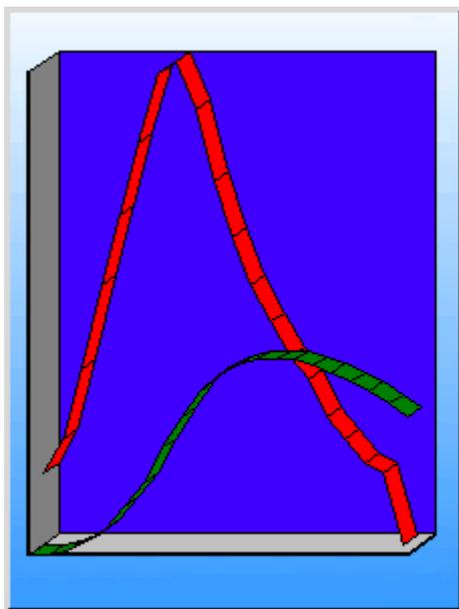




ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E SANITÁRIA  
PHD 307 - HIDROLOGIA APLICADA

---

# Amortecimento de Ondas de Cheia em Reservatório



*Prof. Rubem La Laina Porto*  
*Prof. Kamel Zahed Filho*  
*Monit. Sandra Soares Sá Dourado*  
*Monit. Cristiano de Pádua Milagres Oliveira*

---

São Paulo, 1998

## RESUMO

A apostila a seguir apresentada tem como objetivo auxiliar a compreensão do fenômeno de Amortecimento de Ondas de Cheias em Reservatórios. O estudo do fenômeno é importante não só no que diz respeito ao dimensionamento dos reservatórios, como também à operação.

## BIBLIOGRAFIA ADICIONAL

Chow, Maidment & Mays, Applied Hydrology, McGraw-Hill Book Company, 1988.

Davis & Sorensen, Handbook of Applied Hydraulics, McGraw-Hill Book Company, Kogakusha Company, LTD Tokyo, Third Edition, 1969.

## OBJETIVO

Você deverá, após o estudo deste texto, ser capaz de:

- Calcular o hidrograma efluente de um reservatório, a partir de seu hidrograma afluente;
- Identicamente, calcular o hidrograma afluente a um reservatório a partir de seu hidrograma efluente;
- Dimensionar a largura do vertedor de um reservatório;
- Identificar o Volume de Controle de Cheias, bem como a vazão máxima de saída.

## ÍNDICE

<b>1. OBJETIVO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. APLICAÇÕES .....</b>	<b>1</b>
2.1. Dimensionamento da Largura de Vertedores .....	1
2.2. Estudos do Enchimento e Esvaziamento de Reservatórios.....	1
2.3. Estudos Hidrológicos de Bacias Hidrográficas com Reservatórios.....	1
2.4. Operação de Reservatórios .....	1
2.4.1. Volume de Espera.....	1
2.4.2 Determinação de Leis de Abertura e Fechamento de Comportas.....	2
2.5. Determinação do Hidrograma Afluente a Um Reservatório .....	2
2.6. Dimensionamento de Bueiros.....	2
<b>3. COMPLEMENTAÇÃO: AMORTECIMENTO EM CANAIS.....</b>	<b>2</b>
<b>4. PROCESSO.....</b>	<b>2</b>
<b>5. DADOS DE ENTRADA.....</b>	<b>3</b>
<b>6. CÁLCULOS .....</b>	<b>4</b>
6.1. Métodos Gráficos.....	4
6.2. Método Iterativo .....	5
<b>7. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO .....</b>	<b>7</b>
7.1. Dimensionamento da Largura do Vertedor de uma Barragem.....	7
7.2. Operação de Reservatório.....	8
7.3. Operação de Barragens com Comporta.....	9
7.4. Operação de Barragens com Descarga de Fundo.....	9
7.5. Obtenção do Hidrograma de Entrada a partir do Hidrograma de Saída .....	10
<b>8. PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE LARGURA DE VERTEDORES.....</b>	<b>10</b>
<b>9. PROPRIEDADES GRÁFICAS .....</b>	<b>12</b>
<b>10. EXEMPLO NUMÉRICO.....</b>	<b>12</b>
<b>11. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>13</b>



## 1. Objetivo

A presente apostila tem como objetivo mostrar as alterações sofridas por uma onda de cheia ao passar por um reservatório.

Serão descritos algoritmos de cálculo de amortecimento do hidrograma, aplicados ao dimensionamento da largura de extravasores e à operação de reservatórios.

## 2. Aplicações

O estudo do amortecimento de ondas de cheias em reservatórios apresenta várias aplicações práticas, dentre as quais se destacam:

### 2.1. Dimensionamento da Largura de Vertedores

Será considerado que a cota da crista do vertedor esteja definida, após um estudo do volume útil do reservatório.

A escolha do tipo de vertedor foge ao escopo da disciplina. Serão apresentadas apenas as equações de descarga de alguns tipos de vertedores.

Para o dimensionamento, supõe-se uma situação crítica, em que no instante inicial da ascensão do hidrograma afluente, o nível de água armazenado no reservatório esteja coincidente com a crista do extravasor.

### 2.2. Estudos do Enchimento e Esvaziamento de Reservatórios

Os mesmos algoritmos aqui apresentados podem ser utilizados para estudar o tempo de enchimento de um novo reservatório ou determinar o hidrograma efluente e a curva de variação do nível d'água durante um esvaziamento.

