

- \* Área irrigada = 70 ha
- \* Número de horas de operação = 19 horas por dia
- \* Número de dias de operação = 15 dias por mês
- \* Número de meses de operação = 7 meses por ano
- Considere que o mês médio possui 30,417 dias

**Pede-se:**

- j.1-** Calcular a vazão real necessária à moto-bomba ( $Q_{bomba}$ ) em L / seg.
- j.2-** Calcular a vazão demandada média contínua ( $Q_{demanda}$ ) em L/seg, necessária a um eventual cálculo de volume de reservatório.

**Respostas:**  $Q_{bomba} = 76,7$  L/s;  $Q_{demanda}$  média contínua = 17,5 L/s

**l)** Determinar a área que deveria ter uma bacia hidrográfica hipotética, capaz de fornecer água para se irrigar 1 ha por aspersão no Campus da ESALQ/USP (LAT: 22° 42'; LONG: 47° 38'). Considere 2 situações:

- a)** A captação será feita a fio d'água
- b)** A captação será feita com barramento.

**OUTROS DADOS**

- 1- Lâmina bruta máxima de irrigação = 7 mm/dia; bombeamento de 20 horas por dia.
- 2- Na captação a fio d'água usar 50% da  $Q_{7,10}$  (ou seja, não há outras outorgas concedidas na bacia).
- 3- Na captação com barramento considerar  $Q_{demanda} = 60\%$  da  $Q_{média} - 50\%Q_{7,10} - 0,05Q_{média}$  (perdas)
- 4- Pretende-se irrigar 200 dias por ano
- 5- Usar o software do site do DAEE

**Resposta:** (a)  $A_{bacia} = 97,2$  ha; (b)  $A_{bacia} = 9,9$  ha.

## 5 – RESERVATÓRIOS

### 5.1- Considerações iniciais

Grande parte dos reservatórios de água é construída por meio da realização de *barramentos em cursos d'água*. Segundo o DAEE-SP (2005), os barramentos são planejados com os seguintes objetivos principais:

*1-Elevação do nível da água:* nesse caso, o volume armazenado é secundário, priorizando-se a altura do nível d'água. Ocorre quando se deseja realizar uma captação com bomba em um ribeirão raso, uma captação de água por meio de uma tomada por gravidade (canal), adução para roda d'água, carneiro hidráulico, entre outros;

*2-Amortecimento de cheias:* incluem-se, nesse caso, as bacias de detenção urbanas (“piscinões”) que trabalham a maior parte do tempo vazias, aguardando uma onda de cheia que deve ser amortecida enquanto o reservatório enche;

*3-Geração de energia elétrica:* bastante conhecidas no Brasil devido ao fato da maior parte da energia elétrica consumida no país ser dessa natureza (PPGCEA, 2002);

*4-Piscicultura, carcinocultura e ranicultura:* atividades bastante dependentes da qualidade da água;

*5-Laser e paisagismo:* nesse caso, o volume armazenado não é fator limitante, priorizando-se a estética do local; é atividade intimamente ligada ao turismo rural;

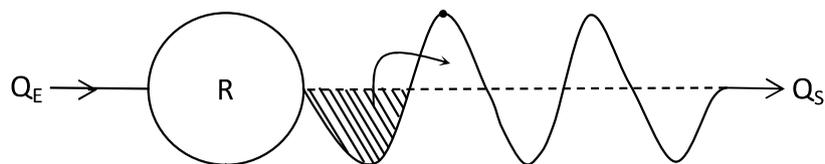
*6-Regularização das vazões:* consiste em reservar água do período chuvoso para ser utilizado no período seco do ano. Devido à importância que esse objetivo tem para a Agricultura (CAMPOS, 2005; GENOVEZ, 2006; CARVALHO 2008), o presente texto tratará principalmente dele, ou seja, pequenas barragens, cujas áreas de contribuição não ultrapassem a cerca de 60 km<sup>2</sup>; barragens com áreas maiores já fogem da formação dos Engenheiros Agrônomos, Agrícolas e dos Gestores Ambientais.

### 5.2- Tipos de reservatórios de regularização

Quanto ao regime de escoamento das vazões que entram e saem dos reservatórios, estes podem ser classificados em dois tipos:

### 5.2.1- Vazão de entrada constante e vazão de saída variável

São os reservatórios que armazenam água no período de menor demanda de saída para suprir os períodos de maiores demanda de saída, como é ilustrado na Figura 5.1:

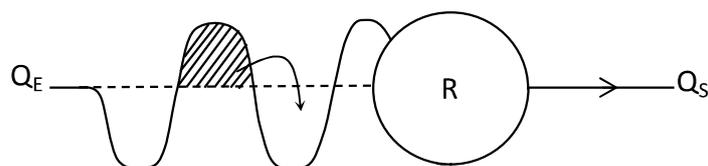


**Figura 5.1-** Reservatório que opera com vazão de entrada constante e vazão de saída variável.

Como exemplo, podem-se citar as caixas d'água municipais urbanas, que interligam as estações de tratamento de água aos bairros da cidade. A caixa armazena água na hora de menor demanda (madrugada) para suprir os picos de demanda que ocorrem no meio da manhã e no início da noite; dessa forma, a estação de tratamento de água pode operar com uma vazão praticamente constante.

### 5.2.2- Vazão de entrada variável e vazão de saída constante

Nesse caso o reservatório recebe uma vazão que varia ao longo do ano, armazenando água para suprir uma demanda constante (Figura 5.2).



**Figura 5.2-** Reservatório operando com vazão de entrada variável, de modo a suprir uma vazão de demanda constante.

Como exemplo desse caso, pode-se citar um barramento que tenha sido construído em um rio para abastecer a uma indústria. As vazões do rio irão variar segundo os meses do ano, e o reservatório terá a função de armazenar água dos meses chuvosos para ser utilizada no período de estiagem (CARVALHO e SILVA, 2003).

No caso dos sistemas de irrigação, tanto a vazão de entrada quanto a vazão de saída (demanda) são variáveis. Entretanto, para simplificar o problema, muitas vezes dimensiona-se o reservatório para uma vazão de saída considerada constante, tal como esquematizado na Figura 5.2.

Como foi visto no Capítulo 4, a vazão de demanda é uma variável fundamental para o dimensionamento do reservatório, de forma que sua estimativa para o meio rural será abordada a seguir.

### **5.3- Demandas de água**

#### **5.3.1- Os usos da água**

Os usos múltiplos da água são divididos em dois grupos: uso consuntivo e uso não consuntivo.

O uso é dito *consuntivo* quando não há retorno para o manancial da água que foi captada, no mesmo estado de quantidade ou de qualidade. Como exemplos desse tipo de uso podem ser citados a irrigação, o abastecimento doméstico, o abastecimento de animais, a maior parte do abastecimento industrial e a piscicultura. A título de informação, a Agência Nacional de Águas (ANA) considera que as irrigações praticadas no Semi-Árido Brasileiro propiciam um retorno de 20% para os rios. Já o DAEE, no Estado de São Paulo, considera que não há nenhum retorno ao rio da água que é captada para irrigação.

O uso é dito *não consuntivo* quando praticamente toda a água captada retorna ao curso d'água, no mesmo estado de quantidade e qualidade. Incluem-se nesse grupo o aproveitamento hidrelétrico, a navegação fluvial, a pesca, o lazer e o paisagismo, assim como outros usos difíceis de serem quantificados como a importância ecológica, a beleza cênica e o significado religioso do manancial. Nesse texto dar-se-á maior enfoque aos usos consuntivos do meio rural.

#### **5.3.2- Demandas médias de água**

A *demanda média* é aquela que é utilizada para a estimativa do volume do lago da barragem ou volume do reservatório (VR). É também utilizada quando se deseja

obter uma outorga para uma captação a ser feita dentro do lago da barragem. Ela inclui demandas domésticas, animal e de irrigação.

#### a) Demanda doméstica

A *demanda doméstica* depende de uma série de fatores tais como: poder aquisitivo da população, clima, preço da tarifa de água, percentagem de hidrômetros instalados, entre outros. O poder aquisitivo é talvez o fator mais relevante; assim é que no Canadá, por exemplo, o consumo médio é de cerca de 350 L/hab/dia, enquanto que em alguns países da África esse valor é menor que 50 L/hab/dia. No Brasil o consumo gira em torno de 200 a 300 L/hab/dia, conforme a cidade (em Piracicaba – SP, por exemplo, esse valor é de 216 L/hab/dia).

#### b) Demanda animal

O consumo de água dos animais depende bastante da temperatura ambiente e da idade dos mesmos. Para fins de anteprojetos, podem ser utilizados os valores da Tabela 5.1 extraídos de Daker (1986) Modificado.

**Tabela 5.1-** Alguns valores médios de *consumo de água de animais*.

ANIMAL	CONSUMO (L/DIA)
1 boi de corte	50
1 vaca leiteira	100L + 6L por litro de leite ordenhado
1 suíno + higiene	25
10 frangos	3 a 5

**Obs:** no caso específico dos frangos, outra maneira de calcular a demanda de água de bebida é considerar 2 litros de água consumida para cada quilo de ração ingerido.

#### c) Demanda para irrigação

A demanda de água para a irrigação vai depender do clima da região, da cultura a ser implantada e do método de irrigação. Para se fazer um cálculo com boa precisão é

mais fácil se dispor da vazão da bomba escolhida pelo projetista, tal como é apresentado na equação 5.1:

$$Q_{\text{contínua}} = \frac{Q_{\text{bomba}}}{A} \times \frac{n^{\circ} \text{ horas/dia}}{24 \text{ horas}} \times \frac{n^{\circ} \text{ dias/mês}}{30 \text{ dias}} \times \frac{n^{\circ} \text{ meses/ano}}{12 \text{ meses}} \quad \text{equação 5.1}$$

Em que:

**Qcontínua** – vazão média de demanda contínua, por unidade de área, L/s/ha;

**Qbomba** – vazão da bomba instalada para suprir o sistema de irrigação, em seu ponto de trabalho, L/s;

**A** - área irrigada abrangida pelo projeto de irrigação, ha.

Experiências realizadas com irrigação de cana-de-açúcar no Estado de SP prevêem um período de irrigação de 210 dias por ano. Captações de água para o abastecimento de usinas de álcool/açúcar, neste mesmo Estado, utilizam um período de bombeamento de 250 dias por ano, 24 horas por dia.

**Exemplo:** deseja-se saber se um barramento feito em uma microbacia é suficiente para abastecer 2 pivôs centrais rebocáveis. Caso não seja suficiente, responder se, aumentando-se a altura da barragem, é possível se resolver o problema (ver o mesmo exercício no Capítulo 4).

**Dados:**

- Latitude local: 23° 31' 22,41''S
- Longitude local: 48° 33' 58,34''W
- Área da microbacia = 141,5 ha
- Área de cada um dos pivôs = 30 ha
- Demanda de água bruta específica = 1,0 L/s/ha
- Vazão necessária a se manter a jusante = 75% da Q7,10
- Vazão máxima regularizável pelo reservatório = QF = 0,60 x Qmédia
- Considerar QF = Qdemanda + Qjusante + 0,05 Qmédia (perdas)
- Considerar que a irrigação será feita 20 horas/dia, 15 dias/mês e 6 meses/ano
- Barragem com lago de 2,26 ha e profundidade média de 3,5 m.

**Solução:**

- Entrando no software do site do DAEE (Capítulo 4) com as coordenadas geográficas e a área da microbacia, obtém-se  $Q_{média} = 11,0$  L/s e  $Q_{7,10} = 3,0$  L/s. Assim:

$$Q_{demanda} + Q_{jusante} + 0,05 Q_{média} = 0,60 Q_{média}$$

$$Q_{demanda} + 0,75 \cdot 3 + 0,05 \cdot 11 = 0,60 \cdot 11$$

$$Q_{demanda \text{ contínua máxima capaz de ser atendida pela microbacia}} = 3,8 \text{ L/s}$$

$$\text{Utilizando eq. 5.1} \rightarrow Q_{contínua} = \frac{Q_{bomba}}{A} \times \frac{n^{\circ} \text{ horas/dia}}{24} \times \frac{n^{\circ} \text{ dias/mês}}{30 \text{ dias}} \times \frac{n^{\circ} \text{ meses/ano}}{12 \text{ meses}}$$

$$Q_{contínua} = \frac{60}{60} \times \frac{20}{24 \text{ horas}} \times \frac{15}{30,417 \text{ dias}} \times \frac{6}{12 \text{ meses}} = 0,2055 \text{ L/s/ha} \therefore$$

$$Q_{demanda \text{ contínua necessária}} = 0,2055 \text{ L/s/ha} \times 60 \text{ ha} = 12,3 \text{ L/s}$$

Desta forma, verifica-se que a microbacia barrada não é capaz de satisfazer a demanda ( pois  $3,8 \text{ L/s} < 12,3 \text{ L/s}$ ).

Tendo em vista que o lago do barramento tem uma superfície de 2,26 ha com uma profundidade média de 3,5 m  $\rightarrow$  Volume do Reservatório = **79.100** m<sup>3</sup>.

Entrando com  $QF = 0,60 \times Q_{média} = 6,6$  L/s no programa do DAEE e calculando-se o volume do reservatório, obtém-se  $VR = 19.000$  m<sup>3</sup>.

