

PEF3527 – Projeto de Barragens e Diques



Universidade de São Paulo



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental

Aula 5 – Aspectos hidrológicos e barragem
Aula 6 – Projeto de classe: aplicação

Sala S21
11 e 18 de setembro



Conteúdo

Aula 5

- 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

Aula 6

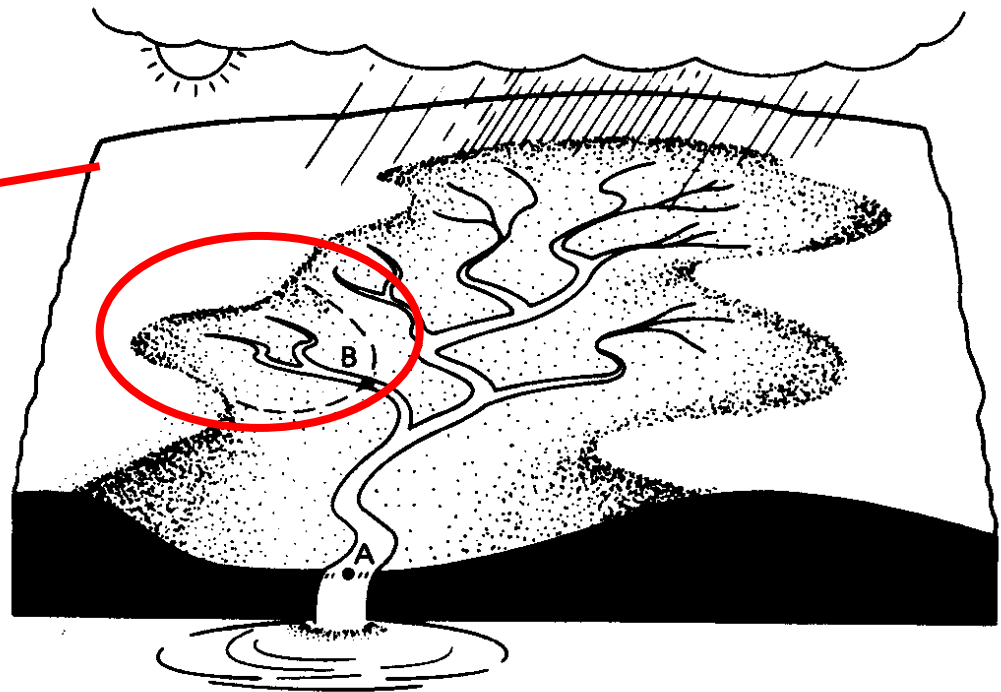
- Barragem
 - Dimensionamento do volume útil
 - Amortecimento de onda de cheia
 - Largura e cota do vertedor
 - Altura da barragem
 - Cota da crista da barragem
- Aplicação (Exercício)



Bacia Hidrográfica - Definição

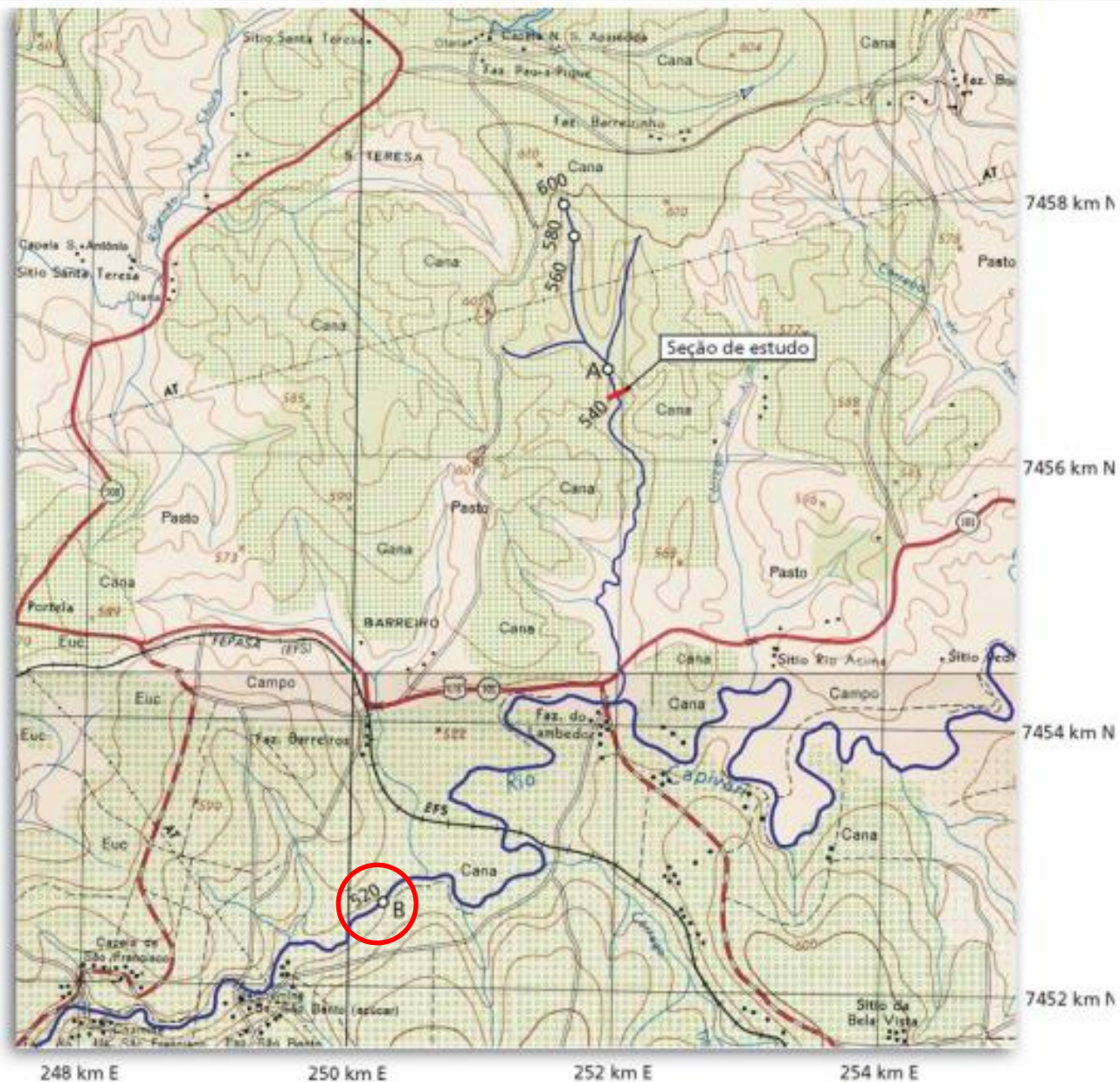
Uma bacia hidrográfica é uma determinada área de terreno que drena água, partículas de solo e material dissolvido para um ponto de saída comum, situado ao longo de um rio, riacho ou ribeirão (Dunne e Leopold, 1978).

... dentro de uma bacia hidrográfica, podem existir inúmeras sub-bacias.

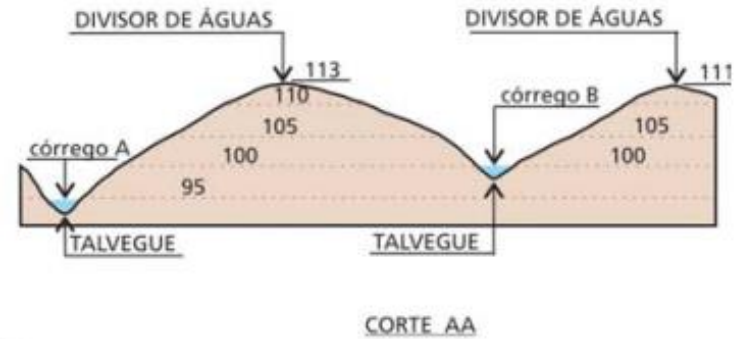
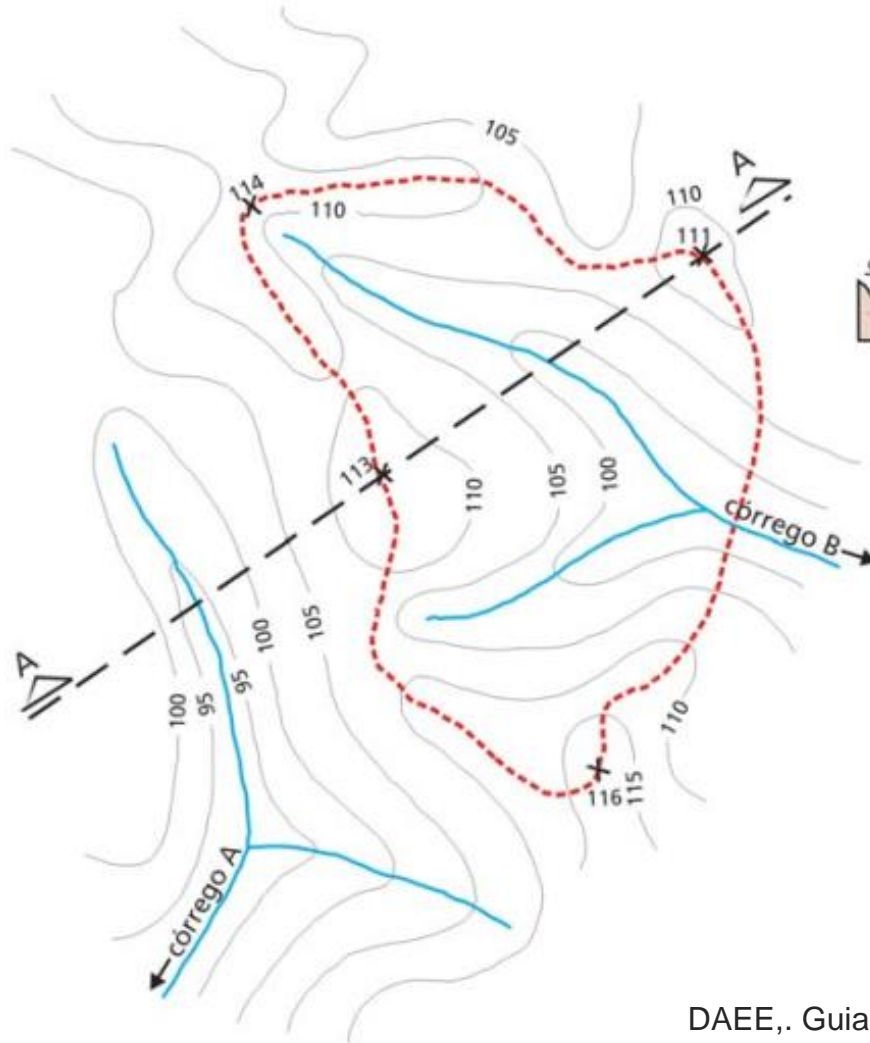


Localização

- Carta planialtimétrica em escala apropriada
- Folha cartográfica de Americana (IBGE 1:50.000 SF-23-Y-A-V-3)



Divisor topográfico



LEGENDA :