### 2.3. Estudos Hidrológicos de Bacias Hidrográficas com Reservatórios

Neste caso, para obtenção do Hidrograma de cheia de uma dada seção do rio localizada geograficamente num ponto que recebe a água depois que ela passa pelo reservatório, torna-se necessário conhecer o hidrograma efluente do reservatório. Para isso é necessário saber como calcular as modificações sofridas pelo hidrograma ao passar pelo reservatório.

### 2.4. Operação de Reservatórios

#### 2.4.1. Volume de Espera

Durante o período de grandes chuvas de uma bacia hidrológica, é usual, se manter o nível d'água armazenado abaixo da cota da crista do vertedor, de maneira a se prover um volume que possa absorver parte de uma onda de cheia afluente ao reservatório. A esse volume denomina-se volume de espera. O cálculo do



amortecimento permite que se avaliem as conseqüências sobre a redução do pico do hidrograma afluente, com a manutenção do volume de espera.

#### **2.4.2 Determinação de Leis de Abertura e Fechamento de Comportas**

Em barragens, onde se dispõe de comportas de superfície, o cálculo do amortecimento será utilizado para a definição de leis de abertura e fechamento, que garantam a segurança da barragem e das localidades situadas a jusante.

### **2.5. Determinação do Hidrograma Afluente a Um Reservatório**

Durante a passagem de uma onda de cheia por um reservatório pode se tornar difícil ou até mesmo inviável a medição das vazões afluentes à um reservatório (por exemplo vários canais afluindo a um reservatório). Neste caso, pode-se obter o hidrograma afluente indiretamente, através do conhecimento do hidrograma efluente (medido imediatamente a jusante da barragem) e do cálculo do amortecimento.

### **2.6. Dimensionamento de Bueiros**

Se um bueiro estiver sendo dimensionado, admitindo-se um acúmulo temporário de água a montante de sua entrada, o cálculo do amortecimento pode ser utilizado para o seu dimensionamento ou para obter o hidrograma efluente.

## **3. Complementação: Amortecimento em Canais**

As alterações de intensidade de pico e deformações sofridas por um hidrograma ao passar a onda de cheia por um reservatório, serão observadas também durante a passagem de uma onda de cheia por um trecho de um canal. Esse assunto será complementado na apostila “Amortecimento de Ondas de Cheia em Canais”.

## **4. Processo**

Quando corre uma precipitação sobre uma dada bacia hidrográfica, as águas precipitadas encaminham-se naturalmente para os pontos mais baixos do terreno, atingindo finalmente os riachos ou rios que as conduzem ao seu destino final. Naturalmente estas precipitações provocam variações de vazão ao longo do tempo em uma dada seção do rio.

O hidrograma de uma onda de cheia é exatamente a representação da variação da vazão em uma dada seção do rio, representando, portanto, os efeitos da bacia hidrográfica a montante desta seção sobre a distribuição temporal da chuva.

Uma onda de cheia ao transitar por um reservatório sofre um efeito de amortecimento, ou seja, o volume do reservatório ao reter parte da vazão afluente faz com que a vazão da saída seja menor que a vazão de entrada, sendo também defasada em relação à vazão de entrada.

Para o cálculo do amortecimento de onda de cheia em reservatório utiliza-se a equação da continuidade:



$$\int_{t_1}^{t_2} Q_E dt - \int_{t_1}^{t_2} Q_S dt = V_2 - V_1$$

Equação 1 - Equação da Continuidade

A equação da continuidade expressa basicamente que o volume de água armazenado em um reservatório em um dado período de tempo é igual à quantidade total de água que chega ao reservatório ( $Q_E$ ) menos a quantidade total de água que sai do reservatório ( $Q_S$ ), neste dado período de tempo.

De forma simplificada pode-se descrever o fenômeno pela seguinte equação:

$$Q_E - Q_S = \frac{\partial V}{\partial T}$$

Equação 2 - Equação da Continuidade Simplificada

$Q_E$  representa o hidrograma conhecido de vazões afluentes ao reservatório,  $Q_S$  o hidrograma de vazões efluentes do reservatório e  $\partial V/\partial t$  representam a variação do volume armazenado no reservatório, devido à variação de seu nível.

Os reservatórios são de maneira gerais estruturas profundas e não extensas, sendo a velocidade da água conseqüentemente baixa. Pode-se assim, sem introduzir grandes erros, considerar a superfície das águas horizontal. Desta forma o volume armazenado no reservatório é diretamente proporcional ao nível de água do mesmo, o que facilita a resolução da equação.

## 5. Dados de Entrada

Para o cálculo do amortecimento de uma onda de cheia por um reservatório são necessários os dados relativos ao hidrograma de cheia, ao reservatório, e às restrições de montante e de jusante, no caso de dimensionamento da largura de vertedor.

O hidrograma de cheia ou hidrograma afluente ao reservatório poderá ser aquele definido por um estudo de cheias na bacia hidrográfica (hidrograma unitário, modelo de transformação chuva-vazão, etc.), no caso de dimensionamento do vertedor. Na aplicação de operação de um reservatório, o hidrograma poderá ser um hidrograma já observado (em análises pós-operação) ou um hidrograma previsto, no caso de operação em tempo real.

Os dados relativos ao reservatório resumem-se ao conhecimento da curva cota-volume do reservatório e das equações de descargas dos órgãos de extravasão da barragem.