Como o volume máximo de lago necessário para atender a demanda de 3,8 L/s seria 19.000 m<sup>3</sup>, verifica-se que o lago atual é mais do que o necessário, ou seja, aumentar a altura da crista da barragem não irá resolver o problema, pois a microbacia não será capaz de enchê-lo (o fator limitante é o tamanho da microbacia hidrográfica e não o tamanho do reservatório).

Comparada com os outros usos, a irrigação é considerada a grande “vilã” do sistema de usos múltiplos da água, devido à grande quantidade de água consumida e devido ao fato de que esse uso é consuntivo do tipo quantitativo.

O DAEE considera que, em média, necessita-se no Estado de São Paulo, a grosso modo, de 30 a 40 ha de bacia hidrográfica para gerar água suficiente capaz de irrigar 1 ha por aspersão.

**Exemplo:** calcular o número de pessoas que podem ser abastecidas em uma cidade (300 L/hab/dia), com a água correspondente à irrigação de 1 ha ( 4 mm/dia de lâmina bruta, em média).

*Solução:*

$$\rightarrow 4 \text{ mm/dia} = 4 \text{ L/m}^2/\text{dia} \times 10.000 \text{ m}^2 = 40.000 \text{ L/dia}$$

$$\rightarrow \frac{40.000 \text{ L/dia}}{300 \text{ L/hab/dia}} = 133 \text{ habitantes / ha irrigado}$$

### 5.3.3- Demandas máximas de água

A vazão de *demanda máxima* é utilizada quando se deseja obter uma outorga de captação a ser feita fora do lago da barragem (captação a fio d'água). Ela também é utilizada para se escolher a bomba hidráulica a ser utilizada na captação (vazão que consta da placa da bomba).

A seguir serão apresentados alguns exemplos em que é necessário se definir a vazão de demanda máxima.

#### a) Vazão de demanda máxima para projetos de irrigação

Quando não existe grande tradição de irrigação na região, o melhor é definir a vazão da bomba baseando-se em dados de evapotranspiração local e de valores de  $K_c$  (CAMARGO e SENTELHAS, 1997), da seguinte forma:

- 1- Obter séries de  $E_{To}$  semanais, de preferência maiores do que 15 anos e dividir os valores por 7, para passar para mm/dia;
- 2- Distribuir os valores de  $K_c$  em todas as semanas, de todos os anos;
- 3- Achar  $(E_{To} \times K_c)_{\text{Max}}$  para cada ano da série;
- 4- Colocar os valores em ordem decrescente;
- 5- Ajustar a uma distribuição de valores extremos;
- 6- Achar  $(E_{To} \times K_c)_{\text{Max}}$  para um período de retorno, geralmente, de 4 anos.; e
- 7- Utilizar a seguinte expressão para o cálculo da vazão da bomba:

$$Q_{\text{bomba}} = \frac{[(E_{To} \times K_c)_{\text{max}} \text{ para } T = 4 \text{ anos}] \times 0,11574 \times A \times 24}{E_f \times n^\circ \text{ horas de irrigação por dia}} \quad \text{equação 5.2}$$

Em que:

**$Q_{\text{bomba}}$**  – vazão da bomba em seu ponto de trabalho, L/s;

$[(ETo \times Kc)_{Max} \text{ para } T= 4 \text{ anos}]$  – evapotranspiração diária máxima da cultura para um período de retorno de 4 anos, mm/dia;

**A**-área irrigada, há;

**Ef**- eficiência de irrigação, decimal.

Quando a região tem tradição em irrigação, valores práticos podem ser obtidos com projetistas que nela trabalham, conforme se exemplifica na Tabela 5.2

**Tabela 5.2-** Lâminas brutas máximas de irrigação (vazões específicas).

<b>Lâminas brutas máximas reais (L/s/ha) sugeridas por Olitta (1978) para SP*</b>	
Gotejamento	0,5
Micro-aspersão	0,7
Aspersão convencional	1,0
Sulcos	1,5
Inundação	4,0
<b>Lâminas brutas máximas reais (L/s/ha) sugeridas por Carvalho (2011)*</b>	
Pivô em SP	0,75 a 0,80
Pivô em GO	0,90 a 1,05
Pivô em MS	1,15
Localizada em SP	0,40 a 0,50

\*Multiplicando-se esses valores pela área a ser irrigada já obtém-se a vazão da bomba (Qdemanda Max).

### **b) Captação para abastecimento de uma cidade**

Na Figura 5.3 estão esquematizados, simplificadamente, os diferentes trechos que compõem uma captação urbana. Nesse esquema, as vazões envolvidas serão as seguintes:

$$Q(1) = Q(2) = Q(3) = Q(\text{demanda média}) \times \frac{24 \text{ horas}}{20 \text{ horas}} \times K1 \quad \text{equação 5.3}$$

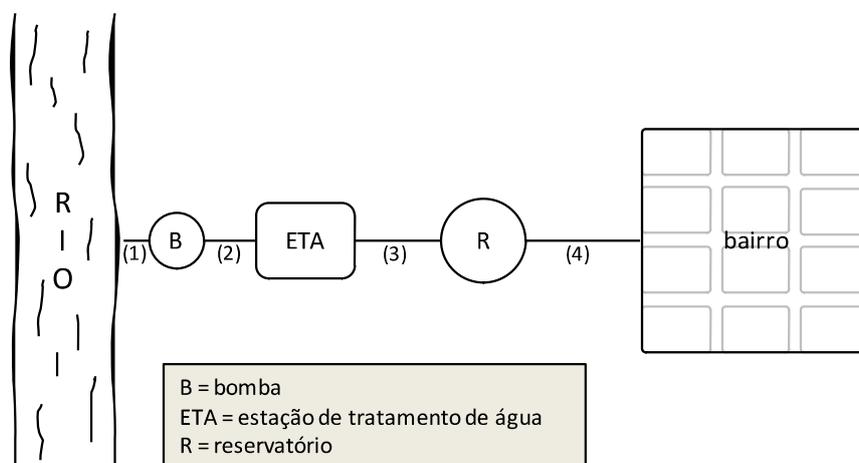
$$Q(4) = Q(\text{demanda média}) \times K1 \times K2 \quad \text{equação 5.4}$$

Em que:

**K1** – coeficiente do dia de maior demanda ( $\approx 1,2$ );

**K2** – coeficiente da hora de maior demanda ( $\approx 1,3$ ).

Na equação 5.3, não é utilizado o coeficiente K2, pois os trechos (1), (2) e (3) estão a montante do reservatório, que realizará a regularização horária. Já o trecho (4) deverá ser dimensionado considerando, também, a hora de maior consumo, pois está a jusante do reservatório.



**Figura 5.3-** Vazões envolvidas em um esquema de captação urbana simplificada.

Uma maneira expedita de se estimar o volume do reservatório é considerar o mesmo com uma capacidade de 1/6 a 1/3 do volume correspondente a um dia médio de consumo.

### c) Captação para bebedouros de bovinos

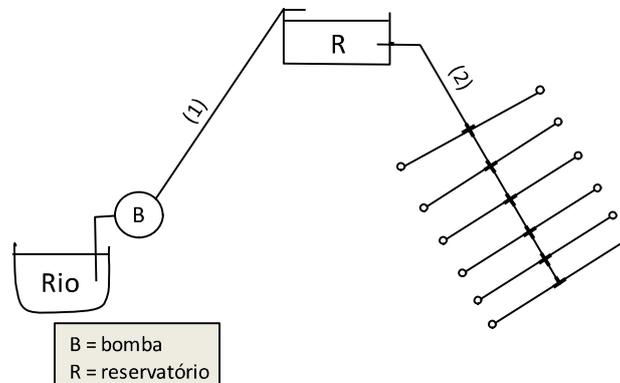
Na Figura 5.4 está esquematizado um sistema de bebedouros para bovinos. A vazão de dimensionamento do conjunto moto-bomba e do trecho (1) será dada por:

$$Q(1) = Q(\text{demanda média}) \times \frac{24 \text{ horas}}{20 \text{ horas}} \quad \text{equação 5.5}$$

A vazão de dimensionamento para o trecho (2), considerando que os bois só bebem água durante 10 horas/dia, será dada por:

$$Q(2) = Q(\text{demanda média}) \times \frac{24}{10}$$

equação 5.6



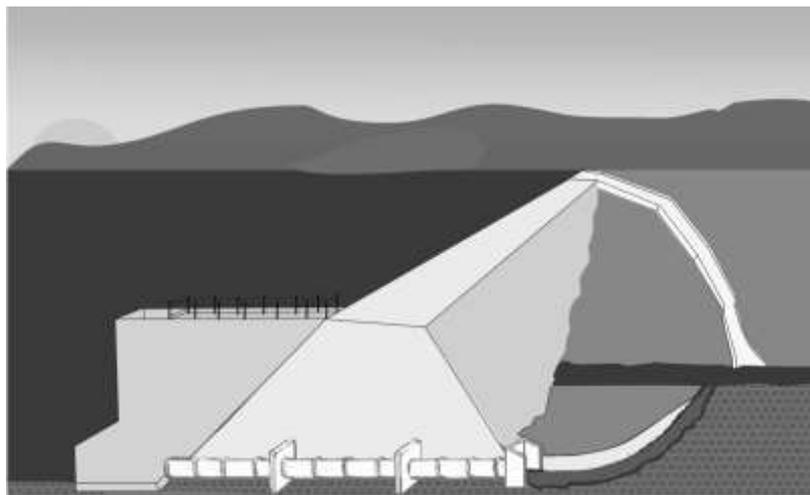
**Figura 5.4-** Desenho esquemático de um conjunto de bebedouros para bovinos.

O critério prático corrente para o dimensionamento do reservatório consiste em considerar que o mesmo deverá ter um volume correspondente a 2 dias de consumo, no mínimo.

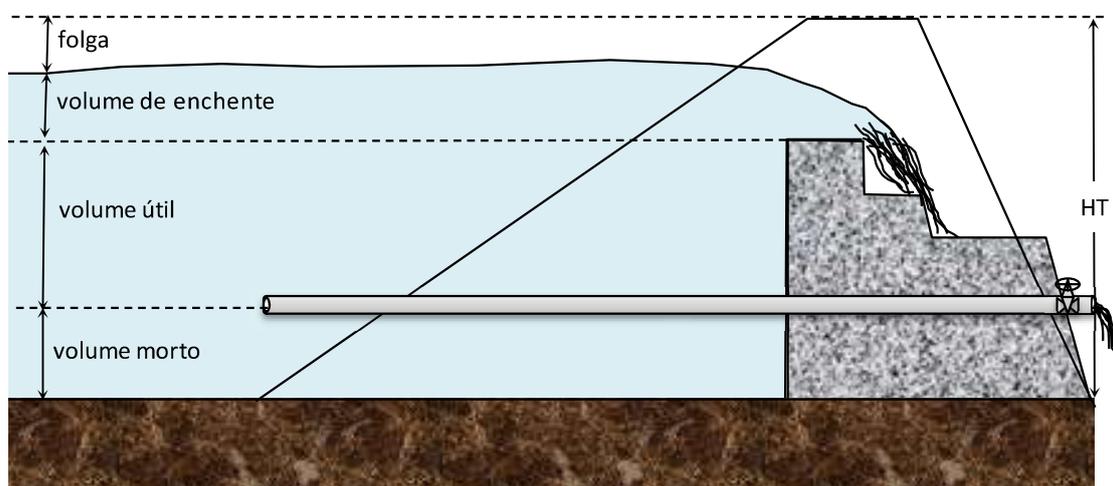
#### 5.4- Variáveis hidrológicas importantes para o dimensionamento de um pequeno barramento de terra

Na Figura 5.5 está representada uma pequena barragem de terra e na Figura 5.6 os principais elementos da barragem, vistos em corte durante uma cheia, quais sejam: o maciço de terra, o lago da barragem, o vertedor e o descarregador de fundo, também chamado de desarenador.

A *altura total do maciço* (HT), vista na Figura 5.6, é a soma das alturas correspondentes ao volume morto, ao volume útil (VR), ao volume de enchente (também chamado de volume amortecido ou de espera - correspondente a uma lâmina de 80 cm a 1,50 m), mais uma folga (“free-board” - que gira em torno de 0,50 à 1,00 metros, para pequenas barragens). O nível da soleira do vertedor é chamado de *NA normal* enquanto o nível da água, quando o vertedor está descarregando  $Q_{max}^*$  é chamado de *NA máximo*. Já o nível correspondente ao maciço total é chamado de nível da crista da barragem.



**Figura 5.5-** Esquema de uma pequena barragem de terra.



**Figura 5.6-** Corte esquemático de uma pequena barragem de terra.

#### **5.4.1- Garantia associada ao Volume Útil (VR)**

Como visto no Capítulo 4, no estudo da Regionalização Hidrológica para o Estado de São Paulo, para o cálculo de  $VR_{10}$  foi necessário se utilizar um valor tabelado denominado  $XT_{10}$ . Isto significa que o volume do reservatório foi calculado para um período de retorno de 10 anos. Conforme a utilidade do barramento, o período de retorno a ser adotado pode variar, conforme ilustra a Tabela 5.3:

**Tabela 5.3-** Valores sugeridos para o período de retorno relativo ao volume útil do barramento (VR)

<b>Finalidade do barramento</b>	<b>Período de retorno (T – anos)</b>
Irrigação	3 a 10
Indústria	10 a 40
Animais	40 a 100
Humano	$\geq 100$

No caso da captação para irrigação, por exemplo, é comum se utilizar  $T = 4$  anos. Isto significa que  $P = \frac{1}{T} = \frac{1}{4} = 0,25 = 25\%$ , ou seja, espera-se que, em média, uma vez a cada 4 anos não se consiga atender a ( $Q_{\text{demanda}} + Q_{\text{jusante}} + \text{Perdas}$ ).

