



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E ARQUITECTURA

Secção de Hidráulica e Recursos Hídricos e Ambientais

ESTRUTURAS HIDRÁULICAS

OBRAS DE DISSIPAÇÃO DE ENERGIA

ANTÓNIO NASCIMENTO PINHEIRO

Novembro, 2006

Índices

Texto

1.	OBRAS DE DISSIPACÃO DE ENERGIA	1.1
1.1	Considerações prévias.....	1.1
1.2	Bacias de dissipação por ressalto	1.1
1.2.1	Considerações prévias	1.1
1.2.2	Determinação da cota da soleira. Nível do escoamento na restituição	1.2
1.2.3	Comprimento e localização	1.3
1.2.4	Aspectos complementares	1.4
1.2.5	Tipos de bacias de dissipação por ressalto.....	1.6
1.2.5.1	Bacias de dissipação propostas pelo United States Bureau of Reclamation.....	1.6
1.2.5.2	Bacias de dissipação a jusante de condutas.....	1.9
1.2.5.2.1	Bacia de dissipação do tipo PWD	1.9
1.2.5.2.2	Bacia de dissipação do tipo WES	1.9
1.3	Concha de rolo.....	1.11
1.3.1	Características e funcionamento hidráulico.....	1.11
1.3.2	Dimensionamento.....	1.13
1.4	Rampa de blocos	1.16
1.5	Bacias de dissipação por impacto	1.18
1.6	Bacias de dissipação por jactos.....	1.21
1.6.1	Fossas de erosão	1.21

Figuras

1 –	Representação esquemática do processo de determinação da cota do fundo da bacia de dissipação por ressalto.....	1.3
2 –	Posicionamento da bacia de dissipação em relação ao leito.....	1.4
3 –	Barragem do Beliche. Vista de jusante dos muros-ala da bacia de dissipação de energia. .	1.5
4 –	Bacias de dissipação por ressalto propostas pelo Bureau of Reclamation. Definição geométrica: (a) tipo II; (b) tipo III; (c) tipo IV.....	1.7
5 –	Bacias de dissipação por ressalto do BUREC. Comprimentos.....	1.8
12 –	Bacia de dissipação do tipo PWD.	1.9
13 –	Bacia de dissipação do tipo WES.	1.10
14 –	Conchas de rolo: (a) sem blocos; (b) com blocos.....	1.11
15 –	Blocos de conchas de rolo. Definição.	1.11
16 –	Conchas de rolo. (a) Sem blocos; (b) com blocos.	1.12

17 – Conchas de rolo. Funcionamento hidráulico	1.13
18 – Conchas de rolo. Ábacos de dimensionamento (adaptado de USBR, 1987)	1.15
24 – Rampa de blocos (Peterka, 1978).....	1.17
25 – Central termoelétrica do Pego. Rampa de blocos.....	1.18
26 – Bacia de dissipação por impacto (Peterka, 1978). Perspectiva com canal trapezoidal a jusante e foto.....	1.18
27 – Bacia de dissipação por impacto. Dimensão base da estrutura em função do caudal (Peterka, 1978).....	1.19
28 – Bacia de dissipação por impacto (Peterka, 1978).....	1.20
34 –Fossas de erosão. Localização da fossa em função do tipo de descarregador de cheias: a) orifícios de meio-fundo; descarregador de superfície; c) canal com trampolim.	1.22
35 –Fossa de erosão. Profundidade.	1.23

1. OBRAS DE DISSIPAÇÃO DE ENERGIA

1.1 CONSIDERAÇÕES PRÉVIAS

O excesso de energia dos escoamentos requer, muito frequentemente, que se prevejam obras onde ocorra a dissipação da energia, de modo a que a elevada intensidade de turbulência gerada no processo de dissipação não provoque danos em obras anexas ou erosões inaceitáveis nos leitos a jusante. Na presente alínea, apresentam-se as principais obras de dissipação de energia em escoamento com superfície livre.

Para a dissipação de energia em excesso nos escoamentos num curto desenvolvimento, é necessário que ocorram escoamentos com elevada intensidade de turbulência, por vezes designados como *escoamentos macroturbulentos* devido à visível agitação da superfície livre.

O ressalto hidráulico, que ocorre na transição do regime rápido para o regime lento, é um escoamento rapidamente variado, com elevada intensidade de turbulência e, conseqüentemente, com significativa dissipação de energia. Outros escoamentos macroturbulentos frequentemente utilizados como meio de dissipação de energia são os resultantes da formação de vórtices de eixo horizontal, da existência de macrorugosidades nos canais e da penetração de jactos em colchões de água ou do seu impacto em fronteiras sólidas ou, menos frequentemente, do seu cruzamento.

Nas alíneas subseqüentes apresentam-se os critérios de dimensionamento de diversos tipos de estruturas de dissipação de energia que utilizam os processos de dissipação referidos no parágrafo anterior. A escolha entre os diversos tipos de estruturas deve ter em consideração não só os critérios técnicos, mas também aspectos económicos, pelo que o dimensionamento e estimativa de custo de diferentes soluções é aconselhável.

No entanto, a jusante de uma estrutura de dissipação haverá sempre uma energia residual por dissipar associada à turbulência do escoamento efluente da estrutura. Essa energia exercerá uma acção erosiva no leito do curso de água a jusante da estrutura que poderá requerer medidas adicionais de protecção do leito. A intensidade dessa turbulência residual poderá constituir uma medida da eficiência da estrutura de dissipação escolhida.

1.2 BACIAS DE DISSIPAÇÃO POR RESSALTO

1.2.1 Considerações prévias

As condições de dimensionamento das bacias de dissipação de energia por ressalto são as características do escoamento à entrada da bacia (h_1 , V_1 e Fr_1) e do escoamento no curso de

água na secção de restituição. O dimensionamento das bacias de dissipação de energia por ressalto implica a determinação dos seguintes parâmetros:

- características geométricas da bacia, nas quais se incluem o comprimento, a largura e as dimensões dos acessórios que se pretenda introduzir para reduzir o comprimento do ressalto hidráulico, de promover a fixação do ressalto hidráulico dentro da bacia ou evitar as escavações imediatamente a jusante da bacia de dissipação;
- cota da soleira da bacia de dissipação;
- localização da secção de montante da bacia de dissipação.

1.2.2 Determinação da cota da soleira. Nível do escoamento na restituição

A cota da soleira da bacia de dissipação de energia deve ser estabelecida em função do nível do escoamento do caudal de dimensionamento imediatamente a jusante da bacia e da submersão requerida pelo tipo de bacia utilizada.

Devido ao carácter tridimensional que o escoamento tem no troço a jusante da bacia de dissipação, o nível do escoamento na secção de restituição só pode ser determinado com rigor recorrendo a um modelo físico. No entanto, no caso do escoamento nesse troço do curso de água se processar em regime lento, pode ser determinado, de modo aproximado, calculando a curva de regolfo desde uma secção de controle a jusante até à secção de restituição, caso se disponha de topografia adequada. Na falta de elementos mais rigorosos, a rugosidade do leito do curso de água pode ser estimada por observação visual e comparação com informação fotográfica de diversos tipos de leito para os quais existe informação sobre a respectiva rugosidade (e.g. Chow, 1981 e French, 1986). Na falta de topografia adequada, uma estimativa, eventualmente grosseira, do nível da restituição pode ser obtida admitindo que o nível na restituição é o do regime uniforme correspondente aquela secção transversal e ao declive médio de um troço que abranja a zona de restituição.

Conhecida a submersão S requerida pelo tipo de bacia de dissipação de energia e escolhida a cota do fundo da bacia de dissipação, N_F , determina-se por

$$N_F = N_j - S \quad (1)$$

conforme se ilustra na Figura 1.

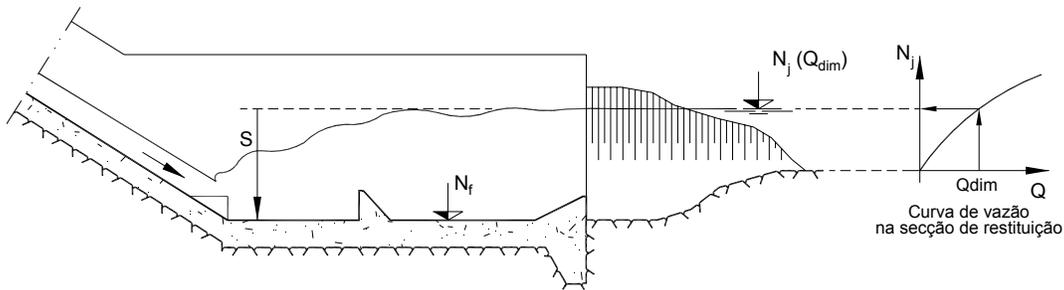


Figura 1 – Representação esquemática do processo de determinação da cota do fundo da bacia de dissipação por ressalto.