A curva cota-volume consiste na relação entre o nível de água do reservatório e o volume a ele correspondente. A capacidade de um reservatório construído em terreno natural é calculada através de um levantamento topográfico, utilizando-se os mesmos procedimentos utilizados no cálculo de volumes de terraplanagem. Traça-se, por planimetria das áreas entre as curvas de nível levantadas topograficamente, a curva área-altitude do reservatório. Integrando-se a curva área-altitude obtém-se a curva volume-altitude do reservatório.

Outra curva necessária à resolução da equação é a curva do vertedor. O vertedor é o órgão de extravasão do reservatório, ou seja, o órgão através do qual a vazão escoar para fora do reservatório. A curva do vertedor indica a vazão efluente para as diversas alturas de lâmina de água acima da crista do vertedor.



As equações a seguir apresentam as formas gerais das equações de descarga para diversos tipos de órgãos de extravasão:

$$Q = CLH_1^{3/2}$$

Equação 3 - Vertedor de Soleira Livre

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} cL (H_1^{3/2} - H_2^{3/2})$$

Equação 4 - Vertedor com Comportas

$$Q = C_0 (2\pi R_s) H^{3/2}$$

Equação 5 - Vertedor Tulipa

$$Q = CWD \sqrt{2gH}$$

Equação 6 - Bueiro

Onde:

- Q = vazão de descarga;
- C = coeficiente de descarga;
- L = largura da crista do vertedor;
- H<sub>1</sub> = carga total referente à crista do vertedor;
- H<sub>2</sub> = carga total referente ao topo da abertura;
- C<sub>0</sub> = coeficiente que relaciona H<sub>1</sub> e R<sub>s</sub>;
- R<sub>s</sub> = raio de abertura do vertedor;
- D = altura da abertura;
- W = largura da embocadura.

As restrições externas à área da barragem são entendidas como a capacidade máxima de vazão do canal imediatamente a jusante da barragem e o nível d'água máximo a montante do vertedor, limitado pela altura da barragem ou pela área inundável máxima desejada.

## 6. Cálculos

O problema de amortecimento de ondas em reservatório é resolvido utilizando-se basicamente a equação da continuidade (Equação 1). A equação pode ser resolvida através de processos numéricos ou gráficos, conforme se verá a seguir.

### 6.1. Métodos Gráficos

Com a facilidade atual de se efetuarem cálculos, os processos gráficos de solução da equação da continuidade caíram praticamente em desuso. Apenas como referência de sua forma genérica, apresenta-se, a seguir, o Método de Puls.

A equação da continuidade pode ser escrita da seguinte forma:



$$\frac{Q_{E1} + Q_{E2}}{2} * \Delta t + V_1 - \frac{Q_{S1}}{2} * \Delta t = V_2 + \frac{Q_{S2}}{2} * \Delta t$$

Equação 7 - Equação da Continuidade para o Método Gráfico

Chamando-se:

$$A = [ (Q_{E1} + Q_{E2}) / 2 ] * \Delta t$$

$$F_1 = V_1 - (Q_{S1} / 2) * \Delta t$$

$$F_2 = V_2 + (Q_{S2} / 2) * \Delta t$$

São construídas duas curvas, a primeira ( $F_1 \times Q_S$ ), e a segunda ( $F_2 \times Q_S$ ) e Dado um certo valor de  $Q_{S1}$ , entra-se na primeira curva e tira-se o valor de  $F_1$ . Entrando-se na equação acima com o valor encontrado, uma vez que o termo “A” também é conhecido, encontra-se o valor de  $F_2$ . Com o valor obtido entra-se na segunda curva e obtém-se o valor procurado de  $Q_{S2}$ .

## 6.2. Método Iterativo

É o método mais indicado, pela sua simplicidade e rapidez de convergência.

Conforme anteriormente citado são utilizadas as curvas cota-volume e do vertedor na solução do problema, De posse destas duas curvas e do hidrograma de entrada do reservatório, a resolução da equação da continuidade pode ser facilmente obtida.

Reordenando-se os termos da equação (2), obtém-se:

$$\frac{Q_{A1}}{2} + \frac{Q_{A2}}{2} + \frac{V_1}{\Delta t} - \frac{Q_{E1}}{2} - \frac{Q_{E2}}{2} = \frac{V_2}{\Delta t}$$

Equação 8 - Equação da Continuidade para o Método Iterativo

ou

$$Q_{A1} + Q_{A2} + \frac{V_1}{\Delta t/2} - Q_{E1} - Q_{E2} = \frac{V_2}{\Delta t/2}$$

Equação 9 - Equação da Continuidade Ordenada para o Método Iterativo

Para simplificação da resolução da equação acima, monta-se uma tabela onde cada um dos termos da equação é registrado em uma coluna. Tem-se assim:

- **Primeira Coluna:** Intervalo ( $\Delta t$ )

Nesta coluna, marcam-se os instantes inicial e final do intervalo de tempo considerado. Deve-se lembrar que este intervalo de tempo deve ser suficientemente pequeno para que a variação da vazão possa ser considerada linear.

- **Segunda Coluna:** Vazão Afluente Inicial ( $Q_{A1}$ )

Marca-se nesta coluna a vazão correspondente ao início do intervalo. Este valor é obtido pela leitura do hidrograma afluente, na abscissa correspondente ao instante inicial do intervalo considerado.