Nesse caso, 25% é o risco que se corre, a cada ano, de ( $Q_{\text{demanda}} + Q_{\text{jusante}} + \text{Perdas}$ ) não ser atendida.

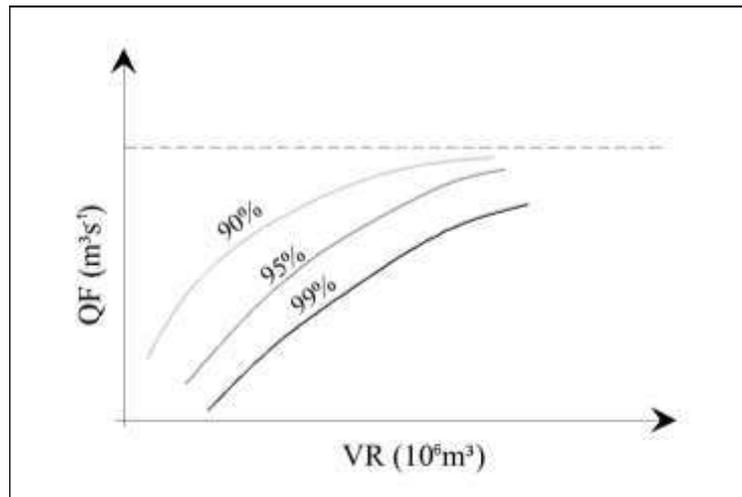
75% é a garantia ou certeza que se tem, a cada ano, de ( $Q_{\text{demanda}} + Q_{\text{jusante}} + \text{Perdas}$ ) ser atendida.

( $Q_{\text{demanda}} + Q_{\text{jusante}} + \text{Perdas}$ ), conforme visto no Capítulo 4, é a *vazão firme de regularização (QF)*, também chamada de vazão potencialmente regularizável ou vazão regularizada.

Assim, é possível, por exemplo, se dimensionar uma barragem para irrigação com vazão regularizável de 500 L/s e com segurança de 75%, e uma barragem para abastecimento urbano com vazão regularizável de 10 L/s e com uma garantia de 99%.

A título de exemplo, no Estado de São Paulo, o Sistema Cantareira regulariza uma vazão de 33 m<sup>3</sup>/s para a Região Metropolitana de São Paulo e 4,0 m<sup>3</sup>/s em direção à bacia do rio Piracicaba, com uma garantia de 99,1%, ou seja, com um risco de não atendimento de 0,9% ou um período de retorno de 111,11 anos.

Se forem calculadas as vazões firmes de regularização em função dos volumes de reservatório para diferentes garantias de atendimento (90, 95 e 99%, por exemplo) será obtida uma família de curvas, tal como apresentado na Figura 5.7.

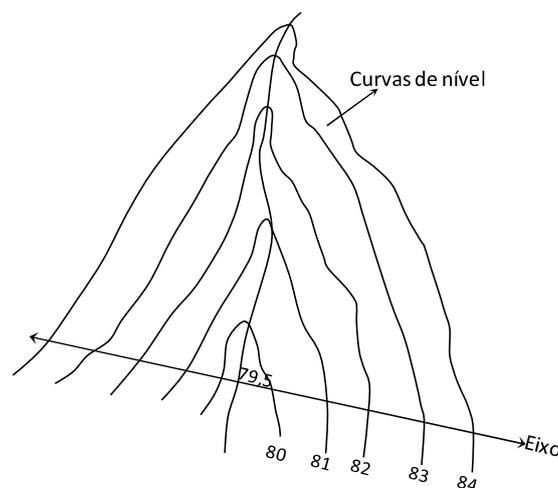


**Figura 5.7-** Curvas de regularização para diferentes níveis de garantia.

#### 5.4.2- Determinação da altura total do maciço (HT)

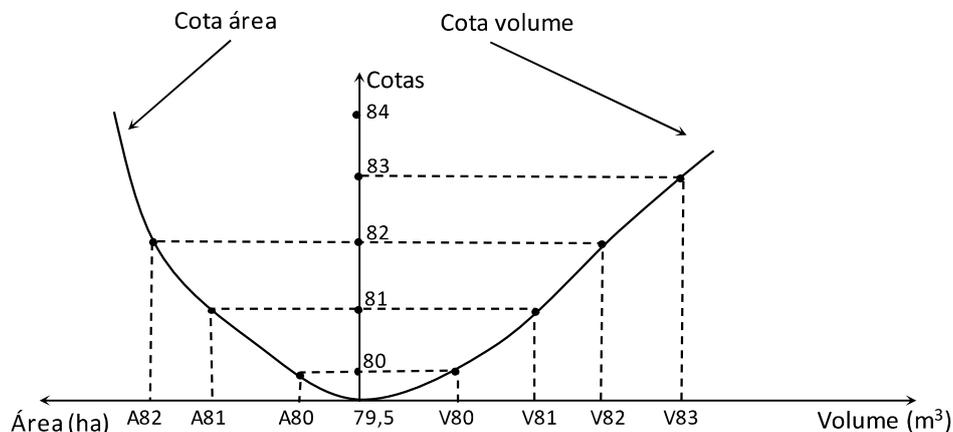
Uma vez determinado o *volume útil do barramento* (VR – que será visto em seguida), é possível se estimar a altura total do maciço (HT). O valor de HT vai definir o tipo de profissional que terá a habilitação técnica para fazer o projeto estrutural da obra.

Para se transformar o volume de água armazenado em altura do maciço é necessário se realizar o levantamento plani-altimétrico da área que futuramente será inundada. O mapa correspondente a esse trabalho deve ser apresentado em escala 1:2000, com curvas de 0,5 em 0,5 m ou de 1 em 1 m, conforme é ilustrado na Figura 5.8.



**Figura 5.8-** Mapa topográfico da área que formará o lago da barragem

O passo seguinte consiste em determinar a curva *cota x área*. Para tal se planimetra a área que cada curva de nível faz com o eixo do barramento, de forma acumulada, plotando-se a esquerda do gráfico apresentado na Figura 5.9.



**Figura 5.9-** Curvas cota x área (A), e cota x volume (B)

Em seguida, é necessário se determinar a curva *cota x volume*. Para tal, considerando-se que as áreas para cada cota foram determinadas, estima-se o volume relativo a cada cota, aproximadamente, usando a expressão do tronco de um cone, conforme é exemplificado a seguir:

$$V_{80} = \frac{(0 + A_{80})}{2} \times 0,5 \text{ m}$$

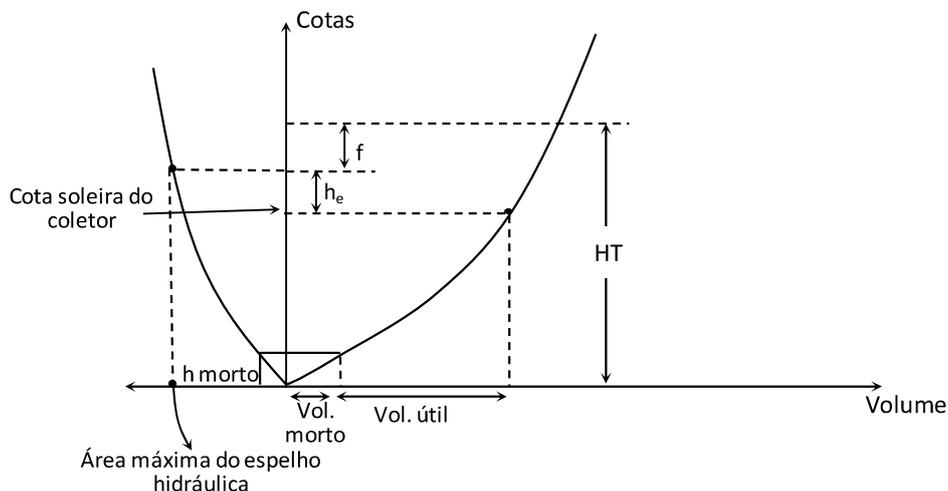
$$V_{81} = V_{80} + \frac{(A_{80} + A_{81})}{2} \times 1,0 \text{ m}$$

$$V_{82} = V_{81} + \frac{(A_{81} + A_{82})}{2} \times 1,0 \text{ m}; \quad \text{E assim sucessivam ente.}$$

Na maioria das vezes a curva cota X volume se ajusta bem a uma função do tipo potência. No caso de cálculos para a estimativa do amortecimento de ondas de cheia proporcionado pelo reservatório, muitas vezes usam-se curvas cota X volume que englobam apenas a parte acima do vertedor, ou seja, considera-se a contagem dos volumes a partir da cota da soleira do vertedor.

De posse dessas duas curvas, procede-se da seguinte forma: conhecendo-se a altura morta, entra-se na curva cota x volume e determina-se o volume morto. A esse volume valor soma-se o volume útil (VR). Entrando-se com essa soma na curva cota x

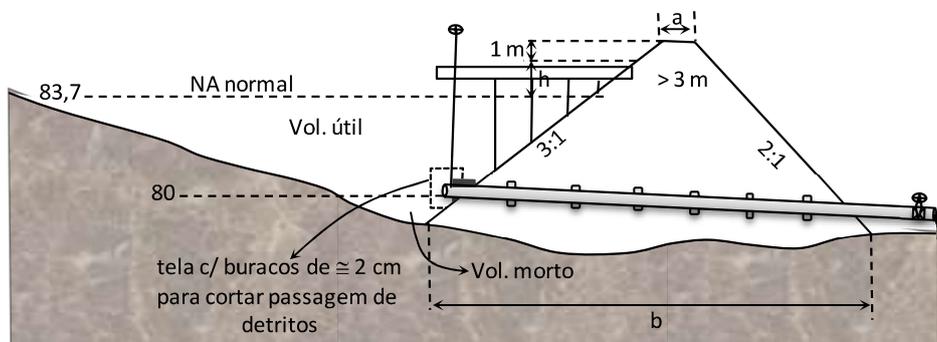
volume, obtém-se a cota do fundo do vertedor (nível normal). Somando-se esse valor à lâmina de enchente ( $h_e$ ) e à folga ( $f$ ), obtém-se a altura total do maciço. Esses passos são mostrados graficamente na Figura 5.10.



**Figura 5.10** - Determinação da altura do maciço (HT), necessária à atender um certo volume útil (VR) de água armazenada no lago do barramento.

#### 5.4.3- Volume de terra movimentado e estimativa do custo do barramento

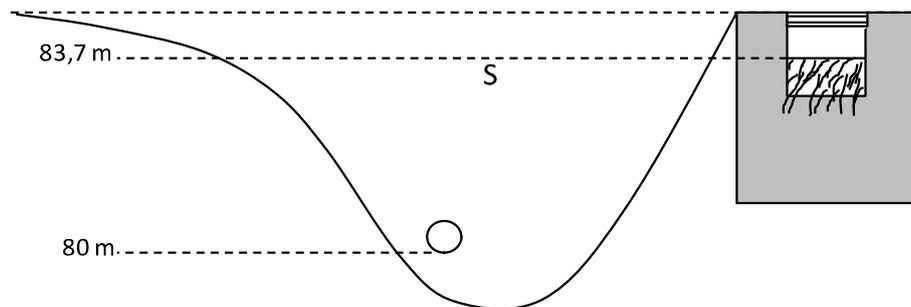
Na Figura 5.11 está esquematizado um corte de um maciço de uma pequena barragem de terra com talude de montante igual a 3:1 e talude de jusante igual a 2:1. Supondo que a crista tenha uma largura  $a = 5$  m e  $HT = 4,5$  m, então a base maior  $b$  será igual a  $3 \times 4,5 + 5 + 2 \times 4,5 = 27,5$  m. A base média (bm) do maciço será  $(5 + 27,5) / 2 = 16,25$  m.



**Figura 5.11**- Esquema de corte de um maciço ilustrando o coroamento (a) e a base maior (b).

Na Figura 5.12 está representada a batimetria da seção onde se pretende erguer o eixo do maciço, destacando-se a seção S. Supondo que S seja igual a 800 m<sup>2</sup>, uma estimativa do volume do barramento será dado por:

$$\text{Vol} = \frac{(a + b)}{2} \times S = \text{bm} \times S = 16,25 \text{ m} \times 800 \text{ m}^2 = 13.000 \text{ m}^3$$



**Figura 5.12-** Corte longitudinal do maciço de terra.

Dentre alguns métodos práticos de se estimar o custo de uma futura barragem, um dos mais utilizados é o que se baseia no volume do maciço. Valores atuais (2012) propõem que se utilize de R\$ 8,50 a R\$ 10,00 por m<sup>3</sup> de terra movimentada; o volume de terra movimentada pode ser calculado multiplicando-se o volume do maciço por 1,4 (fator multiplicativo devido ao empolamento da terra). A esse valor deve-se somar cerca de R\$ 300,00 por m<sup>3</sup> de concreto utilizado, volume este que pode ser obtido com o engenheiro calculista das estruturas feitas com este material.

