

## ***10 REGULARIZAÇÃO DE VAZÕES***

## 10 - REGULARIZAÇÃO DE VAZÕES

### Finalidades dos Reservatórios

Os reservatórios têm por finalidade, acumular parte das águas disponíveis nos períodos chuvosos, para compensar as deficiências nos períodos de estiagem, exercendo um efeito regularizador das vazões naturais.

Em geral, os reservatórios são formados por barragens implantadas nos cursos d'água. Suas características físicas, em especial a capacidade de armazenamento, dependem exclusivamente das características topográficas do vale no qual estará situado.

### Determinação da Altura de uma Barragem

A altura de uma barragem é determinada em função das diferentes parcelas que deverão ser previstas no reservatório a ser formado, cada uma delas, destinada a um fim específico.

A Figura 10.1 mostra esquematicamente uma barragem e as diversas parcelas de sua altura bem como do reservatório formado, que são:

$V_m$  = Volume morto: Volume destinado a receber os sedimentos depositados durante a vida útil do reservatório.

$h_1$  = Sobrecarga mínima necessária na entrada da tomada d'água estabelecida em função de condições hidráulicas.

$V_u$  = Volume útil: Volume destinado a regularizar uma certa vazão regularizada " $Q_r$ ". Quando a obra é destinada a mais de uma finalidade, o volume útil total é geralmente a soma dos diversos volumes necessários a cada finalidade. Esse volume determina o "nível máximo de operação (normal)", e consequentemente a cota da crista do extravazador (sem comportas).

$h_2$  = Carga sobre a soleira do vertedor. A água em excesso é descarregada por sobre a soleira do vertedor. Quando a finalidade da obra é controlar enchentes, esta sobrecarga deve ser dimensionada de forma que não exceda uma determinada vazão a jusante da obra. A parcela  $h_2$  determina o " $V_{ce}$  = Volume de controle de cheias", também denominado de "Volume de espera".

$h_3$  = Parcela destinada a impedir que as ondas formadas pelo vento ultrapassem a crista da barragem.

$h_4$  = Borda livre: Segurança adicional para prevenir eventuais transbordamentos sobre a crista em condições excepcionais. A Figura 10.2 mostra a curva de volumes do reservatório, onde são indicados os mesmos parâmetros.