- **Terceira coluna:** Vazão Afluente Final ( $Q_{A2}$ )

Marca-se nesta coluna a vazão correspondente ao final do intervalo. Este valor é obtido pela leitura do hidrograma afluente, na abscissa correspondente ao instante final do intervalo considerado. A vazão  $Q_{A2}$  de um intervalo corresponde à vazão  $Q_{A1}$  do intervalo subsequente.

- **Quarta Coluna:** Volume Armazenado no Reservatório no Início do Intervalo de Tempo Dividido pela Metade do Intervalo de Tempo [  $V_1 / (\Delta t / 2)$  ]

Marca-se nesta coluna o valor de [  $V_1 / (\Delta t / 2)$  ], calculado pela curva cota-volume do reservatório.

- **Quinta Coluna:** Vazão Efluente Inicial ( $Q_{E1}$ )

No primeiro intervalo, adota-se  $Q_{E1}$  correspondente ao nível d'água inicial, através da equação do vertedor. Caso o nível d'água seja menor ou igual a posição da crista do vertedor impõe-se  $Q_{E1}=0$ . Para os demais intervalos o valor de  $Q_{E1}$  é sempre igual ao valor de  $Q_{E2}$  do intervalo anterior, ou seja, a vazão de saída do instante inicial de um intervalo é igual à vazão de saída do instante final do intervalo anterior.

- **Sexta Coluna:** Cota Estimada do Nível de água Efluente no Final do Intervalo de Tempo ( $Y_{EST2}$ )

Corresponde à cota estimada da lâmina de água efluente no final de um intervalo de cálculo. A estimativa inicial corresponde ao mesmo nível do início do intervalo. Para as demais estimativas, corresponde ao valor de  $Y_{CALC2}$  antecedente.

- **Sétima coluna:** Vazão Efluente Final ( $Q_{E2}$ )

Calculada através da equação do vertedor, com o nível d'água obtido da sexta coluna.

- **Oitava Coluna:** Volume Armazenado no Reservatório no Final do Intervalo de Tempo Dividido pela metade do Intervalo da Tempo [  $V_2 / (\Delta t / 2)$  ]

Este valor é calculado pela resolução da Equação 5. Em termos das colunas descritas tem-se:

$$[8]=[2]+[3]+[4]-[5]-[7]$$

- **Nona Coluna:** Cota Calculada do Nível de Água Efluente ( $Y_{CALC2}$ )

Corresponde ao valor do nível de água calculado pela curva cota-volume através do volume armazenado no reservatório no final do intervalo de tempo.

O cálculo deve ser repetido até que o valor de  $Y_{CALC2}$  menos o valor de  $Y_{EST2}$ , seja em módulo menor ou igual à precisão desejada. Caso a condição não se verifique, adota-se como novo valor de  $Y_{EST2}$ , o valor obtido de  $Y_{CALC2}$ , repetindo-se os cálculos das colunas seis a nove até que a condição se verifique. De maneira genérica, duas a três iterações garantem a convergência do processo dentro de uma precisão razoável. No item 10, a tabela descrita terá seus cálculos demonstrados através de um exemplo numérico. A figura da página seguinte representa o Diagrama de Blocos do algoritmo descrito.

