

PARTE I



HIDROLOGIA E HIDRÁULICA: CONCEITOS BÁSICOS E METODOLOGIAS

Capítulo 2 Hidráulica de Canais, Travessias e Barramentos



DAEE

Este capítulo resume, de forma prática, os conceitos básicos de Hidráulica referentes ao dimensionamento de pequenas obras de canalização, travessia e barramento que não apresentem complexidade.

CANALIZAÇÃO

Canalizar significa modificar ou alterar a seção e/ou o traçado natural de um curso d'água (rio, ribeirão, córrego etc.).

TIPOS DE CANALIZAÇÃO	A céu aberto (canais) De contorno fechado (galerias)
SEÇÕES GEOMÉTRICAS NORMALMENTE UTILIZADAS	Trapezoidal Retangular Circular
REVESTIMENTOS MAIS COMUNS	Terra Enrocamento (rachão) Pedra argamassada Concreto Gabião Terra armada

Os diagramas e as ilustrações das Figuras 8 a 12 apresentam vários tipos de seções e de revestimentos, ordenados sob o aspecto econômico.

Figura 8. Canalização a céu aberto. Tipos de revestimentos mais comuns.

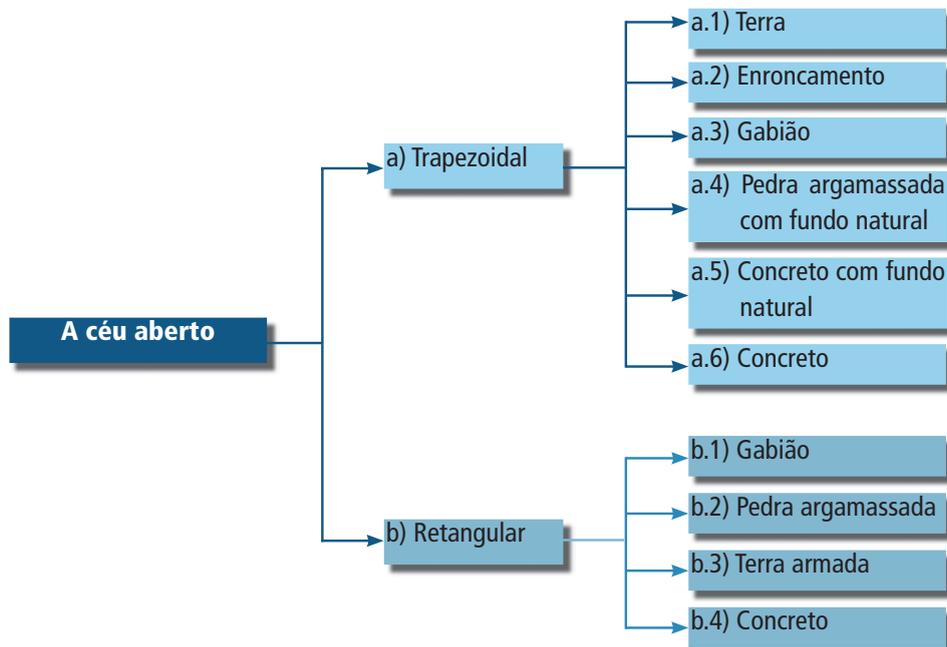
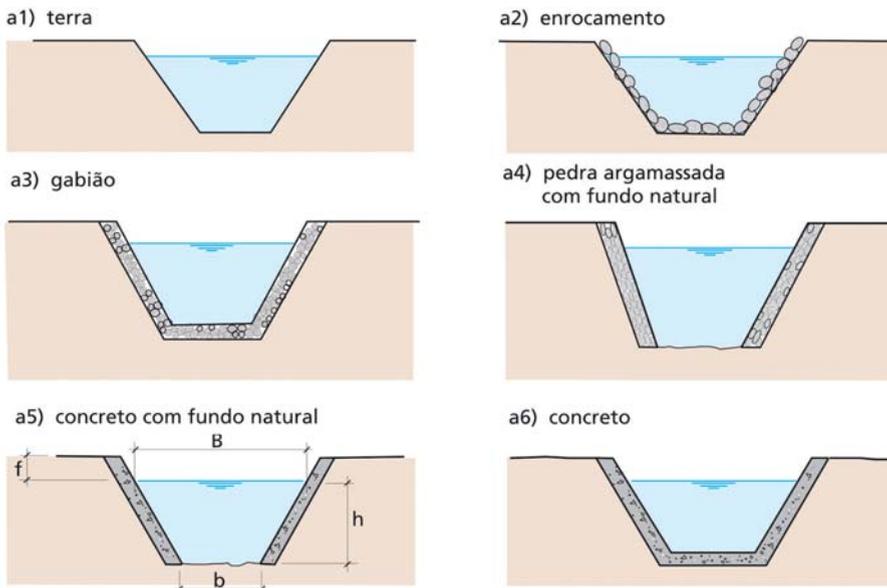
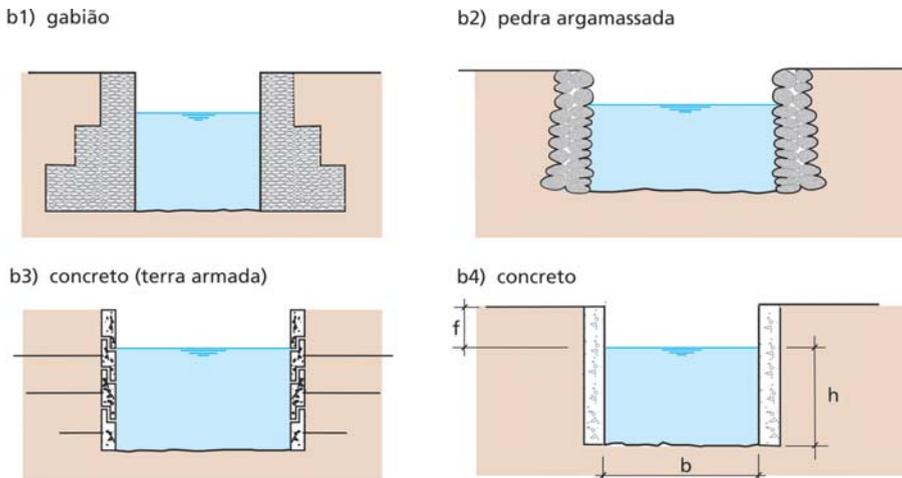


Figura 9. Tipos de revestimentos para canais trapezoidais.



b = largura da base menor
 B = largura da superfície da seção molhada
 h = profundidade da lâmina d'água
 f = borda livre

Figura 10. Tipos de revestimentos para canais retangulares (com fundo de terra).⁵



b = largura do canal
 h = profundidade da lâmina d'água
 f = borda livre

⁵ Projetos de canalização com revestimento do leito resultam em obras significativamente mais dispendiosas que as de canais com leito natural.

Figura 11. Canalização em contorno fechado.

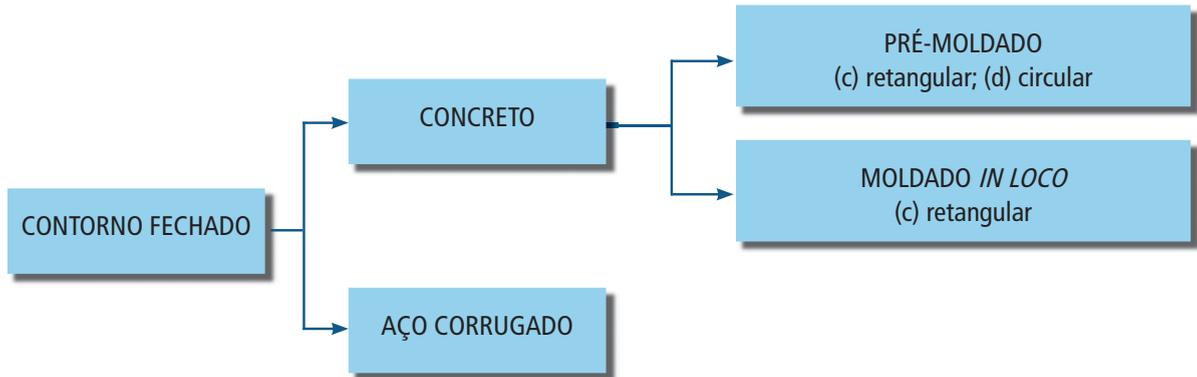
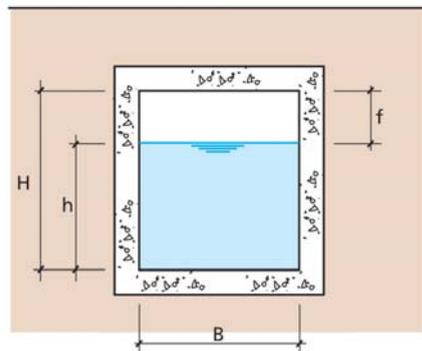
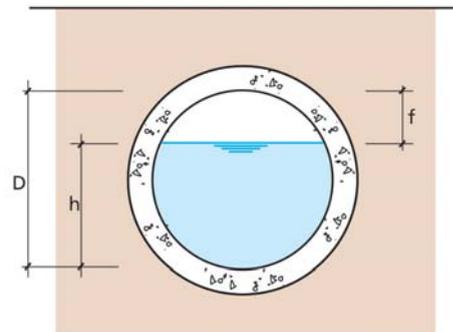


Figura 12. Seções de canalizações em contorno fechado.

c) retangular



d) circular



B = largura interna da seção
H = altura interna da seção
h = profundidade da lâmina d'água
D = diâmetro interno da seção
f = borda livre

Dimensionamento Hidráulico

Para o dimensionamento de canais foram utilizadas técnicas consagradas, empregadas usualmente nos projetos de drenagem urbana, mantendo-se o mesmo enfoque do Capítulo 1, de analisar casos simples como forma de apresentar os conceitos básicos de hidráulica de canais. Todo o equacionamento apresentado refere-se a escoamentos em regime uniforme e permanente, válido quando as características hidráulicas (h , Q e V) são constantes no tempo (regime permanente) e ao longo do percurso (regime uniforme), com o escoamento ocorrendo em condutos livres, nos quais parte do perímetro molhado mantém-se em contato com a atmosfera.