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

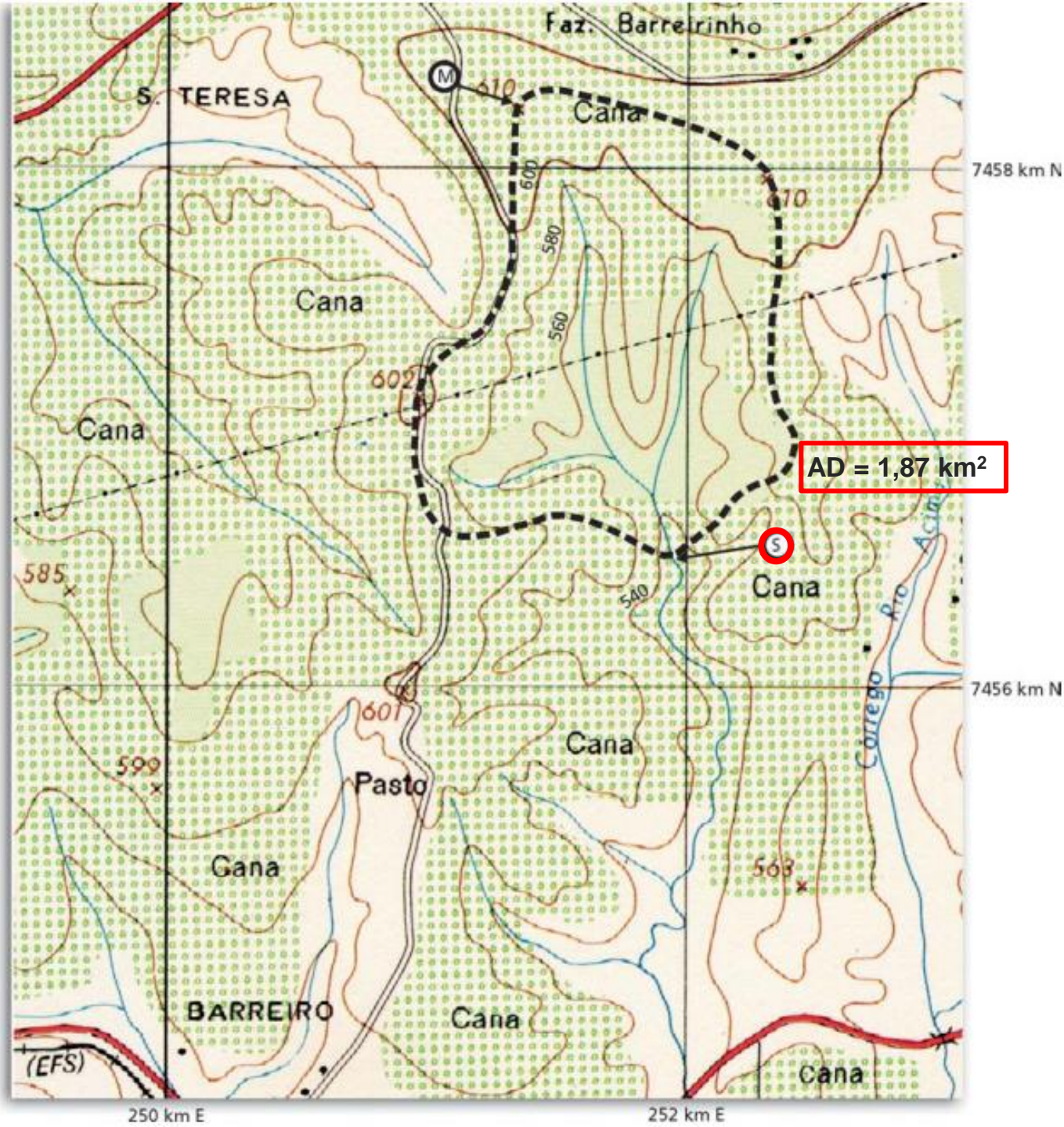
Planta s/ escala

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

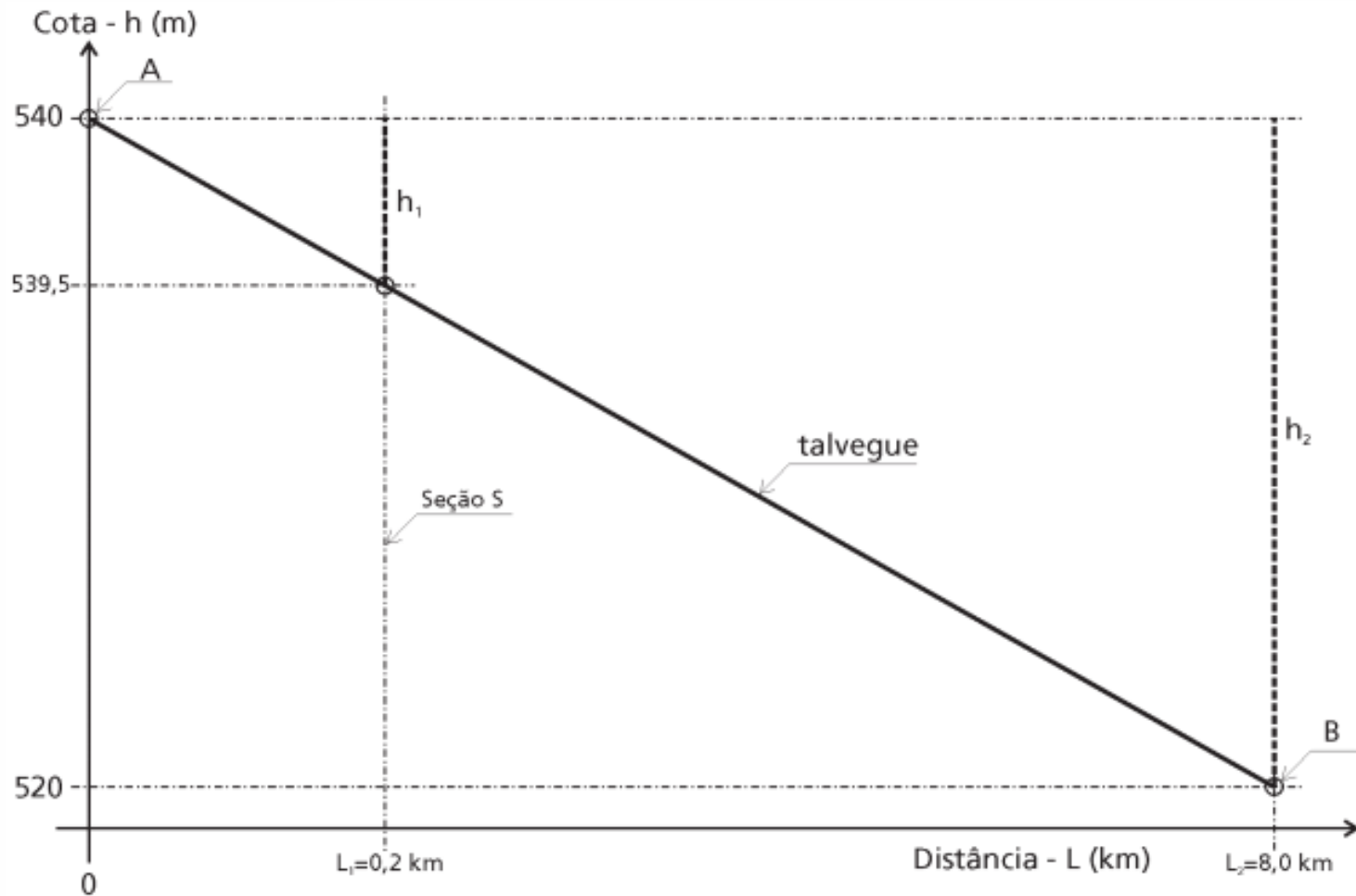


Área de drenagem até a seção S (eixo da barragem)

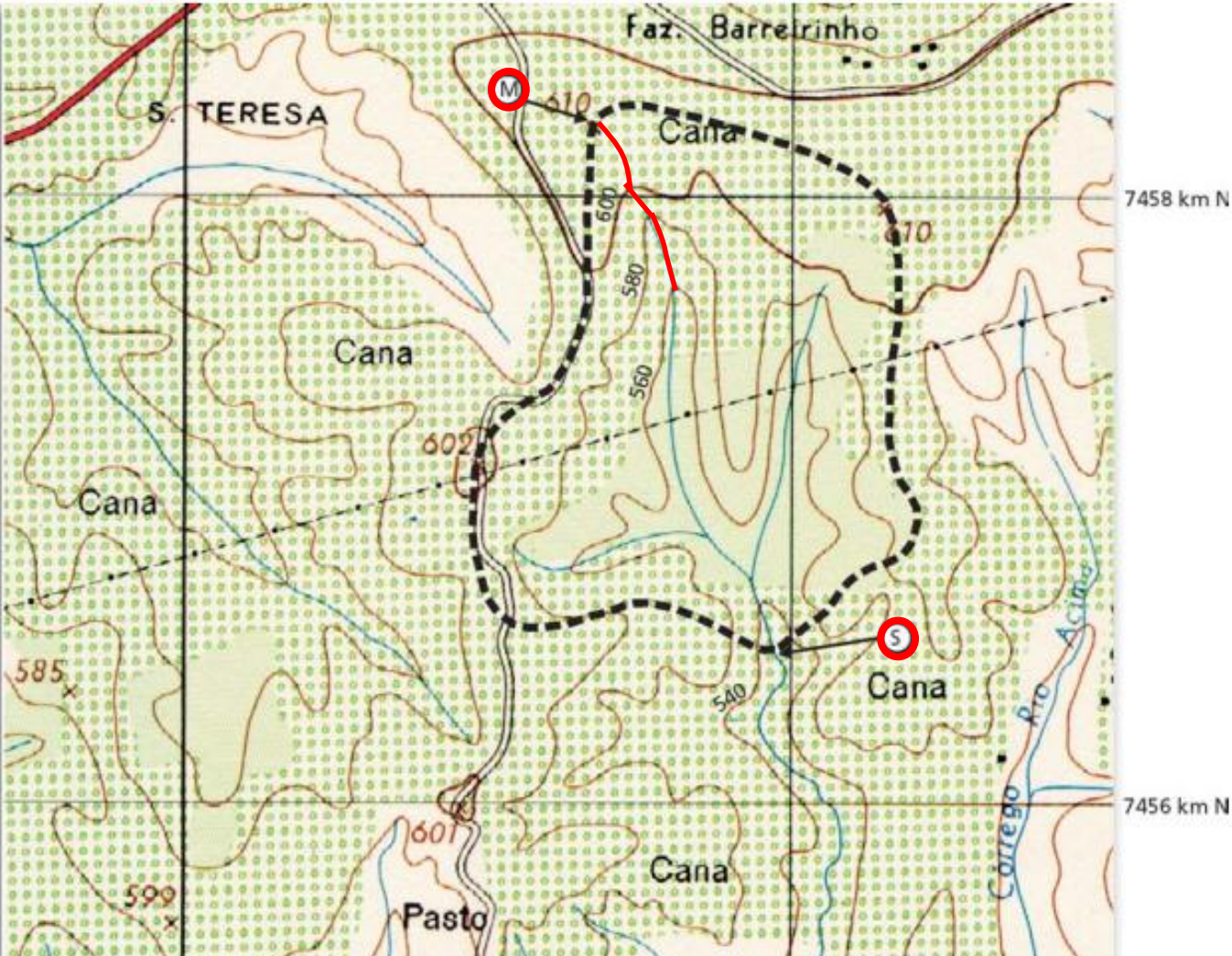
- Delimitação da bacia (o divisor de água intercepta perpendicularmente a curva de nível)
- Comprimento do talvegue principal (L = 2 km)
- Distância S e cota 540 é 0,2 km
- Distância cota 540 e cota 520 é 8 km



Perfil longitudinal entre A e B



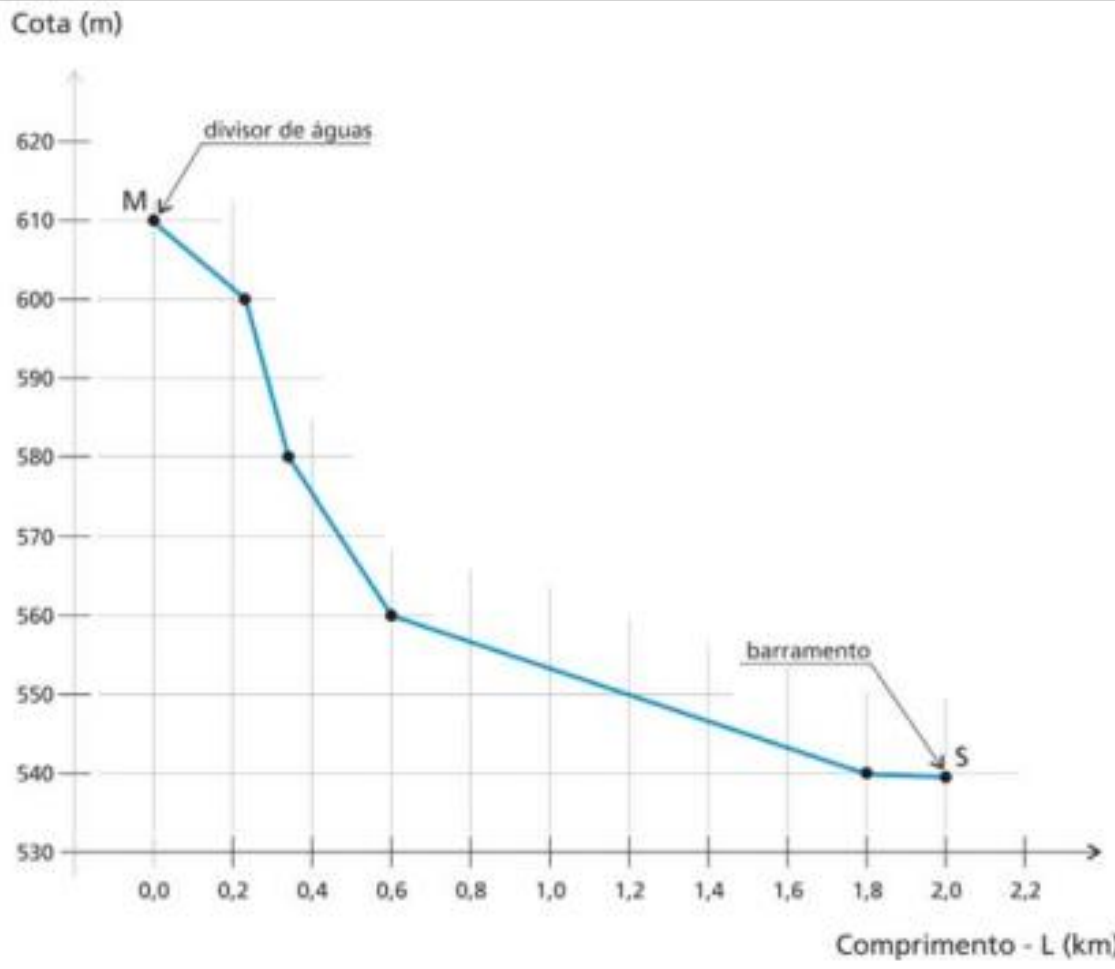
Declividade entre os pontos M e S



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

252 km E

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

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5$$

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

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

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

$$i = \frac{K \cdot T^m}{(t + t_o)^n}$$

- i é a intensidade média da chuva, mm/min
- t é a duração da chuva, min
- T é o período de recorrência, anos
- K , m , n e t_o são parâmetros