Tendo em atenção a incerteza existente na determinação do nível de jusante N_j , é conveniente analisar os efeitos de eventuais erros cometidos na sua determinação no funcionamento da bacia de dissipação de energia por ressalto. No caso de se ter subestimado N_j , o nível de jusante será superior ao calculado e a bacia de dissipação de energia funcionará com submersão superior. Neste caso o ressalto hidráulico seria levado a progredir para montante, passando a ter início ainda sobre o canal. Este facto, desde que tido em consideração no dimensionamento das lajes da soleira do canal, não tem implicações negativas significativas, desde que não se verifique de forma excessiva.

No caso de se sobrestimar N_j , o nível de jusante será inferior ao calculado e a submersão será menor do que a requerida pela bacia de dissipação utilizada. Neste caso, o ressalto hidráulico tenderá a progredir para jusante e, eventualmente, a sair da bacia de dissipação. Esta é uma situação que, obviamente, se deverá evitar, pelo que, numa situação de alguma incerteza na determinação de N_j , se deverá optar por um valor conservativo da submersão conducente a uma situação de início do ressalto sobre o canal do descarregador.

1.2.3 Comprimento e localização

O comprimento de cada bacia de dissipação deve ser estabelecido experimentalmente para cada configuração dos acessórios da bacia. No caso das bacias normalizadas, o comprimento é frequentemente definido em função de Fr_1 .

A localização da bacia deve ser estabelecida em função das características topográficas da zona de restituição e de eventuais condicionamentos geotécnicos, tendo como objectivo reduzir o volume de escavação necessário para sua implantação, em conjunto com o canal de encosta, e tendo em consideração o seu posicionamento em relação ao curso de água.

Em relação a este último aspecto, deve salientar-se que uma implantação da bacia de dissipação de energia que ocupe parcialmente o leito do curso de água pode obrigar a meios

específicos de ensecamento da zona de implantação, caso este troço do curso de água não se encontre ao abrigo do desvio provisório da barragem, se bem que, em geral, diminua as escavações necessárias para implantar a bacia, já que haverá menor interferência com a encosta sobrejacente. Esta questão não se coloca ou tem reduzida expressão no caso de cursos de água temporários, em que se pode aproveitar o período de verão para executar a obra.

Na Figura 2 representam-se dois posicionamentos possíveis da bacia de dissipação de energia por ressalto para um dado curso de água.

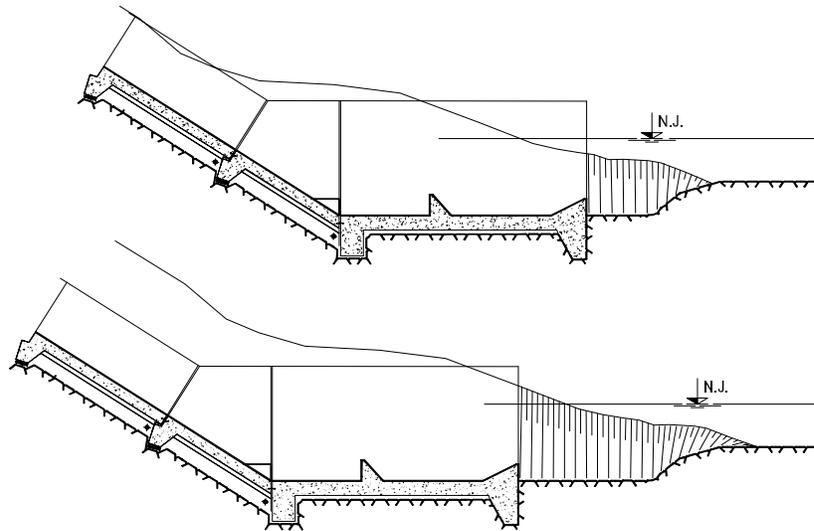


Figura 2 – Posicionamento da bacia de dissipação em relação ao leito.

1.2.4 Aspectos complementares

Na presente alínea abordam-se aspectos complementares do dimensionamento de uma bacia de dissipação de energia por ressalto.

- Altura dos muros

Os muros da bacia de dissipação de energia devem apresentar coroamento horizontal com uma folga relativamente ao nível de jusante que, segundo BUREC (1987) deve ser

$$f = 0,1(V_1 + h_2) , \text{ com } f \text{ [m]; } V_1 \text{ [m/s]; } h_2 \text{ [m]} \quad (2)$$

- Escavação a jusante e muros-ala

Considera-se adequado prever uma plataforma horizontal a jusante da bacia de dissipação de energia por ressalto, cuja concordância com o terreno envolvente se efectuará

mediante rampas de escavação com declive não acentuado, adequado às respectivas características geotécnicas.

Caso se julgue necessário para protecção do terreno ou estruturas a montante da secção de restituição contra a turbulência do escoamento, poder-se-ão prever muros-ala que ligarão as paredes da bacia ao terreno ou estruturas existentes. Na Figura 3 apresenta-se uma vista dos muros-ala da bacia de dissipação da barragem do Beliche.



Figura 3 – Barragem do Beliche. Vista de jusante dos muros-ala da bacia de dissipação de energia.

– Enrocamentos de protecção

No caso da bacia de dissipação de energia se localizar em terrenos susceptíveis de sofrerem erosões inaceitáveis no decurso do normal funcionamento deste órgão, deve prever-se a jusante da bacia um revestimento com enrocamento de protecção com dimensão adequada à velocidade média do escoamento à saída da bacia e tendo em consideração

a elevada turbulência residual que este escoamento ainda possui. De acordo com Samora e Quintela (1995) o diâmetro médio D_{50} do enrocamento a utilizar nestas circunstâncias pode ser calculado segundo a fórmula clássica de Izbash

$$D_{50} = \frac{0,68 U^2}{g \frac{\gamma_s'}{\gamma}} \quad (3)$$

em que U é a velocidade média à saída da bacia de dissipação, g é aceleração da gravidade e γ_s' o peso volúmico submerso da rocha utilizada e γ o peso volúmico da água. O enrocamento deve apresentar um curva granulométrica com as seguintes características:

$$(D_{100} / D_{50})^3 \approx 4 \quad (4)$$

$$(D_0 / D_{50})^3 \approx 0,25 \quad (5)$$

em que D_{100} e D_0 são, respectivamente, o diâmetro máximo e o diâmetro mínimo do enrocamento. A espessura do enrocamento e_{enroc} deve ser compatível com D_{100} , sendo usual considerar que $e_{enroc} \geq 1,5 D_{100}$.

1.2.5 Tipos de bacias de dissipação por ressalto

1.2.5.1 Bacias de dissipação propostas pelo United States Bureau of Reclamation

Na presente alínea considera-se que a escolha do tipo de bacia se refere à opção por um dos diversos tipos de bacias de dissipação de energia por ressalto de dimensões normalizadas propostas por alguns organismos de investigação. De entre estes, deve destacar-se o United States Bureau of Reclamation (BUREC, 1987), que propõe três tipos de bacia de dissipação em função do número de Froude na secção de montante da bacia.

Conforme referido na alínea anterior, as bacias de dissipação de energia por ressalto são escolhidas com base nos parâmetros h_1 , V_1 e Fr_1 , pretendendo-se que, de entre as diversas bacias passíveis de ser aplicadas, se escolha a que tiver menores dimensões.

De entre estas, pode constatar-se ser a bacia de dissipação do tipo IV a que apresenta menor comprimento, seguida pela do tipo III e, finalmente, pela do tipo II. A preferência pelas bacias do tipo III e IV é, assim, evidente. Saliencia-se que a bacia do tipo IV se utiliza para $2,5 < Fr_1 < 4,5$, enquanto as restantes se utilizam para $Fr_1 \geq 4,5$ (Peterka, 1978 e BUREC, 1987). No que se refere à velocidade e ao caudal específico, são também apresentados valores limite, que não devem ser excedidos sem que se proceda a ensaios em modelo físico. Tendo em atenção os baixos números de Froude para que se utiliza a bacia do tipo IV, esta não apresenta grande eficiência na dissipação de energia, pelo que a opção pela sua utilização deve ser precedida de análise comparativa de dispositivos de dissipação de energia alternativos que permitam soluções mais compactas e mais económicas e com maior eficiência na dissipação de energia.