• Equação de Manning

$$V = \frac{1}{n} R_H^{2/3} \sqrt{i}$$

6

onde:

V = velocidade média (em m/s)
 n = coeficiente de rugosidade de Manning
 i = declividade média (em m/m)
 R_H = raio hidráulico (em m)

O raio hidráulico é uma grandeza linear característica do escoamento, definida pelo quociente da área molhada pelo perímetro molhado da seção do escoamento.

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

com:

R_H = raio hidráulico (em m)
 A_m = área molhada (em m²)
 P_m = perímetro molhado (em m)

A declividade média (i) do trecho do canal em estudo é o quociente entre o desnível do fundo do canal (diferença de cotas de *montante* e *jusante* - Δh) e o seu comprimento (L), medido no plano horizontal. Δh e L em metros.

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

7

(m/m)

A corrente de um curso d'água flui de montante para jusante.

• Equação da Continuidade

$$Q = V A_m$$

8

onde:

V = velocidade média (em m/s)
 A_m = área molhada (em m²)
 Q = vazão (em m³/s)

Das equações (6) e (8), resulta:

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

9 que permite a determinação de vazões (em m³/s) em função do coeficiente de Manning, do raio hidráulico (em m), da declividade média (em m/m) e da área molhada (em m²).

• Rugosidade

A Tabela 3 apresenta alguns valores do coeficiente de rugosidade n para utilização em projetos, nas equações (6) e (9).

Tabela 3. Coeficiente de Rugosidade de Manning (n).

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

Valores sugeridos pelo DAEE.

Para canais com parte da seção revestida e parte sem revestimento, como os casos a4 e a5, da Figura 9, e b1 a b4, da Figura 10, com fundo em terra, e nos casos em que são utilizados diferentes tipos de revestimento, determina-se um coeficiente de rugosidade equivalente, aplicando-se a expressão:

$$n_{eq} = \frac{P_a \cdot n_a + P_b \cdot n_b + \dots + P_n \cdot n_n}{P}$$

10

onde:

n_{eq} = coeficiente de rugosidade equivalente

P_a, P_b, \dots, P_n = perímetros molhados referentes aos revestimentos do tipo "a", "b", ..., "n"

n_a, n_b, \dots, n_n = rugosidades referentes aos diferentes revestimentos

$P = P_a + P_b + \dots + P_n$ = somatório dos perímetros molhados,

• Velocidade Máxima

Os valores de velocidades máximas permissíveis relativas a alguns tipos de revestimentos usados em canais estão na Tabela 4.

⁶ Para canais revestidos de concreto bem acabado, de traçado retilíneo, com águas limpas, pode-se admitir $n=0,013$. Caso a canalização apresente singularidades, onde houver a possibilidade de retenção e/ou de deposição de sedimentos, deve-se adotar $n=0,018$ ou estimar a rugosidade equivalente (n_{eq}) pela expressão (10).

Tabela 4. Limites superiores para velocidades em canais⁷.

REVESTIMENTO	V _{máx} (m/s)
Terra	1,5
Gabião	2,5
Pedra argamassada	3,0
Concreto	4,0

• **Borda Livre**

Em canais abertos deve-se manter uma borda livre mínima que corresponda a 10% da lâmina d'água estimada para a cheia de projeto, mas não inferior a 0,4 m ($f \geq 0,1h$, com a condição $f \geq 0,4m$). Para canais de contorno fechado deve ser mantida uma borda livre $f \geq 0,2h$ (Tabela 2).

• **Geometria das Seções Mais Comuns**

A Tabela 5 apresenta expressões para cálculo de elementos característicos das seções de canais de utilização mais freqüente com base em sua geometria.

Tabela 5. Elementos hidráulicos característicos de diferentes tipos de seções transversais.

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

⁷ Os limites da Tabela 4 são recomendados como valores de referência, com base em experiência de projetos.

Além das seções geométricas apresentadas, há outros tipos como: de base retangular com abóbada semicircular, ferradura, boca e ovóide, cujos dimensionamentos podem ser encontrados no manual *Contribuição ao dimensionamento hidráulico dos canais trapezoidais e canais de contorno fechado* (SALKAUSKAS, 1981), no qual se acham os cálculos hidráulicos em regime livre para os principais tipos de seções transversais usados na prática. Os métodos de cálculo baseiam-se na aplicação de parâmetros em forma de tabelas.

Princípios Orientadores para Projeto e Dimensionamento de Canais

- a) Todo projeto de obra hidráulica deve ser precedido de visita ao local da implantação para reconhecimento da área. Se possível, devem ser entrevistados moradores locais para obtenção de informações sobre ocorrências de enchentes.
- b) Na escolha da seção-tipo de projeto do canal, em primeiro lugar deve-se considerar a disponibilidade de faixa para a sua implantação.
- c) É necessário verificar o limite de velocidade para o tipo de revestimento a ser empregado. Às vezes deve-se adequar o perfil do leito do canal, reduzindo sua declividade com o emprego de degraus, a fim de não ser ultrapassada a velocidade máxima permitida pelo revestimento escolhido.
- d) Costuma-se analisar várias alternativas, em projetos de canais, escolhendo-se normalmente a mais econômica.
- e) No dimensionamento de canais em degraus, sugere-se consulta à obra *Drenagem Urbana - Manual de Projeto* (DAEE/CETESB, 1980).
- f) As obras de canalização, em geral, devem ser realizadas de jusante para montante, pelo fato de, uma vez concluídas, possibilitarem a passagem de maiores vazões do que na situação original. Caso contrário, precipitações intensas durante a obra poderão agravar inundações e erosões a jusante.
- g) Na elaboração de um projeto de canalização devem ser analisadas as condições do entorno da obra, para evitar soluções localizadas, verificando-se os possíveis efeitos provocados pela sua implantação, tanto a montante como a jusante do trecho a ser realizado, como, por exemplo, a transferência das vazões de cheia que agravam inundações a jusante, a eventual sobrelevação da linha d'água provocada por perda de carga na entrada do trecho canalizado que causa inundações a montante, e lâmina d'água de projeto compatível com as profundidades do canal.
- h) Se o trecho de jusante do curso d'água não tiver capacidade para absorver as vazões de enchente projetadas para a canalização, deve-se incluir na solução a implantação de volumes de retenção de cheias ("piscinões").
- i) Deve-se analisar se a velocidade média do escoamento no final da canalização é compatível com o canal de jusante. Caso seja superior aos limites permissíveis, devem ser previstas proteções dos taludes e/ou do leito com enrocamento numa

determinada extensão e, se necessário, estruturas para dissipação de energia (por onde deverá ser iniciada a obra - item "f"). Não é prática comum projetar bacias de dissipação de energia em canais, devido à dificuldade da localização do ressalto hidráulico. Nesses casos, sugere-se a implantação de degraus para reduzir a declividade do canal projetado, com a conseqüente redução das velocidades, compatibilizando-as com os valores permitidos para o trecho de jusante.

- j) Na análise de um trecho de canalização com várias singularidades como travessias, diferentes revestimentos, estrangulamentos, variações de seções e de vazões, não permitindo a análise como regime uniforme e permanente, segundo os procedimentos apresentados, sugere-se determinar a linha d'água, em regime gradualmente variado, com o uso do *software* "CLiv" - modelo de simulação.
- l) Outro caso comum em estudos e projetos, é a canalização que desemboca num receptor de maior porte, cujos níveis de cheia podem provocar remanso na linha d'água do trecho canalizado, reduzindo sensivelmente, com essa influência, a capacidade de veiculação de vazões no canal projetado. Frequentemente a ampliação da seção do canal não soluciona o problema, já que o nível d'água de jusante é o condicionante de projeto. Sugere-se analisar essas influências utilizando-se *softwares* como o já citado "CLiv".
- m) O risco admitido no dimensionamento de uma obra hidráulica associa-se ao período de retorno a ser adotado e ao tempo de vida útil previsto para o empreendimento. Na análise de risco deve-se levar em conta não só o custo da obra, mas também os custos tangíveis e intangíveis provocados por eventos naturais de período de retorno superior ao utilizado. Entende-se por custos tangíveis a reconstrução da obra e as indenizações por prejuízos causados a infra-estruturas atingidas, entre outros. Por custos intangíveis entende-se as paralisações dos sistemas viários e suas conseqüências, ferimentos e morte de pessoas, destruição e catástrofes ambientais etc.

CLiv - Conduitos Livres.
Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica - FCTH.
USP, São Paulo/SP. Modelo de Simulação. (<http://www.fcth.br/software/cliv.html>).