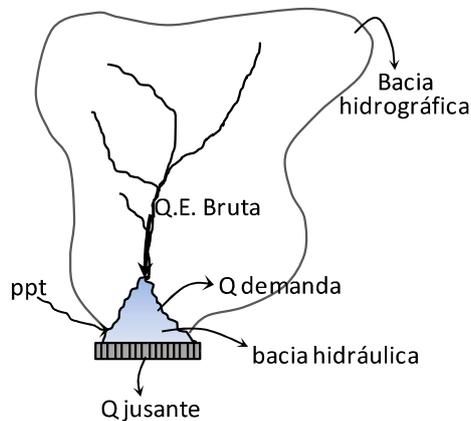
#### **5.4.4- Cálculo do volume do reservatório quando se dispõe de séries de dados de vazão medidas, supondo regularização intra-anual (Método da Planilha)**

No Capítulo 4 foi descrito um procedimento de cálculo aproximado para determinação de volume útil de reservatório (VR), quando não se dispõe de séries de dados de vazão medidas, utilizando apenas a Regionalização Hidrológica Paulista.

Nesse item será visto um método, ainda aproximado, mas que opera com dados medidos de vazão. O método supõe que o ciclo de enchimento e esvaziamento do reservatório se dê dentro de um período de 1 ano, e que o processo que ocorre durante um dado ano não influencia no ano seguinte. Essas pressuposições simplificadoras permitem que o método seja aplicado a cada ano da série, e que na sequência se realize

uma análise de eventos extremos (Capítulo 7) para se associar VR a um período de retorno desejado.

Na Figura 5.13 está esquematizada uma bacia hidrográfica que contribui para um reservatório de regularização.



**Figura 5.13-** Variáveis envolvidas no balanço de água de um reservatório de regularização.

Em que:

**Q.E.Bruta** – vazão de entrada bruta, L/s;

**Q. Jusante** – vazão que se exige manter a jusante do barramento, L/s;

**Ev** – vazão que se perde por evaporação no lago do barramento, L/s;

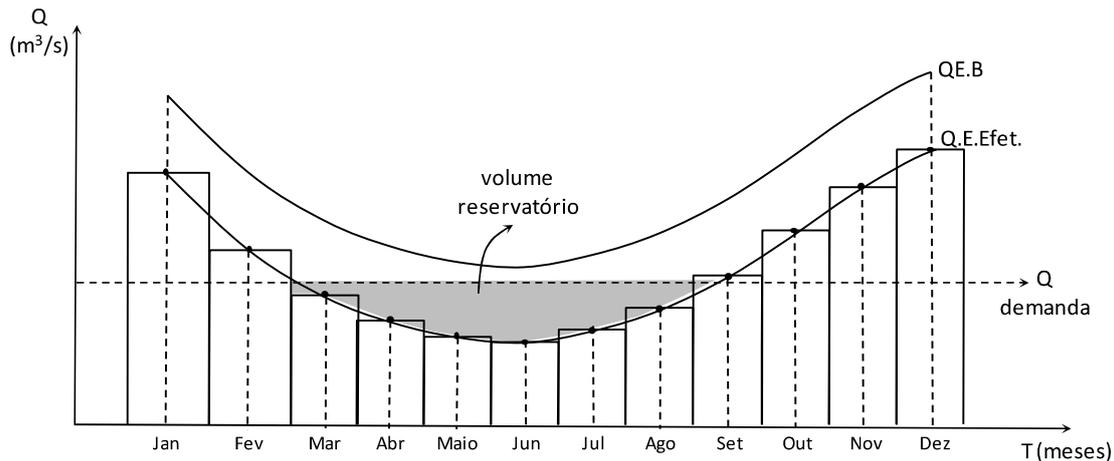
**ppt** – vazão adicionada ao lago devido à chuva, L/s; e

**Q.demanda** – vazão de demanda captada no lago do barramento, L/s.

Tendo em vista essas variáveis, define-se a vazão de entrada efetiva (Q.E.Efetiva) que é dada por:

$$Q.E.efetiva = Q.E.Bruta + ppt - Q.Jusante - Ev \quad \text{equação 5.7}$$

A determinação do volume útil do reservatório (VR), para cada ano, consiste em se realizar um balanço, na maioria das vezes mensal, entre a vazão de entrada efetiva (Q.E.efetiva) e a vazão de demanda captada no lago do barramento (Q.demanda). Esse balanço é apresentado esquematicamente na Figura 5.14.



**Figura 5.14-** Determinação do volume do reservatório (área achurada) por meio do contraste entre a vazão de demanda e a vazão de entrada efetiva.

Verifica-se, portanto, que VR é dado pelo somatório dos valores positivos mensais de  $(Q.\text{demanda} - Q. E. \text{Efetiva})$ . Na sequência é apresentado um exemplo para 1 ano de uma série de dados. Este cálculo deve ser repetido para os outros anos da série, a fim de obter-se VR para um dado período de retorno.

*Exemplo:* calcular o volume do reservatório com uma planilha, já semi-preenchida, que dispõe dos seguintes dados de entrada:

- Coluna 1 – Q.Ent.Bruta, L/s;
- Coluna 2 – Q.Jusante, L/s;
- Coluna 3 – Q. Demanda, L/s;
- Coluna 4 – Evaporação do Tanque Classe “A” – ECA, mm/mês;
- Coluna 5 – Ppt – Precipitação pluvial, mm/mês;
- Área estimada do espelho hidráulico do lago do barramento  $\approx 5,0$  ha;
- Razão  $\frac{\text{Vazão}}{\text{Precipitação}}$  da bacia hidrográfica  $= \alpha \approx 0,25$ .

*Solução:*

As colunas de 1 a 5 representam dados de entrada; as colunas de 6 a 10 permitem a transformação de unidades; as colunas de 11 a 13 representam as saídas.

$$\text{Coluna 6} \Rightarrow \frac{C1 \times 3600 \times 24 \times 30,417}{1000 \times 1000} = C1 \times 2,628$$

**Obs:**  $30,417 = 365 / 12 =$  número médio de dias em um mês.

Coluna 7  $\Rightarrow C2 \times 2,628$

Coluna 8  $\Rightarrow C3 \times 2,628$

Coluna 9  $\Rightarrow \frac{C4 \times 50.000 \times 0,70}{1000 \times 1000} = C4 \times 0,035$

**Obs:** 0,70 é um coeficiente aproximado utilizado para transformar a evaporação de um tanque classe “A” na evaporação ocorrida em uma grande superfície líquida, como o lago da barragem, por exemplo.

Coluna 10  $\Rightarrow \frac{C5 \times 50.000 \times (1 - 0,25)}{1000 \times 1000} = C5 \times 0,0375$

**Obs:** o multiplicador  $(1 - 0,25)$  é utilizado para considerar que 25% da chuva já faz parte da vazão de entrada bruta.

Coluna 11  $\Rightarrow C6 - C7 - C9 + C10$

Coluna 12  $\Rightarrow (+) \{C8 - C11\}$  (somente os positivos)

**Obs:** a coluna 12 é preenchida com os valores positivos da subtração entre C8 e C11. Quando a subtração der um valor negativo, deve-se colocar Zero na célula.

Volume do reservatório =  $\sum C12 = 518,84 (m^3 \times 1000)$

PLANILHA PARA O CÁLCULO DO VOLUME DO RESERVATÓRIO													
0	DADOS DE ENTRADA			CORREÇÕES E TRANSFORMAÇÕES DE UNIDADES						BALANÇO E SAÍDAS			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
MÊS	Q. Ent. Bruta (litros/s)	Q. Jusante (litros/s)	Q. Demanda (litros/s)	E.C.A. (mm/mês)	PPT (mm/mês)	Vol. Ent. Brut. (m3 x 1000)	Vol. Jusante (m3 x 1000)	Vol. Demanda (m3 x 1000)	Vol. Evapor. (m3 x 1000)	Vol. PPT (m3 x 1000)	Vol. Ent. Efet. (m3 x 1000)	Vol. Armaz. (m3 x 1000)	Vol. Ent. Ef. Ac. (m3 x 1000)
JAN.	400	15	60	150	300	1051,21	39,42	157,68	5,25	11,25	1017,79	0,00	1017,79
FEV.	200	15	60	170	200	525,61	39,42	157,68	5,95	7,50	487,74	0,00	1505,53
MAR.	100	15	60	140	150	262,80	39,42	157,68	4,90	5,63	224,11	0,00	1729,63
ABR.	60	15	60	120	120	157,68	39,42	157,68	4,20	4,50	118,56	39,12	1848,20
MAI.	55	15	60	100	80	144,54	39,42	157,68	3,50	3,00	104,62	53,06	1952,82
JUN.	50	15	60	90	50	131,40	39,42	157,68	3,15	1,88	90,71	66,98	2043,52
JUL.	45	15	60	70	20	118,26	39,42	157,68	2,45	0,75	77,14	80,54	2120,66
AGO.	40	15	60	60	0	105,12	39,42	157,68	2,10	0,00	63,60	94,08	2184,26
SET.	30	15	60	70	50								
OUT.	50	15	60	90	70								
NOV.	100	15	60	100	100								
DEZ.	300	15	60	120	200								
											Vol. Reserv. (m3 x 1000)		
											Vol. Ent. Ef. An. (m3 x 1000)		
											Q. Ent. Ef. Med. (litros/s)		

**Observações finais:**

\*A Coluna 13 é igual à Coluna 11 acumulada.

\*O Volume de Entrada Efetivo Anual é igual à última célula da Coluna 13.

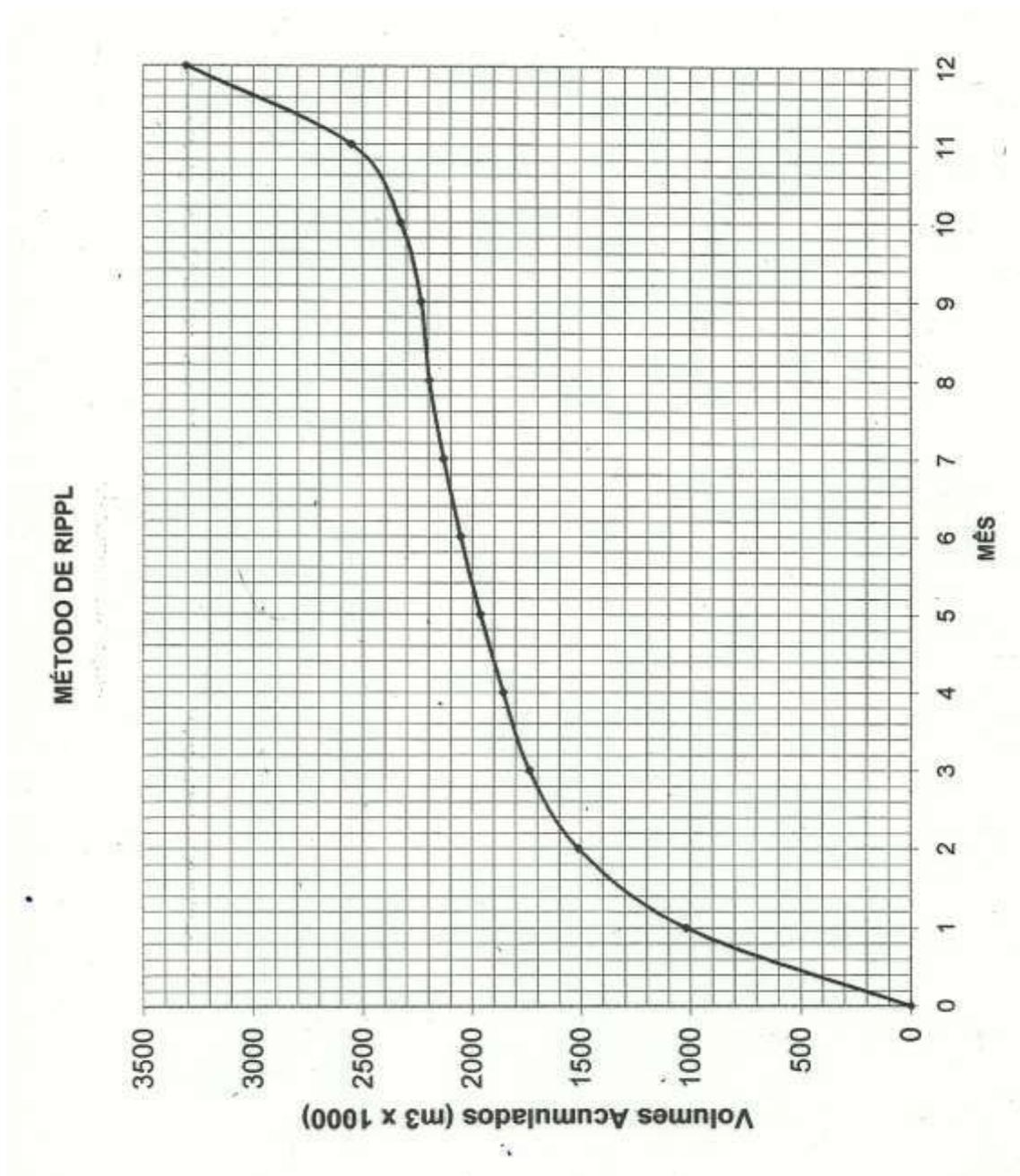
\*A Vazão de Entrada Efetiva Média é dada pela seguinte expressão:

$$Q.\text{Ent.Efet. Média} = \frac{\text{Vol. Ent. Efet. Anual} \times 1000 \times 1000}{365 \times 24 \times 3600} = 104,34 \text{ L/s}$$

\*Esta vazão representa a máxima vazão capaz de ser captada continuamente com um reservatório maior.