Quadro 1 – Bacias de dissipação de energia por ressalto propostas pelo BUREC. Condições de utilização.

Tipo	Fr_1 (-)	V_1 (m/s)	q (m ² /s)
II	>4,5	<33	-
III	>4,5	<18	<18
IV	$2,5 < Fr_1 < 4,5$	<15	-

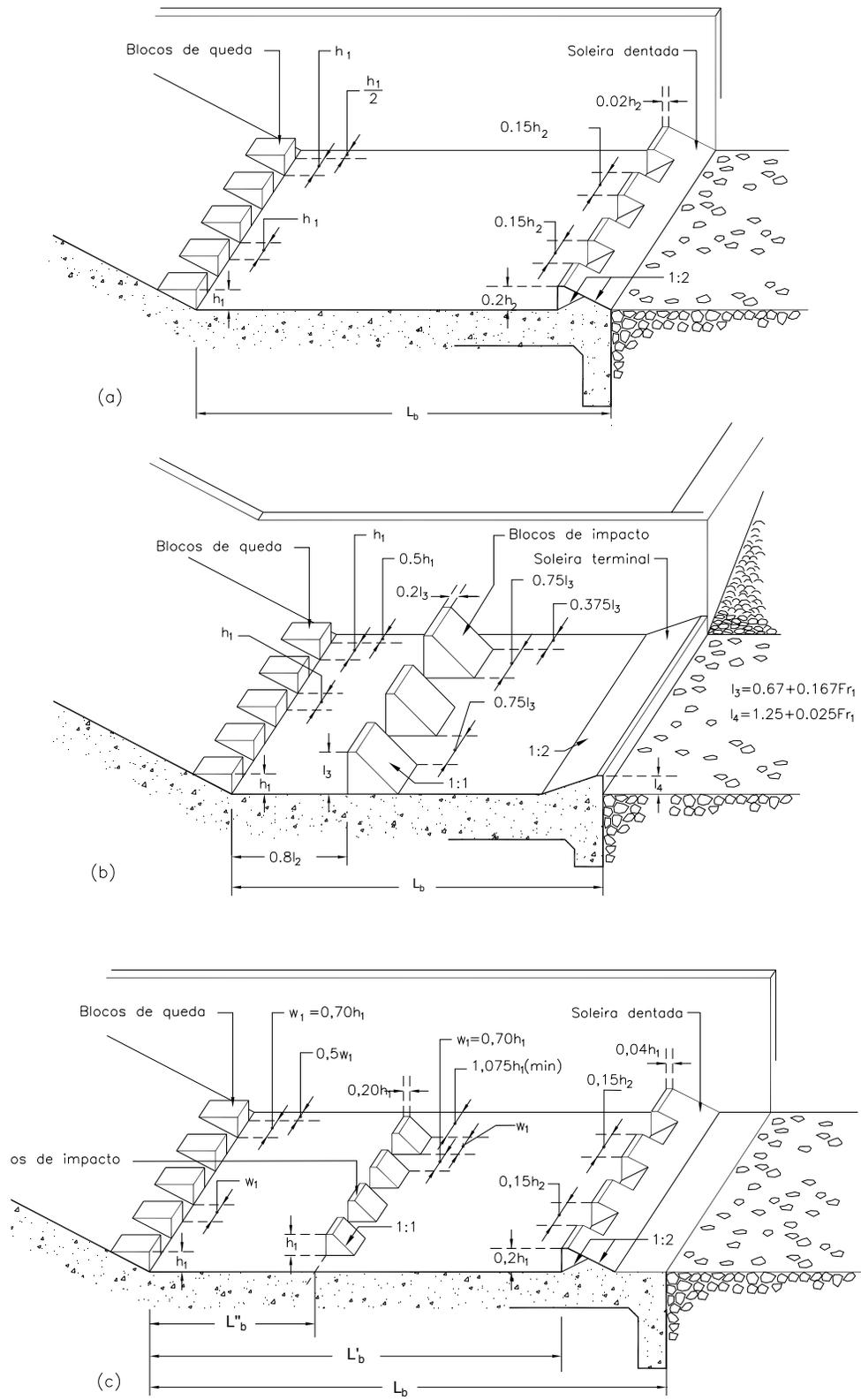


Figura 4 – Bacias de dissipação por ressalto propostas pelo Bureau of Reclamation. Definição geométrica: (a) tipo II; (b) tipo III; (c) tipo IV.

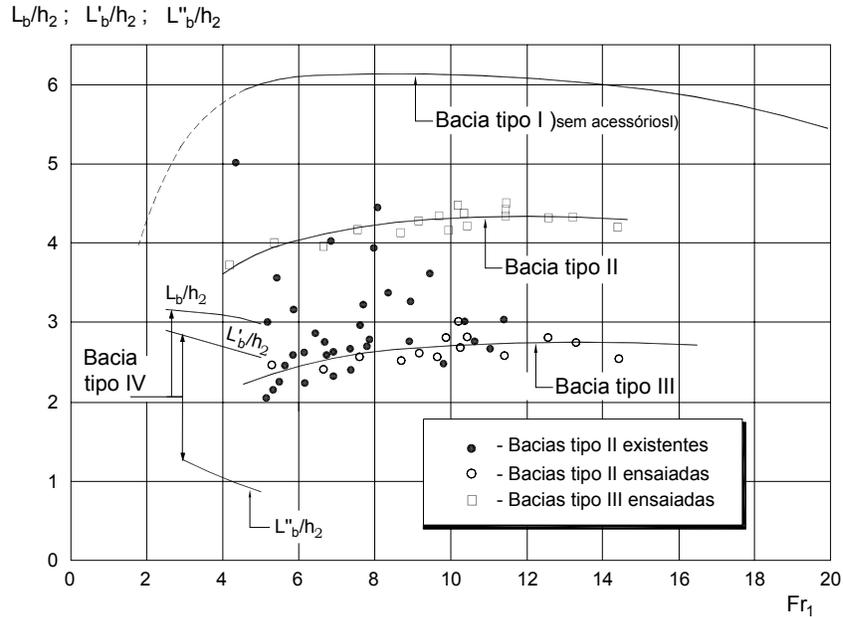


Figura 5 – Bacias de dissipação por ressalto do BUREC. Comprimentos.

No que se refere à capacidade de fixação do ressalto, deve salientar-se que os acessórios das bacias contribuem para aumentar tal capacidade, sendo possível, em alguns casos, reduzir a submersão, S , em relação ao valor requerido numa bacia sem acessórios, que seria h_2 . Assim, a bacia do tipo III necessita apenas de uma altura de água sobre a soleira de apenas $0,8h_2$ para que o ressalto se mantenha no seu interior, enquanto que a bacia do tipo II necessita de apenas $0,95h_2$. No entanto, Peterka (1978) refere ser aconselhável considerar alturas de água sobre estas bacias de $1,1h_2$ e $0,9h_2$ para as bacias do tipo II e III, respectivamente, entendendo-se tal recomendação como uma medida cautelara em relação à incerteza com que habitualmente se conhece o nível na secção de restituição para o caudal de dimensionamento da obra. Para a bacia do tipo IV, recomenda-se uma altura de água h_2 .

BUREC (1987) refere que não foram efectuados testes relativos à erosão a jusante da bacia do tipo IV e ao carregamento do material para dentro da bacia, pelo que, no caso de não serem efectuados ensaios hidráulicos que permitam estudar este fenómeno, se devem tomar precauções para evitar tal erosão. Tais ensaios são requeridos se se pretender utilizar este tipo de bacia para $V_1 > 17$ m/s.

Embora de uso menos corrente, a utilização de bacias dissipação de energia propostas por outras instituições de investigação ou de bacias de dissipação de energia de paredes divergentes deve também ser equacionada, de modo a obter uma solução mais económica.

Para testar soluções não normalizadas ou cuja utilização menos frequente possa suscitar dúvidas, é aconselhável recorrer a ensaios em modelo físico, que serão ainda mais justificáveis se a economia que previsivelmente se venha a obter na obra de dissipação de

energia, decorrente do aperfeiçoamento das formas, for superior ao custo do referido ensaio em modelo físico.

