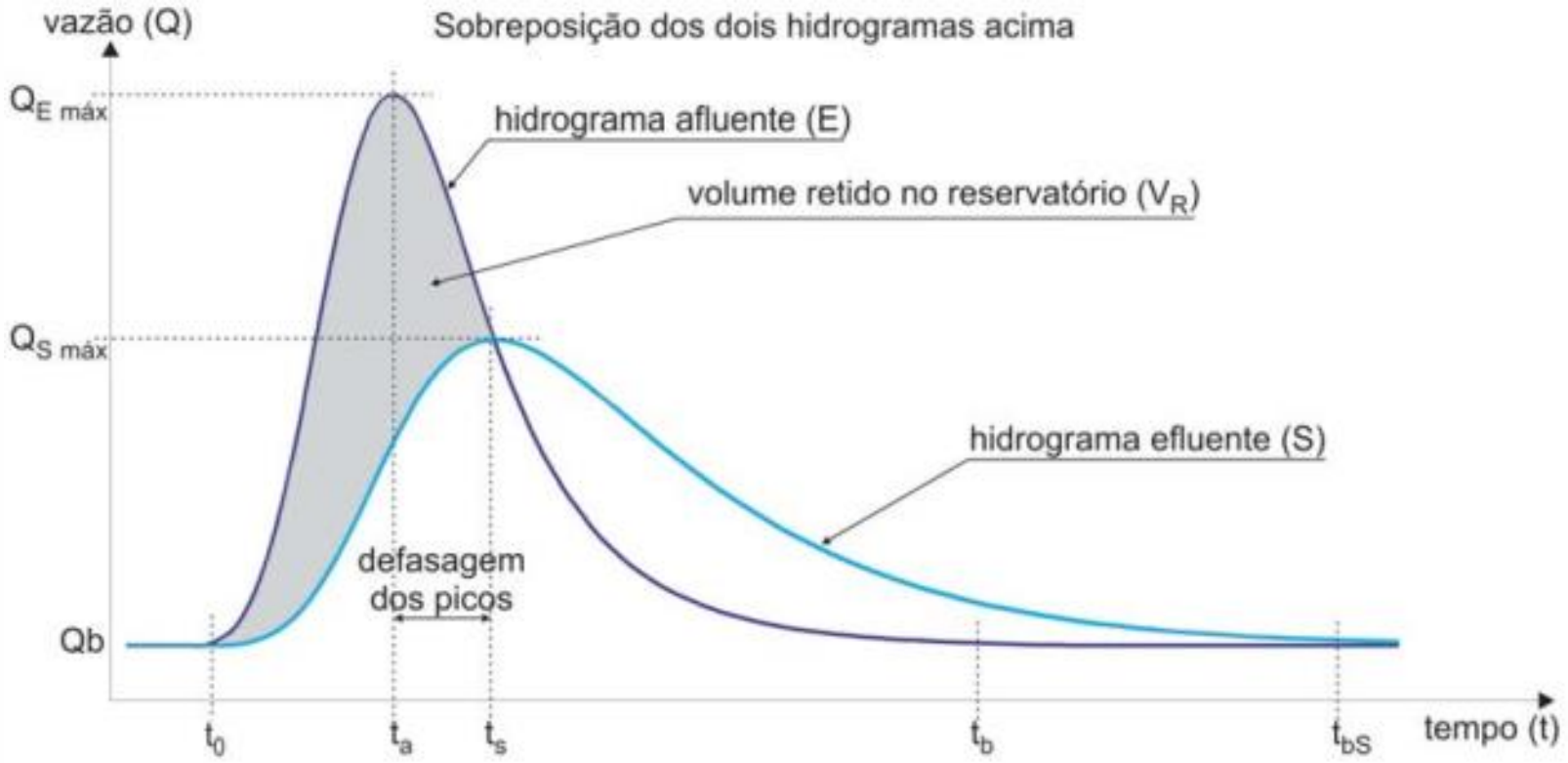
Amortecimento da cheia – Método simplificado