Local	K	m	to	n
São Paulo - Pacaembu	29,132	0,89	15	0,181
São Paulo	57,712	1,025	22	0,172
Curitiba	20,65	0,15	20	0,74
Rio de Janeiro	99,154	0,217	26	1,15
Belo Horizonte	24,131	0,1	20	0,84



Conceito de Período de Retorno

$$q_1 = 1 - p$$

→ Probabilidade de não-ocorrência num ano

$$q_n = (1 - p)^n$$

→ Probabilidade de não-ocorrência em um período "n" ("n" anos)

$$q_j = (1 - p)^{j-1} \cdot p$$

→ Probabilidade do evento acontecer pela primeira vez depois de anos normais (j - 1)

$$E(X) = \sum_{i=1}^n x_i p_x(x_i)$$

→ Valor esperado de uma variável aleatória (X)

$$T = E(j) = \sum_{j=1}^{\infty} j(1 - p)^{j-1} \cdot p$$

$$= p + 2(1 - p)p + 3(1 - p)^2 p + 4(1 - p)^3 p + \dots$$

$$= p \left[1 + 2(1 - p) + 3(1 - p)^2 + 4(1 - p)^3 + \dots \right]$$



$$T = E(x) = p \cdot [1 - (1 - p)]^{-2}$$

$$T = \frac{p}{[1 - (1 - p)]^2} = \frac{1}{p}$$

$$(1 + x)^n = 1 + nx + [n(n-1)/2]x^2 + [n(n-1)(n-2)/6]x^3 + \dots$$

$$\text{com } x = -(1 - p) \text{ e } n = -2$$

$$-2 \cdot -1(1 - p) = 2(1 - p)$$



Período de retorno para Barramento

Dimensões (m)	T (anos)
$h \leq 5$ e $L \leq 200$	100
$5 < h \leq 15$ e $L \leq 500$	1000
$h > 15$ ou $L > 500$	10000 ou PMP
Borda livre (freeboard) $f \geq 0,5$ 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)**

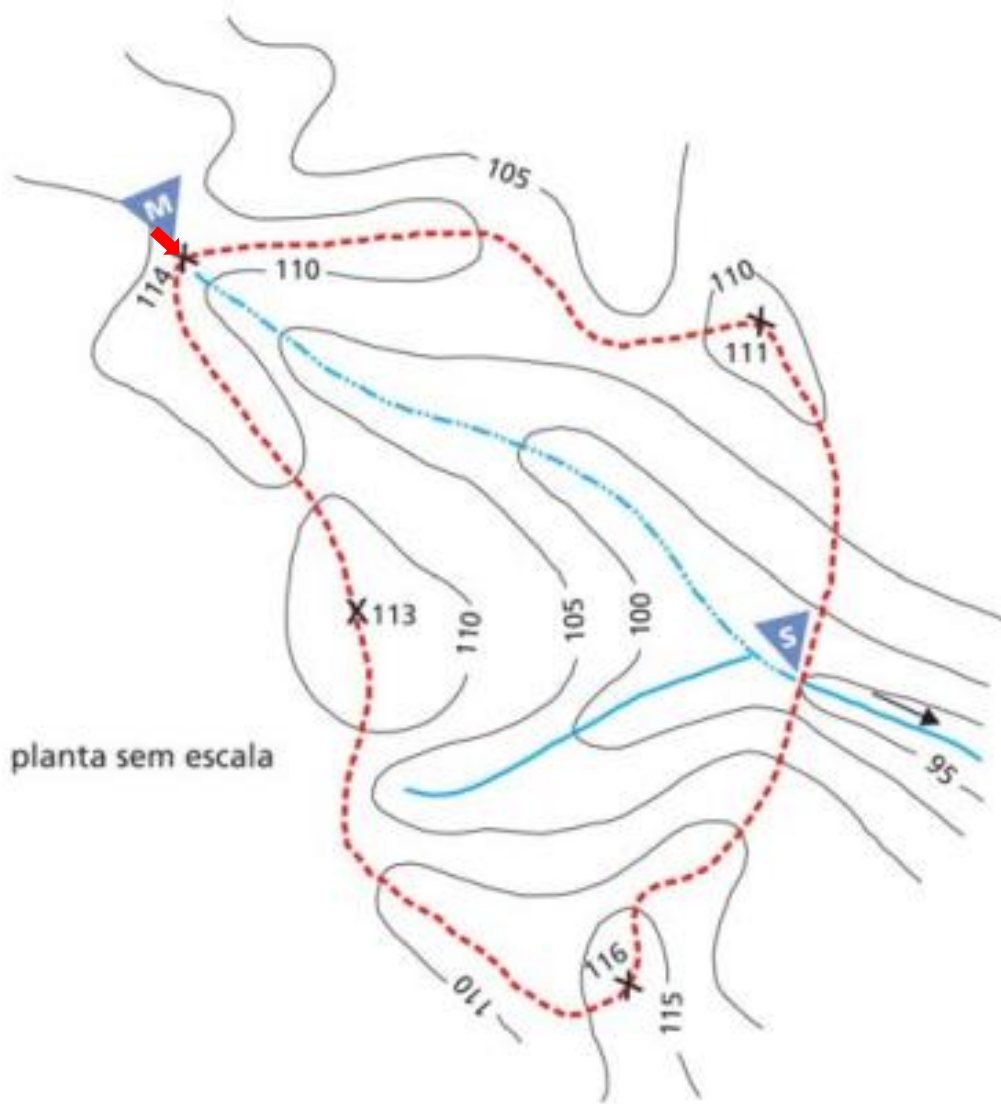
$t = t_c \rightarrow$ se $t_c < 10$ min use IDF com $t = 10$ min

$$i = \frac{K \cdot T^m}{(t + t_o)^n}$$



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)

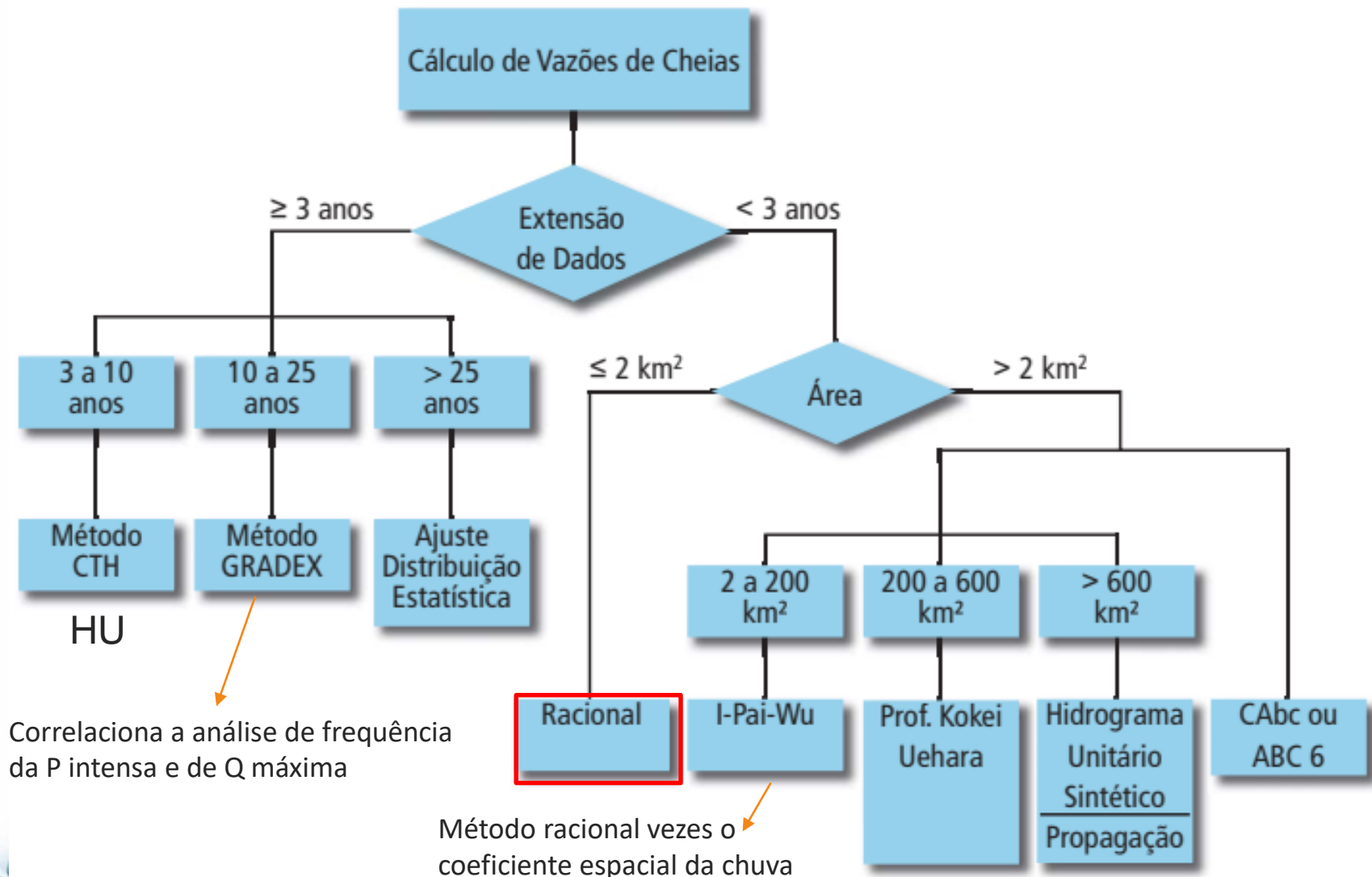
L – comprimento do talvegue do curso d'água (km)