1.2.5.2 Bacias de dissipação a jusante de condutas

1.2.5.2.1 Bacia de dissipação do tipo PWD

Este tipo de bacia é aplicável a jusante de condutas de secção circular com diâmetro compreendido no intervalo $450 < D < 1850$ mm e para cargas hidráulicas H_1 tal que $H_1 < 3D$ (Argue, 1961). O autor aconselha ainda que este tipo de bacias só seja utilizado para escoamentos em que $V < 2\sqrt{gD}$, em que a V é a velocidade média de escoamento.

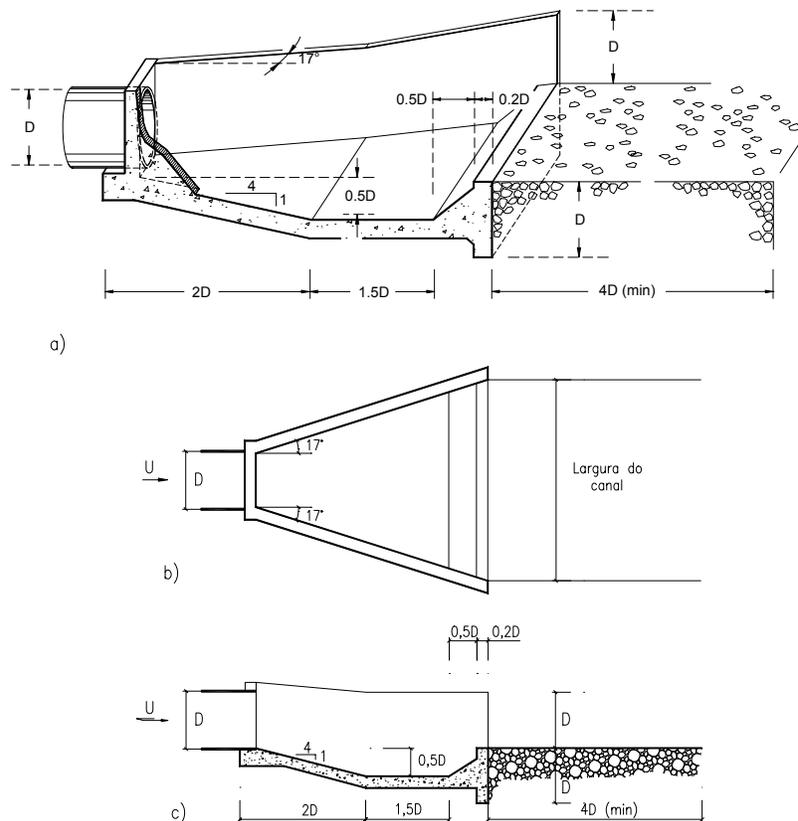


Figura 6 – Bacia de dissipação do tipo PWD.

1.2.5.2.2 Bacia de dissipação do tipo WES

As bacias do tipo WES (Fletcher e Grace, 1972) diferem das bacias do tipo PWD essencialmente por as paredes laterais apresentarem um ângulo de divergência inferior (cerca de 7°) e serem mais alongadas.

O dimensionamento hidráulico destas bacias deve ser efectuado de acordo com

$$\frac{Q_d}{D^{5/2}} \leq 2,90 \frac{h_j}{D} \left(\frac{L_b}{D} \right)^{0,40} (D/h_j)^{1/3} \quad (6)$$

em que:

Q_d - caudal de dimensionamento;

D - diâmetro da conduta;

L_b - comprimento da bacia (cerca de $5D$);

h_j - altura de água a jusante da bacia.

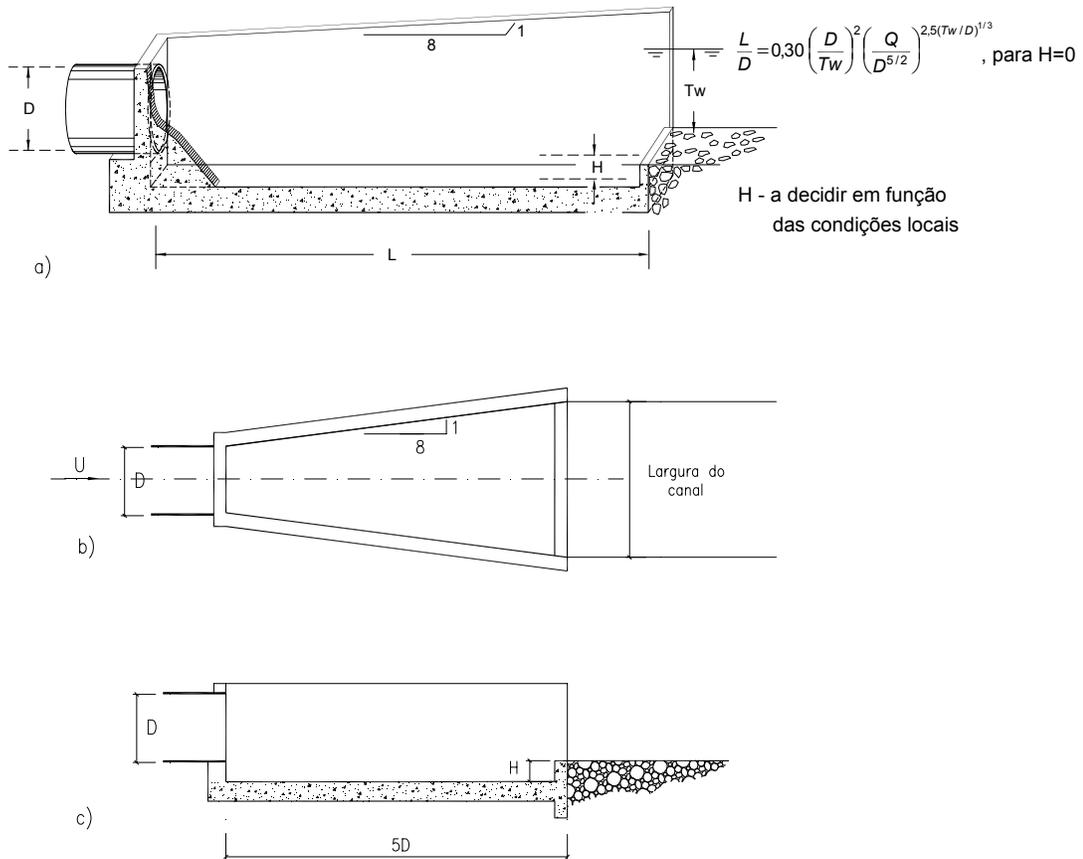


Figura 7 – Bacia de dissipação do tipo WES.

1.3 CONCHA DE ROLO

1.3.1 Características e funcionamento hidráulico

O perfil longitudinal deste dissipador, em forma de concha (*bucket*), promove a formação de um turbilhão de grande dimensão, de eixo horizontal, designado por rolo, que promove a dissipação de energia do escoamento. BUREC (1987) fornece indicações para o dimensionamento de conchas de rolo, com ou sem blocos, sendo dispensáveis ensaios hidráulicos desde que:

- não exista funcionamento prolongado com caudais próximos do de dimensionamento;
- caudais específicos inferiores a cerca de $50 \text{ m}^2/\text{s}$;
- velocidade à entrada inferior a 22 m/s .

As proporções de dissipadores em concha de rolo, sem e com blocos, estão indicadas na Figura 8. Na Figura 9 apresenta-se a definição pormenorizada dos blocos.

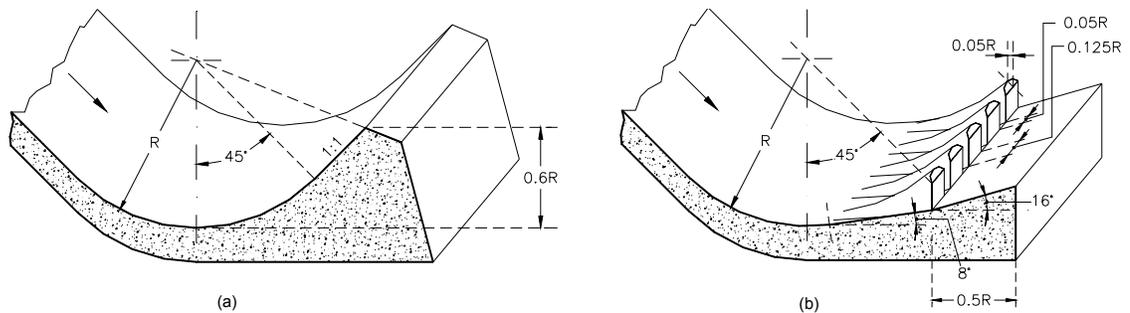


Figura 8 – Conchas de rolo: (a) sem blocos; (b) com blocos.