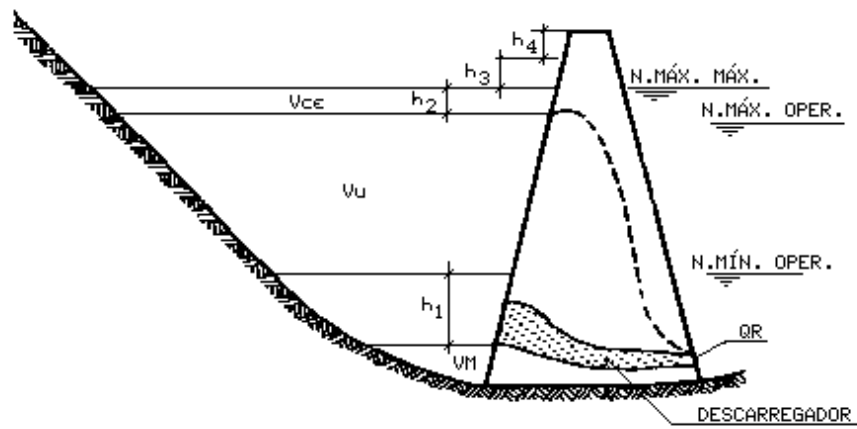


FIGURA 10.1 - Parcelas que compõem a altura de uma barragem

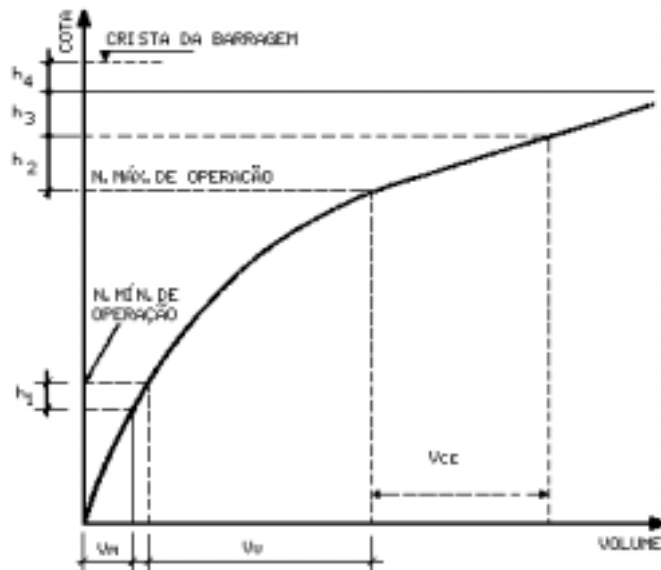


FIGURA 10.2 - Parcelas que compõem a altura de uma barragem, na curva cota-volume

### Dimensionamento de Reservatórios: Cálculo do Volume útil

O volume útil é o volume de armazenamento necessário num reservatório para garantir uma vazão regularizada constante, durante o período mais crítico de estiagem observado.

Os métodos de cálculo desse volume se baseiam no diagrama de massas ou Diagrama de Rippl.

### Diagrama de massas

O diagrama de massas é definido como a integral da hidrógrafa. É um diagrama de volumes acumulados que afluem ao reservatório. Uma hidrógrafa como a mostrada na figura 10.3 dá origem a um diagrama de massas como o da

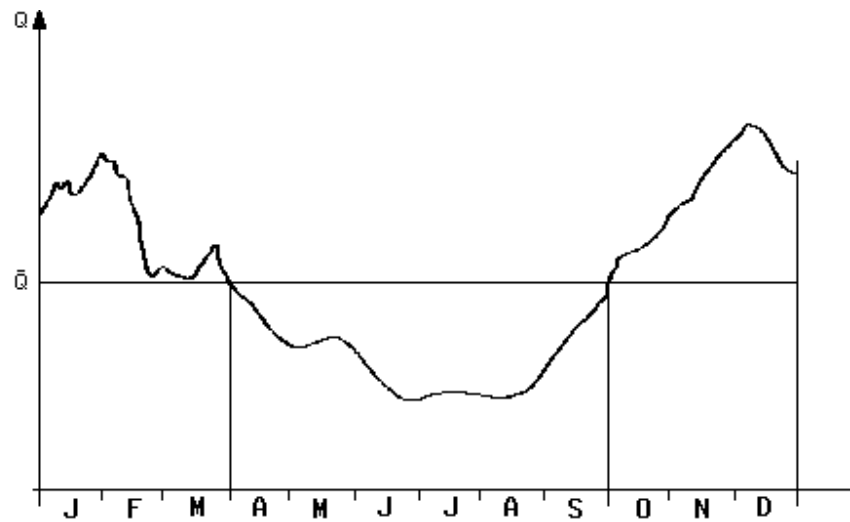


figura 10.4.