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



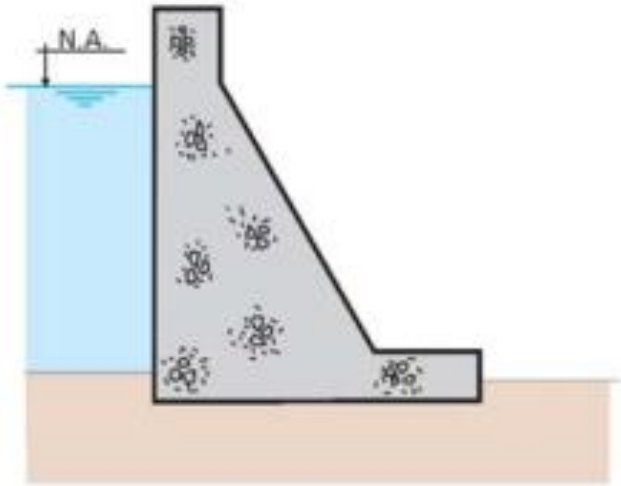
Barragem

- 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

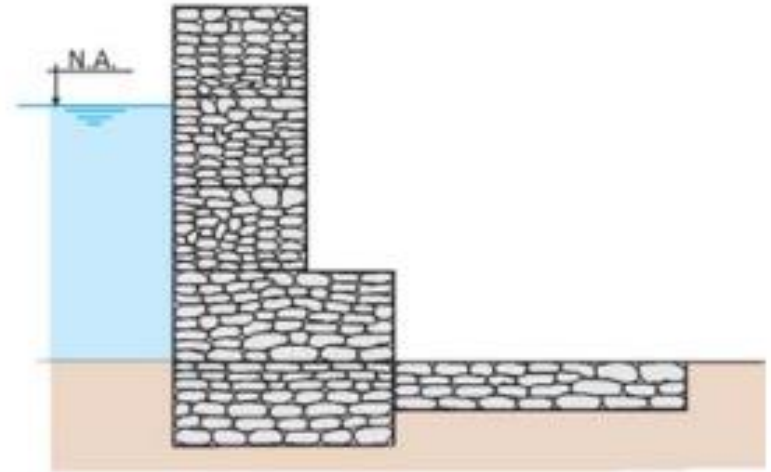


Tipos de barramento

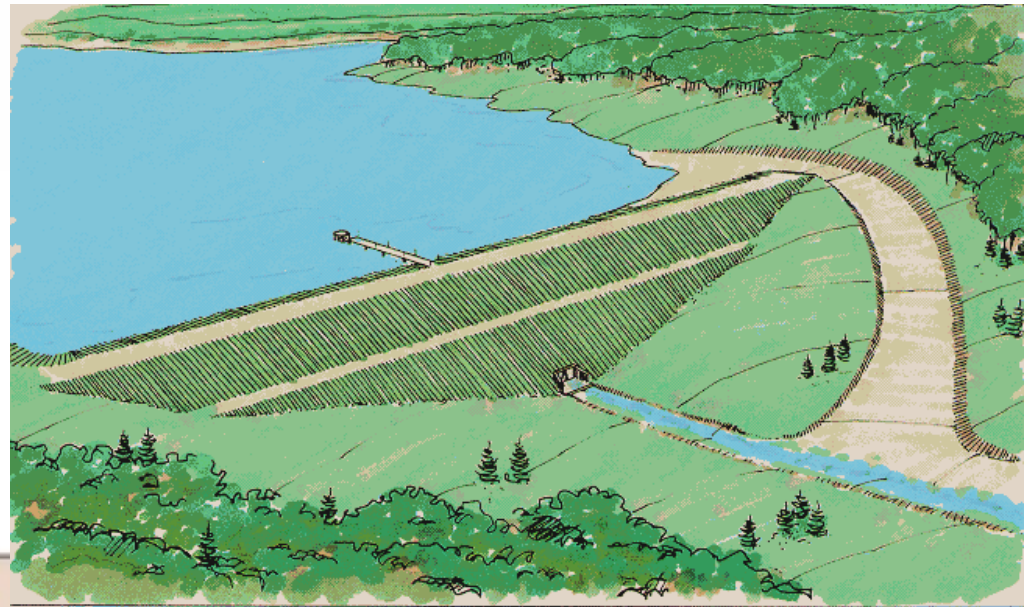
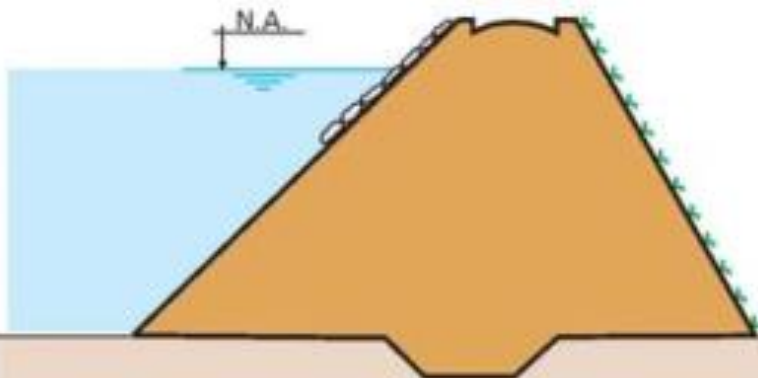
CONCRETO



GABIÃO



TERRA



Altura de Barragens e Volumes Operacionais

Altura da crista da barragem

Cota da Crista

Estudo de estabilidade (circulares, planas) e condições de filtração (fendas de pressão, etc.), Rêsguardo (hidrogramas, etc....)

N. Máximo Maximorum

Volume de controle de cheias

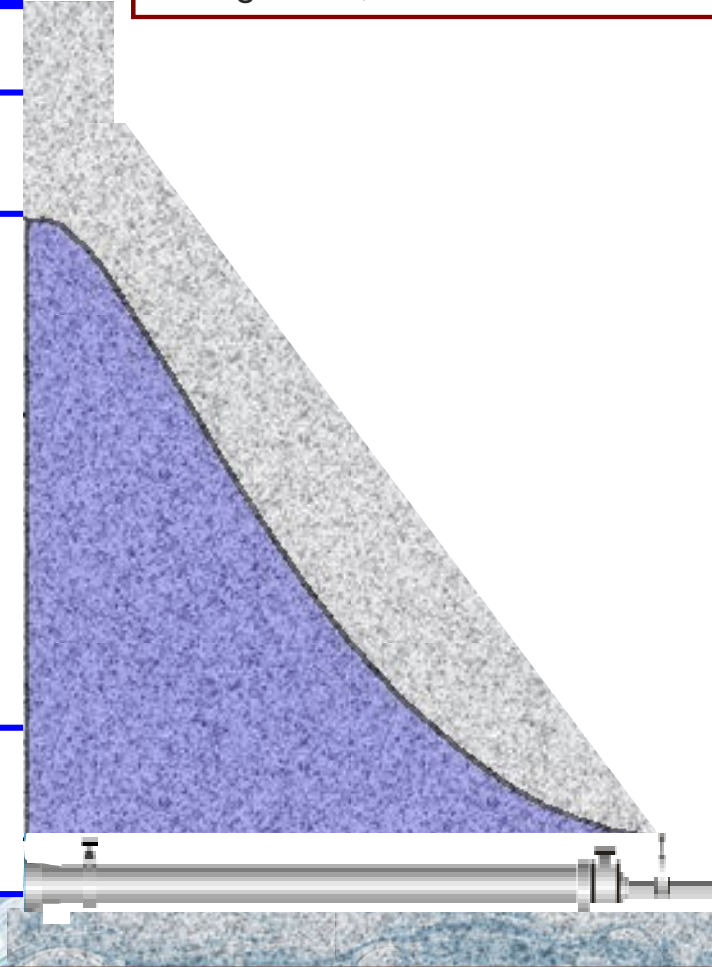
N. Máximo Normal

Volume útil

N. Mínimo Operacional

Volume de resguardo

Volume morto



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. $\text{Volume Final} = \text{Volume Inicial} + \text{Volume Afluente} - \text{Volume Efluente}$ ou
 $\text{Volume Final} = \text{Volume Útil do reservatório}$



Grau de Regularização

É a relação entre a vazão regularizada e a vazão média da bacia.

$$GR = Q_{\text{regularizada}}/Q_{\text{média}}$$

Curva de Possibilidades de Regularização

- É uma curva que relaciona a vazão regularizada com o volume necessário para regularizá-la
- É extremamente útil durante as fases de planejamento de barragens
- É obtida pela planilha variando-se a vazão regularizada e anotando-se o volume útil necessário



Método do Reservatório Semi-Infinito

File Edit View Insert Format Tools Data Window Help

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Determinação do Método do "Reservatório Semi-Infinito"			=MIN(\$B\$7;B7+(C14-\$B\$5)*\$B\$6)					
2									
3	Média=	3,9	m3/s						
4	Grau Reg=	0,6							
5	Qreg=	2,4	m3/s						
6	DT =	2,63	milhões de segundos médios em um mês						
7	Volume Inicial =	100,0	hm3						
8	Vol Útil	85,2	hm3						
9									
10		Qmin	Qmédia	Vmínimo					
11		0,7	3,92	14,8					
12	Ano	Mês	Vazão m3/s	Volume Final	ΔVolume	ΔT crítico	Max Δt Critico	Max Δt Critico	Max Δt Critico
13									
14	1945	1945,0	2,60	100,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0
15		Fev	3,00	=IF(F14=0;0;MAX(G13;E14))			0,0	0,0	0,0
16		Mar	3,10				0,0		
17		Abr	2,00	99,1	0,9	1	0,9		
18		Mai	1,90	97,9	2,1	2	2,1		
19		Jun	1,50	95,7	4,3	3	4,3		
20		Jul	1,40	93,2	6,8	4	6,8		
21		Ago	1,20	90,1	9,9	5	9,9		
22		Set	1,10	86,8	13,2	6	13,2		
23		Out	1,10	83,5	16,5	7	16,5		

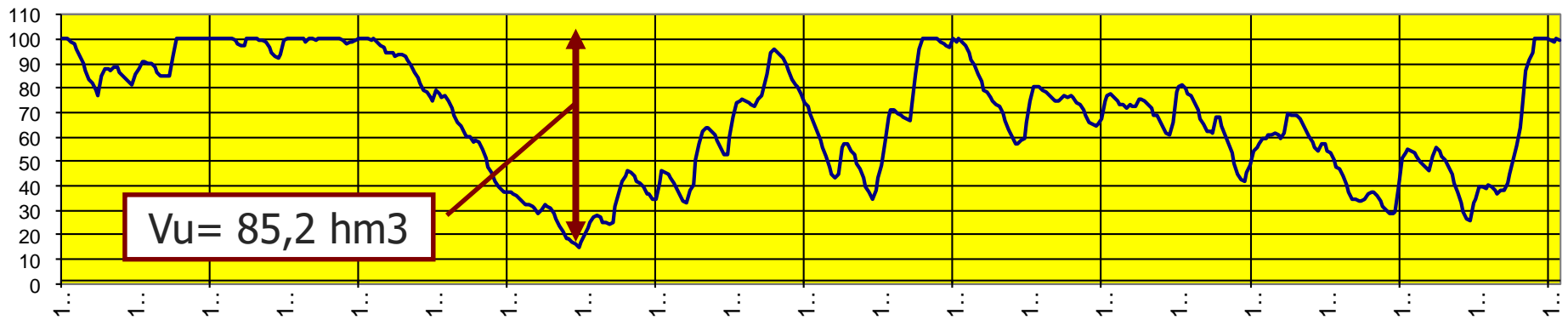
Start | Microsoft Excel - Rip... | Regularização Aula II.ppt

194 194 194 195 195 195 195 195 196 196 196 196 196 197 197 197 197 197 198 198 198

Método do Reservatório Semi-Infinito

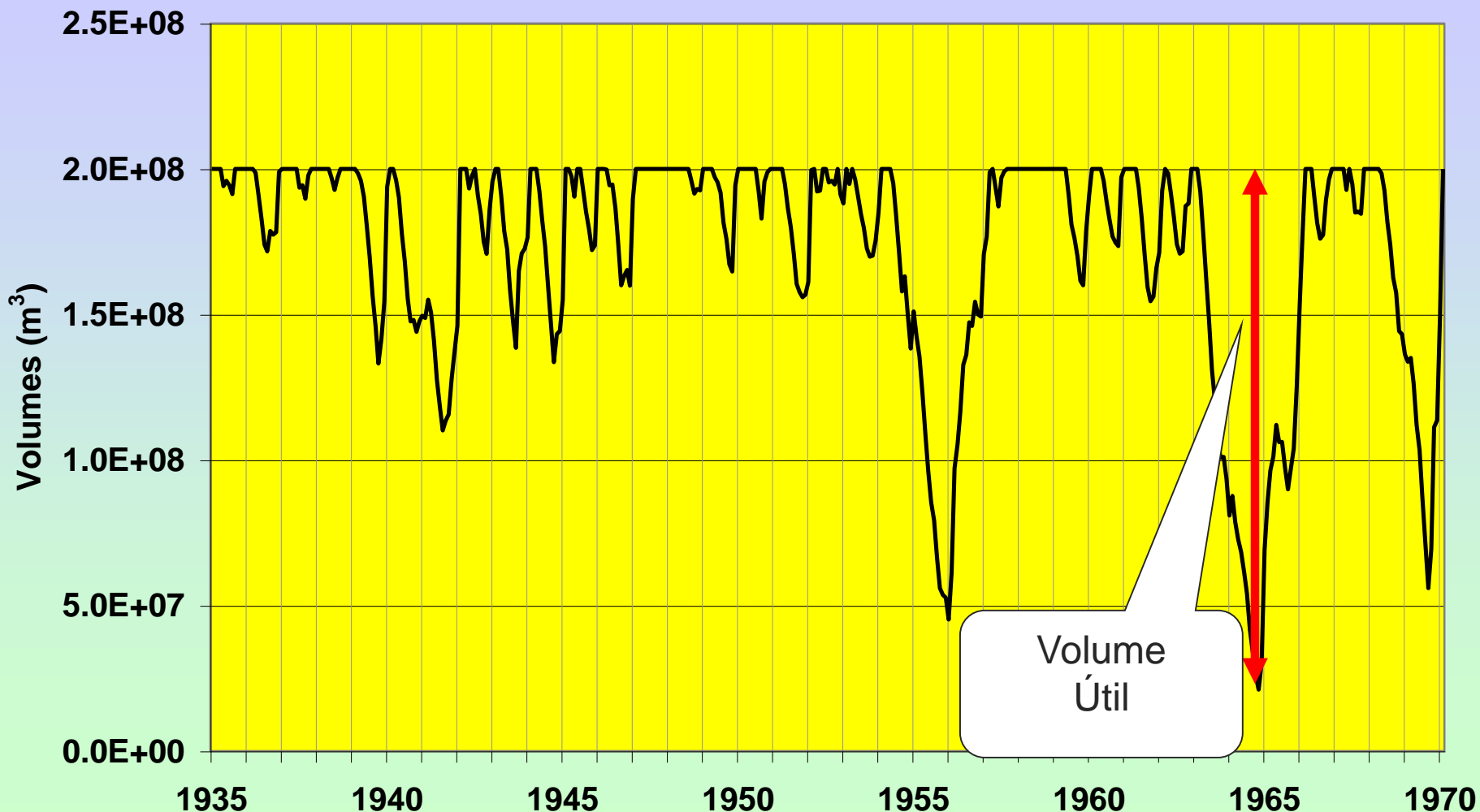
Volumes emprestados de um "reservatório semi infinito" para garantir Qreg