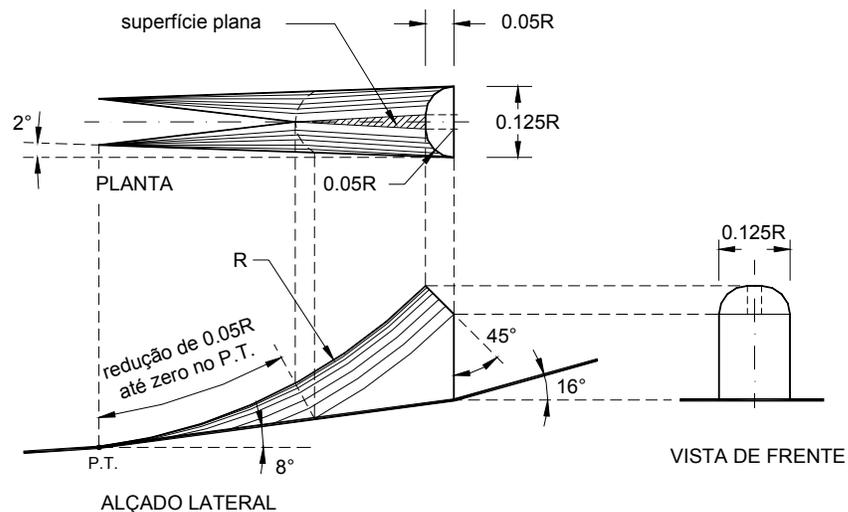
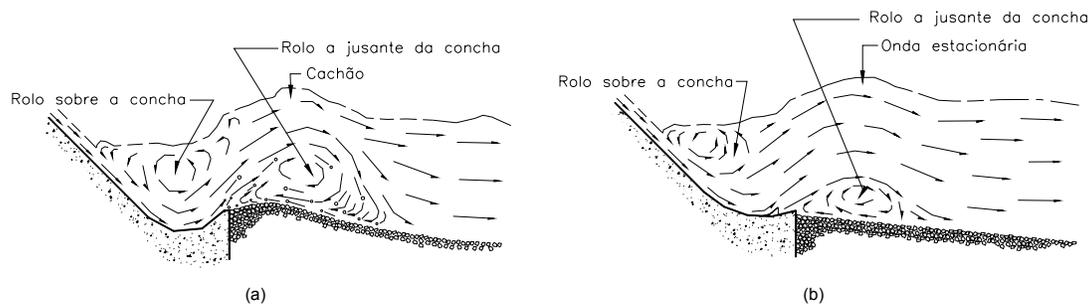


Figura 9 – Blocos de conchas de rolo. Definição.

Na Figura 10 ilustram-se os diferentes funcionamentos hidráulicos relativos aos dois tipos de conchas. De referir que, além do rolo que se forma sobre a concha, existe a jusante um rolo com rotação no sentido contrário. Se não existirem blocos que fracturem a veia líquida, tornando o escoamento claramente tridimensional, toda a corrente é dirigida para o alto à saída do lábio da concha, criando um cachão (*boil*) na superfície da água e um rolo de jusante violento e junto ao fundo. A violência do cachão e do rolo de fundo dependem do nível a jusante, sendo mais significativa para níveis baixos.



O rolo de jusante desloca o material de fundo de jusante para montante e deposita-o junto do lábio, de onde é sucessivamente captado pela corrente, transportado para jusante e depositado, originando um movimento constante. A eventual entrada da água no dissipador em condições assimétricas, devida, por exemplo, à abertura de apenas algumas das comportas de um descarregador de cheias, provoca a penetração de material sólido na concha na zona em que ocorre o menor caudal específico, o que tem o inconveniente de originar abrasão da superfície de betão da concha.

Se a concha dispõe de blocos, parte da corrente passa sobre os estes, sendo dispersada e ocorrendo, portanto, redução das dimensões do rolo de fundo a jusante da concha. O material sólido que seja momentaneamente arrastado para dentro da concha, é rapidamente impelido para jusante, reduzindo-se, assim, o risco potencial de abrasão.

O esquema de escoamento em condições normais de funcionamento corresponde ao nível a jusante situado entre duas alturas limites, S_{max} e S_{min} (Figura 11a). Para um nível suficientemente baixo, o rolo move-se para jusante da concha, funcionando a concha como trampolim (Figura 11b).

Para níveis acima do máximo, verifica-se inicialmente uma configuração em que a veia líquida mergulha a jusante do lábio, provocando erosão do fundo (Figura 11c;d). Quando a erosão progride, forma-se um turbilhão e a veia deixa de ser mergulhante, repondo material

sólido a jusante da concha. Durante o funcionamento, ocorre um ciclo em que as duas últimas configurações se alternam.

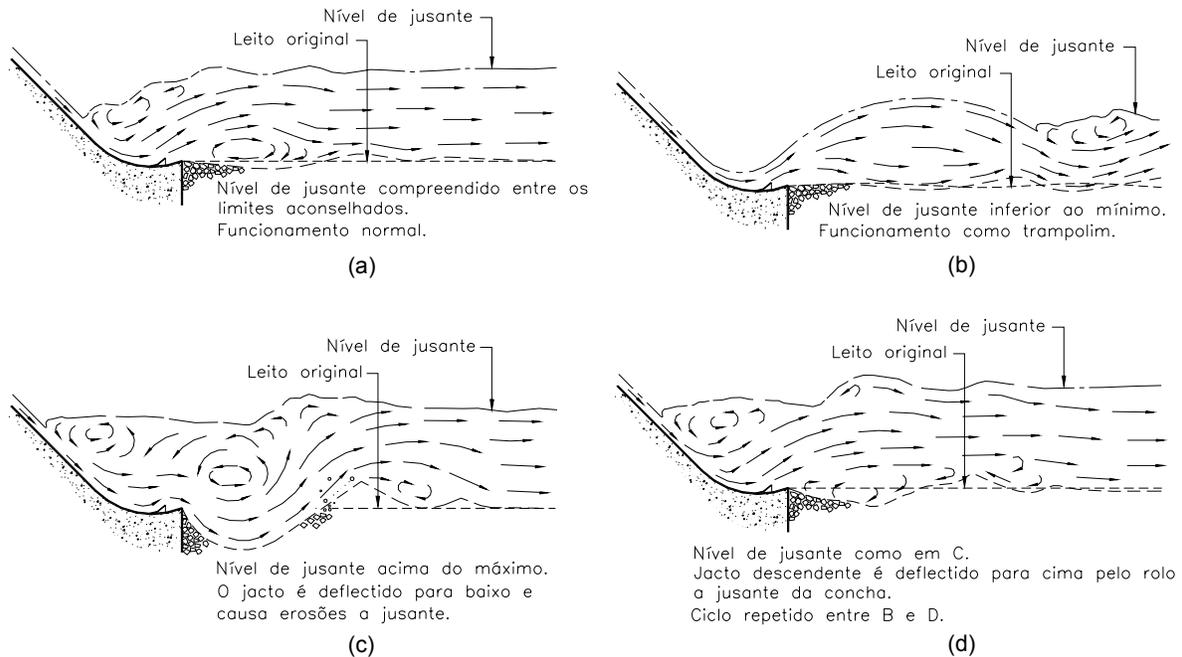


Figura 11 – Conchas de rolo. Funcionamento hidráulico.

1.3.2 Dimensionamento

As condições de dimensionamento das conchas de rolo são as características do escoamento na secção do canal cujo fundo se encontra à cota do nível de jusante para o caudal de dimensionamento (h_1 , V_1 e Fr_1) e do escoamento no curso de água na secção de restituição. O dimensionamento requer a determinação dos seguintes parâmetros:

- características geométricas da concha, da qual a mais significativa é o raio de curvatura; as restantes características são derivadas destes parâmetros de acordo com o exposto na Figura 8 e na Figura 9;
- cota da geratriz inferior da concha.