Plantas e Desenhos

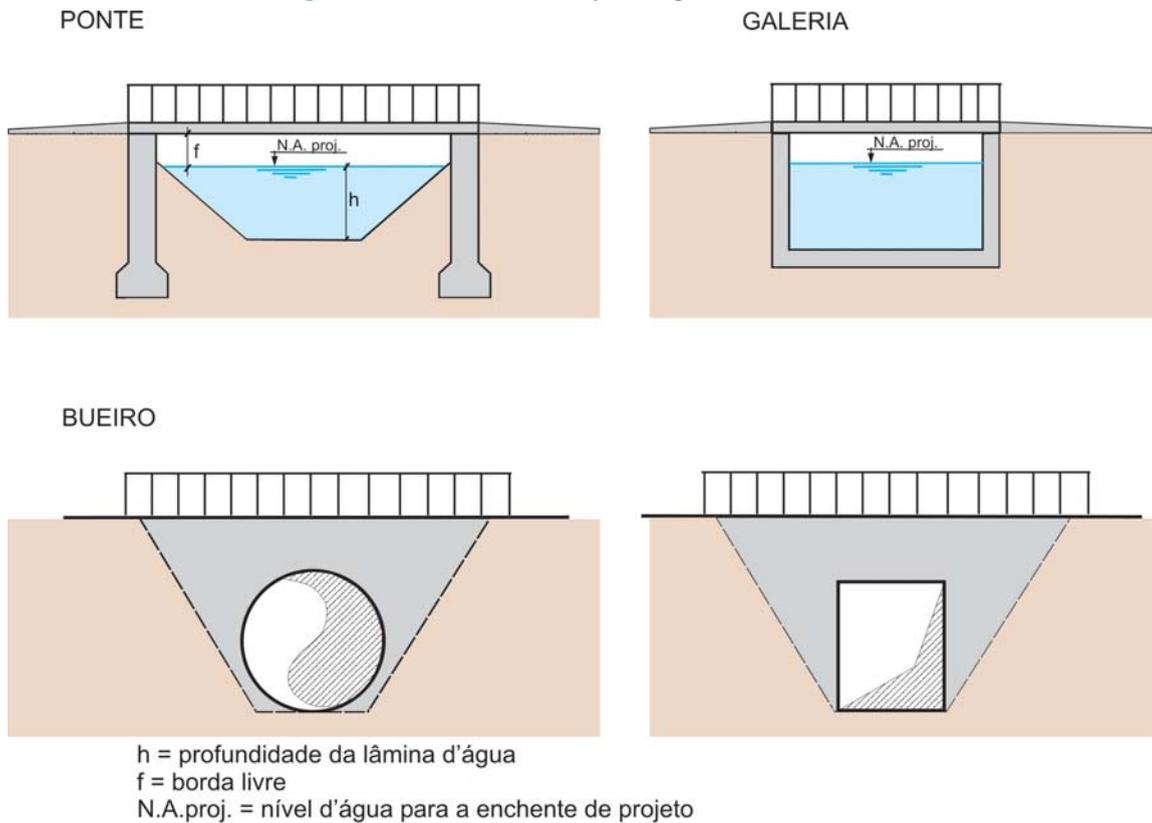
Na solicitação de outorga, além dos estudos e do dimensionamento com memorial de cálculo da hidrologia e da hidráulica da obra, devem ser apresentados, no mínimo, os seguintes desenhos e plantas:

- canalização (traçado geométrico);
- seções-tipo do canal;
- perfil longitudinal, contendo leito natural, fundo de projeto, margens esquerda e direita e linha d'água projetada;
- detalhes;
- seções topobatimétricas do canal, com a(s) seção(ões) de projeto.

TRAVESSIA

Travessias são estruturas que permitem a passagem de uma margem à outra de um curso d'água (ou lago) a pessoas, animais, veículos, água, gás, combustíveis, energia elétrica, telecomunicações, entre outros, por meio de pontes, cabos, condutos, túneis, etc. As travessias podem ser aéreas, intermediárias e subterrâneas. Denomina-se travessia aérea à passagem sobre o canal acima do nível d'água de projeto. A travessia é subterrânea quando a passagem se faz abaixo do leito do corpo d'água. Travessia intermediária é a passagem através do corpo d'água, entre o nível d'água máximo de projeto e o leito. Os principais tipos de travessias estão descritos nas Figuras 13 a 16.

Figura 13. Travessias aéreas: pontes, galerias e bueiros⁸.



⁸ Bueiro: conduto usado para dar livre passagem às águas da drenagem superficial sob uma rodovia, ferrovia, ou qualquer tipo de aterro (DAEE/CETESB, 1980).

Figura 14. Travessias aéreas: dutos.

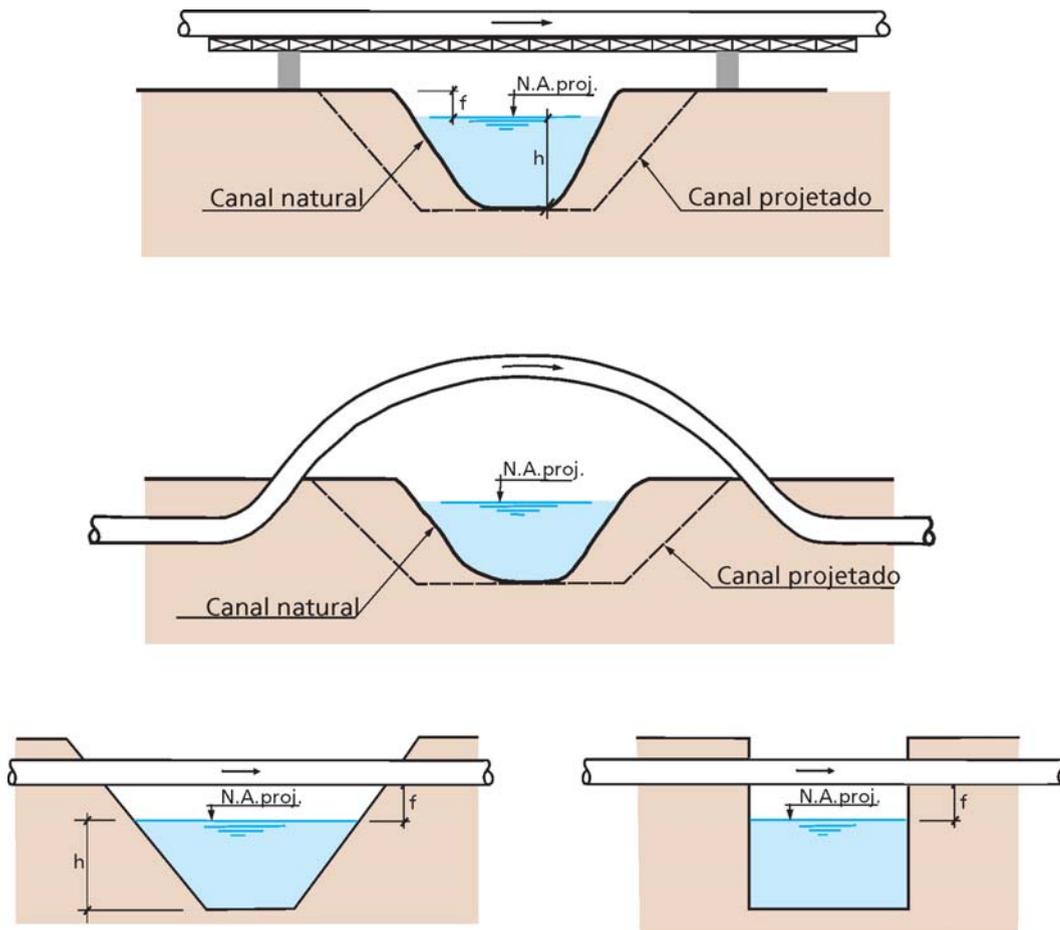
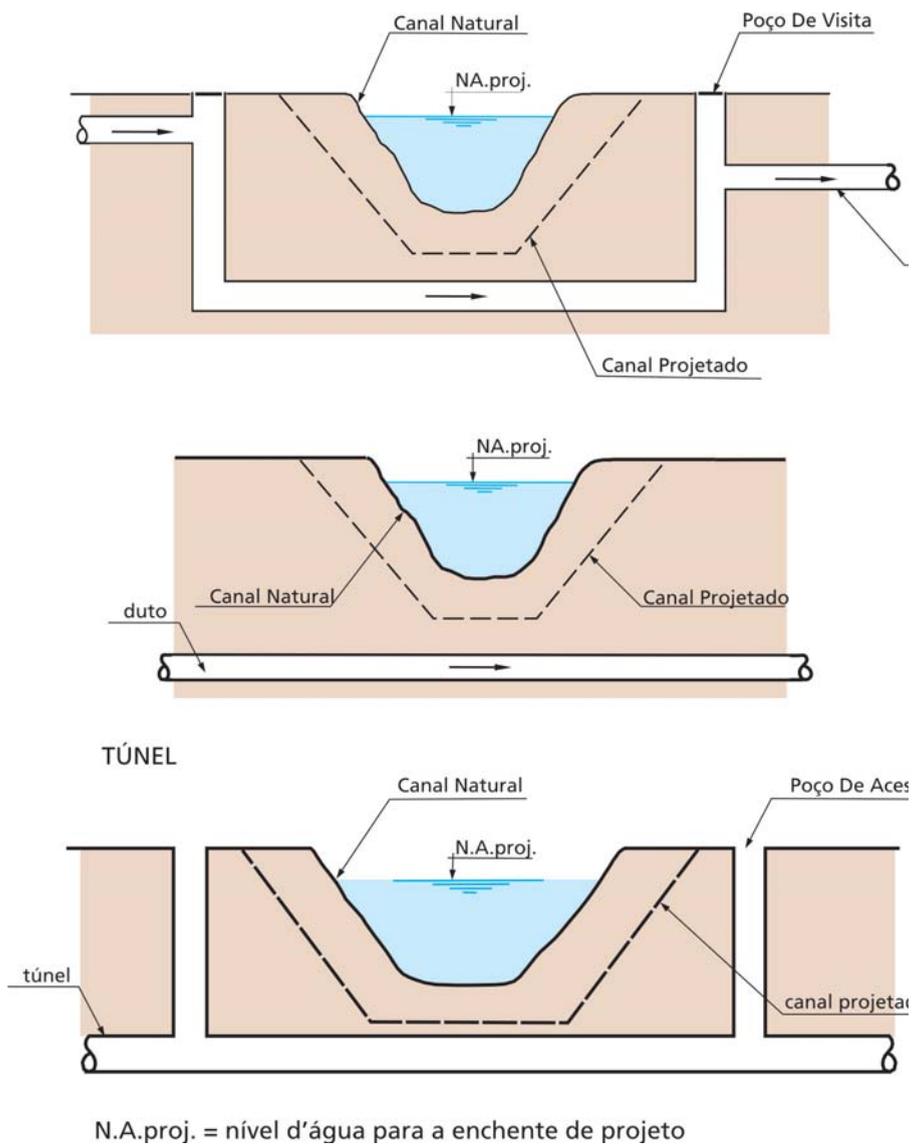


Figura 15. Travessia intermediária⁹.