Amortecimento da cheia – Método simplificado



t_0 = início da passagem da onda de cheia

Hidrograma das vazões que entram no reservatório (E):

$t_a - t_0$ = tempo de ascensão

$t_b - t_0$ = tempo de base

Hidrograma das vazões que saem do reservatório (S):

$t_s - t_0$ = tempo de ascensão

$t_{bS} - t_0$ = tempo de base

$t_s > t_a$ e $t_{bS} > t_b$

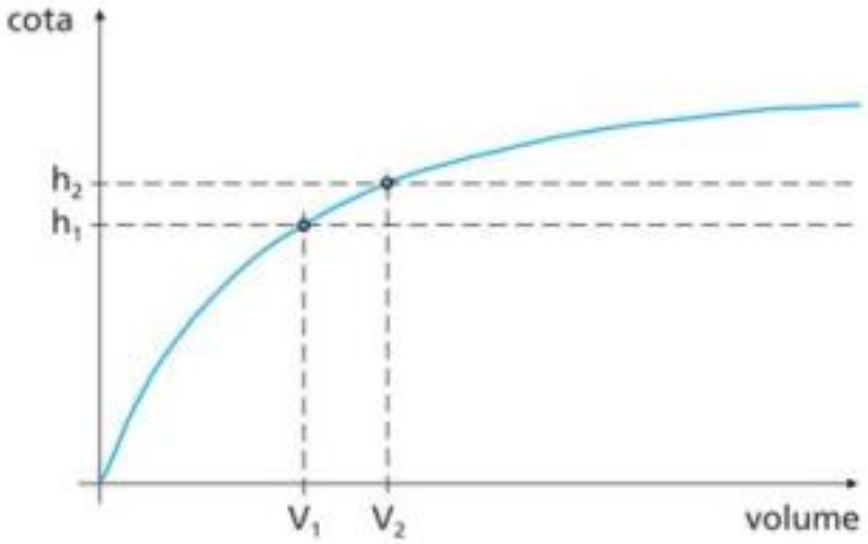
$t_s - t_a$ = defasagem dos picos

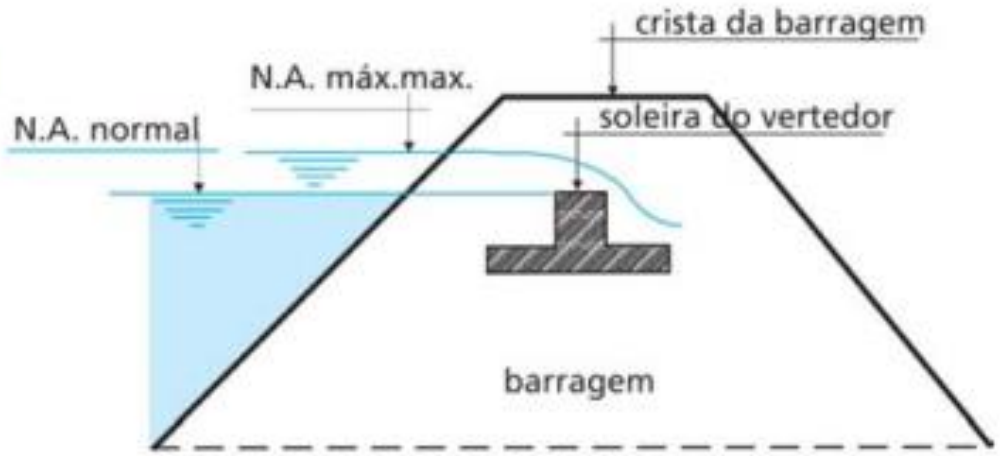
Q_b = vazão de base do curso d'água

$Q_{E\ máx}$ = vazão máxima que entra no reservatório (pico da enchente afluente)