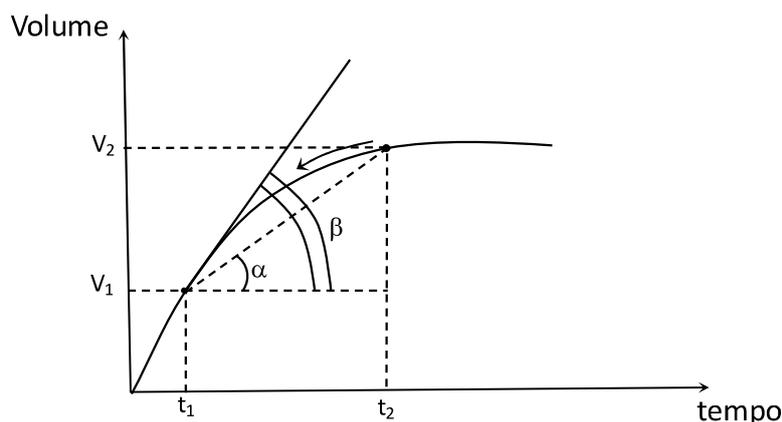
#### **5.4.5- Cálculo do volume do reservatório quando se dispõe de séries de dados de vazão medidas, supondo regularização intra-anual (Introdução ao Método Gráfico de Rippl).**

Esse método é semelhante ao visto anteriormente, com a diferença de operar de forma gráfica e só poder ser aplicado a vazões de demanda constantes ao longo do ano. Para implementá-lo, o primeiro passo consiste em desenhar a Coluna 13 (Volumes de Entrada Efetivos Acumulados) em função dos meses, como pode ser visualizado na Figura 5.15. Esta figura é, na realidade, a integral numérica do histograma da Figura 5.14.



**Figura 5.15-** Volumes de entrada efetivos em função dos meses.

Na Figura 5.16 está representada uma parte do início da curva da Figura 5.15. Nesta, em um tempo  $t_1$ , entrou efetivamente no reservatório um volume  $V_1$ , e no tempo  $t_2$ , entrou um volume  $V_2$ . Assim, pode-se afirmar que:



**Figura 5.16-** Secante e tangente à curva dos volumes de entrada efetivos acumulados.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \text{Volume}}{\Delta t} = \text{Vazão de entrada efetiva média entre } t_1 \text{ e } t_2$$

Imaginando-se que o ponto (2) caminha em direção ao ponto (1) (conceito de derivada), tem-se, no limite, que:

$$\operatorname{tg} \beta = \text{Vazão de entrada efetiva instantânea em } t_1$$

Isto significa que o coeficiente angular da reta tangente (derivada) da curva dos volumes de entrada efetivos acumulados tem a dimensão de vazão.

O *Gráfico de Rippl* pode ser usado para responder a 3 perguntas básicas:

1ª) *Qual o volume do reservatório necessário para satisfazer uma dada vazão de demanda?*

Para responder essa pergunta, inicialmente, é necessário calcular o Volume de Demanda Anual:

$$\text{Volume de Demanda Anual (1000 m}^3\text{)} = \frac{Q \cdot \text{Demanda (L/s)} \times 3.600 \times 24 \times 365}{10^6} \quad \text{equação 5.8}$$

O valor obtido em (5.8) deve ser marcado no gráfico 5.15, de modo que, ao ligar esse ponto à origem, obtém-se a hipotenusa de um triângulo (Figura 5.16). Em seguida, traçam-se duas retas paralelas à hipotenusa e que sejam tangentes às concavidades inferior e superior da curva. A distância entre essas duas retas, *medida na vertical*, fornecerá o volume do reservatório.

Isto significa que o coeficiente angular da reta tangente (derivada) da curva dos volumes de entrada efetivos acumulados tem a dimensão de vazão.

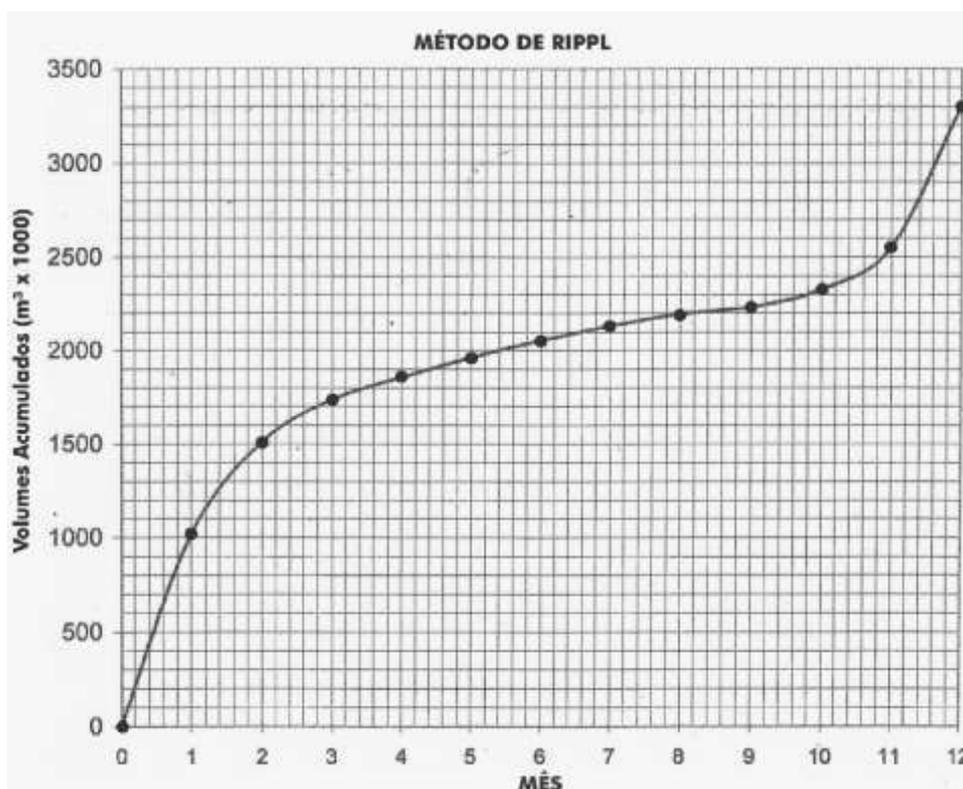


Figura 5.17- Volume de entrada efetivo acumulado (Coluna 13) em função dos meses

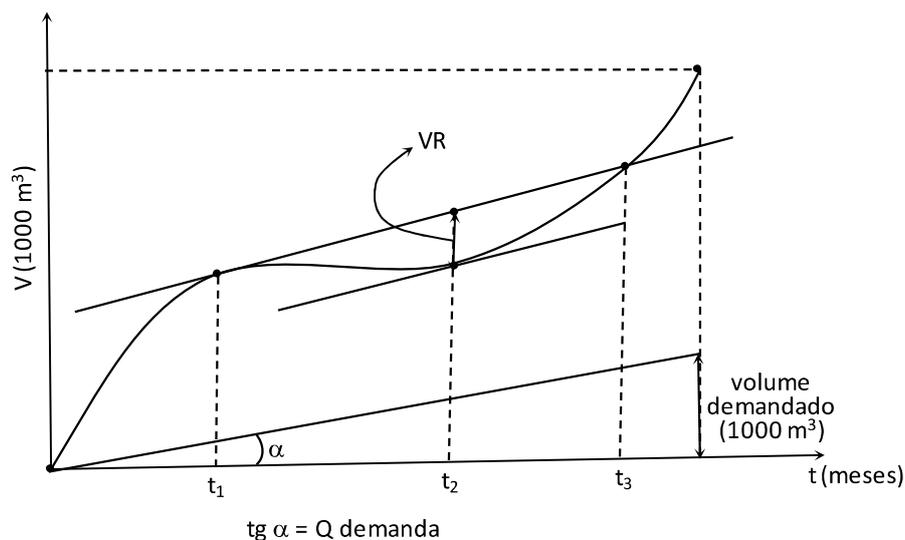
O Gráfico de Rippl pode ser usado para responder a 3 perguntas básicas:

1ª) Qual o volume do reservatório necessário para satisfazer uma dada vazão de demanda?

Para responder essa pergunta, inicialmente, é necessário calcular o Volume de Demanda Anual:

$$\text{Volume de Demanda Anual (1000 m}^3\text{)} = \frac{Q \cdot \text{Demanda (L/s)} \times 3.600 \times 24 \times 365}{10^6} \quad (5.9)$$

O valor obtido em (5.9) deve ser marcado no gráfico 5.15, de modo que, ao ligar esse ponto à origem, obtém-se a hipotenusa de um triângulo (Figura 5.18). Em seguida traçam-se duas retas paralelas à hipotenusa e que sejam tangentes às concavidades

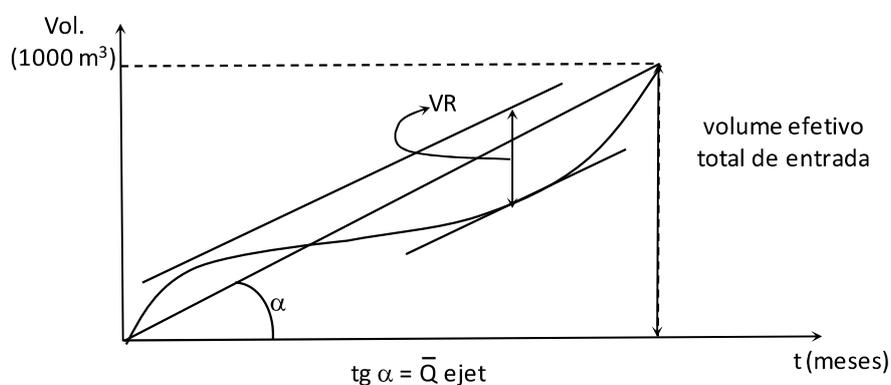


**Figura 5.18** – Procedimento gráfico para a obtenção do volume de um reservatório necessário para satisfazer certa vazão de demanda ( $Q$ .demanda).

Ainda em relação à Figura 5.18, o tempo  $t_1$  representa o início do esvaziamento do reservatório; o tempo  $t_2$  é aquele em que o reservatório encontra-se em seu nível mais baixo; no tempo  $t_3$  o reservatório volta a ficar cheio, sendo que, em seguida, a vazão de entrada verterá para jusante.

2ª) Qual o volume do reservatório necessário para satisfazer a maior vazão de demanda possível?

A maior vazão de demanda capaz de ser satisfeita é a Vazão Efetiva Média de Entrada. Portanto, para resolver este problema, basta fazer o Volume de Demanda Anual igual ao Volume Efetivo Total de Entrada Anual (Figura 5.19) e proceder tal como visto no primeiro problema.

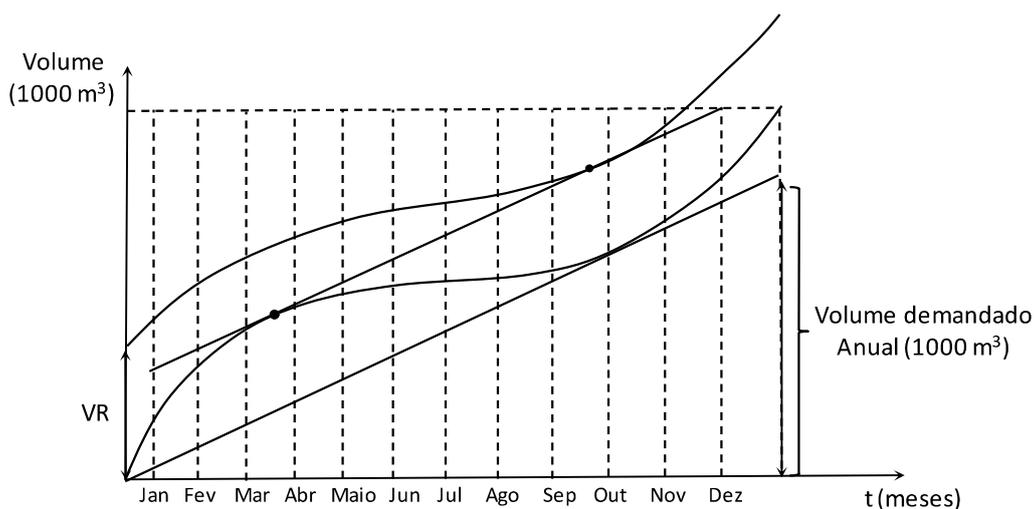


**Figura 5.19** - Procedimento gráfico para se determinar o volume do reservatório ( $VR$ ) capaz de satisfazer a maior vazão de demanda possível.

3ª) Qual a vazão de demanda capaz de ser satisfeita por um dado volume de reservatório?

Para se resolver esse problema é necessário, inicialmente, traçar uma segunda curva, que diste de um valor VR acima da primeira (Figura 5.20). Em seguida, traça-se uma reta que tangencia as duas curvas simultaneamente. Essa reta é rebatida para a origem, determinando um seguimento no final do gráfico. Esse seguimento representa o Volume de Demanda Anual capaz de ser satisfeito por esse reservatório. A vazão de demanda, portanto, será dada pela equação 5.10:

$$Q.\text{demanda (L/s)} = \frac{\text{Vol. Demanda Anual (1000 m}^3\text{)} \times 10^6}{365 \times 24 \times 3.600} \quad \text{equação 5.10}$$



**Figura 5.20** - Método gráfico para se estimar a vazão de demanda capaz de ser suprida por um dado volume de reservatório (VR).