O procedimento para dimensionamento destes dois parâmetros é o seguinte:

- determina-se o raio mínimo, R_{min} da concha com base no ábaco superior;
- estabelece-se o raio da concha $R_{adop} \geq R_{min}$;

- utilizando R_{adop} , determina-se a submersão mínima, S_{min} , e máxima, S_{max} , da geratriz inferior da concha, utilizando os ábacos respectivos incluídos na Figura 12;
- estabelece-se a cota da geratriz inferior da concha de modo a submersão da geratriz inferior da concha, S , seja $S_{min} < S < S_{max}$; a maior aproximação a um dos valores extremos do intervalo será ponderada em função do rigor com que se conhecem os níveis a jusante, do interesse em implantar a concha tão acima quanto possível e das implicações decorrentes de se ultrapassar um dos limites determinados.

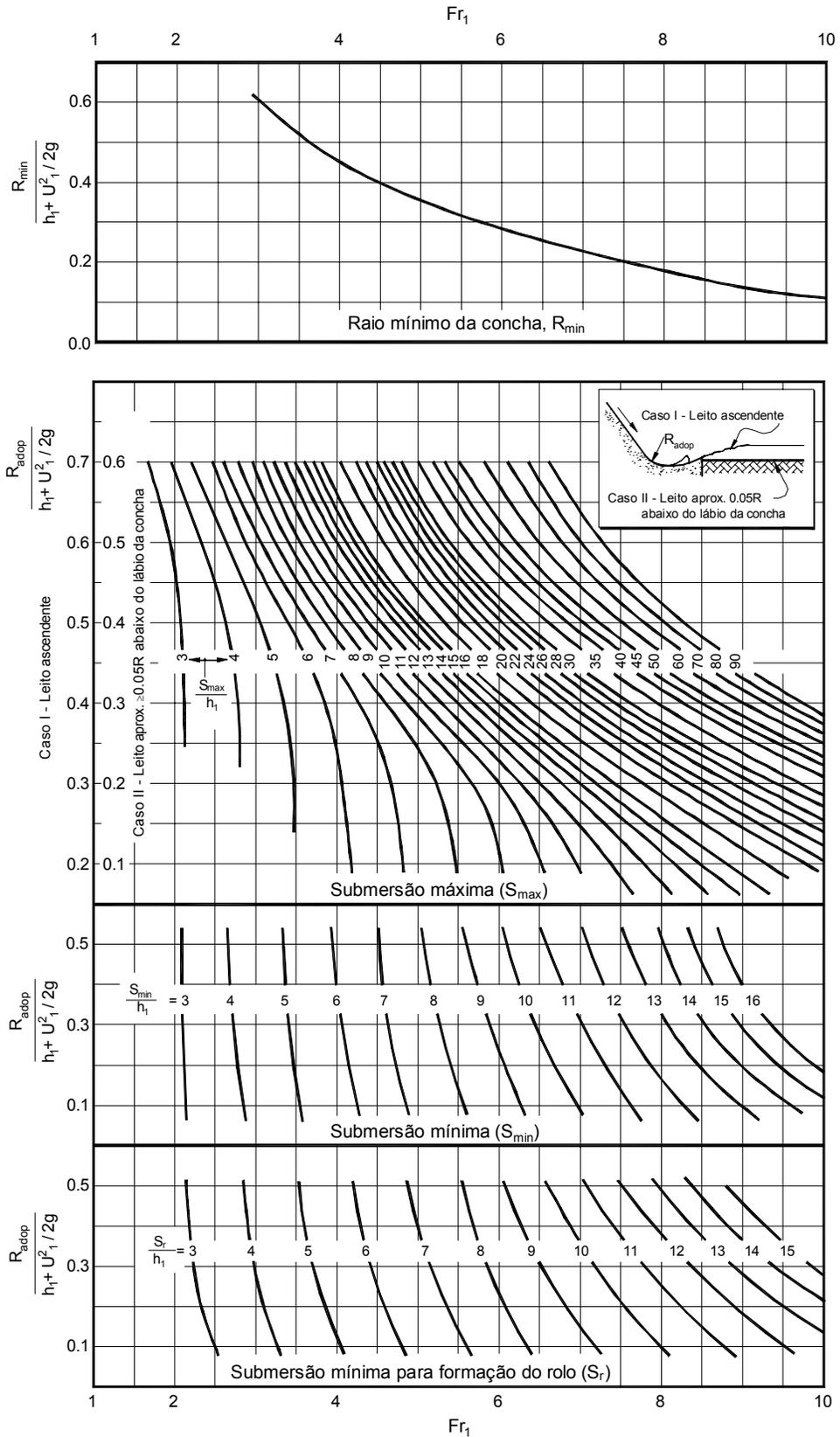


Figura 12 – Conchas de rolo. Ábacos de dimensionamento (adaptado de USBR, 1987).

1.4 RAMPA DE BLOCOS

A rampa de blocos é uma estrutura desenvolvida para promover a dissipação de energia em quedas existentes em canais. Tais quedas podem resultar de desníveis bruscos existentes no percurso dos canais ou na entrada de reservatórios alimentados por canais.

As rampas são dotadas de blocos com dimensão adequada ao caudal de dimensionamento, dispostos em filas cujos espaçamentos se encontram desalinhados com os das filas anexas, de modo a que o escoamento sofra sucessivos impactos que dissipam a energia resultante do desnível acentuado, não permitindo que, em termos médios, o escoamento acelere ao longo da rampa. Ocorre, assim, um escoamento cujas características médias se repetem entre duas filas de blocos sucessivas, atingindo-se, assim, uma situação que, embora de forma não rigorosa, se pode designar como “uniforme”.

No que se refere ao dimensionamento, devem considerar-se os seguintes aspectos:

- a velocidade de escoamento no canal de aproximação à rampa V_1 deve ser inferior à crítica ($V_1 < V_c = \sqrt[3]{gq}$) e, preferencialmente, $V_1 = \sqrt[3]{gq} - 1,5$, com V [m/s]; a altura do degrau previsto imediatamente a montante da rampa deve ser dimensionada de modo a respeitar a velocidade V_1 ;
- a primeira fila de blocos deve situar-se perto da crista, nunca distando desta mais do que 0,30 m na vertical;
- a altura dos blocos, h_{bi} , deve situar-se próxima de $0,8h_c$, não devendo exceder $0,9h_c$; no entanto, a dimensão dos blocos poderá ser ligeiramente alterada sem que o processo de dissipação de energia se altere significativamente;
- a largura e espaçamento dos blocos deve ser próxima de $1,5 h_{bi}$, podendo ser reduzida até h_{bi} ; os blocos são normalmente construídos com a face de montante perpendicular ao fundo da rampa; faces verticais também podem ser adoptadas, embora produzam maiores projecções de água;
- a primeira fila deve incluir dois blocos de menor largura junto das paredes; a geometria das filas de blocos repete-se alternadamente, com espaçamento de $2,0h_{bi}$;
- o declive habitual da rampa de blocos é de 1:2; no entanto, é admissível adoptar declives inferiores, devendo, neste casos, o espaçamento entre filas de blocos ser aumentado proporcionalmente, de forma a manter o desnível entre filas consecutivas de blocos estipulado para o declive 1:2;

- são necessárias quatro filas de blocos para que se atinja um regime “uniforme”, pelo que é este o número mínimo de filas aconselhável;
- a altura dos muros da rampa deve ser maior ou igual a $3,0h_{bl}$;
- no caso da rampa estar inserida num canal não revestido, é necessário prever um enrocamento de protecção a jusante com pedra com diâmetro compreendido entre 0,15 e 0,30 m; neste caso a rampa deve terminar abaixo do topo do enrocamento, devendo pelo menos uma fiada de blocos estar enterrada no enrocamento de protecção de jusante (ver Figura 13).