FIGURA 10.3 - Hidrógrafa de entrada em um reservatório

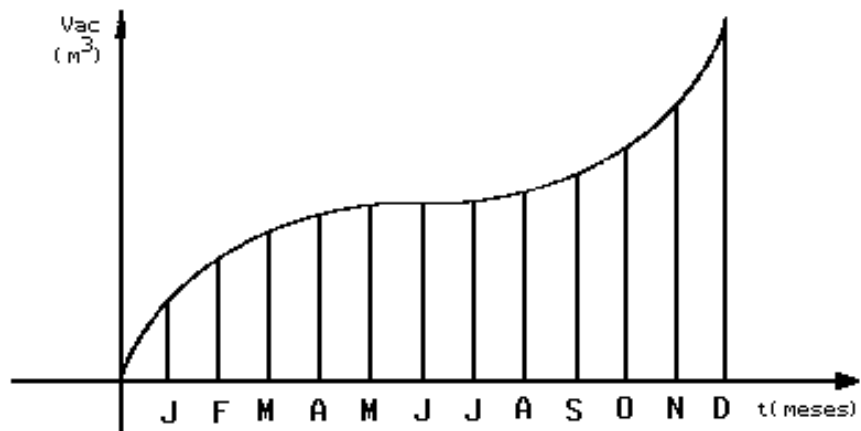


FIGURA 10.4 - Diagrama de massas



FIGURA 10.5 - Diagrama de massas e cálculo do volume de regularização

Como o diagrama de massas é a integral da hidrógrafa, as tangentes a essa curva dão as vazões em cada tempo considerado.

As vazões a serem regularizadas são referenciadas como uma porcentagem da vazão média de longo termo. Na figura 10.5, a vazão média é dada pela inclinação da reta AB.

O período crítico na figura 10.5 é o intervalo de tempo de  $t_1$  a  $t_2$ . Para manter a vazão média durante o intervalo de tempo ( $t_1$ ,  $t_2$ ), será necessário um volume  $V_n$ , dado por:

$$V_n = \bar{Q}(t_2 - t_1)$$

Como o diagrama da figura 10.5 é um diagrama integral, o volume  $V_n$  fica representado pelo segmento EC.

O volume que aflui,  $V_a$  ao reservatório no período de tempo ( $t_1, t_2$ ) é:

$$V_a = \int_{t_1}^{t_2} Q dt$$

O volume ( $V_a$ ) é representado pelo segmento DC.

Assim, a capacidade do reservatório, isto é ( $V_n - V_a$ ) é representada pelo segmento ED, que por sua vez é a soma de  $\delta_1$  e  $\delta_2$ , conforme a figura 10.5.

Utilizando-se o diagrama de massas é possível determinar graficamente o volume útil, conforme foi descrito acima.



Porém, esse método é bastante impreciso. Uma forma mais precisa de determinação do volume útil para regularização é um método analítico, denominado método do máximo déficit acumulado, apresentado a seguir.

**Método do máximo déficit acumulado (censurado):**

O roteiro para o cálculo através desse método é o seguinte:

- 1 - Com os dados de vazão média mensal do local a estudar, determina-se a vazão média do período ( $\bar{Q}$ ).
- 2 - Escolhe-se a vazão que se deseja regularizar ( $Q_r$ ) (menor ou igual à vazão média).
- 3 - Monta-se uma tabela com os volumes médios mensais, em unidade conveniente ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{mês}$ ) para facilidade de cálculo.
- 4 - Para cada mês "i" calcula-se o volume correspondente à diferença entre a vazão média mensal e a vazão regularizada escolhida.
- 5 - Em seguida calculam-se as somas parciais acumuladas dos déficits em volume, fazendo os valores maiores que zero iguais a zero (ou seja, censura-se a soma em zero).
- 6 - Escolhe-se o menor valor de soma parcial acumulada de déficits de todo o período (ou o maior valor em módulo).
- 7 - O volume útil de regularização será o valor absoluto dessa soma parcial, com a unidade transformada para  $\text{m}^3$ , multiplicando-se os valores em  $\text{m}^3/\text{s}/\text{mês}$  pelo n° de segundos de um mês.

Para maior conveniência, os cálculos acima podem ser organizados conforme exemplo apresentado na Tabela 10.1. Na coluna (2) estão os volumes médios mensais, na coluna (3) estão os volumes correspondentes às diferenças entre as vazões e a vazão de regularização escolhida. Na coluna (4) estão os valores das somas parciais de déficits censuradas.

Para os valores apresentados a vazão média é igual a  $28.86 \text{ m}^3/\text{s}$  e a vazão a ser regularizada escolhida foi de 70 % desse valor.