*Exercício:* dada a curva dos Volumes de Entrada Efetivos Acumulados (Figura 5.15), pergunta-se:

- 1º) Qual o Volume Útil do Reservatório (VR) para suprir uma Vazão de Demanda Contínua de 60 L/s?
- 2º) Qual o Volume Útil do Reservatório (VR) para suprir a maior Vazão de Demanda Contínua capaz de ser satisfeita?

3º) Qual a Vazão de Demanda Contínua capaz de ser satisfeita com um reservatório de Volume Útil (VR) igual a  $250 \times 10^3 \text{ m}^3$ ?

*Respostas:*

1º) VR =  $548 \times 10^3 \text{ m}^3$ .

2º) VR =  $1.493 \times 10^3 \text{ m}^3$

3º) Q.Demanda = 46 L/s

#### **5.4.6- Método de Rippl para regularização plurianual**

Os métodos que consideram a *regularização plurianual* proporcionada por um reservatório representam melhor a realidade, pois na prática, o volume armazenado em um ano pode influenciar o volume dos anos seguintes. Isto significa que volumes calculados ano a ano, individualmente, não devem ser considerados eventos independentes. Assim, essa técnica é particularmente importante para reservatórios maiores, principalmente em regiões semi-áridas, onde o regime das secas pode durar vários anos.

Nesse contexto, o Método de Rippl consiste em utilizar os mesmos fundamentos vistos no item 5.4.4, mas aplicados para uma série de vários anos de dados de vazão de entrada efetiva, ao invés de um ano por vez. Pode ser aplicado, também, ao conjunto de 4 a 5 anos mais secos da série. Se a série tiver 30 anos de dados, por exemplo, o período de retorno relativo ao VR encontrado será  $T=30$  anos.

Outro aspecto importante quanto ao uso desse método é que a vazão de demanda necessita ser constante ao longo dos anos. Ao se aplicar o método, parte-se do princípio de que no início do processo o reservatório está cheio.

*Exemplo:*

Na tabela a seguir são dadas as vazões mensais de um rio intermitente, para os 4 anos mais secos da série, assim como as chuvas e a evaporação na região. Considera-se que a área média do lago do barramento seja de 400 acres e que o rendimento hidrológico da bacia seja de 20%.

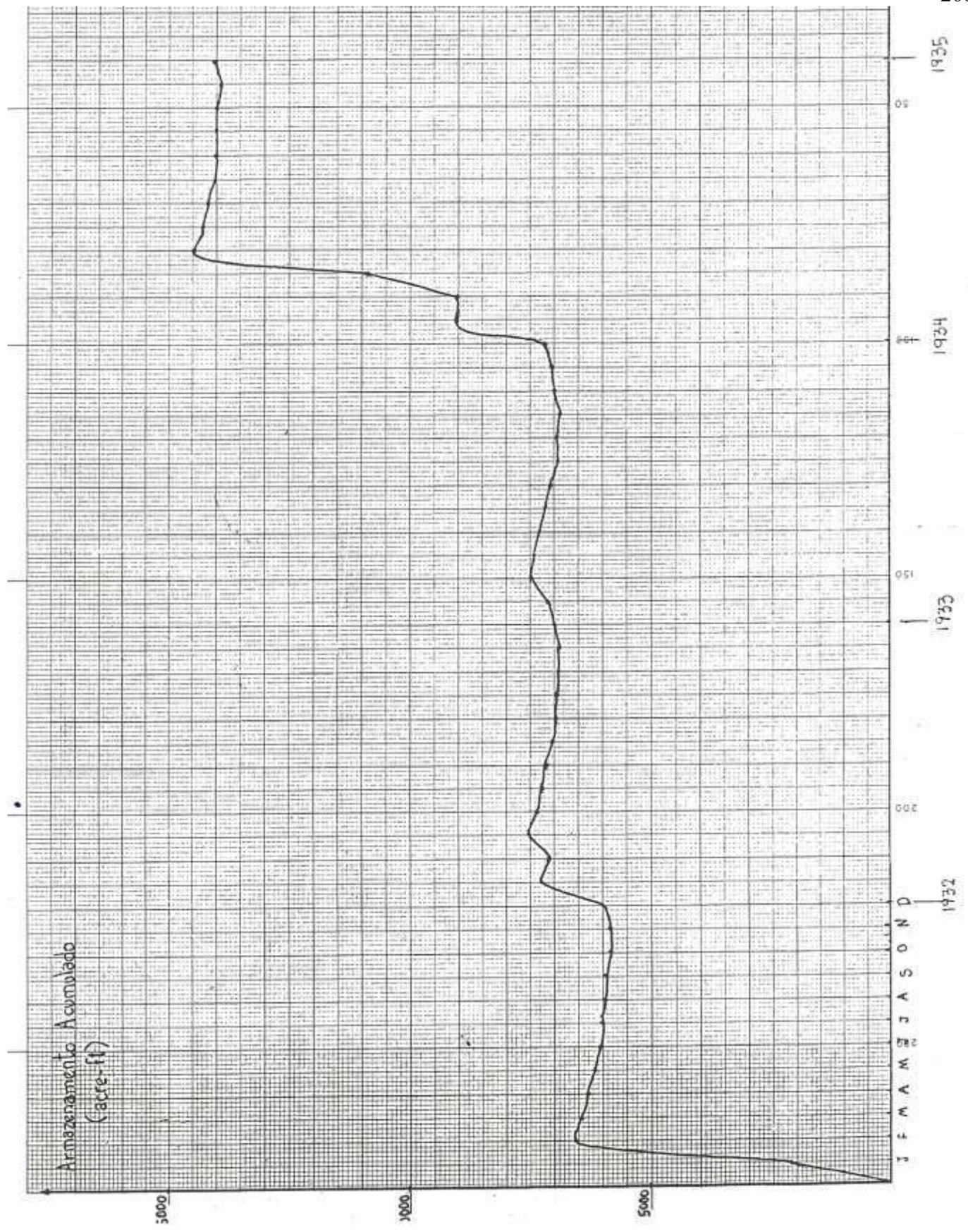
A coluna (VII) foi plotada no gráfico a seguir; considera-se que não há necessidade de se manter vazão a jusante. Pergunta-se:

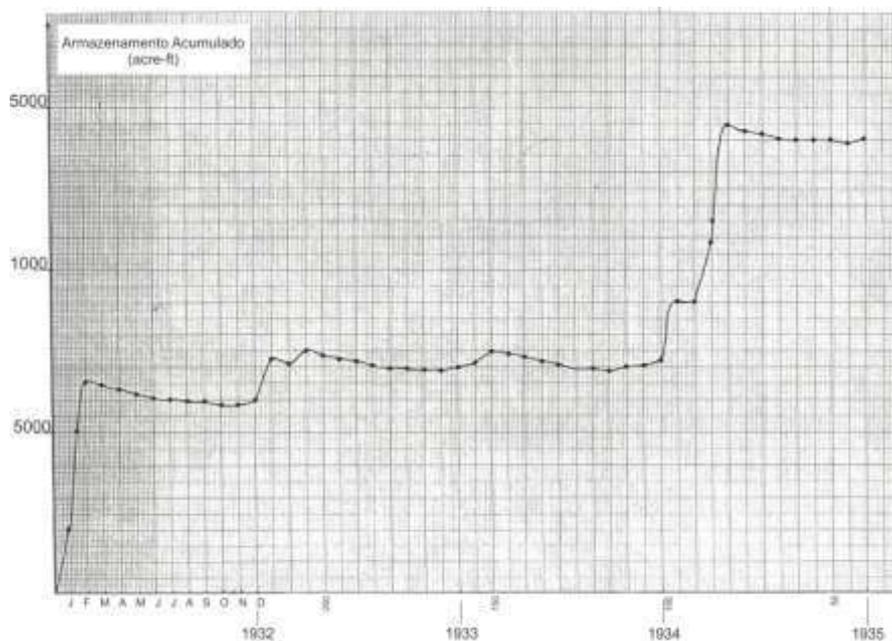
- a) Qual é a máxima vazão capaz de ser regularizada?
- b) Para essa vazão máxima, qual o volume útil do reservatório (VR)?
- c) Qual o valor de VR para uma vazão de demanda de 700 acre-pé/ano?
- d) Se o VR for igual a 500 acre-pé, qual a vazão demandada que poderá ser suprida?

*Respostas:*

- a)  $Q_{\text{demanda}} = 3.500$  acre-pé/ano
- b)  $VR = 9.500$  acre-pé
- c)  $VR = 1.900$  acre-pé
- d)  $Q_{\text{demanda}} = 1.950$  acre-pé/ano

ANO	MES	(I)		(II)	(III)	(IV)		(V)	(VI)		(VII)
		VOL. ENTRADA (acre-pé)	VOL. ENTRADA (polegada)			E.C.A. (pé)	VOL. EVAP.=(III)*0,7*400 (acre-pé)		ARM. MENSAL=(I)-(IV)+(V) (acre-pé)	ARM. ACUM. (acre-pé)	
1932	JAN	2030	4,5	0,20	56,0	0,29	150,0	2124,0	4535,5	2124,0	6659,5
1932	FEV	4460	4,7	0,29	81,2	0,42	156,7	1567,0	-100,9	4535,5	6558,5
1932	MAR	0	0,5	0,42	117,6	0,48	16,7	16,7	-111,1	-100,9	6447,5
1932	ABR	0	0,7	0,48	134,4	0,51	23,3	23,3	-128,1	-111,1	6319,3
1932	MAI	8	0,2	0,51	142,8	0,45	6,7	6,7	-126,0	-128,1	6193,3
1932	JUN	0	0,0	0,45	126,0	0,38	0,0	0,0	-106,4	-126,0	6193,3
1932	JUL	0	0,0	0,38	106,4	0,25	0,0	0,0	-70,0	-106,4	6086,9
1932	AGO	0	0,0	0,25	70,0	0,14	0,0	0,0	-39,2	-70,0	6016,9
1932	SET	0	0,0	0,14	39,2	0,07	0,0	0,0	-6,3	-39,2	5977,7
1932	OUT	0	0,4	0,07	19,6	0,08	13,3	13,3	4,3	-6,3	5971,5
1932	NOV	0	0,8	0,08	22,4	0,11	26,7	26,7	125,5	4,3	5975,7
1932	DEZ	3	4,6	0,11	30,8	0,20	153,3	153,3	1292,3	125,5	6101,2
1933	JAN	1045	9,1	0,20	56,0	0,29	303,3	303,3	-15,2	1292,3	7393,6
1933	FEV	26	1,2	0,29	81,2	0,42	40,0	40,0	335,7	-15,2	7378,4
1933	MAR	340	3,4	0,42	117,6	0,48	113,3	113,3	-121,7	335,7	7714,1
1933	ABR	6	0,2	0,48	134,4	0,51	6,7	6,7	-75,5	-121,7	7592,4
1933	MAI	4	1,9	0,51	142,8	0,45	63,3	63,3	-125,0	-75,5	7516,9
1933	JUN	1	0,0	0,45	126,0	0,38	0,0	0,0	-106,4	-125,0	7391,9
1933	JUL	0	0,0	0,38	106,4	0,25	0,0	0,0	-70,0	-106,4	7285,5
1933	AGO	0	0,0	0,25	70,0	0,14	0,0	0,0	-39,2	-70,0	7215,5
1933	SET	0	0,0	0,14	39,2	0,07	63,3	63,3	43,7	-39,2	7176,3
1933	OUT	0	1,9	0,07	19,6	0,08	0,0	0,0	-22,4	43,7	7220,0
1933	NOV	0	0,0	0,08	22,4	0,11	230,0	230,0	49,3	-22,4	7197,6
1933	DEZ	0	6,9	0,11	30,8	0,20	193,0	193,0	402,1	49,3	7396,8
1934	JAN	62	1,3	0,20	56,0	0,29	43,3	43,3	-104,6	402,1	7446,1
1934	FEV	300	5,5	0,29	81,2	0,42	183,3	183,3	-103,1	-104,6	7848,3
1934	MAR	13	0,0	0,42	117,6	0,48	0,0	0,0	-106,0	-103,1	7743,7
1934	ABR	8	0,7	0,48	134,4	0,51	23,3	23,3	-116,8	-106,0	7640,6
1934	MAI	6	0,6	0,51	142,8	0,45	20,0	20,0	-106,0	-116,8	7523,8
1934	JUN	0	0,6	0,45	126,0	0,38	0,0	0,0	-106,4	-106,0	7417,8
1934	JUL	0	0,0	0,38	106,4	0,25	0,0	0,0	-70,0	-106,4	7311,4
1934	AGO	0	0,0	0,25	70,0	0,14	33,3	33,3	13,7	-70,0	7241,4
1934	SET	0	1,0	0,14	39,2	0,07	170,0	170,0	93,5	13,7	7235,5
1934	OUT	0	1,0	0,07	19,6	0,08	33,3	33,3	147,6	93,5	7249,3
1934	NOV	0	5,1	0,08	22,4	0,11	123,3	123,3	2067,3	147,6	7396,9
1934	DEZ	1	3,7	0,11	30,8	0,20	303,3	303,3	93,9	93,5	7490,4
1935	JAN	1820	9,1	0,20	56,0	0,29	43,3	43,3	-19,9	2067,3	9557,7
1935	FEV	18	1,3	0,29	81,2	0,42	196,7	196,7	1709,1	-19,9	9537,8
1935	MAR	1630	5,9	0,42	117,6	0,48	193,3	193,3	3738,9	1709,1	11246,9
1935	ABR	3680	5,8	0,48	134,4	0,51	0,0	0,0	-119,8	3738,9	14985,8
1935	MAI	23	0,0	0,51	142,8	0,45	0,0	0,0	-118,0	-119,8	14866,0
1935	JUN	8	0,0	0,45	126,0	0,38	0,0	0,0	-105,4	-118,0	14748,0
1935	JUL	1	0	0,38	106,4	0,25	0,0	0,0	-70,0	-105,4	14642,6
1935	AGO	0	0	0,25	70,0	0,14	6,7	6,7	-32,5	-70,0	14572,6
1935	SET	0	0,2	0,14	39,2	0,07	26,7	26,7	7,1	-32,5	14540,1
1935	OUT	0	0,8	0,07	19,6	0,08	16,7	16,7	-5,7	7,1	14547,2
1935	NOV	0	0,5	0,08	22,4	0,11	116,7	116,7	93,9	-5,7	14541,4
1935	DEZ	8	3,5	0,11	30,8	0,20	93,9	93,9	14635,3	93,9	14635,3