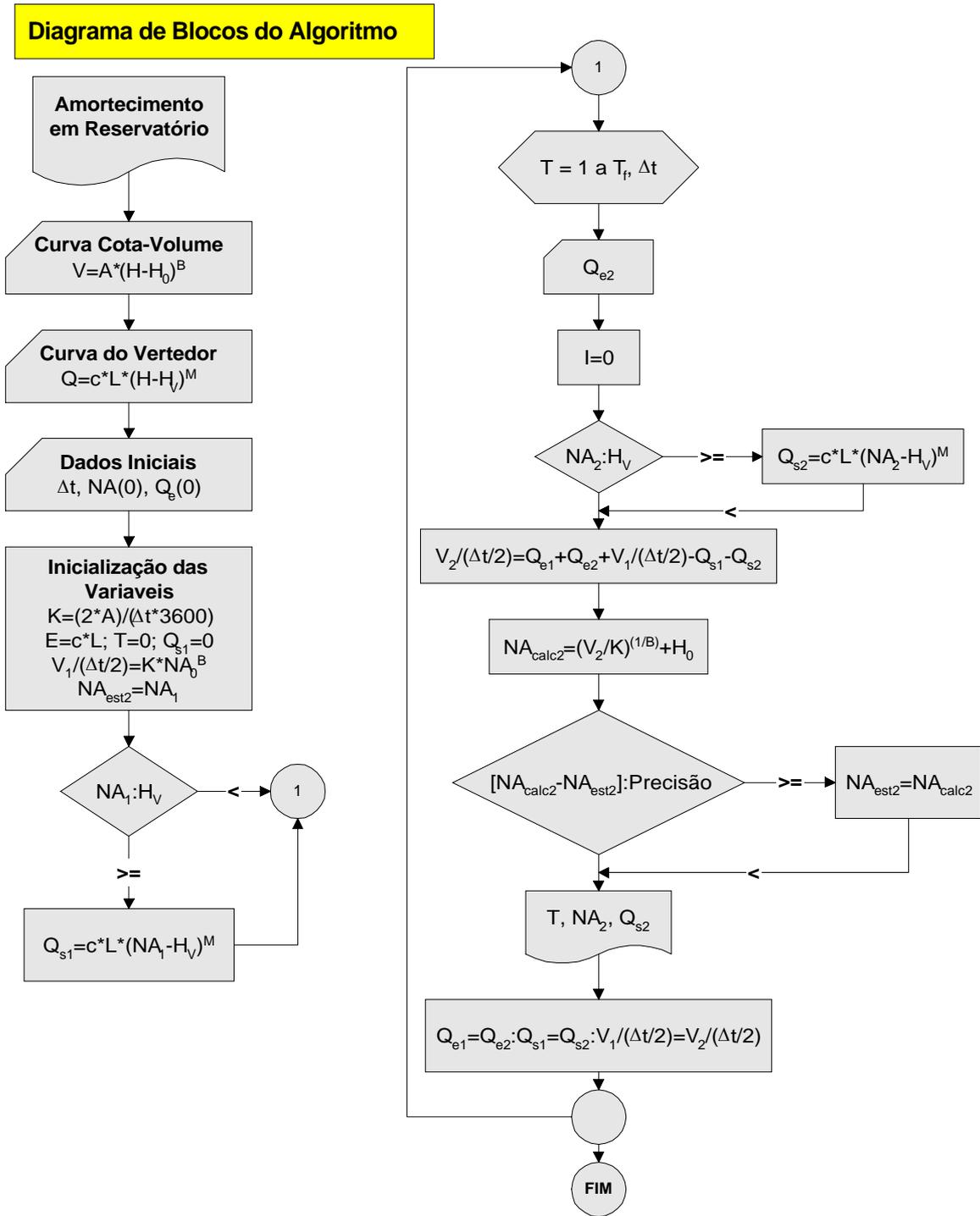


Figura 1 - Diagramas de Blocos do Algoritmo de Resolução

## 7. Exemplos de Aplicação

### 7.1. Dimensionamento da Largura do Vertedor de uma Barragem

A hipótese utilizada no dimensionamento do reservatório é que o NA inicial encontra-se na crista do vertedor, ou seja, o reservatório está cheio.



Aplica-se o processo de cálculo anteriormente descrito, lembrando-se que a largura do vertedor não é conhecida. Adota-se então, dentro de uma faixa pertinente, diversos valores de largura, efetuando-se os cálculos descritos para cada uma delas.

Construindo-se os gráficos  $Q_{MAX}$  x Largura e  $NA_{MAX}$  x Largura, obtém-se curvas dos seguintes tipos:

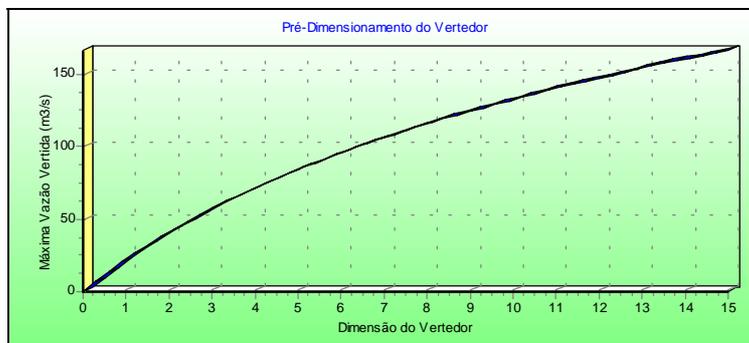


Figura 2

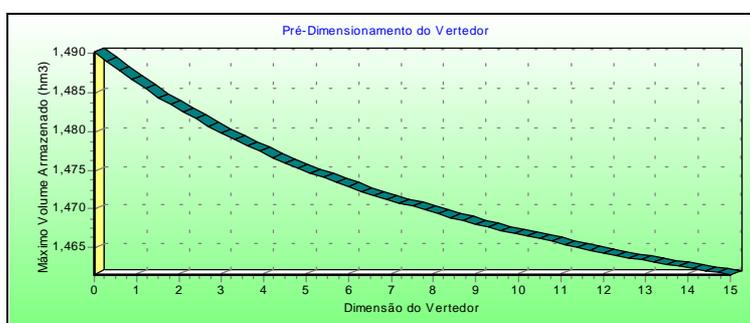


Figura 3

A curva  $Q_{SMAX}$  x Largura tem implicações a jusante da barragem, uma vez que a vazão efluente não pode ser tão pequena que provoque (por acúmulo de água superior à capacidade do reservatório) o galgamento da barragem pelas águas. Por outro lado, a vazão efluente não pode ser tão grande que provoque inundações nas áreas a jusante.

A curva  $NA_{MAX}$  x Largura por sua vez tem implicações a montante uma vez que quanto maior o NA maior será a área inundada a montante.

Vemos, portanto que a escolha da largura do vertedor da barragem implica, na verdade, não só em sua largura como também na altura da barragem.

Assim sendo, a decisão sobre a largura do vertedor é uma função do custo que analisa a relação custo do vertedor de concreto x custo da “altura da barragem”.

Mas nem só o custo é levado em conta na decisão. Esta escolha resulta em implicações políticas, sociais e ambientais, uma vez que com a variação da largura varia a extensão de área inundada a montante e a jusante.

## 7.2. Operação de Reservatório

O modo pelo qual um reservatório é operado, depende fundamentalmente da função por ele exercida pois, de forma geral um reservatório é utilizado para diversos propósitos, como o controle de cheias, o abastecimento de cidades, a geração de energia e outros.