TABELA 10.1 - Exemplo de cálculo pelo método do máximo déficit acumulado

(1) mês i	(2) $V_i$ (m <sup>3</sup> /s/mês)	(3) $V_{i-r}$ (m <sup>3</sup> /s/mês)	(4) $\sum V_{i-r}^*$ (m <sup>3</sup> /s/mês)
1	86,7	66,50	0,00
2	67,2	47,00	0,00
3	46,8	26,60	0,00
4	28,3	8,10	0,00
5	22,3	2,10	0,00
6	24,4	4,20	0,00
7	17,3	-2,90	-2,90
8	13,5	-6,70	-9,60
9	11,8	-8,40	-18,00
10	20,1	-0,10	-18,10
11	26	5,80	-12,30
12	19,6	-0,60	-12,91
13	19	-1,20	-14,11
14	67,5	47,30	0,00
15	26,5	6,30	0,00
16	19,1	-1,10	-1,10
17	19,5	-0,70	-1,80
18	14,8	-5,40	-7,20
19	18,2	-2,00	-9,20
20	12,6	-7,60	-16,80
21	9,9	-10,30	-27,11
22	23,5	3,30	-23,81
23	22,2	2,00	-21,81
24	55,8	35,60	0,00

### Curva de regularização

Calculando-se diversos valores de volume útil, para diversas vazões de regularização, é possível construir uma curva, denominada curva de regularização ou curva de possibilidades de regularização. Um exemplo desse tipo de curva pode ser visto na figura 10.6.. Essa curva é assintótica: para a vazão regularizada tendendo à vazão média, o volume útil tende a infinito.

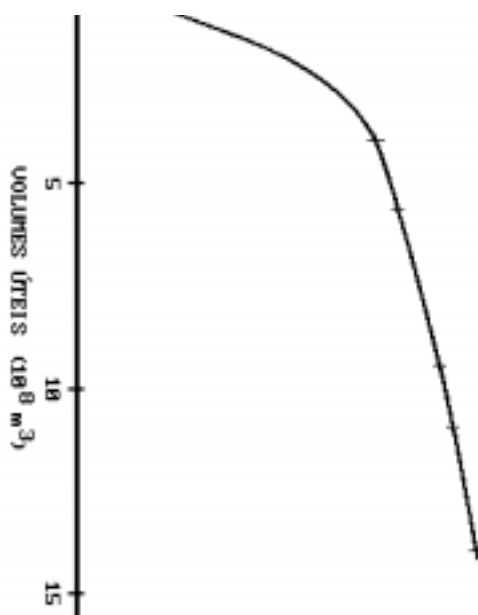


FIGURA 10.6 - Exemplo de Curva de regularização

### **Perdas por Evaporação**

Nos reservatórios de pequena profundidade, assim como nos de regularização plurianual, as perdas por evaporação podem ser bastante significativas, e devem ser levadas em consideração no dimensionamento dos mesmos.

As perdas por evaporação devem ser estimadas para o período crítico de depleção do reservatório, considerando a área de superfície líquida, que é variável nesse período.

É usual avaliar a perda por evaporação considerando a área de superfície líquida correspondente a 2/3 (dois terços) da profundidade do mesmo, medidos a partir do fundo.

As variações sazonais de evaporação podem, em determinados casos, revestir-se de certa importância em particular

nos projetos de irrigação, uma vez que, normalmente nos períodos em que a evaporação é máxima, as demandas de água, também o são.

A evaporação deve, sempre que possível, ser avaliada com base em dados de evaporímetros próximos do local de estudo, ou na falta destes, através de fórmulas empíricas, como por exemplo a de Thornthwaite-Holzman, que podem ser encontradas na literatura especializada.