Eixo X: col A Eixo Y: col D



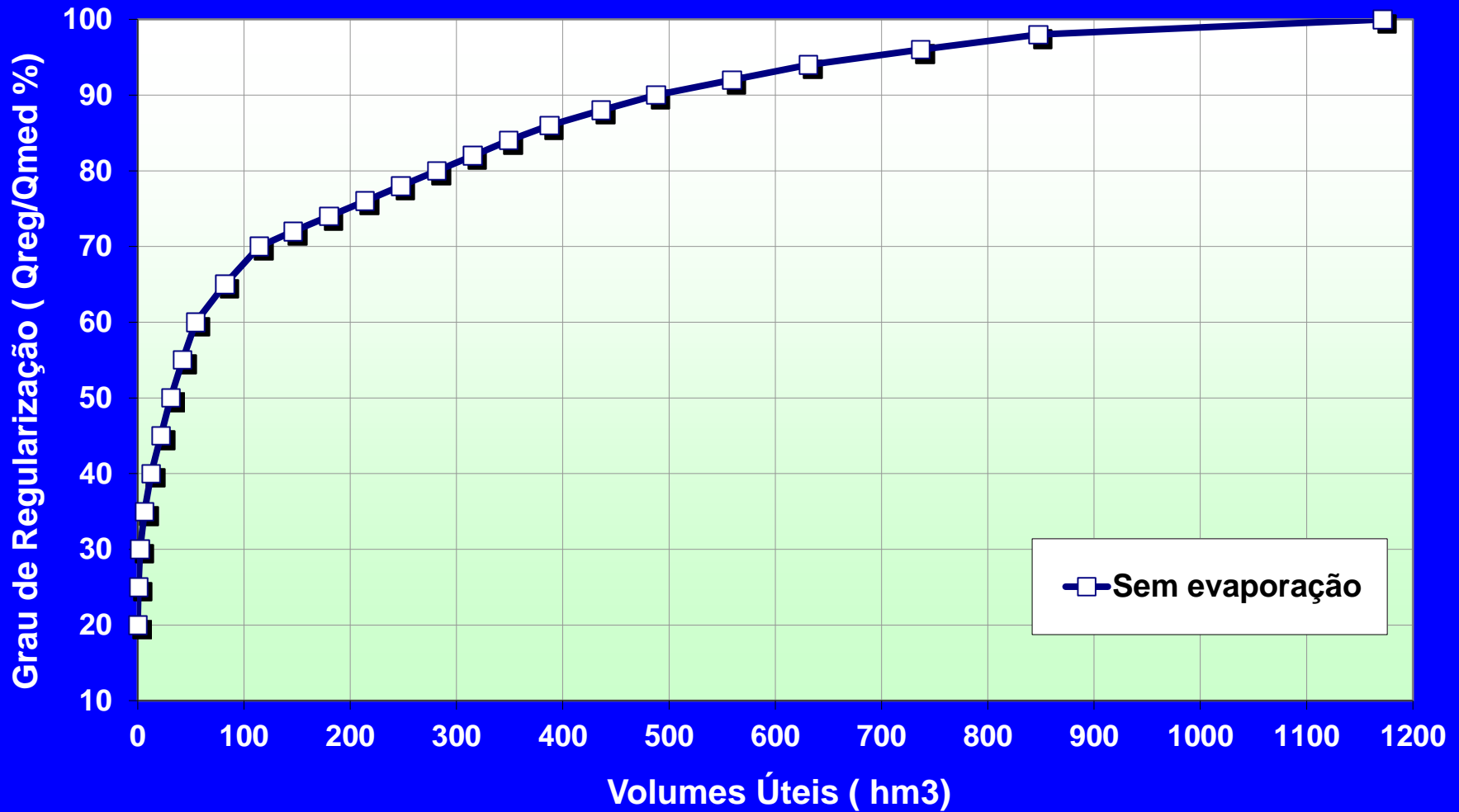
Método do Reservatório Semi-Infinito

Cálculo do Volume Útil
Método do reservatório Semi-Infinito



Curva de Possibilidades de Regularização

Curva de Possibilidades de Regularização

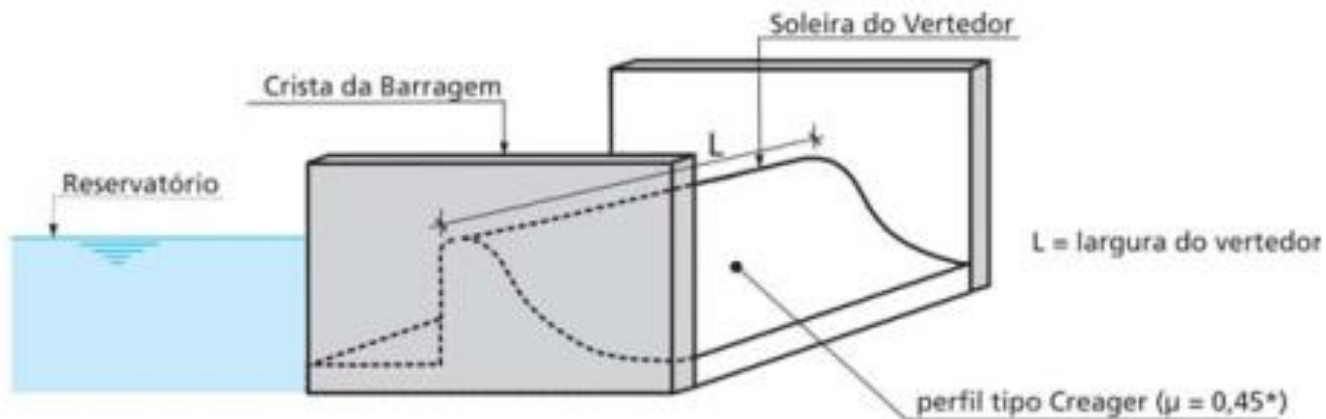


Vertedor (extravasador) de superfície

- 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



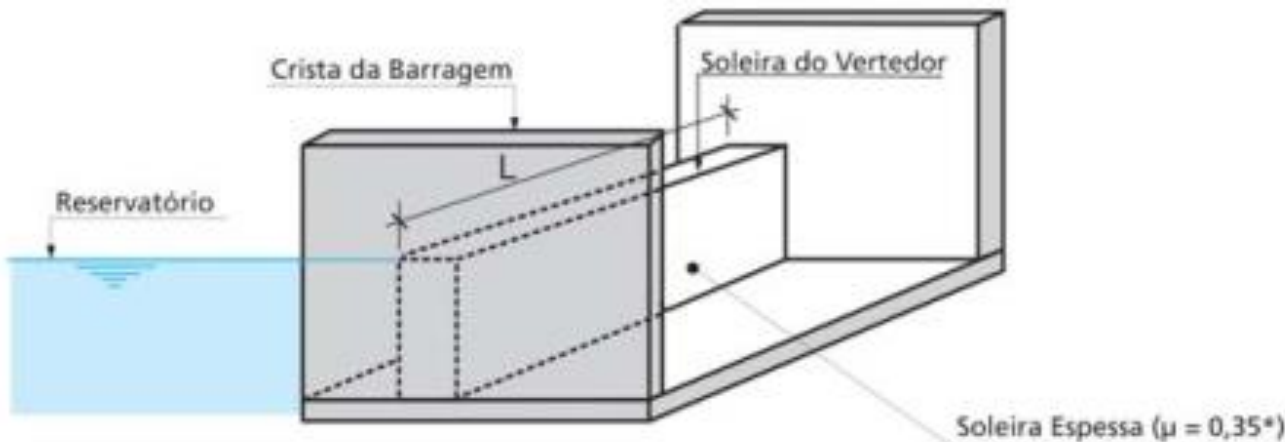
Tipos de soleiras mais comuns



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

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

PERFIL TIPO CREAGER



SOLEIRA ESPESSA

Q – vazão (m^3/s)

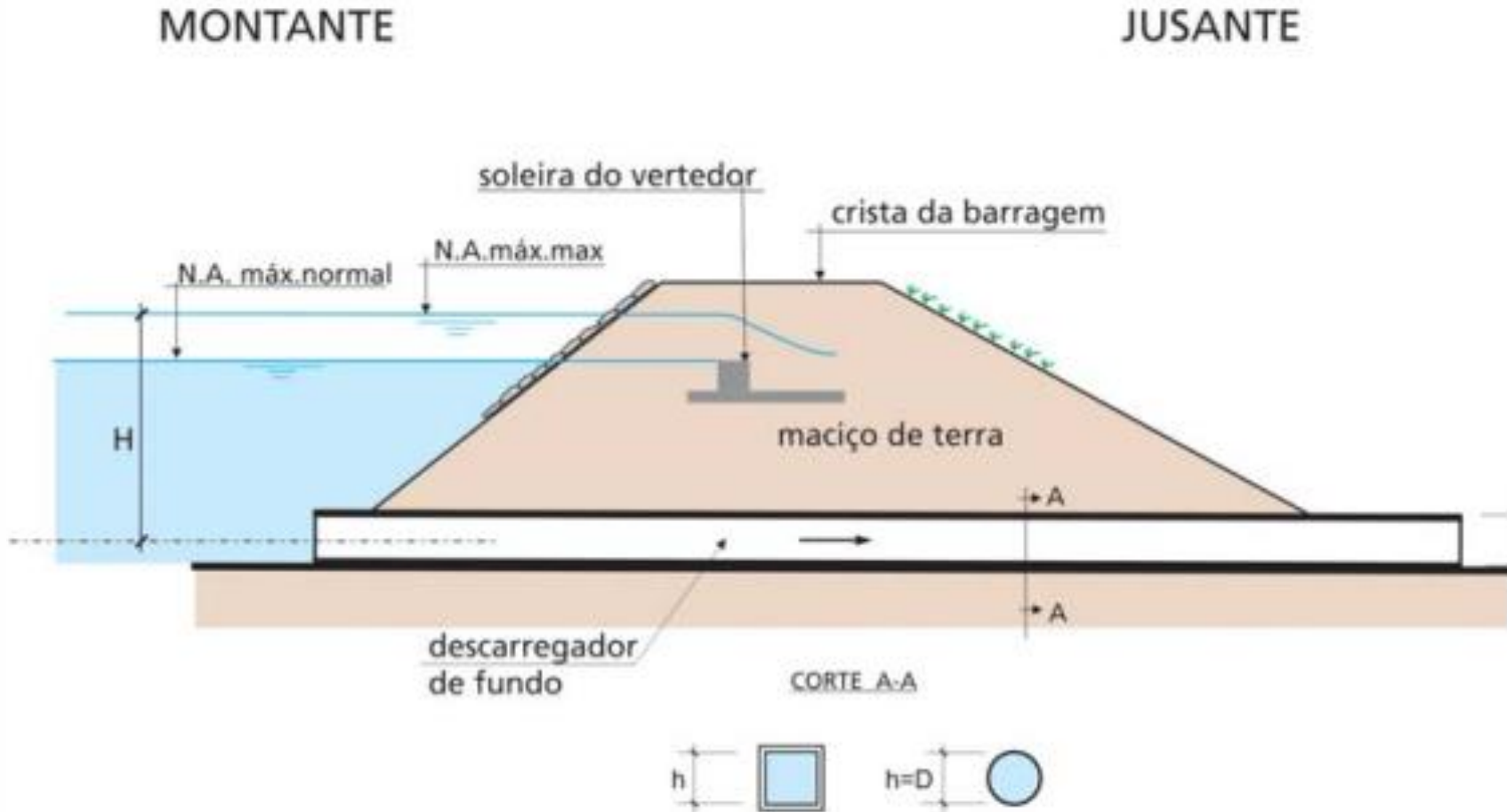
μ - coeficiente de descarga
 H – lâmina d'água sobre a soleira (m)