$Q_{S\ máx}$ = vazão máxima que sai do reservatório após o amortecimento

Curva cota-volume do reservatório

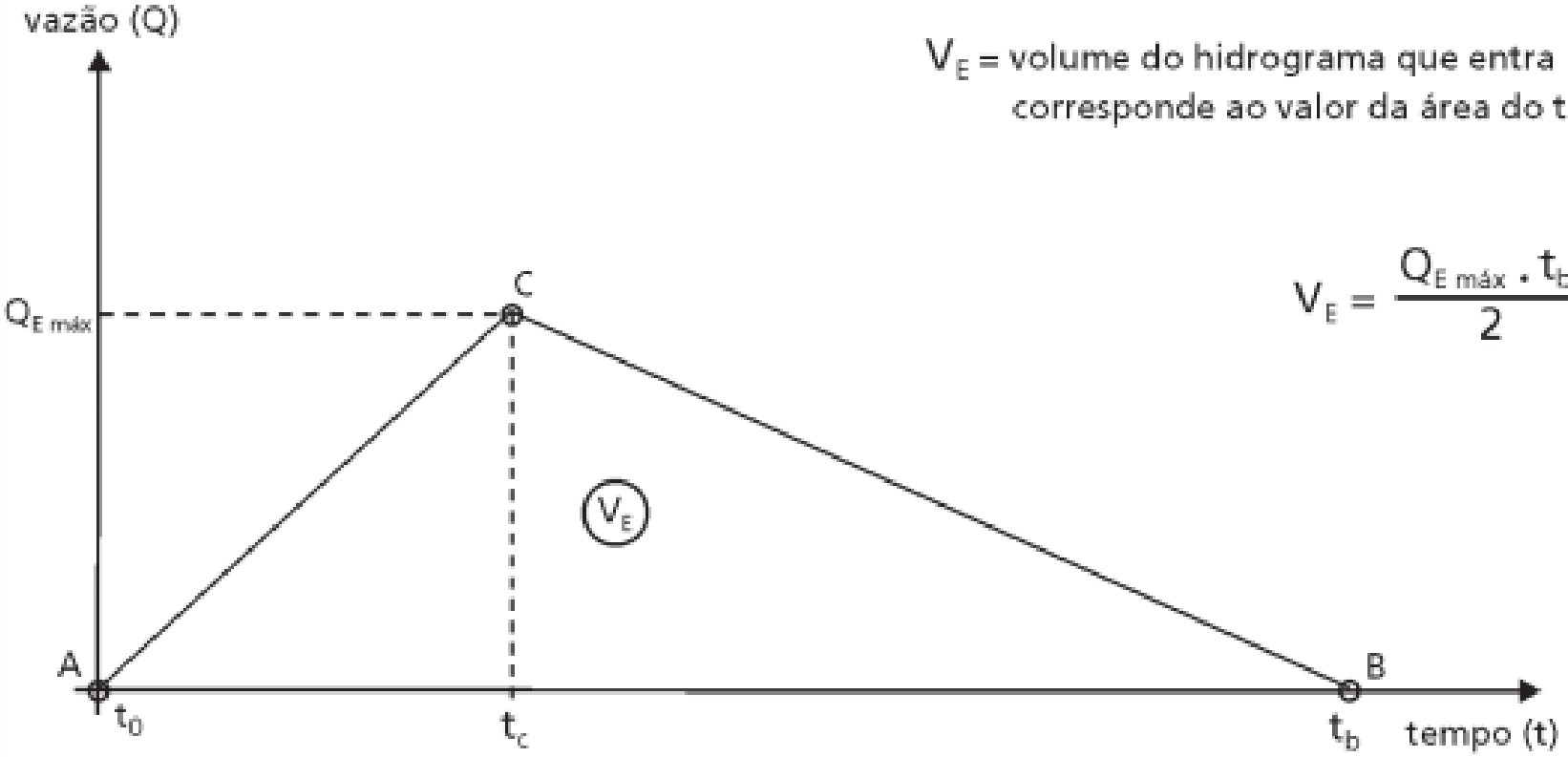




N.A. máx.max. = nível d'água máximo*maximorum*

$V_R = V_2 - V_1$ = volume de amortecimento de cheia

Hidrograma triangular de enchente



V_E = volume do hidrograma que entra no reservatório: corresponde ao valor da área do triângulo ACB

$$V_E = \frac{Q_{E\ máx} \cdot t_b}{2}$$

t_0 = zero (considerado)