### **Determinação do Volume Morto (Vm)**

O reservatório propicia condições para a sedimentação do material sólido transportado pelo curso d'água devido a diminuição da velocidade das águas. Formam-se depósitos com distribuição granulométrica característica variando o tamanho dos grãos de montante (com materiais grosseiros) para jusante (material fino).

O método usual para resolver o problema do assoreamento é destinar uma parcela do volume total do reservatório à sedimentação dos sólidos durante a sua vida útil.

Para determinar o volume de sedimentos que se deposita ao longo da vida útil do reservatório, é necessário conhecer a taxa de deposição anual. Essa taxa pode ser estimada a partir de dados de transporte sólido do rio e da capacidade de retenção do reservatório.

No Brasil, os dados de transporte sólido são escassos e de qualidade duvidosa. Assim, as estimativas são efetuadas com base em dados de regiões próximas a área de projeto ou mesmo de outros países. Como estimativa preliminar do volume morto adota-se geralmente 10% do volume útil.

### **Determinação do Volume de Controle de Cheias (Vce)**

A determinação do volume necessário para controle de cheias Vce é efetuada através de estudos de encaminhamento de enchentes pelo reservatório e órgão de extravazamento, conforme abordado no tópico a seguir.

Esses estudos devem permitir não apenas estabelecer o volume Vce, como também, as características dos órgãos de extravazamento. No caso de um vertedor linear estudos de encaminhamento de enchentes devem permitir fixar o comprimento necessário para o mesmo.

## **AMORTECIMENTO DE ONDA DE CHEIA EM RESERVATÓRIO**

### **Conceituação Básica do Processo de Encaminhamento de Enchentes**

O armazenamento de água num reservatório depende da diferença entre as descargas afluentes e as efluentes. Para um intervalo de tempo  $\Delta t$ , a relação pode ser expressa pela equação:

$$\Delta V = Q_a \cdot \Delta t - Q_e \cdot \Delta t$$

onde:

$\Delta V$  = Volume armazenado durante o intervalo  $\Delta t$ ;

$Q_a$  = Descarga média afluente durante o intervalo  $\Delta t$ ;

$Q_e$  = Descarga média efluente durante o intervalo  $\Delta t$ ;

As descargas afluentes ao longo do tempo são representadas pelo hidrograma da enchente afluente de projeto; as descargas efluentes são definidas pela curva de descarga do vertedouro em função do nível d'água no reservatório, e o volume armazenado no reservatório é definido pela curva de volumes acumulados do mesmo. Nos estudos de encaminhamento de enchentes, o hidrograma da enchente afluente é um elemento invariável. A capacidade de armazenamento também constitui um elemento invariável para um dado local de barragem. A curva de descarga do vertedouro por outro lado, não é fixa: ela depende não apenas das dimensões e tipo do vertedouro, mas também das condições de operação (e dispositivos de descarga de fundo em alguns casos) para regular a descarga efluente.

A quantia de água que um vertedouro pode descarregar, depende do tipo de dispositivo de controle. Para o vertedouro de soleira livre, a descarga varia com a carga sobre a crista; o aumento da descarga implica em aumento da carga sobre a crista. Para o vertedouro com comportas, entretanto, a descarga para um mesmo nível pode variar em função da operação das mesmas. Por exemplo, uma hipótese de operação do vertedouro com comportas, pode consistir em abrir as mesmas mediante uma manobra tal, que as descargas afluente e efluente sejam iguais, até que as comportas estejam totalmente abertas; outra hipótese de operação do mesmo vertedouro, consiste em abrir as comportas num ritmo mais lento, retendo no reservatório a água que for possível, sem que varta por sobre elas.

As descargas a serem liberadas pelo reservatório não precisam necessariamente ser conduzidas exclusivamente pelo vertedouro, mas também pelos órgãos de descarga de fundo que podem contribuir como dispositivos suplementares de descarga de enchentes. Em tais casos, a determinação dos tipos e dimensões do vertedouro e descarregador de fundo, bem como a forma de operação conjunta, devem ser efetuadas de modo a obter uma relação predeterminada entre níveis e descargas efluentes.