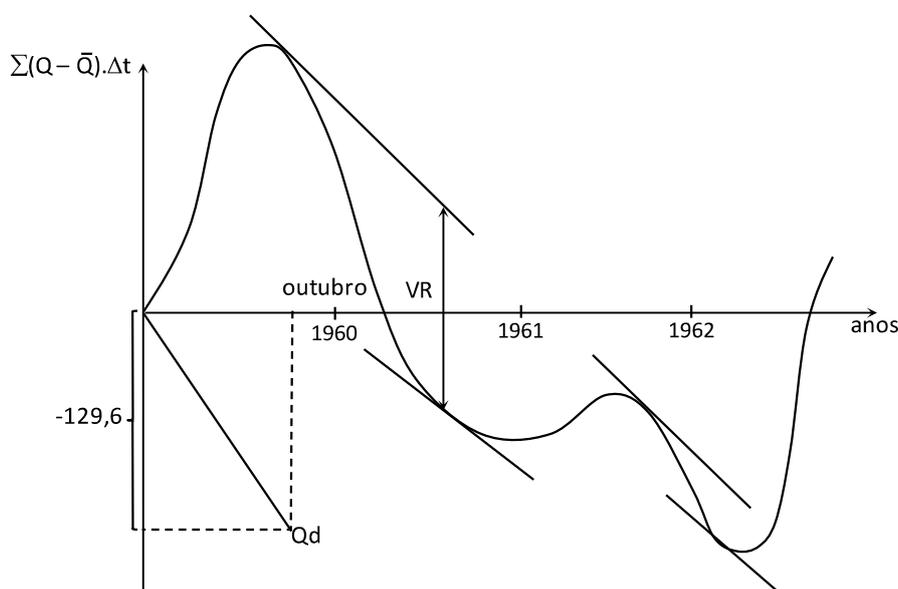




#### 5.4.7- Método da Curva de Diferenças Totalizadas ou Método da Curva de Massa Residual (regularização plurianual)

Tem vantagem sobre o Método de Rippl pelo fato do gráfico se desenvolver na horizontal, o que facilita seu traçado. Entretanto, tal como o Método de Rippl, só pode ser aplicado para uma vazão de demanda constante.

O método consiste em considerar no eixo das ordenadas, ao invés do volume de entrada efetivo acumulado,  $\sum (Q - Q_{\text{média}}) \cdot \Delta t$ . Após a elaboração da curva, plota-se a reta relativa à vazão de demanda e suas tangentes, acima e abaixo da curva, conforme ilustra a Figura 5.21. A maior diferença relativa às duas retas tangentes, *medida na vertical*, corresponderá ao volume do reservatório.



**Figura 5.21** - Esquema da Curva das Diferenças Totalizadas relativo ao exemplo que se segue.

*Exemplo:*

Considerando as vazões médias mensais do pior período de estiagem do rio Tiete, estação fluviométrica de Itaquaquecetuba, e utilizando a Curva das Diferenças Totalizadas (Figura 5.22), determine:

- a) O volume do reservatório (VR) para  $Q_{\text{demanda}} = 80\% \cdot Q_{\text{média}}$ .
- b) O volume do reservatório (VR) para  $Q_{\text{demanda}} = 50\% \cdot Q_{\text{média}}$
- c) Qual  $Q_{\text{demanda}}$  pode ser suprida se  $VR = 120 \times 10^6 \text{ m}^3$  ?
- d) Qual o volume do reservatório para  $Q_{\text{demanda}} = 30 \text{ m}^3/\text{s}$  ?

**DADO:**  $Q_{\text{média}} = 25 \text{ m}^3/\text{s}$

*Solução:*

a)  $Q_{\text{demanda}} = 80\% \cdot Q_{\text{média}} \rightarrow Q_{\text{demanda}} = 0,80 \times 25 = 20 \text{ m}^3/\text{s}$

$$\sum (Q_i - Q_{\text{média}}) \cdot \Delta t = \sum (20 - 25) \cdot 30.86400 \cdot N^{\circ} \text{ meses} = \sum (-5) \cdot 2,592 \cdot N \cdot 10^6$$

Para  $N=10$  (mês de outubro)  $\rightarrow \sum (Q_i - Q_{\text{média}}) \times \Delta t = -129,6 \times 10^6$  (Ver Figura 5.22)

Assim,  $VR = 250 \times 10^6 \text{ m}^3$

b)  $VR = 75 \times 10^6 \text{ m}^3$

c)  $Q_{\text{demanda}} \approx 15 \text{ m}^3/\text{s}$

d) Não é possível pois  $Q_{\text{demanda}} > Q_{\text{média}}$

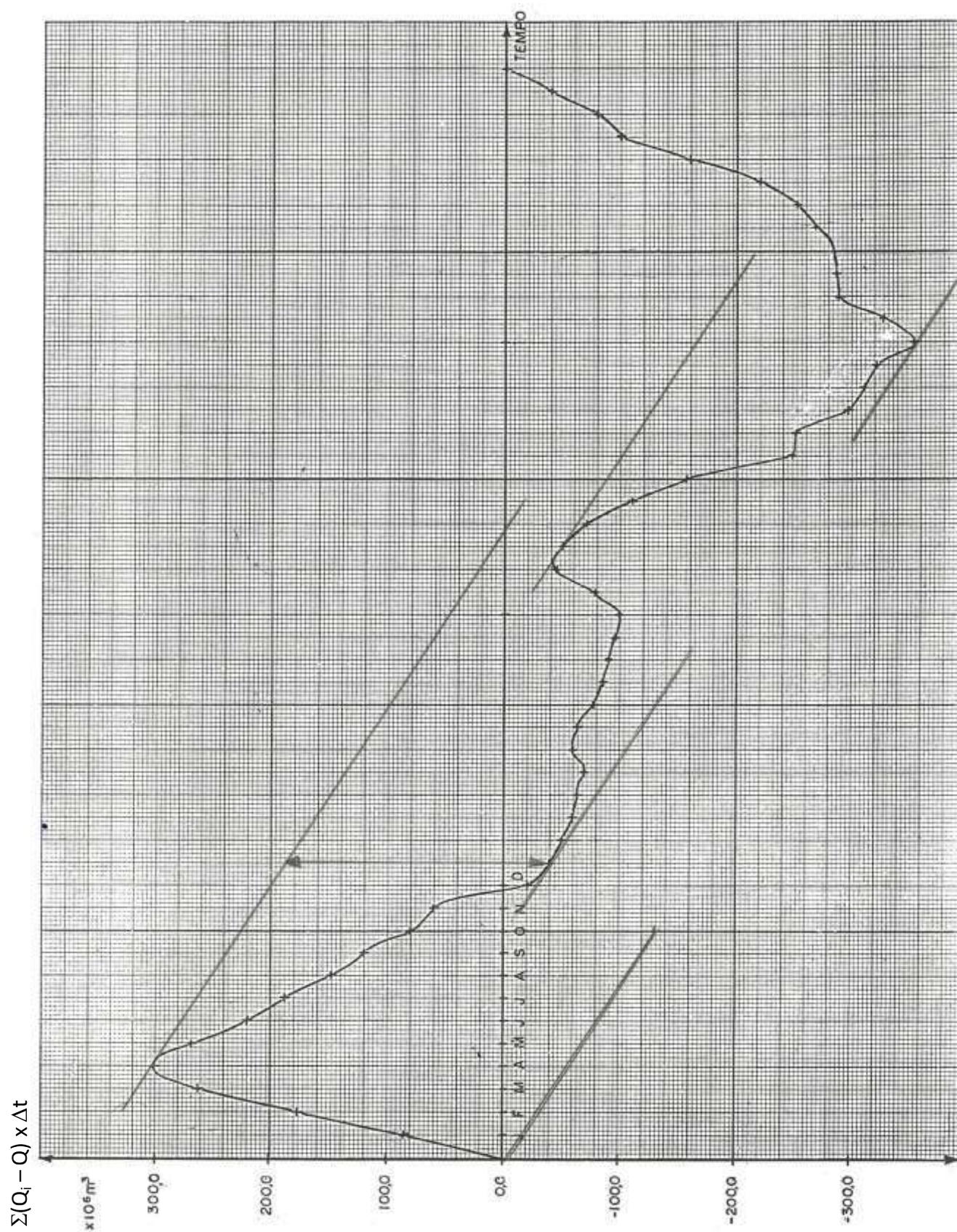
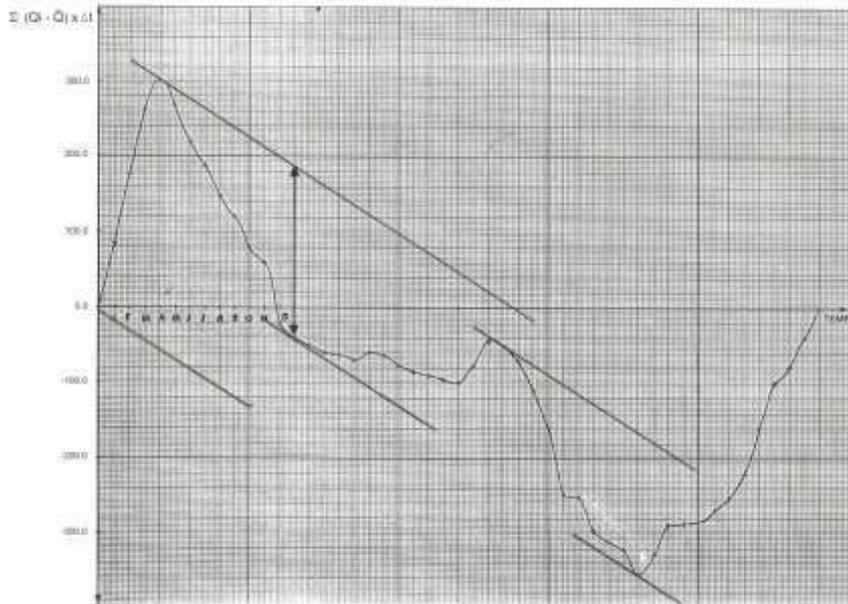


Figura 5.22- Curva das Diferenças Totalizadas para a pior estiagem do rio Tietê – SP.



#### 5.4.8- Método dos Picos Sequenciais (regularização plurianual)

Este método tem, em relação aos dois métodos vistos anteriormente, as vantagens de permitir trabalhar com vazões de demanda variáveis ao longo do tempo, e também de ser facilmente programado para computadores. Consiste em seguir as seguintes etapas:

- 1) Calcular  $\sum (Q_i - D_i) \cdot \Delta t$ ; sendo  $Q_i$  = vazão de entrada efetiva e  $D_i$  = vazão de demanda
- 2) Aplicar em 2 períodos de série, ou seja, em  $2 \cdot N$ , sendo  $N$  o número de meses da série.
- 3) Localizar o primeiro pico  $\rightarrow P_1$
- 4) O pico seguinte  $P_{i+1}$  deve ser maior do que  $P_i$ .
- 5) Achar os picos  $P_2, P_3$ , etc.
- 6) Achar o menor valor  $T_1$  entre  $P_1$  e  $P_2$  e calcular o valor  $P_1 - T_1$ , calculando  $VR_1$ .
- 7) Achar  $T_2$  entre  $P_2$  e  $P_3$ , calculando  $VR_2 = P_2 - T_2$ , e assim por diante.
- 8) O último valor de  $T$  é obtido entre o último pico  $P_i$  e o valor final de  $\sum (Q_i - Q_{demanda\ i}) \cdot \Delta t$
- 9) A capacidade de projeto do reservatório será o valor de  $VR_i$  máximo.
- 10) O reservatório pode ter sua capacidade zerada uma ou duas vezes no período  $2 \cdot N$
- 11) Antes de aplicar o método, checar se a vazão de demanda média é menor que  $Q_{média}$  de entrada efetiva. Na prática  $Q_{demanda\ média}$  deve ser menor que de 50 a 70% da  $Q_{média}$ .

*Exemplo:*

Na Tabela 5.4 estão apresentadas as vazões de entrada efetivas (coluna 4) e as vazões variáveis de demanda (coluna 5). Preencher as colunas 8, 9 e 10, calculando assim o VR. Em seguida preencher as colunas de 11 a 13, que ilustram a operação do reservatório.