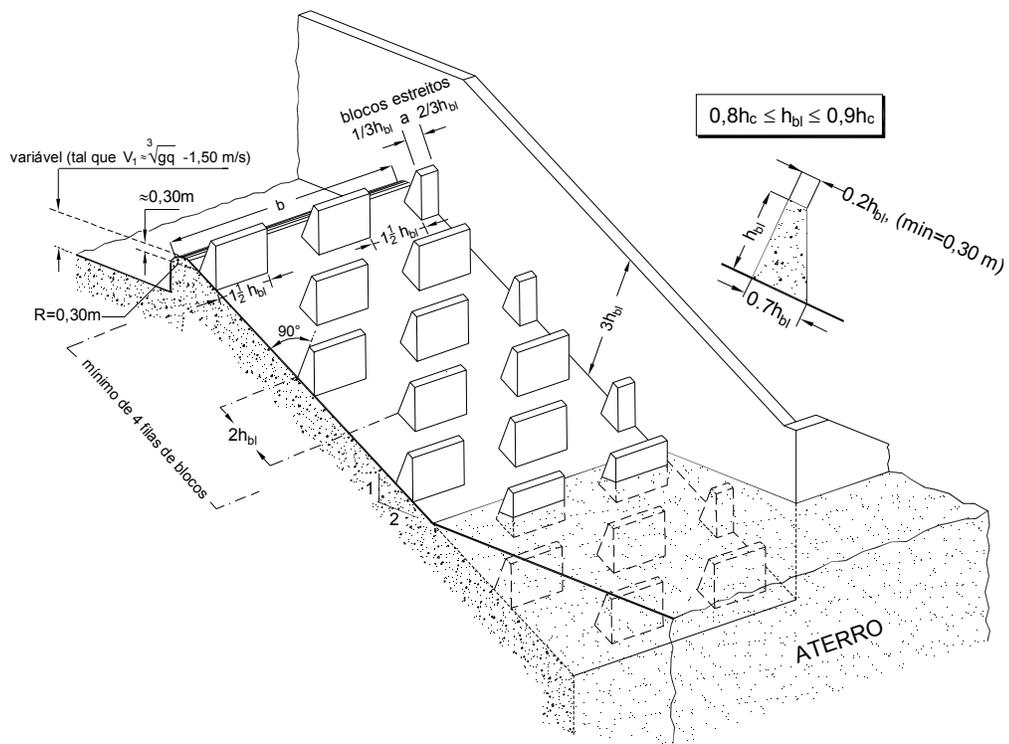


Figura 13 – Rampa de blocos (Peterka, 1978).



Figura 14 – Central termoelétrica do Pego. Rampa de blocos.

1.5 BACIAS DE DISSIPAÇÃO POR IMPACTO

A bacia de dissipação por impacto é uma estrutura em forma de caixa dotada de uma viga transversal com secção em L invertido, que não requer a existência de qualquer nível de água mínimo a jusante para assegurar o seu bom funcionamento (Figura 15). A bacia foi concebida para ser colocada na extremidade de jusante de uma conduta em pressão. No entanto, mediante as necessárias adaptações a montante, poderá também ser utilizada na extremidade de condutas com escoamento em superfície livre. Neste caso, para idênticos números de Froude a montante, a eficiência desta estrutura como dissipador de energia é superior à de um ressalto hidráulico.

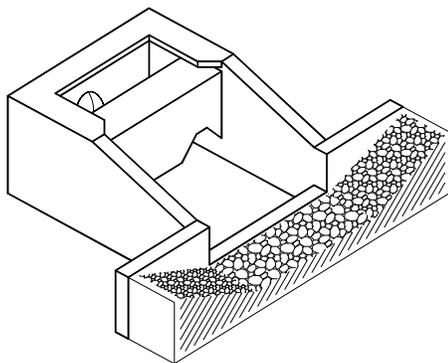


Figura 15 – Bacia de dissipação por impacto (Peterka, 1978). Perspectiva com canal trapezoidal a jusante e foto.

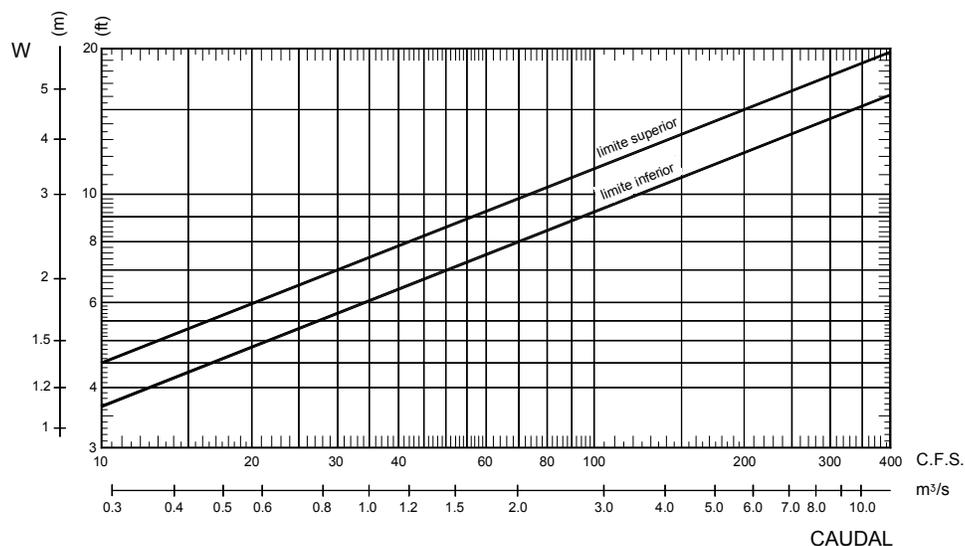


Figura 16 – Bacia de dissipação por impacto. Dimensão base da estrutura em função do caudal (Peterka, 1978).

Peterka (1978) apresenta os critérios de dimensionamento para este tipo de estruturas, aplicáveis para caudais até cerca de 11 m³/s e velocidades até 9 m/s (Figura 16 e Figura 17). A utilização deste tipo de bacia para velocidades de escoamento superiores à recomendada é possível, desde que não se prevejam períodos de funcionamento longos, de modo a controlar a erosão do betão na zona nas faces interiores da viga em L invertido. Uma solução possível para obviar a esta questão é prever o revestimento de tais faces com chapas de aço (preferencialmente aço inox). A sua utilização na extremidade de jusante de barragens de altura média torna-se assim viável.

O bom funcionamento da bacia de dissipação por impacto não depende do nível de jusante. No entanto, se o nível a jusante se situar cerca de $d+g/2$ acima do fundo, verifica-se uma redução da turbulência residual e das erosões a jusante. Níveis superiores conduzirão a projecções de água sobre as paredes da bacia.

As reentrâncias no bordo inferior da viga em L invertido destinam-se a provocar zonas de concentração de caudal que ajudem a limpar sedimentos eventualmente acumulados no interior da bacia. Caso não se preveja ser possível tal acumulação, as reentrâncias podem não ser construídas pois têm a desvantagem de aumentar ligeiramente as erosões a jusante. De qualquer modo, Peterka (1978) refere que, mesmo no caso de total colmatagem sob a viga em L invertido, a bacia suporta o escoamento totalmente por cima da viga. Esta situação conduzirá, obviamente, a projecções significativas de água sobre as paredes da bacia.