Se for possível obter equações que expressem o hidrograma da enchente de projeto, a curva de descarga do vertedouro (inclusive suas possíveis alterações por razões operativas), e da curva de volumes acumulados do reservatório, o encaminhamento da enchente poderá ser resolvido matematicamente por integração direta. Na maioria dos casos, entretanto, em geral não é possível representar os elementos mencionados, através de relações simples, não sendo portanto prático resolver tais problemas por procedimentos matemáticos. Foram desenvolvidos muitos métodos para cálculos relativos ao problema do encaminhamento de enchentes, cada um deles apresentando suas vantagens e desvantagens, e variam de, integrações numéricas a soluções por procedimentos inteiramente gráficos. Para a solução dos problemas de encaminhamento de enchentes, foram também desenvolvidos equipamentos mecânicos e eletrônicos especiais para esse fim, além dos computadores digitais, que permitem uma utilização para esses problemas, altamente eficiente e particularmente vantajosa em alguns casos especiais.

No presente texto, é apresentado um método numérico de encaminhamento de enchentes, através de integração por aproximações sucessivas.

### **Método das Aproximações Sucessivas**

O método das aproximações sucessivas, baseia-se na aplicação da Equação do armazenamento; a Tabela 10.2 constitui um exemplo de aplicação do presente método de encaminhamento de enchentes, cujos dados básicos estão representados nas Figuras 10.7, 10.8 e 10.9, e compreendem o seguinte:

TABELA 10.2 - Cálculo de Encaminhamento de Enchente pelo Método das Aproximações Sucessivas

(1) TEMPO T	(2) INTERVALO $\Delta T$	(3) DESCARGA AFLUENTE NO INSTANTE $T, Q_0$	(4) DESCARGA AFLUENTE MÉDIA EM $\Delta T$	(5) VOLUME AFLUENTE EM $\Delta T$	(6) N.A. ADMITIDO NO RESERVATÓRIO NO INSTANTE T	(7) DESCARGA EFLUENTE NO INSTANTE $T, Q_e$	(8) DESCARGA EFLUENTE MÉDIA EM $\Delta T$	(9) VOLUME EFLUENTE EM $\Delta T$	(10) ACRÉSCIMO DE VOLUME NO RESERVATÓRIO $\Delta V$	(11) VOLUME TOTAL ACUMULADO	(12) N.A. NO RESERVATÓRIO NO FIM DE $\Delta T$	(13) OBSERVAÇÃO
HORAS	HORAS	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup>	m	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m	
0		11,4								1 310 000	100,00	
	1		17,1	61 560	100,10	0,4	0,2	720	60 840	1 370 840	100,09	Alto
1		22,7			100,09	0,4	0,2	720	60 840	1 370 840	100,09	O.K.
	1		39,8	143 280	100,20	1,2	0,8	2 880	140 400	1 511 240	100,28	Baixo
2		56,8			100,28	2,0	1,2	4 320	138 960	1 509 800	100,28	O.K.
	1		85,2	306 720	100,40	3,4	2,7	9 720	297 000	1 806 800	100,63	Baixo
3		113,5			100,63	7,3	4,7	16 920	289 800	1 799 600	100,62	O.K.
	1		141,9	510 840	101,00	15,2	11,3	40 680	470 160	2 269 760	101,09	Baixo
4		170,2			101,09	17,5	12,4	44 640	466 200	2 265 800	101,09	O.K.
	1		151,8	546 480	101,50	28,9	23,2	83 520	492 960	2 728 760	101,53	Baixo
5		133,4			101,53	29,8	23,7	85 320	461 160	2 726 960	101,53	O.K.
	1		113,5	408 600	101,70	35,2	32,5	117 000	291 600	3 018 560	101,79	Baixo
6		93,6			101,79	38,2	34,0	122 400	286 200	3 013 160	101,79	O.K.
	1		80,9	291 240	101,90	41,7	40,0	144 000	147 240	3 160 400	101,92	Baixo
7		68,1			101,92	42,4	40,3	145 080	146 160	3 159 320	101,92	O.K.
	1		56,8	204 480	102,00	45,2	43,8	157 680	46 800	3 206 120	101,96	Baixo
8		45,4			101,96	43,8	43,1	155 160	49 320	3 208 640	101,96	O.K.
	1		38,3	137 880	101,90	41,7	42,8	154 080	- 16 200	3 192 440	101,95	Baixo
9		31,2			101,95	43,4	43,6	156 960	- 19 080	3 189 560	101,95	O.K.
	2		22,7	163 440	101,80	38,4	40,9	294 480	- 131 040	3 058 520	101,83	Baixo