Restringindo-se ao controle das cheias, o controle poderá ser mais bem efetuado quanto maior for o volume de água que puder ser armazenado no reservatório antes do vertimento. Assim, quanto mais baixo estiver o NA do reservatório, maior será o amortecimento do hidrograma de cheia afluyente, visando causar os mínimos danos possíveis à jusante.

Cabe aqui uma pequena discussão a respeito do Volume de Espera do reservatório. Na época de cheias, deve ser possível armazenar um volume tal que o hidrograma de entrada do reservatório possa ser parcialmente retido, resultando em vazões de saída menores. Para que se possa armazenar tal volume, o nível de água do reservatório deve estar abaixo do nível da crista do vertedor quando se inicia a época de cheias.

Quando a largura do vertedor já estiver definida, deve-se procurar qual o nível de água inicial, para o qual a vazão máxima de saída é menor que a vazão de projeto.

### 7.3. Operação de Barragens com Comporta

Barragens com comporta são aquelas que apresentam dispositivos de regulagem de abertura para verter a água. Assim o gráfico  $Q_{VERT} \times h$ , apresenta uma série de curvas dependentes da abertura do dispositivo. No gráfico a seguir, são mostradas algumas curvas, cada uma delas para uma dada porcentagem de abertura da comporta.

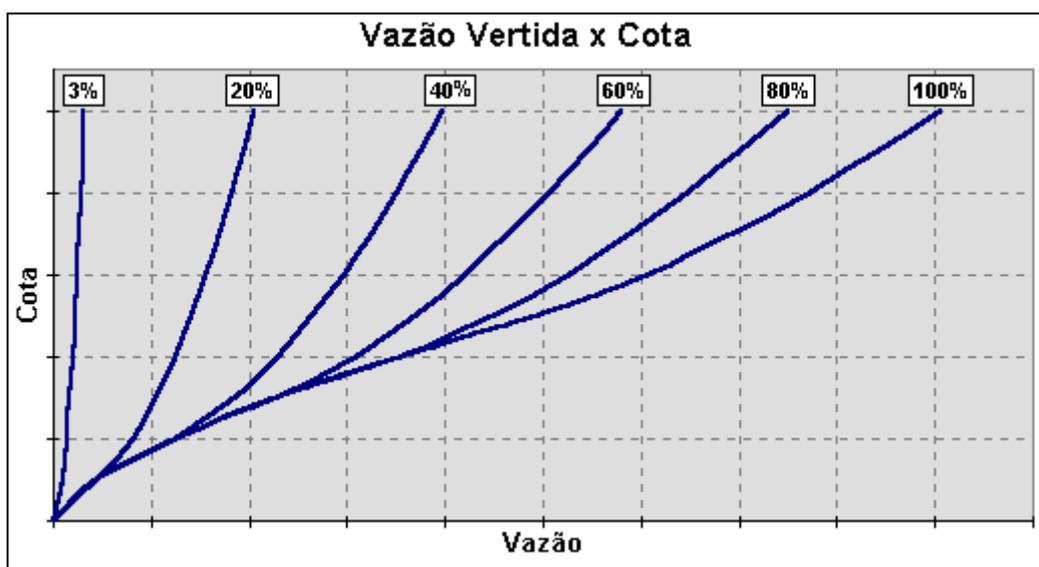


Figura 4

A operação passa agora a utilizar regras definidas pela equipe responsável. Exemplos destas regras são:

- A vazão efluente máxima deve ser menor que um determinado valor para que sejam evitados danos às áreas de jusante.
- A variação do nível de água em função do tempo ( $\Delta NA/\Delta t$ ) deve ser menor que um determinado valor para que não haja galgamento do reservatório pelas águas.
- A variação da vazão máxima vertida em função do tempo deve ser menor que um determinado valor.

### 7.4. Operação de Barragens com Descarga de Fundo

Caso a barragem possua órgão de descarga de fundo, a vazão efluente passará a ser composta por duas parcelas, a primeira referente à descarga pelo extravasor e a segunda referente à descarga de fundo.



Neste caso a equação da continuidade poderá ser escrita na forma a seguir apresentada:

$$Q_{A1} + Q_{A2} + \frac{V_1}{\Delta t/2} - [Q_{E1} + Q_{DESC}] - [Q_{E2} + Q_{DESC}] = \frac{V_2}{\Delta t/2}$$

Equação 10 - Equação da Continuidade para Operação em Barragens

Onde a vazão de descarga de fundo é função da altura de coluna de água sobre ela e da própria abertura do órgão de descarga.

O processo de solução é análogo ao explicado no item 6.2, onde se agrega um termo adicional à vazão de extravasão.

## 7.5. Obtenção do Hidrograma de Entrada a partir do Hidrograma de Saída

Em casos práticos pode ocorrer que o hidrograma disponível seja o efluente e não o afluente. Neste caso a equação da continuidade pode ser aplicada da maneira convencional, isto é, trabalhando com os valores expressos na equação (4).

Os termos conhecidos pertencem agora às vazões de saída, e pode-se, utilizando-se a tabela do item 6.2, encontrar o hidrograma efluente.

O cálculo se inicia no ponto de  $Q_{SMAX}$ , onde se sabe que a vazão de entrada é igual à vazão de saída. Com os dados referentes a este ponto, calcula-se os dois trechos do hidrograma de entrada, correspondentes aos intervalos de tempo anteriores e posteriores ao ponto conhecido.