⁹ Travessia intermediária, geralmente para cabos. O cabo ou o duto passam sob a superfície do corpo d'água e sobre seu leito. O DAEE não recomenda ou autoriza travessias desse tipo em cursos d'água (rios), por se constituírem em obstáculos ao escoamento e pelas altas velocidades durante as cheias.

Figura 16. Travessias subterrâneas: dutos e túnel.



Dimensionamento Hidráulico

O dimensionamento hidráulico de travessias deve seguir as mesmas técnicas empregadas para as canalizações, ou seja, análise em regime uniforme e permanente (casos mais comuns), utilizando-se as equações de Manning (6) e da Continuidade (8) para determinar a velocidade média e a vazão de projeto. Devem ser observados também os mesmos coeficientes de rugosidade (Tabela 3) e as restrições quanto às velocidades máximas admissíveis para canais em função do tipo de revestimento (Tabela 5).

Neste Guia focaliza-se o dimensionamento de travessias no nível básico, considerando os escoamentos em regime livre. Não serão vistos os problemas de hidráulica relativos a bueiros e às influências de pilares de pontes e de aterros, entre outros. Para consulta e orientação recomenda-se a publicação *Drenagem Urbana - Manual de Projeto* (DAEE/CETESB, 1980).

Na determinação da declividade média de projeto sugere-se o levantamento, no mínimo, de três seções topobatimétricas localizadas no eixo da travessia, a jusante e a montante, eqüidistantes de 20 a 50 metros.

Princípios Orientadores para a Análise Hidráulica de Travessias

- a) No projeto de uma travessia é importante analisar e verificar as influências decorrentes de sua implantação, tanto a montante como a jusante da seção de projeto.
- b) Tubulações (adutora de água e coletores de esgotos, por exemplo) cruzando canais pouco acima da lâmina d'água de vazões normais, que ficam submersas durante as cheias obstruindo e prejudicando o escoamento pela redução da capacidade hidráulica da seção, constituem solução não recomendada para projetos de canalização.
- c) Caso uma travessia antiga se mostre insuficiente para a veiculação de vazões de cheia e necessite de ampliação de sua seção de escoamento, recomenda-se verificar, inicialmente, como as adequações introduzidas afetarão as cheias a jusante. Para evitar o agravamento de enchentes a jusante em função das adequações propostas, sugere-se a implantação de uma estrutura de controle de vazões a montante da travessia, formando-se, desse modo, uma área de retenção de cheias - "piscinão" - com efeito para jusante semelhante ao da travessia existente.
- d) Cuidados especiais devem ser observados no caso de a travessia operar como bueiro, no qual a carga necessária (NA) para veicular a vazão de projeto não deve provocar inundações na várzea a montante, em áreas de terceiros. Além disso, o aterro sobre a tubulação deve ser projetado considerando-se que funcionará como um barramento durante as cheias. Recomenda-se ainda que a saída do bueiro seja protegida com enrocamento ou outro revestimento, devido às altas velocidades que ali ocorrem durante as cheias, ou então que seja implantada uma estrutura de dissipação de energia no local para impedir possíveis erosões.

- e) O nível d'água na travessia relativo à cheia de projeto deve ser compatível com as cotas das margens do canal e da várzea a montante, ou seja, na medida do possível a implantação da travessia não deve provocar inundações a montante.
- f) Os níveis d'água do canal (natural ou não) devem ser compatíveis, tanto a montante como a jusante, com os níveis projetados e/ou verificados para a travessia.
- g) Borda livre (*freeboard*) mínima (Tabela 2): $f=10\%$ de h (lâmina d'água para a cheia de projeto), com $f \geq 0,4$ m (idem ao descrito para canais).
- h) Quando a seção da travessia não obedecer à mesma geometria da seção transversal do canal, deve-se prever trechos de transição na canalização, a montante e a jusante da travessia.
- i) Nos casos em que a seção da travessia provoca modificações na linha d'água no canal a montante, por perda de carga na entrada, por exemplo, recomenda-se analisar o perfil da linha d'água com a utilização, se for o caso, de *softwares* como o "CLiv".
- j) Os projetos de travessias de qualquer tipo, aéreas ou subterrâneas, devem levar em consideração as possíveis necessidades futuras de ampliação da seção do curso d'água que atravessam, seja qual for o motivo: crescimento da impermeabilização da bacia a montante, canalização do curso d'água, implantação de avenidas de fundo de vale etc. Sem essa atitude preventiva, a obra de travessia poderá transformar-se, em pouco tempo, numa seção de controle para o futuro canal, devendo ser reconstruída ou adequada.
- l) No caso de pontes, não devem ser projetadas vigas com a face inferior abaixo das margens do canal, em virtude da diminuição da capacidade hidráulica da seção da travessia. Por motivo semelhante, sempre que possível deve-se evitar a implantação de pilares na calha do curso d'água. Recomenda-se utilizar vigas invertidas, deixando a seção do canal completamente livre para o escoamento das águas.

Plantas e Desenhos

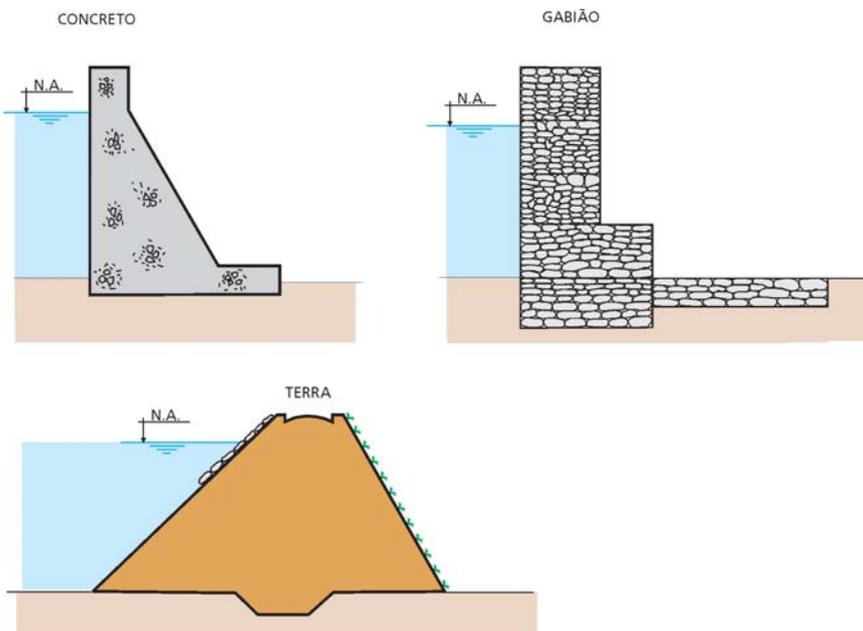
Para efeito de outorga, por semelhança com projetos de canalização, além dos estudos e do dimensionamento, contendo memorial de cálculo da hidrologia e da hidráulica, devem ser apresentadas, no mínimo, as seguintes plantas e desenhos:

- planta da implantação da obra de travessia;
- gabarito da travessia, no caso de travessias aéreas, locado na seção natural do canal, ou a seção transversal, no caso de bueiros e de dutos (subterrâneos);
- perfil longitudinal (ao longo do eixo do curso d'água);
- seções topobatimétricas do canal;
- detalhes de interesse para a outorga.

BARRAGEM

Barragens, *barramentos*, ou paramentos são estruturas construídas transversalmente aos cursos d'água, com o objetivo de modificar o fluxo, pela necessidade de elevação do nível e/ou para acumular volumes com finalidades como derivação das águas, controle de cheias, geração de energia, navegação, lazer etc.

Figura 17. Alguns tipos de barramentos.



Barramento é todo maciço cujo eixo principal esteja num plano que intercepte um curso d'água e respectivos terrenos marginais, alterando suas condições de escoamento natural, formando reservatório de água a montante, o qual tem finalidade única ou múltipla (Portaria DAEE 717/96).

Dimensionamento Hidráulico

Analisa-se neste Guia o dimensionamento das estruturas hidráulicas típicas de pequenas barragens, como descarregador de fundo, vertedor de superfície e bacia de dissipação de energia. Essas estruturas são necessárias porque garantem a integridade da obra, quando ocorrem precipitações intensas, e a manutenção de vazões mínimas para jusante, atendendo às condições ambientais e às necessidades de outros usuários. Também se analisa o amortecimento de ondas de cheia pelos reservatórios. Não são abordadas questões relativas à estrutura do barramento, estabilidade de taludes, filtros, drenos, tipos de material etc.

Seguindo a orientação geral inicialmente proposta, destaca-se o dimensionamento das estruturas hidráulicas de uma pequena barragem no nível básico, com o uso de procedimentos simplificados e práticos, aplicáveis em casos sem complexidade.

Soleira livre: por segurança, não se recomenda, jamais, a instalação de comportas sobre a soleira de vertedores de pequenas barragens. Esses barramentos são implantados em seções que definem pequenas bacias de contribuição, com cheias de curto tempo de concentração, ou seja, durante as quais o pico de cheia é atingido rapidamente, inviabilizando operações de comportas por falta de tempo de reação. Além disso, pequenos barramentos formam reservatórios com limitada capacidade de amortecimento.

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

Vertedor de Superfície

Essa importante estrutura hidráulica permite a passagem das vazões do reservatório para o leito natural a jusante em canal aberto. É dimensionada para possibilitar o escoamento das vazões de cheias de projeto, após o amortecimento (se houver) pelo reservatório. Dessa forma, evita-se o galgamento do maciço da barragem pela onda de cheia, o que comprometeria a estabilidade da obra.

O extravasor de superfície ou vertedor de superfície é uma estrutura em canal aberto de seção retangular revestida. Normalmente é formado por canal de aproximação, *soleira* (inserida no canal do vertedor), calha inclinada (“rápido”) e bacia de dissipação de energia para o encaminhamento do fluxo, em retorno ao leito de jusante, em condições hidráulicamente convenientes através do canal de restituição¹⁰. Salieta-se a importância de toda a estrutura de descarga superficial aqui descrita, por permitir um escoamento eficiente e previsível sobre a soleira projetada e possibilitar ao caudal vencer o desnível com a necessária dissipação da energia cinética.