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

L – largura do vertedor (m)



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 (m³/s)

n – coeficiente de rugosidade de Manning

R_H – raio hidráulico (m)

i – declividade média (m/m)

A_m – área molhada (m²)

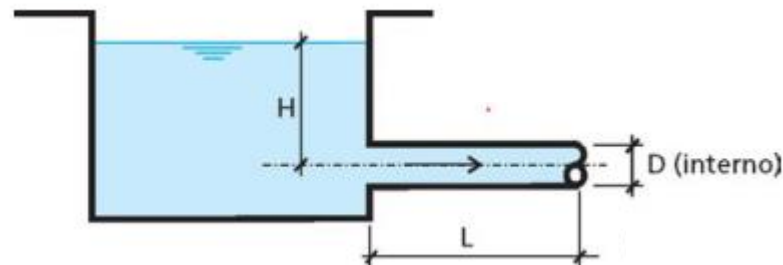
P_m – perímetro molhado (m)

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 (m³/s)

A – área da seção transversal (m²)

G – aceleração da gravidade (9,81 m/s²)

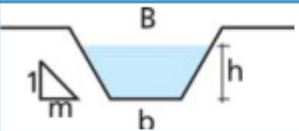
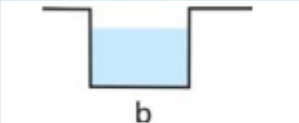
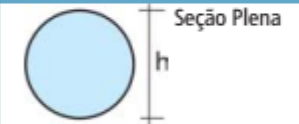
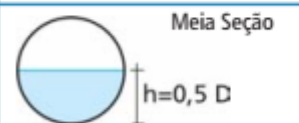
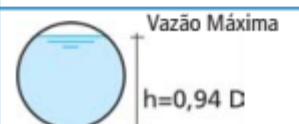
H – carga sobre o descarregador (m)

C_d – coeficiente de descarga (0,6 para L/D até 60)

n de Manning e características hidráulicas de seções transversais

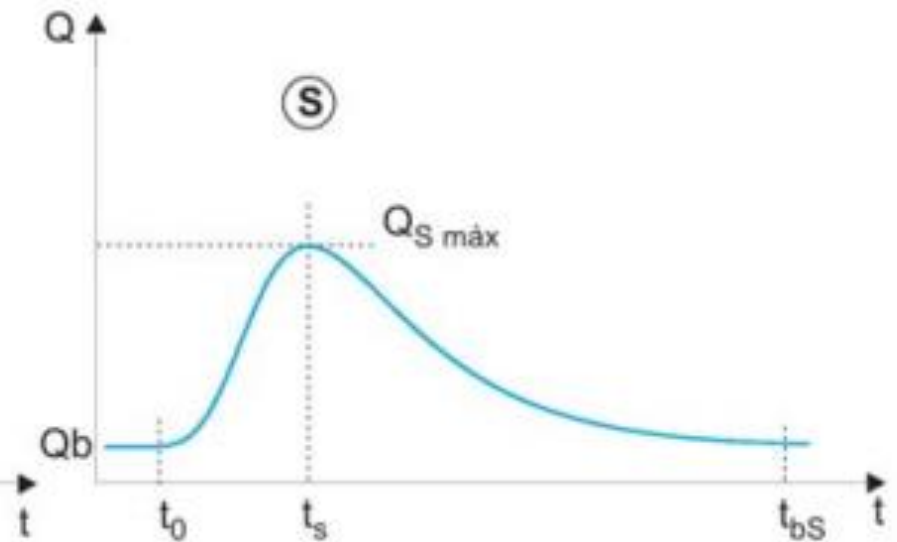
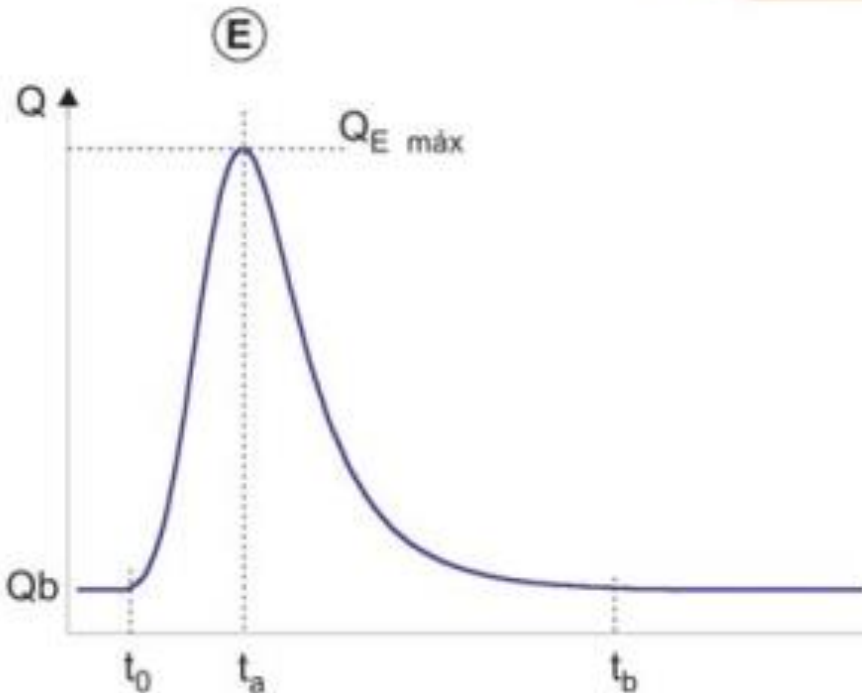
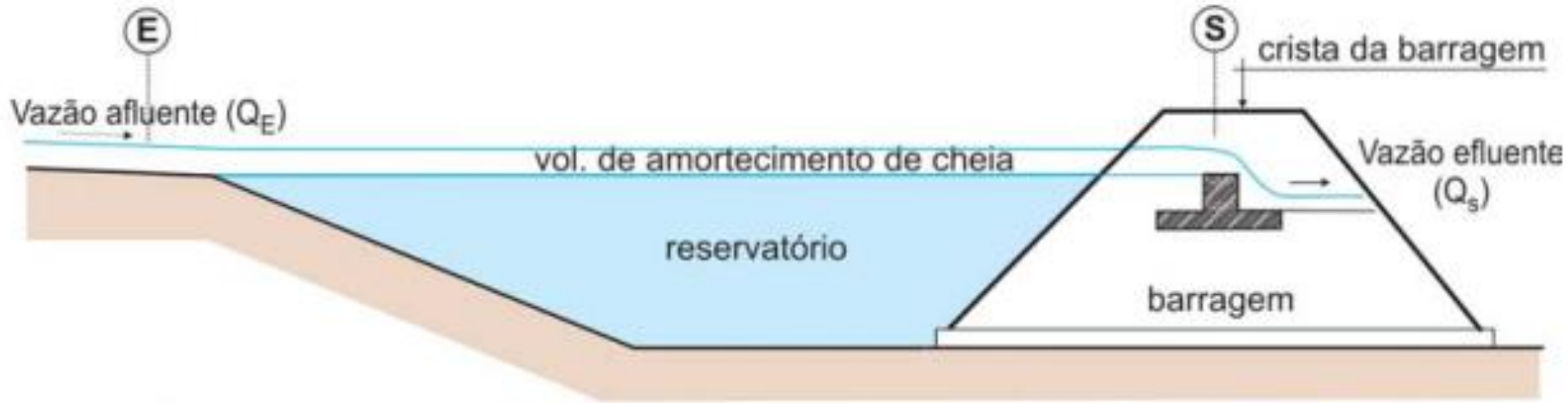
REVESTIMENTO	n
Terra	0,035
Rachão	0,035
Gabião	0,028
Pedra argamassada	0,025
Aço corrugado	0,024
Concreto ⁶	0,018

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

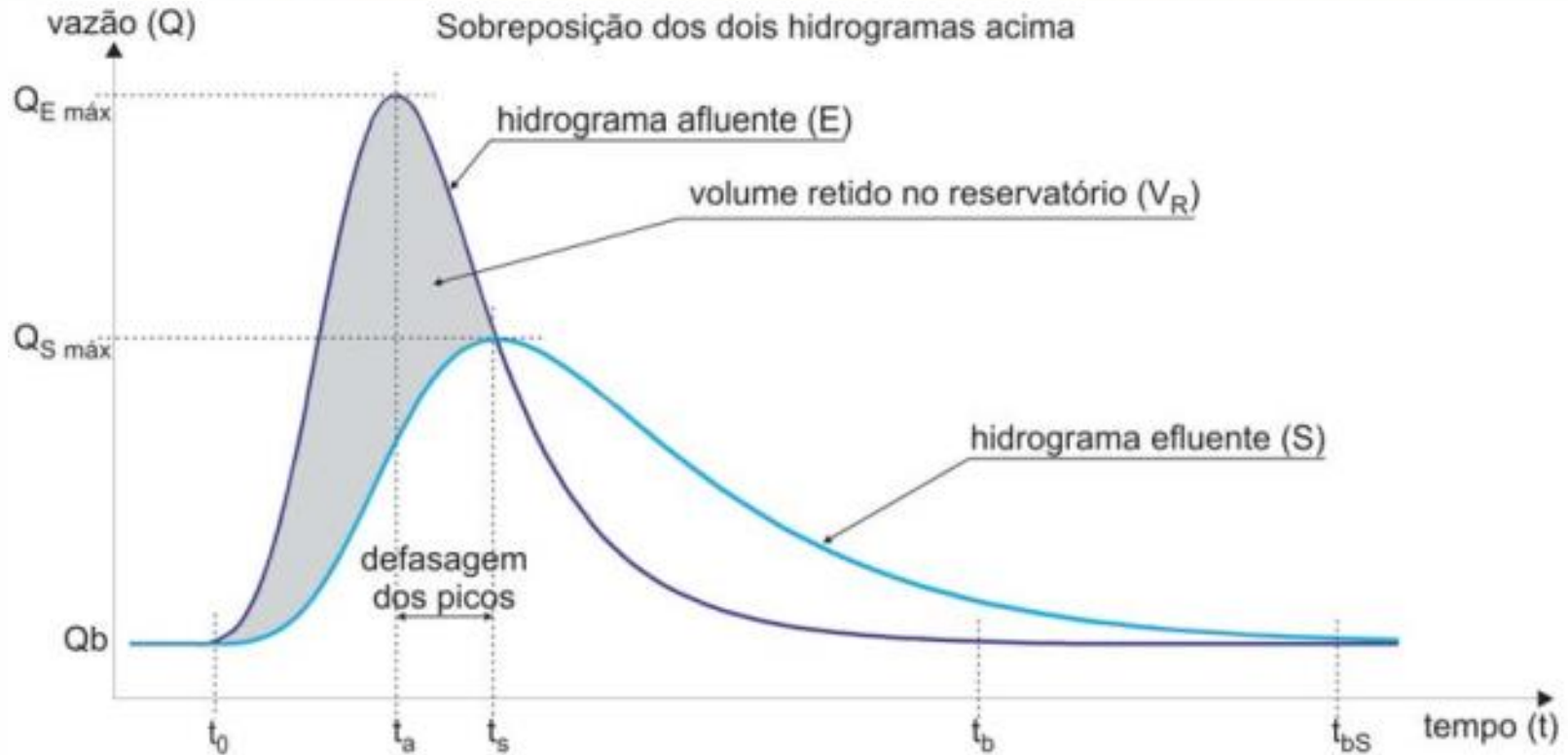
Geometria da Seção	Área Molhada (A_m)	Perímetro Molhado (P_m)	Raio Hidráulico (R_H)	Largura Superficial (B)
	$(b+mh)h$	$b + 2h\sqrt{1+m^2}$	$\frac{(b+mh)h}{b + 2h\sqrt{1+m^2}}$	$b+2mh$
	$b \cdot h$	$b+2h$	$\frac{b \cdot h}{b+2h}$	b
 Seção Plena	$\frac{\pi \cdot D^2}{4}$	$\pi \cdot D$	$\frac{D}{4}$	---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