## 8. Pré-Dimensionamento de Largura de Vertedores

Desde que se adotem formas triangulares para o hidrograma de entrada e de saída do reservatório, é possível obter valores aproximados que servem para definir um intervalo de largura de vertedor a ser pesquisado.

Sem grande perda de precisão pode-se adotar a curva cota-volume a partir da crista do vertedor como sendo um segmento de reta. Neste caso:

$$\Delta V = A * \Delta h$$

Equação 11 - Aproximação dos Hidrogramas para formas triangulares

Onde:

$\Delta V$  = variação do volume do reservatório ( $m^3$ );

$\Delta h$  = variação do nível do reservatório (m);

A = área inundada nas proximidades da cota da soleira do extravasor ( $m^2$ ).

Da mesma forma é possível simplificar os hidrogramas de entrada e de saída, conforme a figura:

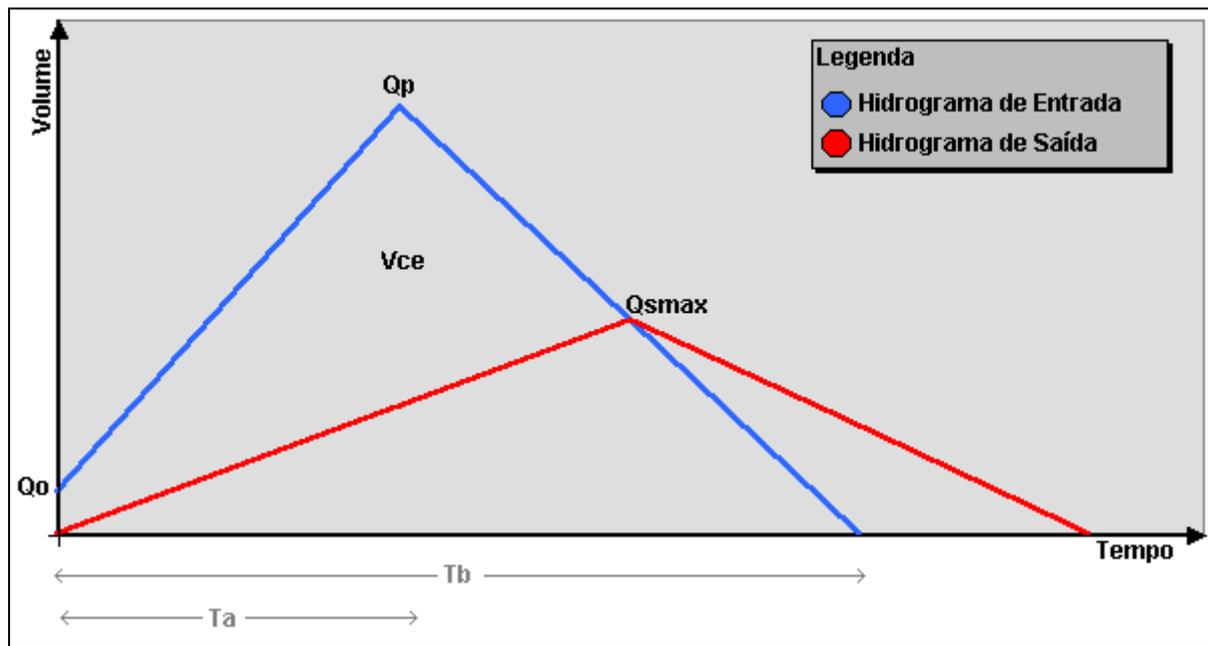


Figura 5

Na figura acima o  $V_{CE}$  é dado por:

$$V_{CE} = \frac{Q_0}{2} * T_a + \frac{Q_P - Q_{SMAX}}{2} * T_b$$

Equação 12 - Cálculo do Volume de Controle para Hidrogramas Triangulares

Lembrando que:

$$Q_{SMAX} = K * L * h^{\frac{3}{2}}$$

Equação 13 - Lei de Descarga para Vertedores de Soleira Livre

Onde:

$$K = \mu * \sqrt{2 * g}$$

L = largura do vertedor

Tem-se, portanto:

$$L = \left[ -A * h + \frac{Q_0}{2} * T_a + \frac{Q_P}{2} * T_b \right] * \frac{2}{K * h^{\frac{3}{2}} * T_b}$$

Equação 14 - Dimensionamento da Largura do Vertedor

Se o valor de L ou h forem insatisfatórios, deve-se admitir outro valor de  $Q_{SMAX}$ .