• Descarga pelo Vertedor de Superfície

onde:

- 11 Q = vazão sobre a soleira em m³/s
 μ = coeficiente de descarga
 H = lâmina d’água sobre a soleira do vertedor em m
 g = aceleração da gravidade, de valor igual a 9,81 m/s²
 L = largura do vertedor (comprimento da soleira) em m (Figura 18)

Como , $\sqrt{2g} = 4,43$

$$Q = 4,43 \mu L H^{3/2}$$

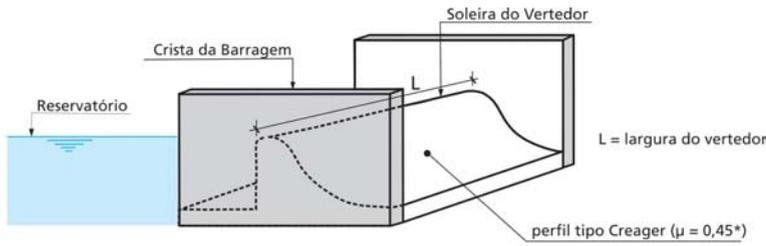
- 12 pode-se escrever a equação (11), na forma ao lado:
 (com Q em m³/s e L e H em m).

Descarregador de Fundo

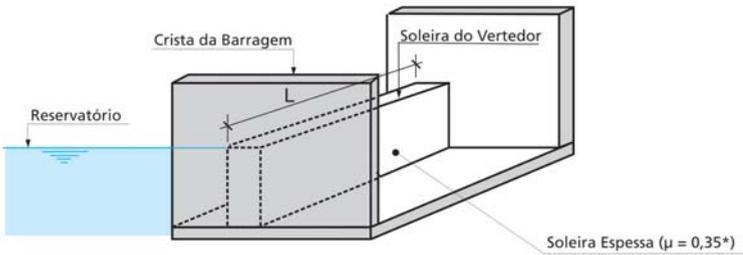
Estrutura hidráulica importante e indispensável para qualquer pequena barragem, o descarregador de fundo é utilizado na fase de construção do barramento como desvio para o escoamento das vazões do curso d’água. Após a implantação da obra, permite a operação do reservatório quando necessário em qualquer nível, tornando possível a manutenção de vazões mínimas para jusante. Preferencialmente deve funcionar hidráulicamente como conduto livre, para segurança da própria estrutura (Figura 19).

¹⁰ Em pequenas barragens a bacia de dissipação pode ser substituída por um projeto de canal do vertedor em degraus que funcionem como dissipadores de energia restituindo o fluxo da vazão de projeto em condições compatíveis com o canal de jusante (DAEE/CETESB, 1980, cap. VIII-3; CHOW, 1959, capítulo 15-15.)

Figura 18. Tipos de soleiras usadas normalmente



PERFIL TIPO CREAGER



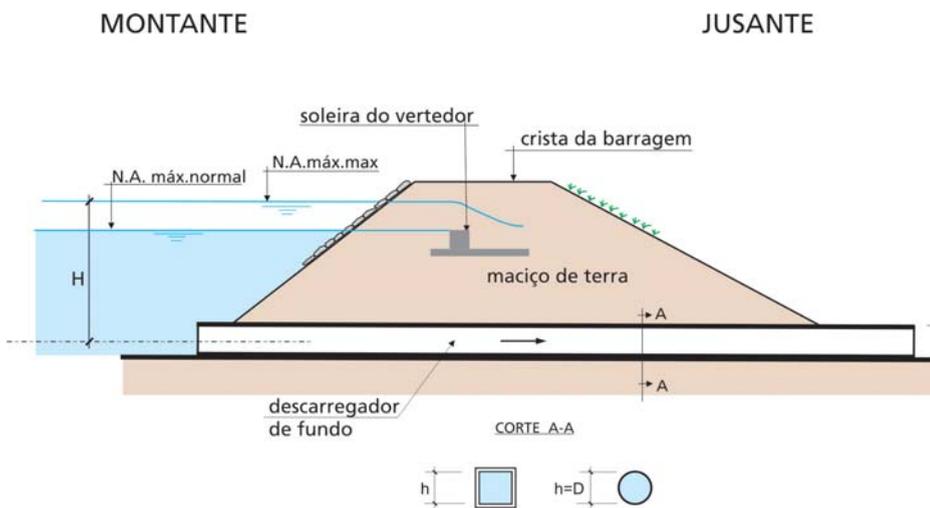
SOLEIRA ESPESSA

L = largura do vertedor
 (*) valores máximos sugeridos para o coeficiente de descarga (μ)

Perfil Creager : $m = 0,45$

Soleira Espessa : $m = 0,35$

Figura 19. Descarregador de fundo de uma pequena barragem.



• **Conduto Livre**

Para a verificação da capacidade de escoamento de vazões como conduto livre, devem ser adotados os conceitos descritos no Capítulo 2 (págs. 25 a 27).

Por exemplo, no caso de tubulação de concreto (seção circular), de aplicação mais comum, pode-se verificar a vazão máxima, como conduto livre, com o uso da equação (9) e os dados das Tabelas 3 e 5:

$$h = 0,94 D = \text{lâmina líquida que resulta no maior valor de vazão}$$

$$A_m = 0,7662 D^2 = \text{área molhada}$$

$$R_H = 0,2895 D = \text{raio hidráulico}$$

$$D = \text{diâmetro interno da tubulação}$$

Da equação (9), resulta:

$$Q = \frac{1}{n} R_H^{2/3} \sqrt{i} A_m = \frac{1}{0,018} (0,2895 D)^{2/3} 0,7662 D^2 \sqrt{i}$$

$$Q = \frac{1}{n} 0,3353 D^{8/3} \sqrt{i}$$

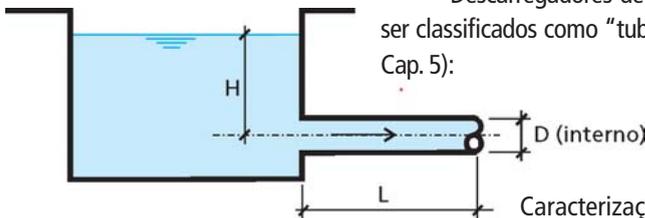
13 [Q em m³/s; D em m; i em m/m]

Para uso prático, utilizando o coeficiente de rugosidade $n = 0,018$ (concreto)¹¹, pode-se escrever a equação (13) da seguinte forma:

$$Q = 18,628 D^{8/3} \sqrt{i}$$

• **Conduto Forçado**

Descarregadores de fundo, funcionando em carga como conduto forçado, podem ser classificados como “tubos muito curtos” com descarga livre (AZEVEDO NETTO, 1998, Cap. 5):



Caracterização (aproximada) em função da relação $L = n D$.

Orifícios: $0 \leq L < 1,5 D$

Bocais: $1,5 D \leq L < 3 D$

Tubos muito curtos: $3 D \leq L < 500 D$

No processo rápido de cálculo, a determinação da vazão de tubos muito curtos, sujeitos a descarga livre, pode ser feita com a ajuda da fórmula geral deduzida para pequenos orifícios e bocais:

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

14 onde:

Q = vazão pelo conduto, em m³/s

A = área, em m², da seção transversal do descarregador de fundo, $\pi D^2 / 4$, sendo D o diâmetro interno do descarregador de seção circular.¹²

¹¹ Pequenas barragens e suas estruturas não recebem manutenção adequada. Por esse motivo, recomenda-se o uso de valores conservadores para o coeficiente de rugosidade “n”.

g = aceleração da gravidade: $9,81 \text{ m/s}^2$

H = carga sobre o descarregador de fundo: diferença entre as cotas do nível d'água no reservatório e do eixo da galeria

C_d = coeficiente de descarga ($C_d = 0,6$)

O coeficiente de descarga C_d depende da relação L/D . Para os "tubos muito curtos", C_d decresce com a elevação da relação L/D .

Sugere-se utilizar $C_d = 0,6$, por segurança, para valores de L/D até 60.

Amortecimento de Ondas de Cheia Simplificado

O objetivo da análise do amortecimento de uma onda de cheia passando pelo reservatório de uma barragem é definir a vazão máxima ($Q_{S_{\text{máx}}}$) que terá de ser veiculada pelo vertedor (ou estruturas de descarga), para o seu dimensionamento. Com essa finalidade utiliza-se o valor da vazão de cheia de projeto ($Q_{E_{\text{máx}}}$) definido pela Hidrologia, verificando-se quanto do volume transportado pela enchente de projeto ficará armazenado no reservatório temporariamente (Figura 20).

Considerou-se que as vazões das cheias são veiculadas do reservatório para jusante apenas pelo vertedor de superfície.

Quando atingem o reservatório de uma barragem, os volumes transportados pela cheia aumentam a quantidade de água nele acumulada, elevando seu nível, em função, também, do controle exercido pelo vertedor. A saída de água para jusante, no retorno ao leito natural do rio, ocorrerá através do vertedor implantado junto do barramento. Portanto, o vertedor deve ser dimensionado para viabilizar a passagem da vazão máxima efluente durante a cheia de projeto, com o reservatório chegando a seu nível máximo *maximorum*.

Para um determinado risco ou período de retorno (TR) as estruturas de descarga deverão ser suficientes para evitar que o nível do reservatório se eleve acima do $N.A._{\text{máx. máx.}}$ estabelecido em projeto, impedindo o vertimento por cima da crista do maciço, o que colocaria em risco tanto a segurança da barragem como das áreas a jusante.

Hidrograma de Enchente

A representação gráfica, típica, da passagem de uma onda de cheia pela seção de um rio é mostrada na Figura 20 (gráfico E), na qual se pode observar a variação da vazão no tempo: uma subida "rápida" da vazão, até atingir um máximo no instante t_a , com uma queda mais lenta, até retornar ao valor da vazão que originalmente escoava pelo canal, no instante t_b (tempo de base = $t_b - t_0$).