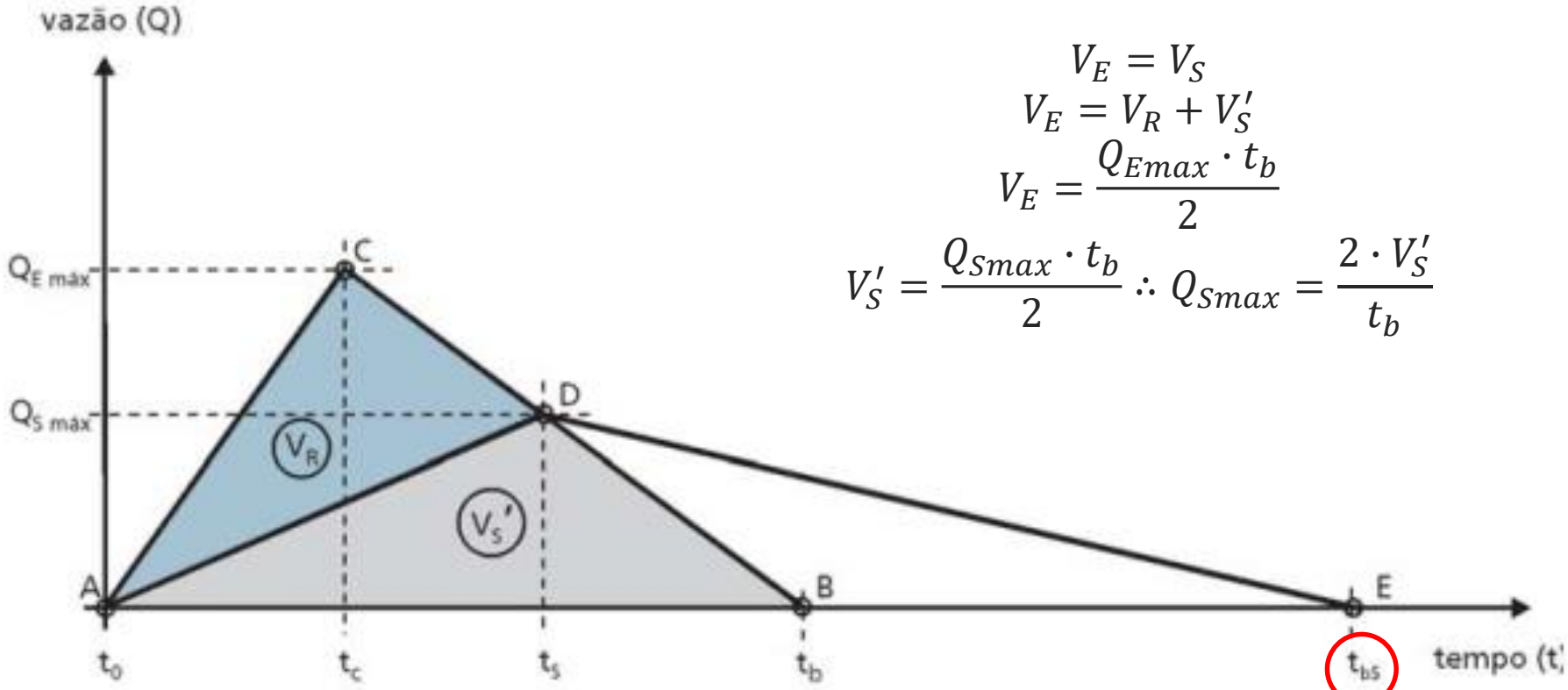
t_a = tempo de ascensão. No Método Racional $t_a = t_c$ (tempo de concentração da bacia)

t_b = tempo de base

$t_b - t_c$ = tempo de recessão

Hidrogramas triangulares afluente e efluente

No início da afluência da cheia o nível da água no reservatório é a mesma da cota da soleira do vertedor.