11		14,2			101,83	39,4	41,4	289 080	- 134 640	3 054 920	101,83	O.K.
----	--	------	--	--	--------	------	------	---------	-----------	-----------	--------	------

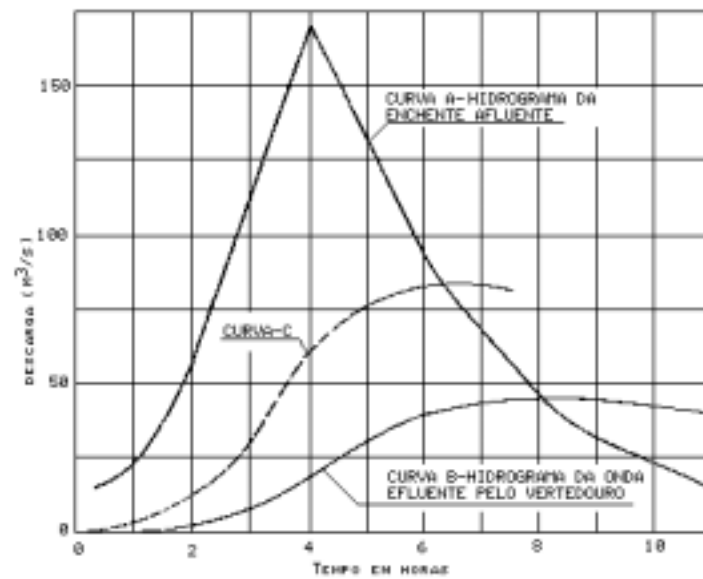


FIGURA 10.7 - Hidrogramas Afluente e Efluente ao Reservatório



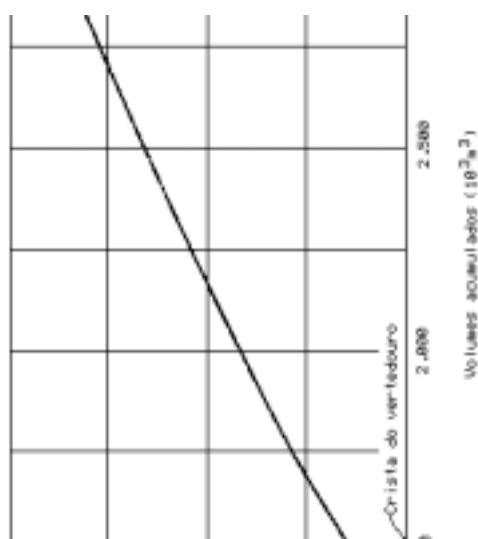


FIGURA 10.8 - Curva de Volumes do Reservatório

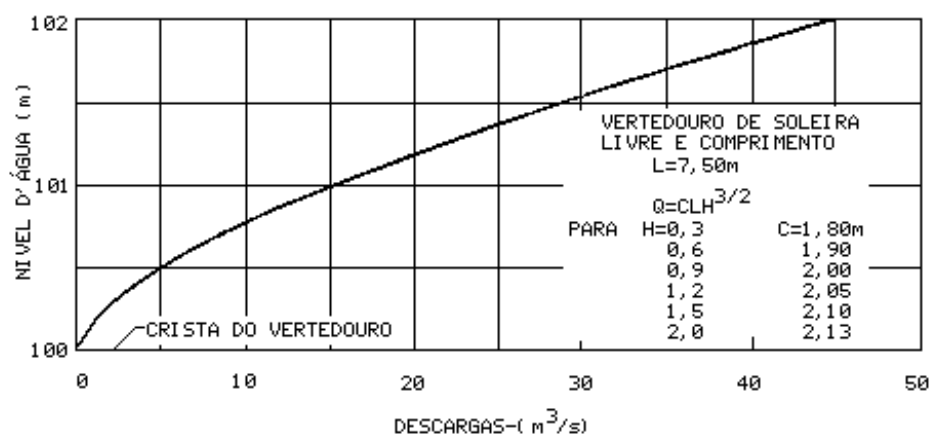


FIGURA 10.9 - Curva de Descarga do Vertedor

#### ROTEIRO DE CÁLCULO (PREENCHIMENTO DA TABELA)

- (1) Hidrograma de enchente (descargas afluentes em função do tempo), Figura 10.7.
- (2) Curva de volumes do reservatório (volumes acumulados em função do nível d'água) Figura 10.8.
- (3) Curva de descarga (descargas vertidas em função do nível d'água no reservatório) Figura 10.9.

Os procedimentos de cálculo mostrados na Tabela 10.2 são os seguintes:

- (1) Selecionar um intervalo de tempo  $\Delta t$ , e indicar na coluna (2).
- (2) Preencher a coluna (3) a partir do hidrograma da enchente da Figura 10.7.
- (3) A coluna (4) representa as descargas médias afluentes relativas aos intervalos considerados.
- (4) Obter a coluna (5) convertendo os valores da coluna (4) em  $m^3$ .
- (5) Admitir um nível d'água para o reservatório no fim do intervalo de tempo considerado, registrando-o na coluna (6); em seguida determinar a correspondente descarga efluente obtida da Figura 10.9, e indicá-la na coluna (7).
- (6) Determinar a descarga média efluente no intervalo de tempo em questão, considerando a descarga no início do intervalo de tempo que deverá ser conhecida, e a descarga efluente obtida no passo (5) e indicada na coluna (7); indicar o valor obtido na coluna (8).