¹² Não se recomenda o uso de tubos com diâmetro inferior a 0,8 m para descarregadores de fundo de pequenas barragens de terra, devido a eventuais inspeções para verificação das condições da galeria, além de manutenções e limpezas que se tornem necessárias. Deve-se observar o mesmo procedimento para galerias de seção retangular ou de outros formatos.

Os volumes transportados por uma cheia afluem ao reservatório num intervalo de tempo (t_b) menor do que aquele que esses mesmos volumes demorarão para passar pelo extravasor da barragem e retornar ao leito natural do curso d'água: $t_s > t_a$ e $t_{b_s} > t_b$ (Figura 20).

Note-se que a configuração de um hidrograma é a mesma de um fluviograma de enchente que apresente a variação do nível d'água no canal no tempo. Como a cada cota atingida pela lâmina que escoar por uma seção se pode relacionar um valor de vazão (ver curva-chave), a partir de um fluviograma pode-se traçar o hidrograma correspondente.

Para o cálculo de amortecimento de cheias em reservatórios de barragens de maior importância deve-se usar o método iterativo ou o método gráfico que possibilitam a elaboração do hidrograma amortecido.

Curva Cota-Volume

A fim de melhor compreender os princípios do amortecimento de ondas de cheias em reservatórios, deve-se analisar o conceito de volume de amortecimento. Uma das conseqüências da implantação de um barramento é a formação de volumes de acumulação. A cada cota ou nível atingido pelo lago corresponde um valor de volume de água armazenado, contido pelas várzeas, encostas e pelo maciço da barragem. Com os dados de cotas e respectivos valores de volumes totais armazenados, pode-se traçar a curva cota-volume do reservatório, como mostra a Figura 21.

Hidrograma Triangular

O traçado de um hidrograma pode ser simplificado substituindo-se as curvas ascendente e descendente por segmentos de reta e considerando-se $t_0 =$ zero e $Q_b =$ zero. O diagrama assim gerado assume a forma triangular (Figura 22), com a base sobreposta ao eixo do tempo.

No uso do Método Racional (bacias até 2 km²), adota-se $t_a = t_c$, com t_c representando o tempo de concentração da bacia, e se estabelece uma relação entre t_c e t_b . Neste Guia adota-se $t_b = 3 t_c$, uma vez que o método não avalia ou calcula o volume de cheia.

O volume do hidrograma da cheia que entra no reservatório (V_E) pode ser estimado calculando-se a área do triângulo definido pelos pontos A, C e B (ΔACB), conforme indicado na Figura 22.

Aplicando-se a simplificação da representação triangular aos hidrogramas afluente (E), que entra no reservatório, e efluente (S), que sai do reservatório, da Figura 20, obtém-se o gráfico da Figura 23.

Como citado antes, considera-se a duração da chuva crítica igual ao tempo de concentração da bacia (t_c). Analisando-se o hidrograma da Figura 22, o instante t_c é aquele em que toda a área da bacia está contribuindo para a vazão da seção em estudo. Após t_a ($t_a = t_c$), com o término da precipitação e o escoamento superficial continuando durante determinado tempo, a curva de vazões passa a ser descendente, denominando-se, entre os momentos t_c e t_b , de curva de recessão do escoamento superficial.

Figura 20. Hidrogramas (afluente e efluente) típicos de uma cheia passando por um reservatório que permitem a observação do efeito do armazenamento no pico da cheia. Hipótese admitida: no início da precipitação o N.A. do reservatório coincidia com a cota da crista da soleira do vertedor.

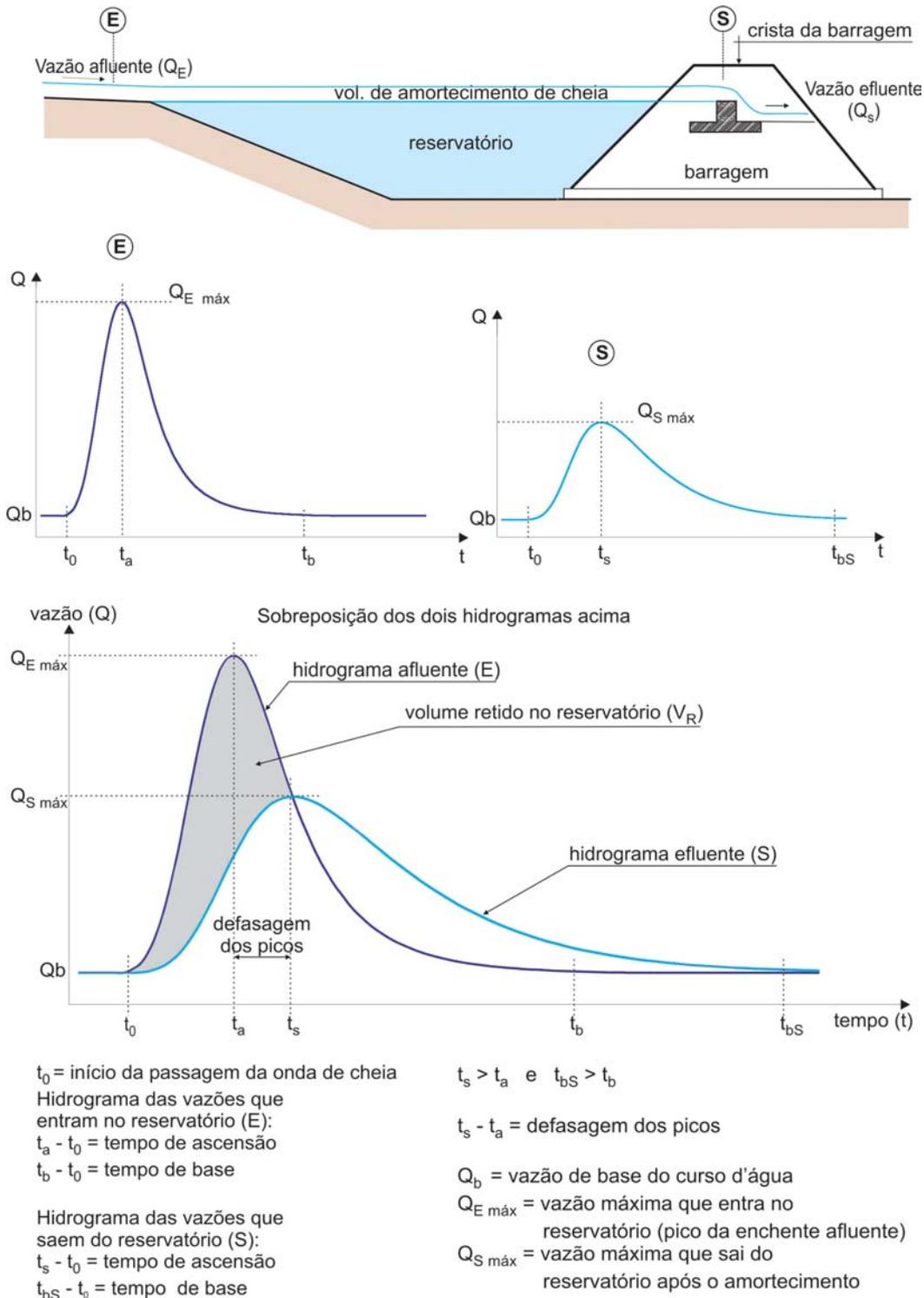
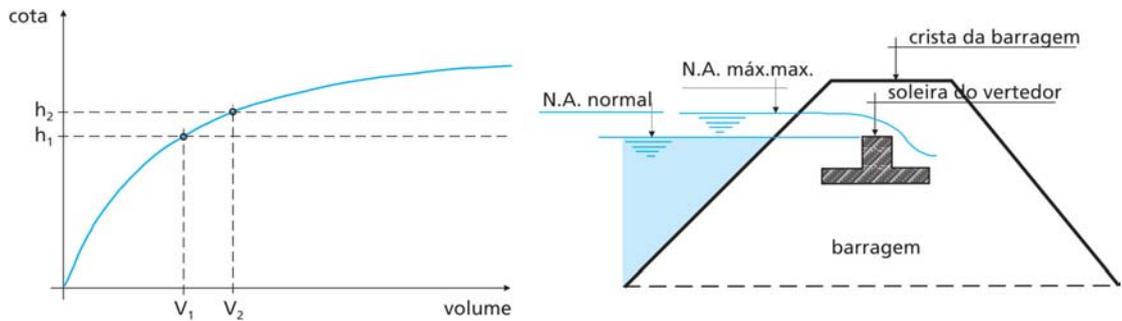


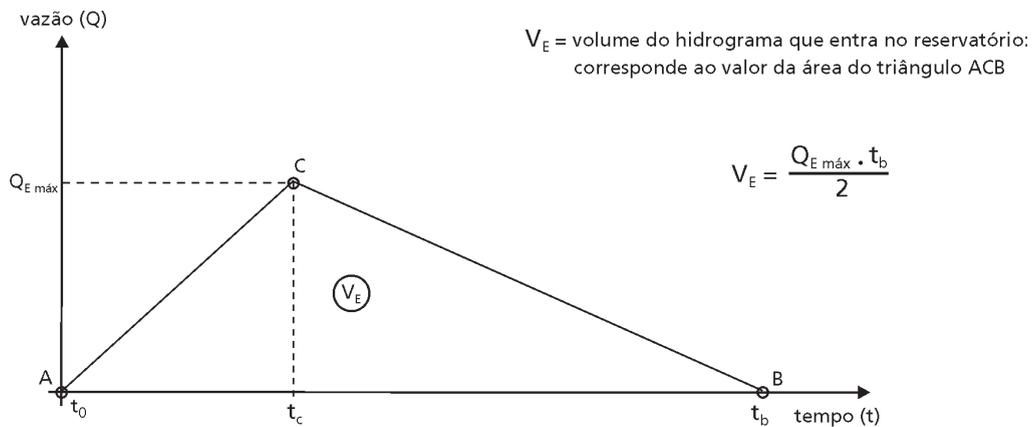
Figura 21. Curva cota-volume de reservatório formado por um pequeno barramento. O nível normal foi adotado igual ao da soleira livre do vertedor de superfície. O nível máximo *maximorum* (N.A._{máx.max.}) resulta do amortecimento da cheia de projeto pelo reservatório e da capacidade hidráulica do vertedor de superfície.