## 9. Propriedades Gráficas

Analisando a figura abaixo, que mostra os hidrogramas de entrada e saída superpostos tem-se:

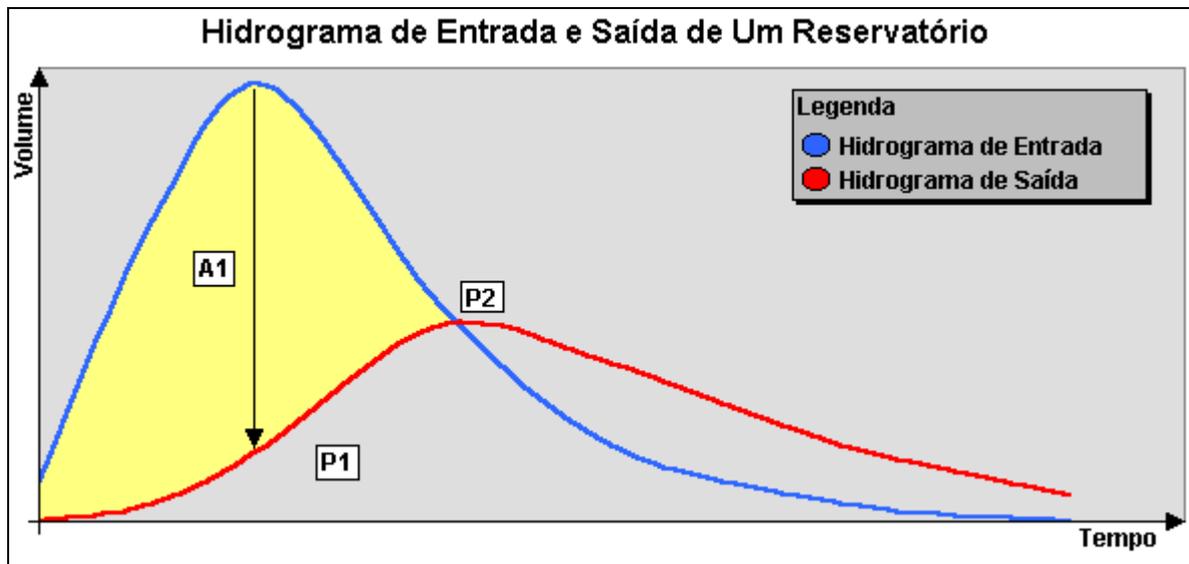


Figura 6

- **Primeira Propriedade:** Uma vez que a integral do Hidrograma de Entrada corresponde ao volume que entra no reservatório e a integral do Hidrograma de Saída corresponde ao volume que sai do reservatório, a área A1 assinalada corresponde ao volume armazenado no reservatório no espaço de tempo considerado.
- **Segunda Propriedade:** Considerando a função nível d'água em função do tempo, a velocidade de movimentação do nível d'água é sua primeira derivada. Entre zero e  $Q_{S\text{MAX}}$  esta velocidade é sempre positiva (nível d'água subindo). Entre zero e  $Q_{E\text{MAX}}$ , a diferença entre  $Q_E$  e  $Q_0$  é crescente, portanto a velocidade de subida cresce. Entre  $Q_{S\text{MAX}}$  e  $Q_{E\text{MAX}}$  a velocidade se mantém positiva, mas decresce até zero (quando  $Q_E$  é igual à  $Q_S$ ). Portanto no instante  $Q_{E\text{MAX}}$ , a variação de velocidade no tempo muda de sinal, o que caracteriza um ponto de inflexão (P1) no hidrograma de saída.
- **Terceira Propriedade:** O ponto P2, que é o ponto onde os dois hidrogramas se encontram, corresponde à máxima vazão de saída, pois a curva de descarga é crescente com o nível de água (volume) e neste ponto o volume armazenado é máximo.

## 10. Exemplo Numérico

A seguir apresenta-se um exemplo do método iterativo anteriormente descrito. Considere que os dados constantes nas colunas 2 e 3 foram obtidos de um hidrograma afluente ao reservatório.

Curva Cota-Volume:  $V = 14,2 \cdot (H - 100)$

Curva do Vertedor:  $Q = 0,5 \cdot L \cdot (H - 200) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H - 200)}$



Interv.	$Q_e$ (i)	$Q_e$ (i+1)	$V/(\Delta t/2)$ (i)	$Q_s$ (i)	$Y_{est}$ (i+1)	$Q_s$ (i+1)	$V/(\Delta t/2)$ (i+1)	$Y_{calc}$ (i+1)
1	60	84	157778	0,00	200,00 200,09	0,00 1,02	157922 157921	200,09 200,09
2	84	150	157921	1,02	200,09 200,24	1,02 4,43	158153 158150	200,24 200,24
3	150	216	158150	4,43	200,24 200,46	4,43 11,74	158507 158500	200,46 200,46
4	216	280	158500	11,07	200,46 200,76	11,74 24,93	158973 158959	200,76 200,75
5	280	340	158959	24,93	200,76 201,11	24,93 44,01	159529 159510	201,11 201,09

## 11. Bibliografia

- (1) Chow, V. T., Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill Book Company, Illinois - U.S.A., 1964.
- (2) Chow, Maidment & Mays, Applied Hydrology, McGraw-Hill Book Company, 1988.
- (3) Davis & Sorensen, Handbook of Applied Hydraulics, McGraw-Hill Book Company, Kogakusha Company, LTD Tokyo, Third Edition, 1969.
- (4) Linsley, R. K., Engenharia de Recursos Hídricos, McGraw-Hill do Brasil Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo Brasil, 1978.
- (5) Pinto, N. L. e outros, Hidrologia Básica, Editora Edgard Blucher, São Paulo, 1977.
- (6) United States Department of the Interior, Stewart L. Udall, Secretary & Bureau of Reclamation, Floyd E. Dominy, Commissioner, Diseño de Presas Pequeñas, Compañía Editorial Continental, S.A., Quarta Impression, 1974.
- (7) Wisler, C.O. & Brater, E.F., Hidrologia, Ao Livro Técnico e Científico S.A., Rio de Janeiro - Brasil, 1964.