$$V_E = V_S$$

$$V_E = V_R + V_S'$$

$$V_E = \frac{Q_{Emax} \cdot t_b}{2}$$

$$V_S' = \frac{Q_{Smax} \cdot t_b}{2} \therefore Q_{Smax} = \frac{2 \cdot V_S'}{t_b}$$

Desconhecido

Q_E = vazão de enchente que entra no reservatório (hidrograma ACB)

Q_S = vazão que sai do reservatório pelo extravasor (hidrograma ADE)

$t_b = 3\ t_c$ $\quad$ t_0 = zero

Cálculo da vazão e da largura do vertedor

1. **Determinar t_c e Q_{Emax}**
2. $t_b = 3 \cdot t_c$; $V_E = \frac{Q_{Emax} \cdot t_b}{2}$
3. **Por meio da curva cota-volume** $V_R = V_2 - V_1$
4. **Calcular** $V_E = V_R + V_S' \therefore V_S' = V_E - V_R$; $Q_{Smax} = \frac{2 \cdot V_S'}{t_b}$
5. **Calcular** $L = \frac{Q_{Smax}}{\mu \cdot H^{3/2} \cdot \sqrt{2g}}$

Resumo de dados

I_{eq} = 16,45 m/km

$$t_c = 57 \cdot \left(\frac{L^2}{I_{eq}}\right)^{0,385} = 57 \cdot \left(\frac{2^2}{16,45}\right)^{0,385} = 33 \text{ min}$$

T = 100 anos $i_{33,100}$ = 2,55 mm/min

Q_{Emax} = 19,81 m³/s (NRCS) Q_{Emax} = 19,87 m³/s Q_{Emax} = 20 m³/s (Adotada)

Cota máx max = 142,5 m (definida previamente em função dos entendimentos do empreendedor e o levantamento topográfico e cadastral)

$V_2 = V_{máx\ max}$ = 117575 m³ (obtido da curva cota-área-volume)

Cota soleira vertedor = 141,7 m (A área a ser inundada não deve ser maior que 6 ha. A interseção das curvas cota-área e cota-volume é 56430 m², menor que o limite pré-determinado, com Cota = 141,7 m)

Carga hidráulica acima do vertedor = H = 142,5 – 141,7 = 0,8 m

$V_1 = V_{NA}$ = 65075 m³

Cálculos

Tempo de base: $t_b = 3 \cdot t_c \ = 3 \cdot 33 = 99 \text{ min} = 5940 \text{ seg}$

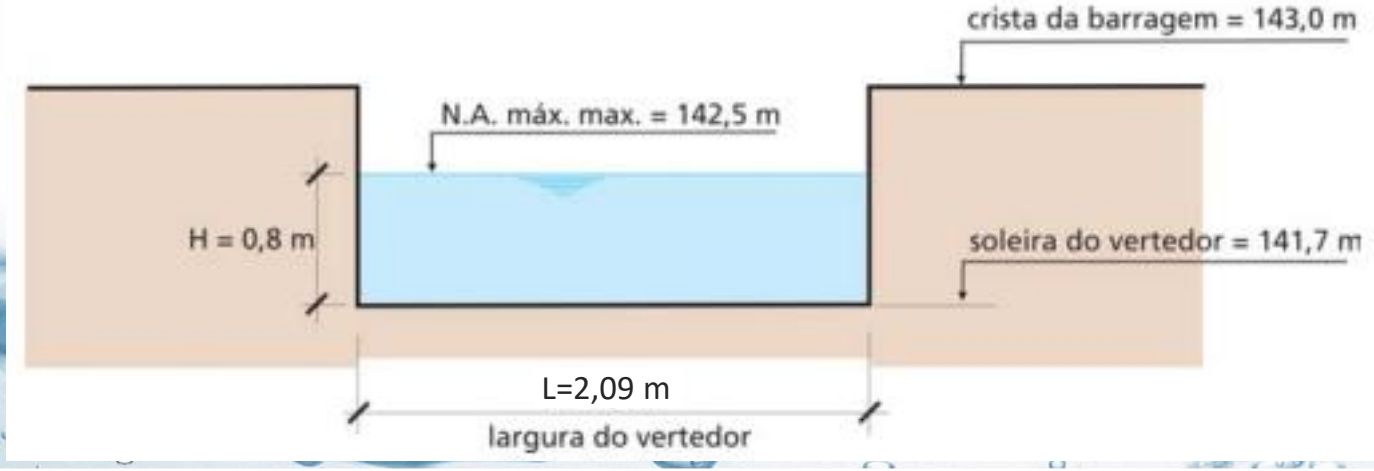
Volume de entrada: $\frac{Q_{Emax} \cdot t_b}{2} \ = \frac{20 \cdot 5940}{2} = 59400 \text{ m}^3$