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

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

Figura 22. Representação triangular de um hidrograma de enchente.



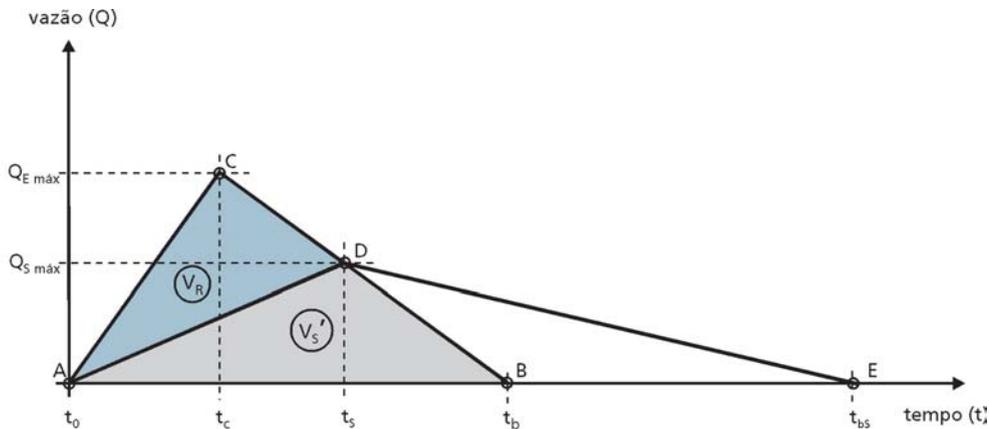
$t_0 =$ zero (considerado)

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

$t_b =$ tempo de base

$t_b - t_c =$ tempo de recessão

Figura 23. Representação triangular dos hidrogramas de uma cheia passando por um reservatório: o que entra no reservatório (afluente), definido pelos segmentos AC e CB, e o que sai do reservatório (efluente), definido pelos segmentos AD e DE. Hipótese adotada: no início da afluência da cheia, o nível d'água no reservatório encontra-se na mesma cota da soleira do vertedor.



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

$t_b = 3 t_c$ $t_0 = \text{zero}$

Da análise dos dois hidrogramas de enchente da Figura 23, tem-se:

- instante inicial: $t_0 = \text{zero}$ (considerado)
- hidrograma afluente definido pelos segmentos de reta AC (ascendente) e CB (descendente); valor máximo da vazão de enchente que entra no reservatório, $Q_{E \text{ máx}}$, ocorrendo no instante t_c
- hidrograma efluente definido pelos segmentos de reta AD (ascendente) e DE (descendente); valor máximo da vazão que sai pelo vertedor, $Q_{S \text{ máx}}$, ocorrendo no instante t_s
- volume total que entra no reservatório, V_E , no período t_0 a t_b , com valor igual ao volume total que sai pelo vertedor (V_S) no período t_0 a t_{bs} : $V_E = V_S$
- volume total da enchente correspondendo ao valor da área do triângulo formado pelo eixo do tempo e pelos segmentos ascendente e descendente (AC e CB ou AD e DE).

A partir das características geométricas dos triângulos da Figura 23 pode-se proceder ao seguinte desenvolvimento:

Volume total que entra : $V_E = \text{Área } \Delta ACB = \frac{Q_{E \text{ máx}} \cdot t_b}{2}$

Volume total que sai : $V_S = \text{Área } \Delta ADE = \frac{Q_{S \text{ máx}} \cdot t_{bs}}{2}$

Como $V_E = V_S$, então,

$\text{Área } \Delta ACB = \Delta ADE$

Como não se conhece o valor de t_{bS} , utilizam-se as propriedades dos triângulos para a determinação de $Q_{Smáx}$.

Pela igualdade das áreas dos triângulos acima demonstrada,

$$\text{Área } \triangle ACB = \triangle ADE,$$

e sendo o $\triangle ADB$ parte componente dos dois, ou seja,

$$\text{Área } \triangle ACB = \text{Área } \triangle ACD + \text{Área } \triangle ADB = V_E$$

$$\text{Área } \triangle ADE = \text{Área } \triangle DBE + \text{Área } \triangle ADB = V_S,$$

conclui-se que

$$\text{Área } \triangle ACD = \text{Área } \triangle DBE$$

O volume de reservação ou de amortecimento¹³ (V_R) corresponde à área do triângulo ACD:

$$V_R = \text{Área } \triangle ACD$$

Como o volume (V_S') correspondente à área do $\triangle ADB$ é parte do volume total que entra, V_E , tem-se

$$V_E = V_R + V_S'$$

Pode-se, então, calcular o valor de $Q_{Smáx}$ por meio dos elementos geométricos do triângulo ACB.

Da hidrologia, tem-se os valores de

t_c = tempo de concentração da bacia

e

$Q_{Emáx}$ = vazão da cheia de projeto

Determina-se,

$$t_b = 3 t_c$$

e

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

Por meio da curva cota-volume do reservatório, determina-se o volume de reservação (V_R), conforme mostra a Figura 21: $V_R = V_2 - V_1$, onde V_1 é o volume acumulado no reservatório para o nível d'água normal (no caso, a cota da crista da soleira do vertedor) e V_2 , o volume acumulado para o nível máximo *maximorum*.

Com a igualdade

$$V_E = V_R + V_S'$$

determina-se

$$V_S' = V_E - V_R$$

e, com

$$V_S' = \text{Área } \triangle ADB = \frac{Q_{Smáx} \cdot t_b}{2}$$

é possível calcular

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

¹³ Volume compreendido entre o nível d'água normal (cota da crista do vertedor) e o máximo *maximorum*.

Dessa forma, pela análise do amortecimento da onda de cheia de projeto ao passar pelo reservatório, utilizando-se a simplificação dos hidrogramas triangulares da Figura 23 e o valor do volume de reservação (ou de amortecimento de cheia) disponível, determina-se a vazão máxima efluente, $Q_{S \text{ máx}}$, que deverá ser veiculada através do vertedor.

Dimensionamento do Vertedor de Superfície

Após a determinação do valor de $Q_{S \text{ máx}}$, com a equação de descarga do vertedor (12) verifica-se o comprimento de soleira que será necessário para veicular a vazão máxima defluente:

$$Q = 4,43 \mu L H^{3/2}$$

com:

$$Q = Q_{S \text{ máx}} \text{ (m}^3\text{/s)}$$

μ = coeficiente de descarga do vertedor [0,35, para soleira espessa e 0,45, para soleira tipo Creager, por exemplo] (ver Figura 18)

H = carga sobre a soleira (m); simplificada, o valor da diferença entre a cota do nível d'água máximo *maximorum* do reservatório e a cota da soleira

L = comprimento da soleira (m)

Da equação acima, tira-se o valor de

$$L = \frac{Q_{S \text{ máx}}}{4,43 \mu H^{3/2}}$$

Bacias de Dissipação de Energia

Essas estruturas hidráulicas são projetadas a jusante de trechos de canais, dutos ou galerias com declividades acentuadas onde as altas velocidades ocasionam erosão e instabilidade no escoamento no encontro com trechos de menor declividade.

A implantação de uma barragem, por exemplo, cria um desnível entre as superfícies do reservatório e do curso d'água no trecho de jusante. As descargas através do vertedor têm que ultrapassar esse desnível para retornar ao leito do curso d'água a jusante. Se não for utilizado um trecho com forte inclinação ou com degraus, de modo a vencer o desnível numa curta distância, será necessário estender o canal de restituição do vertedor por centenas de metros, buscando um perfil em conformidade com o relevo natural.

Bons resultados são obtidos com a implantação de uma calha inclinada ("rápido"), ou trecho com declividade acentuada, no fim do qual o escoamento apresentará velocidades extremamente altas, ou muita energia inercial. Como a condição torrencial pode provocar erosão, pondo em risco a segurança da barragem, é necessário dissipar essa energia. Uma das formas é através de um ressalto hidráulico, localizado numa bacia de dissipação de energia, restituindo-se as águas para jusante do modo mais tranqüilo possível.

O fenômeno do ressalto hidráulico é provocado pela agitação ou onda estacionária formada pela alteração brusca da velocidade do caudal, com mudança do regime de escoamento de supercrítico (torrencial) para subcrítico (fluvial).

Número de Froude

O Número de Froude (F) exprime a relação entre as forças inerciais e as forças gravitacionais, representando o efeito da gravidade sobre o estado do escoamento:

$$F = \frac{v}{\sqrt{g y}}$$

15

onde v é a velocidade média, y é a profundidade do escoamento e g a aceleração da gravidade.

O regime de escoamento é classificado de acordo com o valor assumido por F , sendo:

- $F = 1$, regime crítico,
- $F < 1$, subcrítico ou fluvial
- $F > 1$, supercrítico ou torrencial

As bacias de dissipação tradicionalmente utilizadas nos barramentos são as definidas pelo U. S. Bureau of Reclamation que, após a realização de diversos ensaios, classificou-as de acordo com o F e a velocidade média do escoamento em :

- Tipo I $1,7 < F < 2,5$
- Tipo II $F > 4,5$ e $V > 15$ m/s
- Tipo III $F > 4,5$ e $V < 15$ m/s
- Tipo IV $2,5 < F < 4,5$

A garantia da formação do ressalto hidráulico, dentro da bacia de dissipação projetada, será maior quanto maior for F , resultando, assim, em menores comprimentos de bacia de dissipação para uma dada barragem.