- (7) O valor constante da coluna (8) deverá em seguida ser convertido em  $m^3$  e indicado na coluna (9).
- (8) Coluna (10) = coluna (5) - coluna (9).
- (9) O valor inicial da coluna (11), representa o volume de armazenamento no reservatório no início da enchente.  
  
Determinar o valor subsequente da coluna (11), adicionando o valor obtido para  $\Delta V$ , ao volume inicial do reservatório.
- (10) Determinar a correspondente elevação do nível d'água no reservatório a partir da figura 10.4, e indicar o valor obtido na coluna (12).
- (11) Comparar o nível d'água obtido na coluna (12) com o valor inicial admitido, indicado na coluna (6). Se a diferença entre ambos for inferior a 2 cm, considerar o resultado registrado na coluna (12), como suficientemente preciso. Caso contrário, efetuar uma nova hipótese de nível d'água e repetir os passos acima indicados, até obter um resultado satisfatório.

A curva das descargas efluentes em função do tempo, resultante dos cálculos mostrados na Tabela 10.1, está plotada na Figura 10.7 e indicada como curva B. Como a área sob o hidrograma da enchente (curva A), representa o volume total afluente ao reservatório, a área sob o hidrograma da onda efluente representa o volume total vertido (curva B). Decorre portanto, que a área compreendida entre as duas curvas (A) e (B), representa o volume retido no reservatório. O volume de armazenamento calculado na Tabela 10.2, pode portanto, ser confirmado por comparação com a correspondente área medida no gráfico.