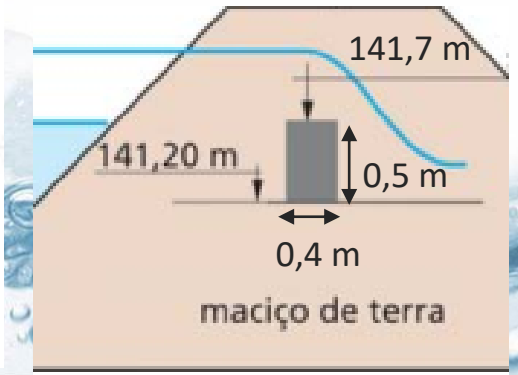
Volume para amortecimento de cheia: $V_R = V_2 - V_1 \ = 117575 - 65075 = 52500 \text{ m}^3$

$V_S' = V_E - V_R \ = 59400 - 52500 = 6900 \text{ m}^3$

Vazão de saída no vertedor: $Q_{Smax} = \frac{2 \cdot V_S'}{t_b} \ = \frac{2 \cdot 6900}{5940} = 2{,}32 \text{ m}^3/\text{s}$

Largura do vertedor (μ = 0,35, H = 0,8 m): $L = \frac{Q_{Smax}}{\mu \cdot H^{3/2} \cdot \sqrt{2g}} \ = \frac{2{,}32}{0{,}35 \cdot 0{,}8^{1{,}5} \cdot \sqrt{2g}} = 2{,}09 \text{ m}$





Verificação para a vazão catastrófica

- **Determinar o T associado à vazão catastrófica**

Condição crítica: Carga hidráulica entre a crista da barragem e a soleira do vertedor

H = 143 – 141,7 = 1,3 m

Vazão de saída da cheia catastrófica (L = 2,09 m, C = 0,35): $Q_{Smax} = 0{,}35 \cdot 2{,}09 \cdot 1{,}3^{1{,}5} \cdot \sqrt{2g} = 4{,}8\ \mathrm{m^3/s}$

$$V_S' = \frac{Q_{Smax} \cdot t_b}{2} = \frac{4{,}8 \cdot 5940}{2} = 14256\ \mathrm{m^3}$$

$$V_R = V_{143} - V_{141{,}7} = 154400 - 65075 = 89325\ \mathrm{m^3}$$

$$V_E = V_R + V_S' = 89325 + 14256 = 103581\ \mathrm{m^3}$$

$q = (1 - P)^n$
Risco de ocorrência
$R = 1 - (1 - P)^n$

Vazão máxima da cheia catastrófica: $Q_{Emax} = \frac{2 \cdot V_E}{t_b} = \frac{2 \cdot 103581}{5940} = 34{,}88\ \mathrm{m^3/s}$

Intensidade da chuva crítica: $Q = 0{,}1667 \cdot C \cdot i \cdot AD \quad 34{,}88 = 0{,}1667 \cdot 0{,}25 \cdot i \cdot 187 \therefore i = 4{,}475\ \mathrm{mm/min}$

Período de retorno: $4{,}475 = 1{,}0819 + 0{,}3984 \cdot \left[-0{,}4847 - 0{,}9062 \cdot ln \cdot ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right]$

Para T = 1000 anos: i = 3,38 mm/min

Solver Excel: T ≈ 22027 anos

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{1000}\right)^{50} = 0{,}049$$

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{22027}\right)^{50} = 0{,}0023$$

Fim