Dimensionamento de uma Bacia de Dissipação

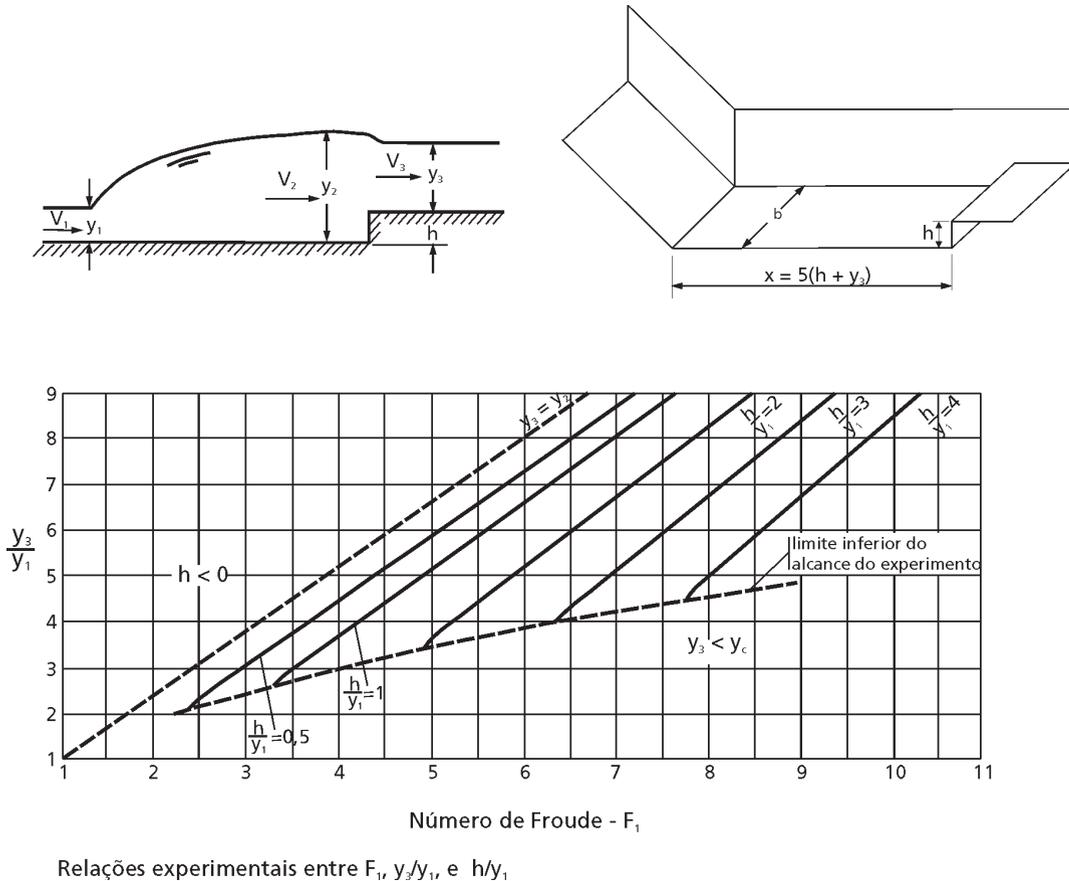
As bacias de fundo plano são de aplicação mais comum, pela facilidade de construção e eficiência quando bem projetadas.

Com a intenção de analisar e desenvolver o projeto de uma estrutura de linhas geométricas mais simples do que as bacias indicadas pelo U. S. Bureau of Reclamation, e de mais fácil construção, escolheu-se um modelo apresentado na publicação *Open-Channel Hydraulics* (CHOW, 1959, item 15-9 - *Controle do ressalto por meio de soleiras / 15-9.C.*).

O modelo foi ensaiado por Forster e Skrinde, em 1950, que a partir de dados experimentais produziram o gráfico da Figura 24.

A bacia tem fundo plano, seção retangular e termina em um degrau ou desnível ascendente, na forma de parede vertical, que se traduziu como "sobrelevação abrupta" do leito. Pelos diagramas e expressões da Figura 24 pode-se verificar que para determinar x e h (comprimento e profundidade da bacia), é preciso conhecer os valores de y_3 , v_1 e y_1 .

Figura 24. Bacia de dissipação de energia num canal retangular, terminando em sobrelevação abrupta do leito. Diagrama para projeto e verificação. Por Forster & Skrinde - 1950 (CHOW, 1959).



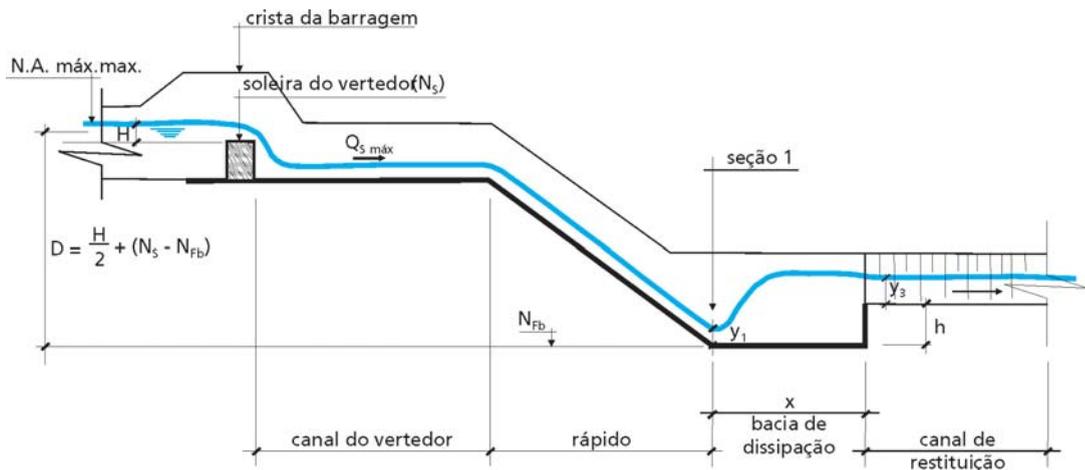
• Lâmina d'água de Jusante

A bacia de dissipação é dimensionada para a máxima vazão que deverá ser veiculada pelo vertedor quando ocorre a cheia de projeto: $Q_{S\text{máx}}$.

O trecho de jusante do canal de restituição (Figura 25), de seção trapezoidal, deverá apresentar características físicas, como seção transversal e declividade, semelhantes às do canal natural do curso d'água a jusante do barramento, de forma a conduzir a $Q_{S\text{máx}}$ nas mesmas condições de fluxo (lâmina e velocidade) do canal natural.

Uma vez estabelecidas a declividade e a seção transversal do trecho do canal de restituição entre a bacia de dissipação e o canal natural, usam-se as equações (6), (7) e (8) para a estimativa do valor de y_3 , que é a lâmina correspondente à vazão de valor igual à $Q_{S\text{máx}}$.

Figura 25. Perfil longitudinal típico, adotado no projeto, para a estrutura de vertimento superficial que faz a transição entre o reservatório e o curso d'água.



• Velocidade e Lâmina na Seção de Entrada

No final do "rápido", na entrada da bacia (seção 1), tem-se uma seção retangular, de base b_1 , com área molhada

$$A_{m1} = y_1 \cdot b_1$$

Pela equação da continuidade (8), tem-se:

$$Q_{S\text{máx}} = v_1 \cdot A_{m1} = v_1 \cdot y_1 \cdot b_1$$

Denomina-se vazão específica (q_1) a vazão por unidade de largura do canal retangular na seção (1):

$$q_1 = \frac{Q_{S\text{máx}}}{b_1}$$

Como os valores de $Q_{S\text{máx}}$ e b_1 são conhecidos, das equações acima tem-se

$$y_1 = \frac{q_1}{v_1}$$

O valor de v_1 é estimado por meio da expressão que fornece a carga cinética em uma seção de um escoamento

$$H_c = \frac{v^2}{2g}$$

16

Substituindo-se H_c pelo desnível D , mostrado na Figura 25, determina-se a velocidade v_1 na entrada da bacia.

• Estimativa Preliminar da Profundidade da Bacia

Para uma primeira aproximação da profundidade da bacia (h) por meio do gráfico da Figura 24, adota-se um valor inicial para D :

$$D = NA_{\text{máx máx}} - \text{cota do leito do canal de restituição}$$

Com D e com a equação (16) calcula-se

$$v_1 = \sqrt{2gD}$$

Em seguida,

$$y_1 = \frac{q_1}{v_1}$$

Com a equação (15) e com os valores preliminares de v_1 e y_1 , determina-se

$$F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g y_1}}$$

Os valores F_1 e y_1 , assim encontrados, e y_3 , já determinado anteriormente, permitem definir no diagrama da Figura 24 o ponto ($F_1 ; y_3 / y_1$). Por interpolação, calcula-se o valor da relação h / y_1 correspondente ao ponto encontrado, o que possibilita determinar o valor de h .

Com esse primeiro valor estimado para h pode-se proceder, numa segunda etapa, a uma verificação das dimensões h e x .

• Verificação do Dimensionamento

Após a estimativa preliminar anterior, é possível estabelecer o desnível entre o N.A. máximo *maximorum* do reservatório e o fundo da bacia, com melhor aproximação. Para o novo cálculo de v_1 determina-se o desnível D com a seguinte expressão (Figura 25):

$$D = 1/2 H + N_s - N_{Fb}$$

onde:

N_s = nível ou cota da soleira do vertedor

$H = NA_{\text{máx máx}} - N_s$ = carga sobre a soleira do vertedor

$NA_{\text{máx máx}}$ = nível d'água máximo *maximorum* do reservatório (Figura 21)

N_{Fb} = nível ou cota do fundo da bacia de dissipação (utiliza-se o valor de h estimado inicialmente: $N_{Fb} = \text{cota do leito do canal de restituição} - h$)

Com o valor de D , corrigido, usando-se as mesmas expressões descritas nos itens anteriores, determinam-se novos valores de v_1 , y_1 , F_1 e y_3 / y_1 .

$$v_1 = \sqrt{2gD}$$

$$y_1 = \frac{q_1}{v_1}$$

$$F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g y_1}}$$

- **Dimensões da Bacia de Dissipação**

Com o novo par de valores F_1 e y_3 / y_1 , e o uso do gráfico da Figura 24, determina-se h / y_1 e, conseqüentemente, h .

O comprimento da bacia de dissipação é calculado pela expressão definida no experimento: $x = 5 (y_3 + h)$.