*Resposta:*

$$VR = 14,784 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{mês}$$

**Tabela 5.4-** Cálculo do volume do reservatório pelo método dos picos sequenciais

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
ANO	MÊS	PERÍODO	$Q_i$ ( $\text{m}^3$ $\text{s}^{-1}$ )	$R_i$ ( $\text{m}^3$ $\text{s}^{-1}$ )	$d_i = Q_i - R_i$ ( $\text{m}^3$ $\text{s}^{-1}$ )	$DAC_i = 100 + \sum d_i$	Pico $P_j$	Depressão $M_j$	$VAU_j - P_j - M_j$ ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ mês)	$V_i =$ Volume de armazenamento de Res. ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ meses)	$W_i$ Descargas Vertidas ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ )	Estado do Reservatório
1960	1	1	10	5.976	4.024	104.024						
1960	2	2	12	5.976	6.024	110.048						
1960	3	3	21	7.470	13.53	123.578						
1960	4	4	8	8.964	-0.964	122.614						
1960	5	5	6	13.446	-7.446	115.168						
1960	6	6	19	14.940	4.06	119.228						
1960	7	7	22	22.410	-0.41	118.818						
1960	8	8	29	16.434	12.566	131.384						
1960	9	9	11	13.446	-2.446	128.938						
1960	10	10	3	11.952	-8.952	119.986						
1960	11	11	14	10.458	3.542	123.528						
1960	12	12	11	17.928	-6.928	116.600						
1960	1	13	10	5.976	4.024	120.624						
1960	2	14	12	5.976	6.024	126.648						
1960	3	15	21	7.470	13.53	140.178						
1960	4	16	8	8.964	-0.964	139.214						
1960	5	17	6	13.446	-7.446	131.768						
1960	6	18	19	14.940	4.06	135.828						
1960	7	19	22	22.410	-0.41	135.418						
1960	8	20	29	16.434	12.566	147.984						
1960	9	21	11	13.446	-2.446	145.538						
1960	10	22	3	11.952	-8.952	136.586						
1960	11	23	14	10.458	3.542	140.128						
1960	12	24	11	17.928	-6.928	133.200						

### 5.5- Amortecimento da enxurrada e dimensionamento do vertedor do barramento

Quando a onda de cheia entra no reservatório da barragem, há um enchimento do lago, simultaneamente ao descarregamento da enxurrada pelo vertedor. Esse enchimento *amortece a vazão* de

pico da cheia ( $Q_{max}$  - Capítulo 3), que precisa ser recalculada para que o vertedor não fique superdimensionado.

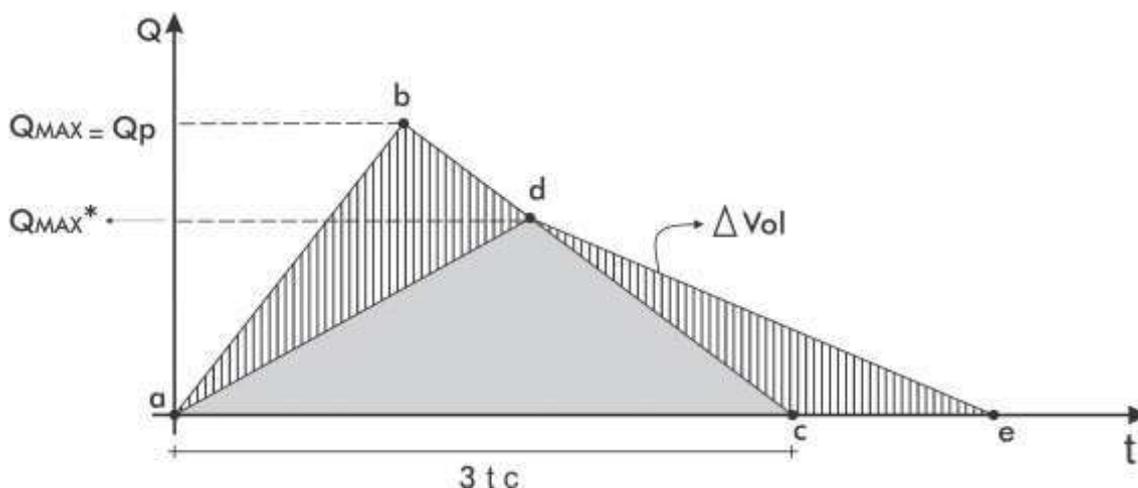
Serão apresentados neste texto vários métodos de cálculo: o primeiro é um método simplificado, que é usado quando não se dispõe da forma da hidrógrafa de cheia, e sim de sua vazão de pico, apenas; recomenda-se que o mesmo seja aplicado apenas a pequenas bacias.

Os demais métodos são mais robustos, mas exigem que se conheça a hidrógrafa da cheia, o que se obtém quando se usa o método da Hidrógrafa Unitária ou os métodos da Hidrógrafa Unitária Triangular ou Adimensional do Soil Conservation Service para o cálculo da enxurrada, por exemplo (ver Capítulo 3).

Quando se utiliza o primeiro método é mais fácil se fixar a lâmina de enchente e calcular a largura do vertedor (como será visto em seguida); já quando se utilizam os demais métodos, geralmente se fixa a largura do vertedor e se calcula a lâmina de enchente (serão abordados no Capítulo 6).

### 5.5.1- Método dos Hidrogramas Triangulares

Esse método consiste em assumir que o hidrograma total de entrada no lago da barragem terá forma semelhante à de um hidrograma unitário triangular sintético, ou seja, uma base igual a  $2,67 t_c$ , que por simplificação é adotada igual a  $3t_c$  (Figura 5.23). Nesta figura o hidrograma de entrada é o triângulo  $abc$  e o de saída do reservatório o triângulo  $ade$ . A vazão de pico do hidrograma de entrada é  $Q_{max}$  e a vazão de pico do hidrograma de saída é  $Q_{max}^*$ .



**Figura 5.23-** Simplificação dos hidrogramas de entrada ( $abc$ ) e saída ( $ade$ ) de um reservatório.

Como em um gráfico  $Q \times t$  a área sob o gráfico representa um volume, pela observação do hidrograma de entrada pode-se escrever:

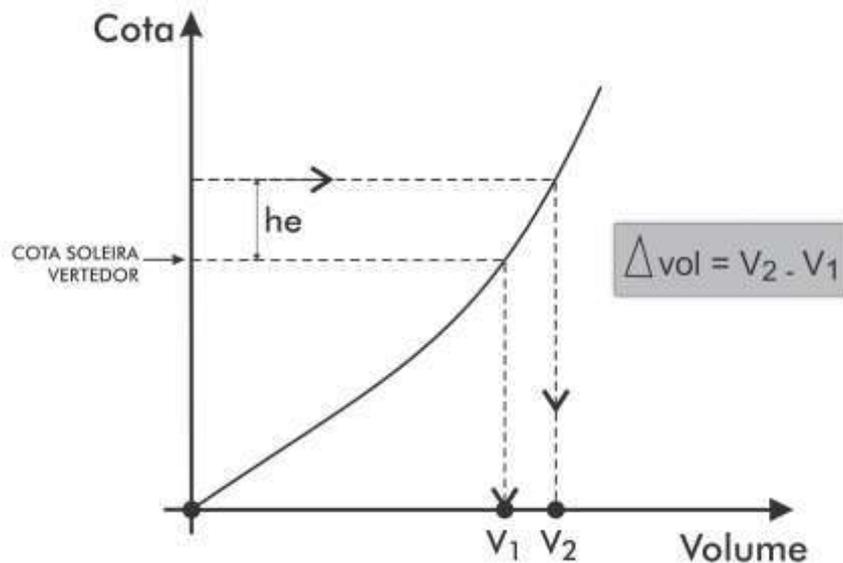
$$\text{Volume encurrada} = \text{Área sob o triângulo } abc = \frac{Q_{\max} \cdot 3 \cdot tc}{2}$$

Como o volume que entra deve ser igual ao que sai após a passagem da cheia (nível d'água de volta a soleira do vertedor), tem-se que:

$$\text{Área sob o triângulo } ade = \text{Área sob o triângulo } abc = \frac{Q_{\max} \cdot 3 \cdot tc}{2}$$

$$\Delta adc + \Delta cde = \frac{Q_{\max} \cdot 3 \cdot tc}{2}$$

A área sob o triângulo *cde* representa o volume descarregado pelo barramento após a entrada da onda de cheia. Esse volume é aquele que corresponde à quantidade de água que encheu o lago (área do triângulo *adb*), indo do nível da soleira do vertedor até a sua altura máxima de enchente, como é ilustrado na curva cota X volume do reservatório (Figura 5.24)



**Figura 5.24** – Volume de amortecimento do lago da barragem

Desta forma, dando sequência ao raciocínio tem-se:

$$\Delta adc + \Delta Vol = \frac{Q_{\max} \cdot 3 \cdot tc}{2}$$

$$\frac{Q_{\max} \cdot 3 \cdot tc}{2} + \Delta Vol = \frac{Q_{\max} \cdot 3 \cdot tc}{2} \therefore Q_{\max} \cdot 3 \cdot tc + 2 \cdot \Delta Vol = Q_{\max} \cdot 3 \cdot tc$$

$$Q_{\max} \cdot 3 \cdot tc = \frac{3 \cdot tc \cdot Q_{\max} - 2 \cdot \Delta Vol}{3 \cdot tc}$$

**equação 5.11**

Em que:

$Q_{max}^*$  - vazão de pico amortecida,  $m^3/s$ ;

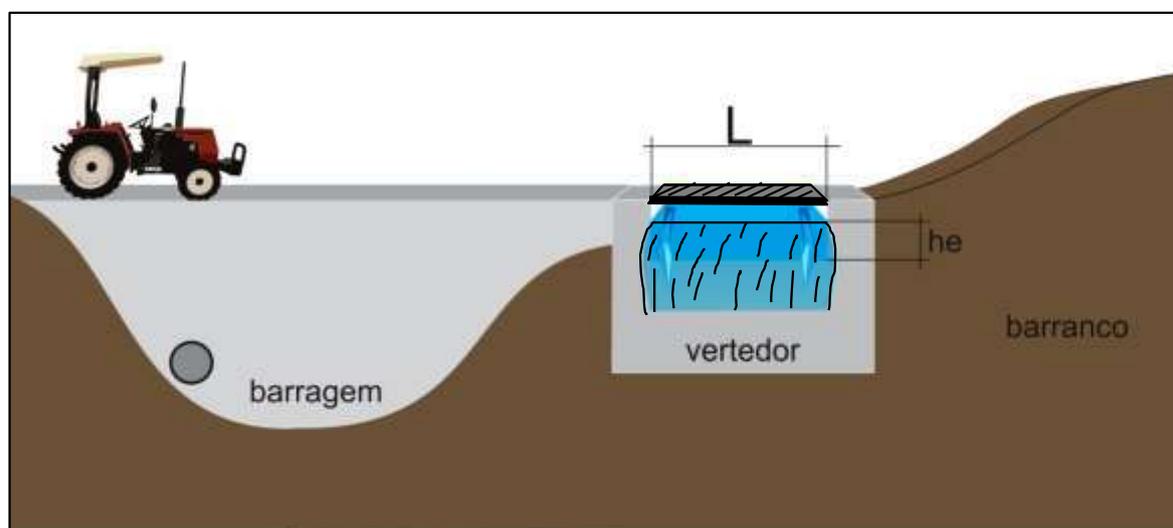
$Q_{max}$  – vazão de pico de entrada no lago da barragem,  $m^3/s$ ;

$t_c$  – tempo de concentração, seg; e

$\Delta Vol$  – volume que vai da soleira do vertedor à máxima altura de enchente na barragem,  $m^3$ .

Observando-se a equação 5.11, pode-se constatar que quando o volume do lago da barragem é grande o amortecimento também é grande, de forma que o vertedor fica relativamente pequeno. Já os lagos pequenos, em igualdade de condições, tendem a ter vertedores mais largos devido ao menor amortecimento.

Obtida a vazão de pico amortecida ( $Q_{max}^*$ ), é possível se dimensionar o vertedor da barragem, o que significa se fixar uma carga  $h_e$ , e calcular sua largura  $L$ , como ilustra a Figura 5.25.



**Figura 5.25** – Vertedor de largura  $L$ , descarregando a vazão máxima amortecida com uma lâmina  $h_e$ .

*Observação:*

Quando a barragem é muito pequena, podem-se utilizar vertedores tubulares (um ou dois) cuja equação é dada por  $Q = 1,518 \cdot D^{0,693} \cdot h^{1,807}$ , em que  $Q$  é a vazão amortecida ( $m^3/s$ ),  $D$  é o diâmetro do tubo de concreto (m) e  $h$  é a lâmina d'água dentro do tubo.

Já a expressão geral dos vertedores retangulares usados em barramentos segue à forma:  $Q = C \cdot L \cdot h^{3/2}$ . A maioria das barragens pequenas costuma utilizar os vertedores de parede espessa, que possuem valor de  $C$  de 1,55. Para vertedores de parede delgada (tábuas)  $C$  vale 1,71; esse mesmo valor é usado para vertedores em arco de concreto. Já nas barragens grandes, são usados mais comumente os vertedores do tipo Creager; estes são mais eficientes hidraulicamente e possuem valor de  $C$  variando de 1,90 à 2,20.

*Exemplo:*