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 $t_{bS} > t_b$

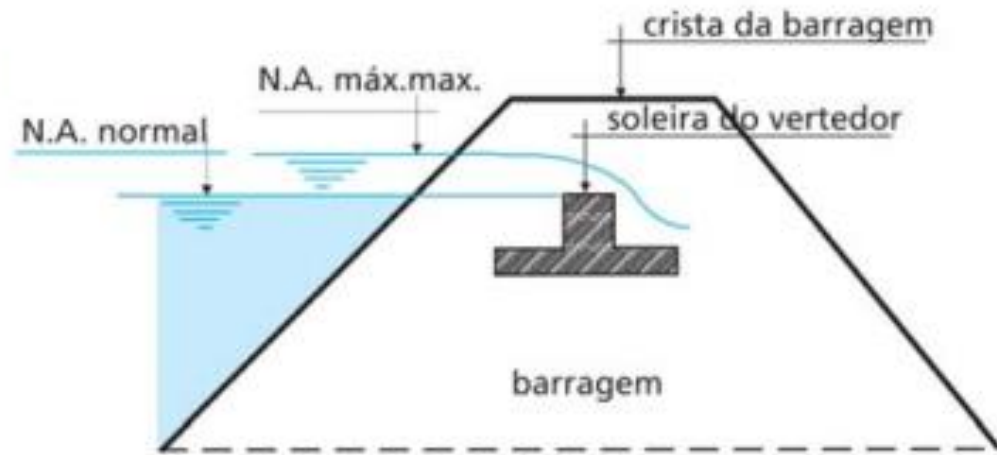
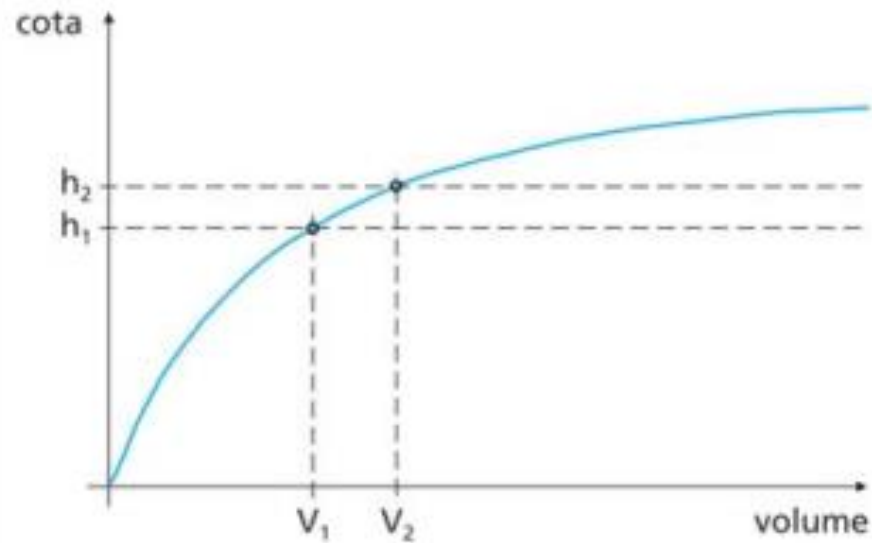
$t_s - t_a$ = defasagem dos picos

Q_b = vazão de base do curso d'água

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

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

Curva cota-volume do reservatório

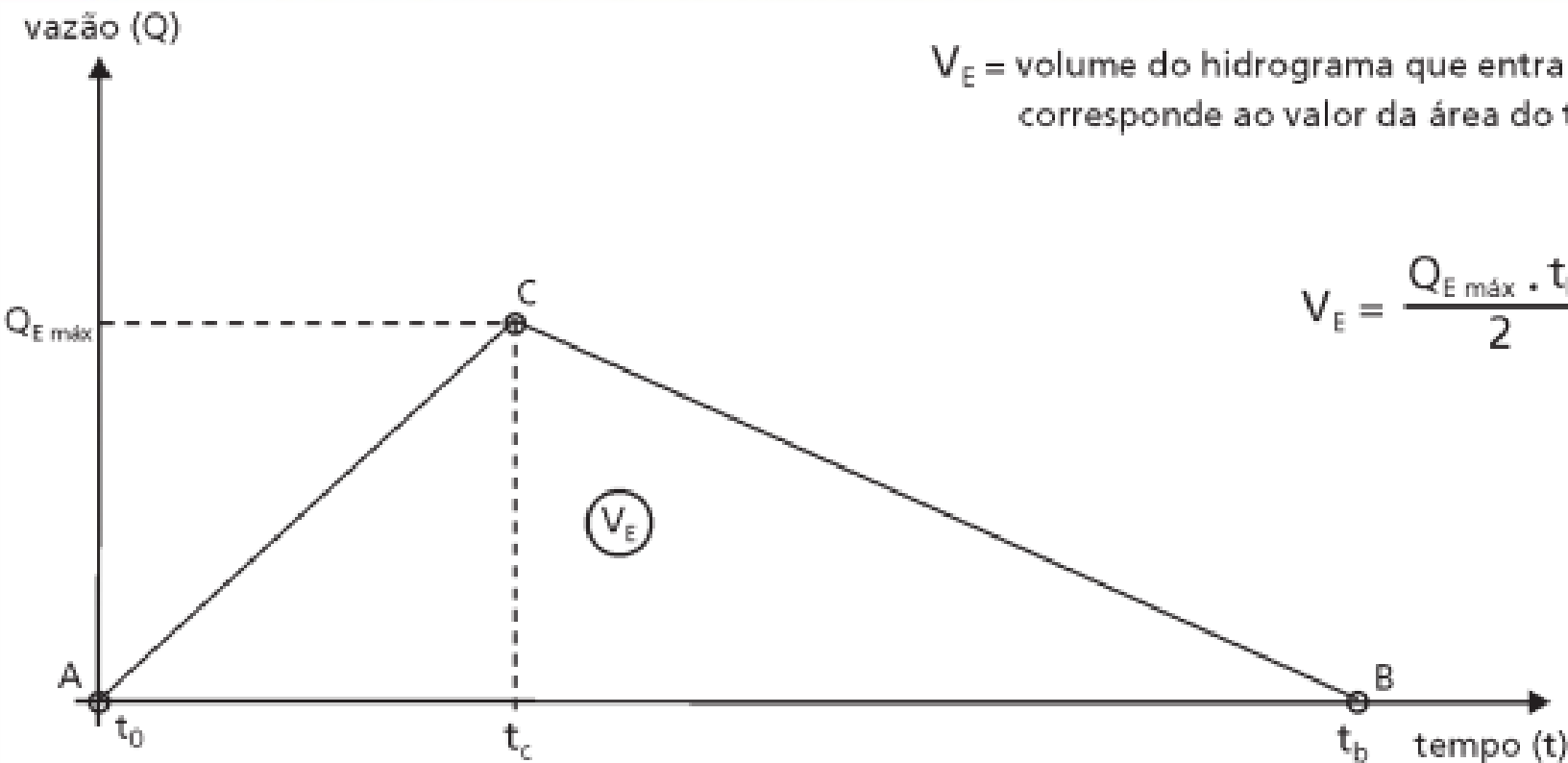


N.A. máx.max. = nível d'água máximomaximorum

$V_R = V_2 - V_1 =$ 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

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

t_0 = zero (considerado)

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

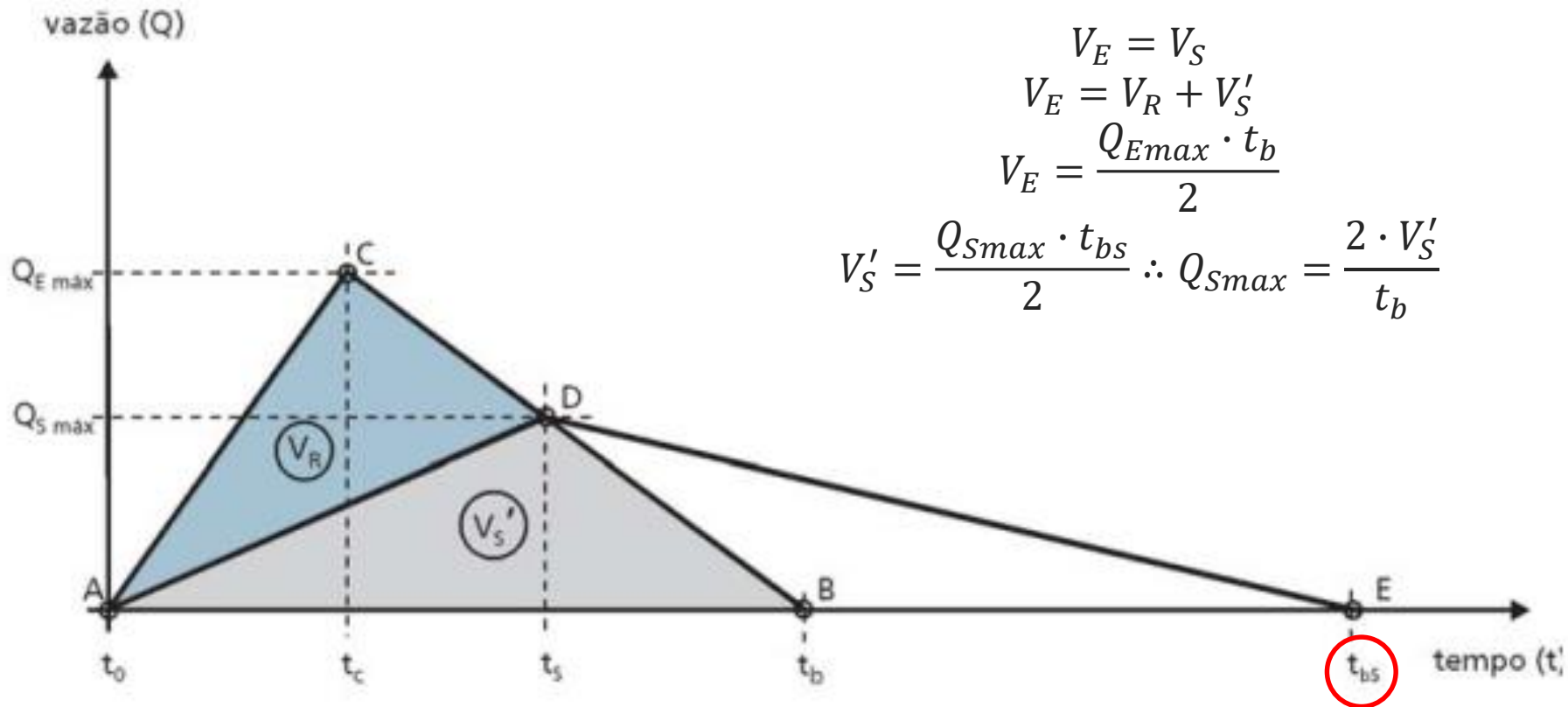
t_b = tempo de base

$t_b - t_c$ = 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.



Desconhecido

Q_E = vazão de enchente que entra no reservatório (hidrograma ACB)
 Q_S = vazão que sai do reservatório pelo extravasor (hidrograma ADE)

$t_b = 3 t_c$

$t_0 = \text{zero}$

Cálculo da vazão e da largura do vertedor

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



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 e as dimensões da largura do vertedor no Córrego Lambedor, Município de Capivari, São Paulo.



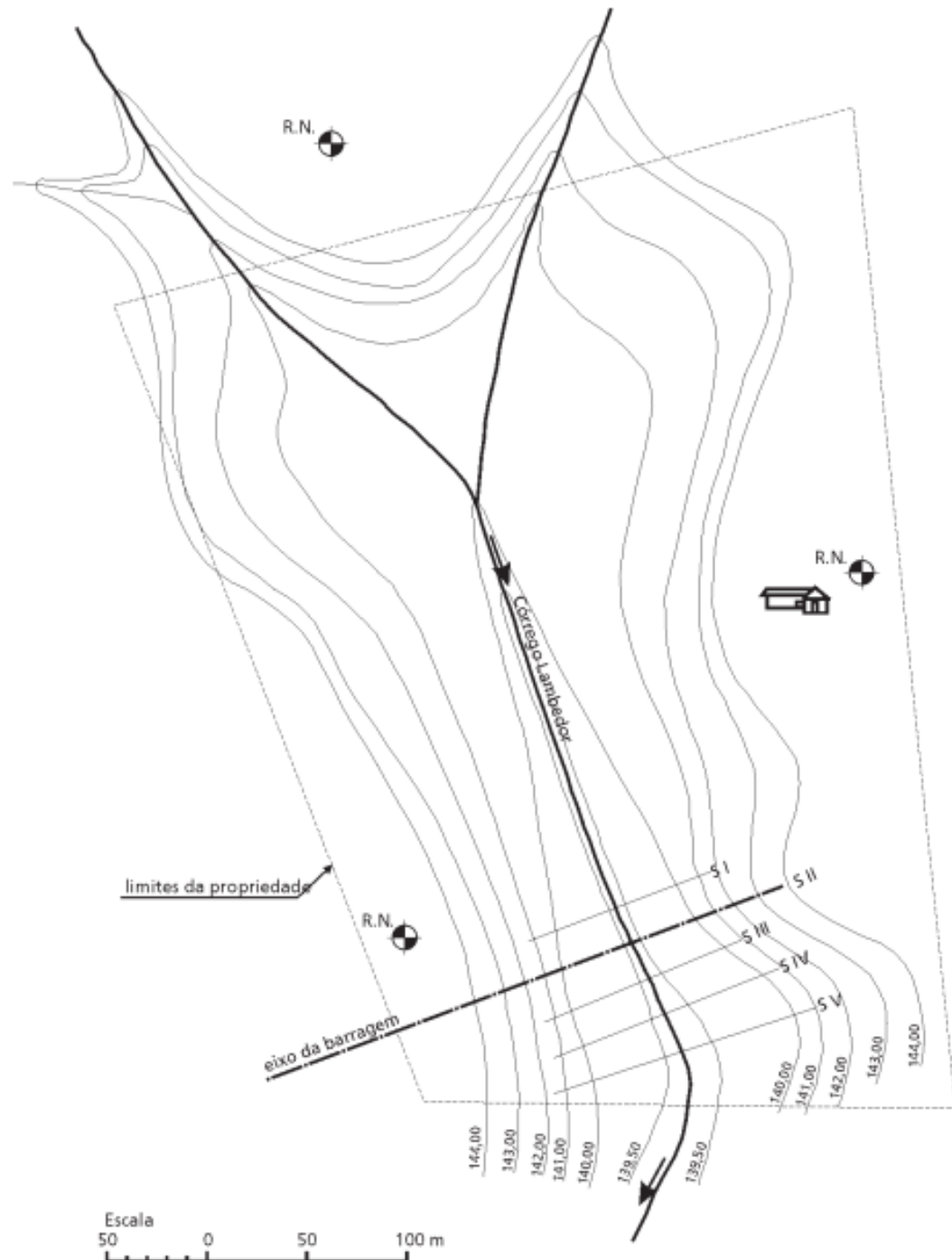
Condições e Levantamentos de campo

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



■ 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: $h \leq 5 \text{ m}$ e $L \leq 200 \text{ m}$ $\rightarrow T = 100 \text{ anos}$

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

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

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

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



Cálculos

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

Adotar $Q_{Emax} = 20 \text{ m}^3/\text{s}$

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

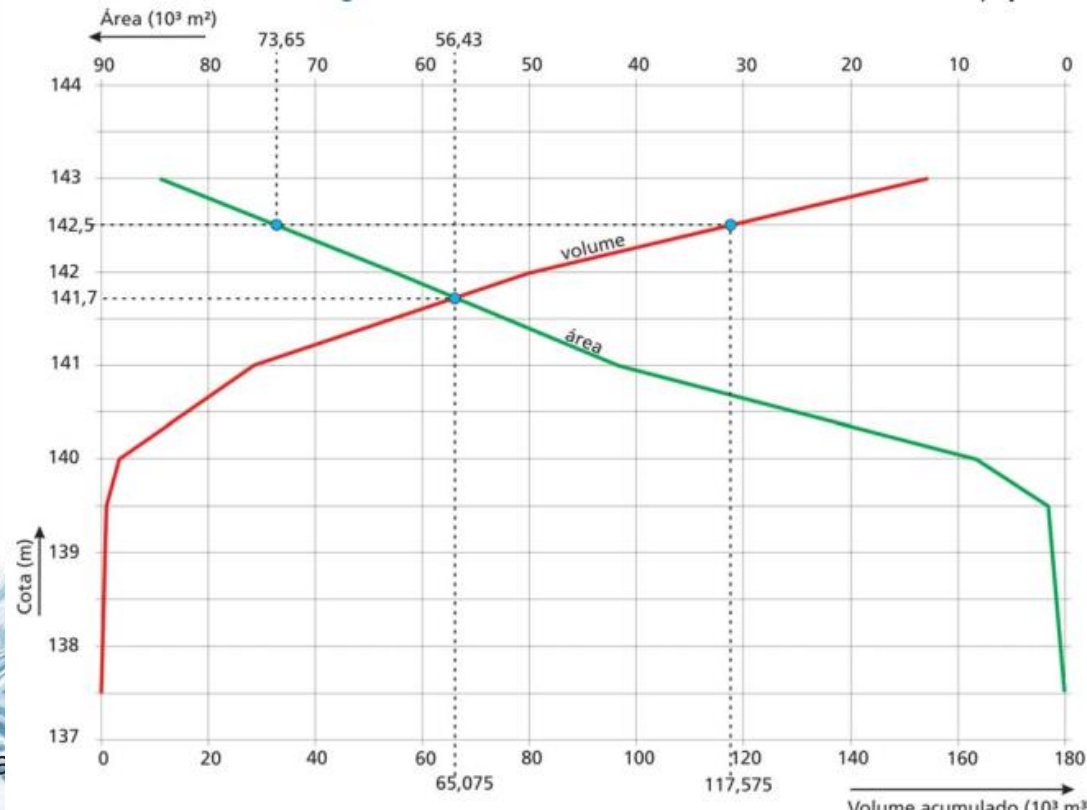
Cota da crista do maciço: NA máx max = 142,5 + Borda livre (0,5 m) = **143,0 m**

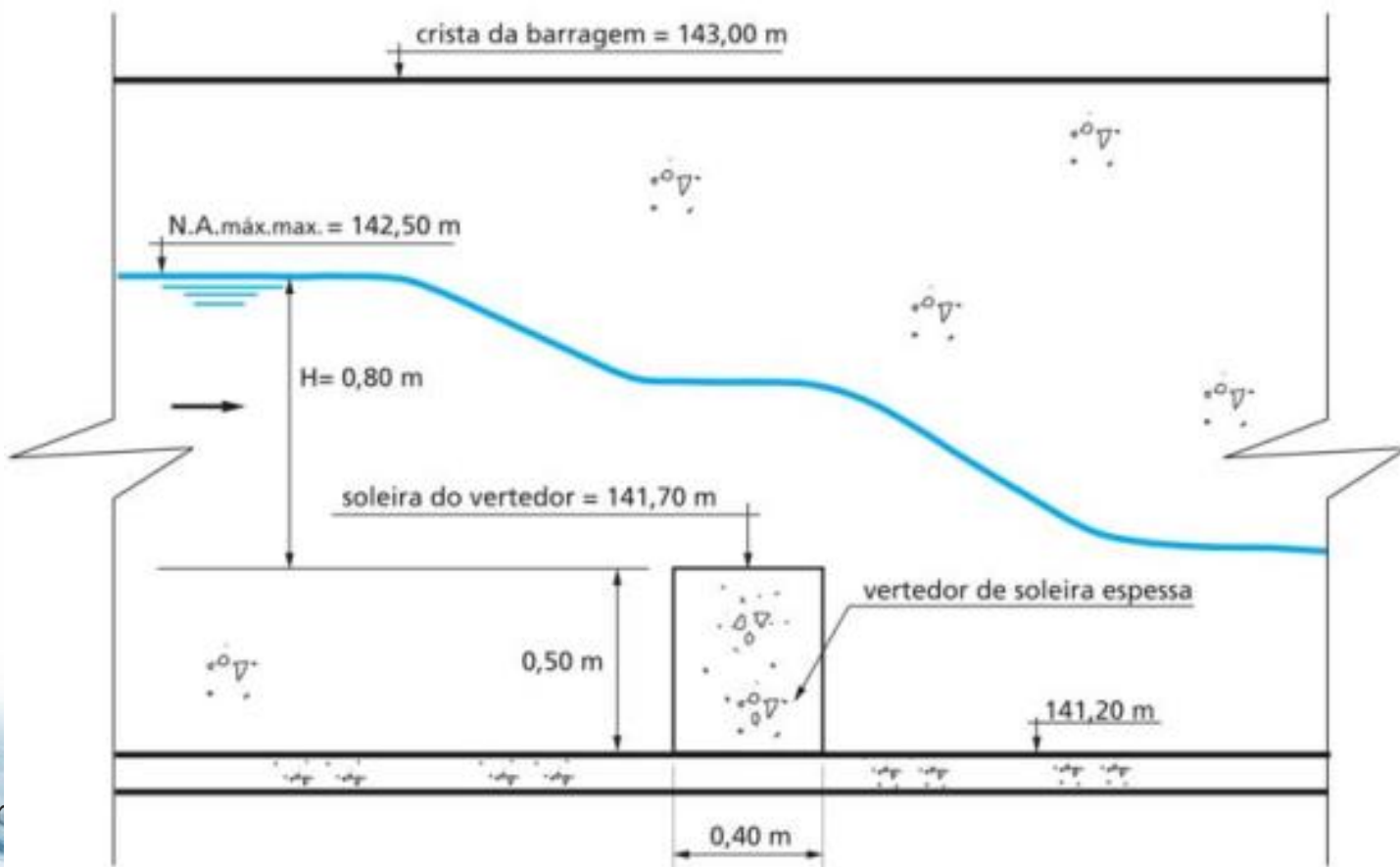
Cota da soleira do vertedor: NA normal

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





Cálculos

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

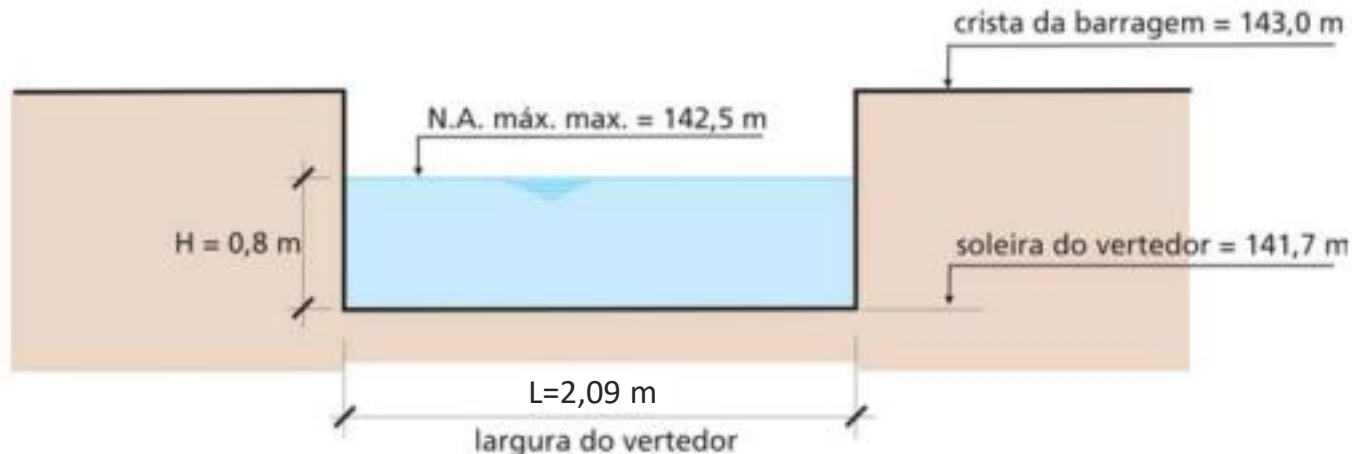
Volume de entrada: $\frac{Q_{E\max} \cdot t_b}{2} = \frac{20 \cdot 5940}{2} = 59400 \text{ m}^3$

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: $Q_{S\max} = \frac{2 \cdot V'_S}{t_b} = \frac{2 \cdot 6900}{5940} = 2,32 \text{ m}^3/\text{s}$

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



De

USP

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

$$H = 143 - 141,7 = 1,3 \text{ m}$$

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

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

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

$$V_E = V_R + V'_S = 89325 + 14256 = 103581 \text{ m}^3$$

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

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

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: $i = 3,38 \text{ mm/min}$

Solver Excel: $T \approx 22027$ anos

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

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

$$q = (1 - P)^n$$

Risco de ocorrência

$$R = 1 - (1 - P)^n$$



Fim