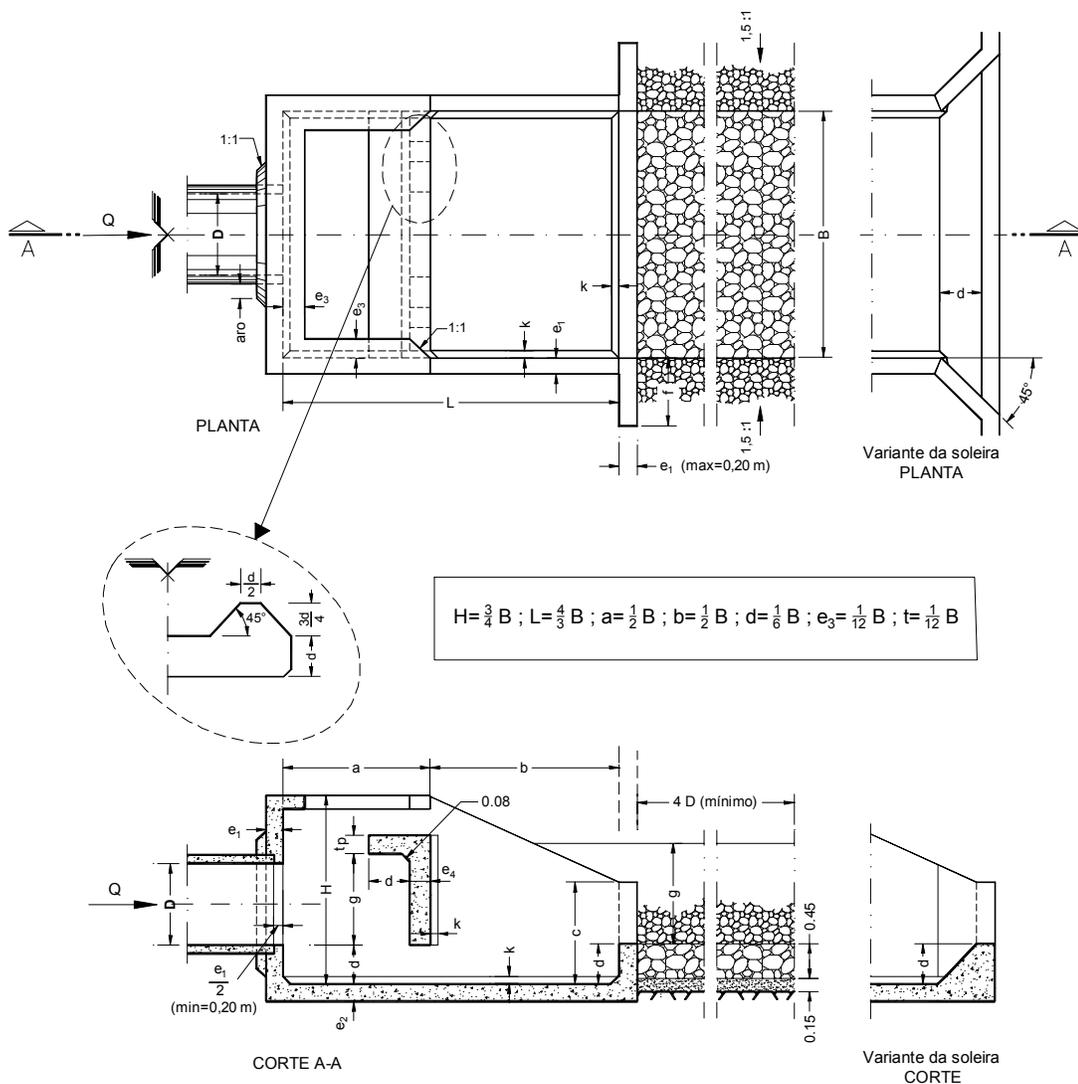


Figura 17 – Bacia de dissipação por impacto (Peterka, 1978).

No que se refere à protecção do leito a jusante, se necessária, aconselha-se um enrocamento dimensionado de acordo com os critérios utilizados para protecção a jusante de bacias de dissipação por ressalto, considerando a velocidade média do escoamento à saída. Para determinação desta velocidade média, deverá considerar-se que, para o caudal de dimensionamento, o nível de água dentro da bacia se situa no plano da face inferior do ramo horizontal da viga em L invertido. Peterka (1978) refere que, embora não seja requerido um nível de água mínimo a jusante, a instalação da bacia a uma cota tal que o nível de jusante para o caudal de dimensionamento deverá ser próximo de

No caso da bacia de impacto ser instalada na extremidade de condutas com escoamento em superfície livre, é aconselhável que se instale um tubo de ventilação com cerca de 1/6 do

diâmetro da conduta para promover o arejamento a montante do ressalto hidráulico que previsivelmente se formará dentro da conduta.

Peterka (1978) recomenda ainda que a conduta de montante não tenha inclinação superior a 15° imediatamente a montante da bacia. Se tal ocorrer, aconselha um troço horizontal com comprimento mínimo de dois diâmetros.

1.6 BACIAS DE DISSIPAÇÃO POR JACTOS

1.6.1 Fossas de erosão

A construção de descarregadores de cheias em que a dissipação de energia se efectua no leito natural, com formação de fossa de erosão, é uma solução bastante divulgada sempre que as condições locais o permitam, por evitar a construção de uma obra de betão onde tal dissipação ocorra.

A acção dinâmica do jacto provoca pressões elevadas no leito, que se transmitem à fundação através das superfícies de descontinuidade do maciço rochoso. No caso das forças instaladas nos blocos serem suficientemente fortes para vencer o peso submerso dos blocos e eventuais tensões tangenciais existentes entre as faces dessas superfícies, ocorre o arrancamento do bloco e o posterior arrastamento para jusante. Quando a capacidade de transporte do escoamento já não permite o arrastamento de um dado bloco, este deposita-se, contribuindo para a formação de uma barra a jusante da fossa de erosão (Figura 18). Durante o transporte, o bloco pode sofrer choques que provoquem a sua fracturação, dando origem a blocos de menores dimensões que podem então ser transportados a maior distância, alongando, assim, a barra a jusante da fossa.

Nos protótipos é difícil conhecer as condições que contribuíram para a erosão observada, nomeadamente a duração e os valores de caudal e as características geomorfológicas do local. Nos modelos é difícil reproduzir estas características, simular os processos de fracturação e abrasão dos blocos, bem como a dissipação de energia e o emulsionamento do jacto ao longo da sua trajectória. Assim, é natural que, consoante os dados considerados na dedução de cada fórmula, se verifiquem limitações de aplicação, sendo necessário recorrer ao bom senso e à analogia de condições de base na interpretação dos diferentes resultados obtidos.

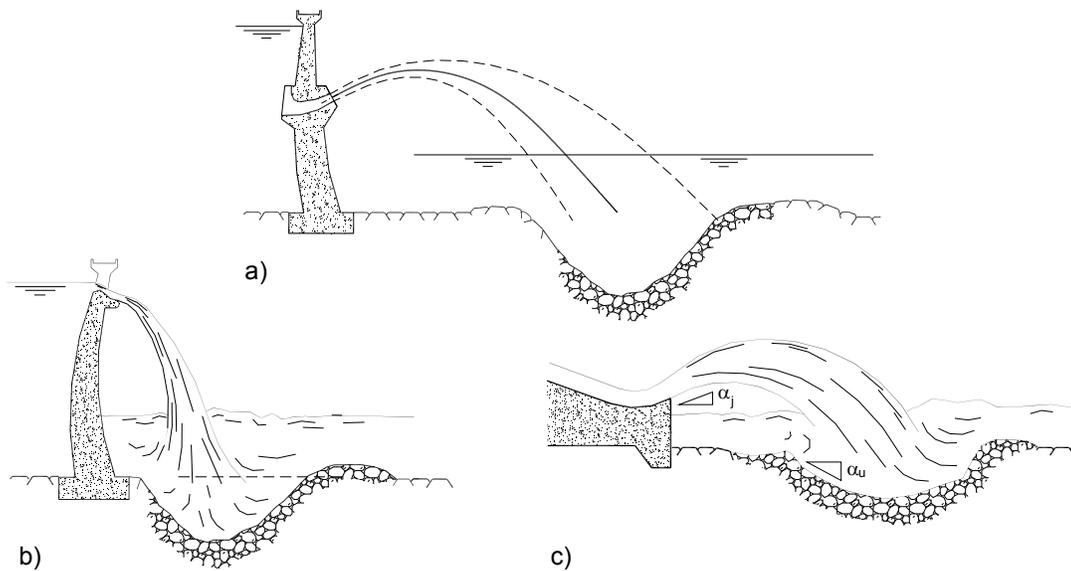


Figura 18 –Fossas de erosão. Localização da fossa em função do tipo de descarregador de cheias: a) orifícios de meio-fundo; descarregador de superfície; c) canal com trampolim.

Para estimar a erosão máxima produzida por acção de jactos livres, dispõe-se de fórmulas empíricas. O interesse que este assunto merece levou à elaboração de um número significativo de trabalhos de investigação baseados em observações das erosões ocorridas em protótipos, ou em modelos reduzidos ou instalações experimentais ou, ainda, combinando observações de ambos os tipos, (e.g. Mason e Arumugan, 1985), de que, resultaram diferentes fórmulas para estimar a profundidade máxima de erosão devido à incidência de um jacto. A maioria das fórmulas até hoje publicadas é do tipo

$$D = K \frac{q^x H^y}{d^z} \quad (7)$$

em que D é a profundidade da fossa de erosão, q o caudal específico, H a queda bruta e d o diâmetro característico dos blocos que resultarão da acção do jacto sobre o leito. Diferentes autores têm preconizado conjuntos de valores x , y , z e diâmetros característicos que se situam entre o diâmetro médio, d_m , e d_{90} .

Um segundo grupo de fórmulas é caracterizado por contemplarem adicionalmente a espessura do colchão de água a jusante na zona de impacto do jacto, h . É deste tipo a expressão proposta por Martins (1973)

$$D = 0,14N + 1,7h - 0,73 \frac{h^2}{N}, \quad \text{com } N = \left(\frac{Q^3 H^{1,5}}{d^2} \right)^{1/7} \quad (8)$$

Existem ainda expressões que incluem o ângulo de incidência do jacto com o colchão de água a jusante.

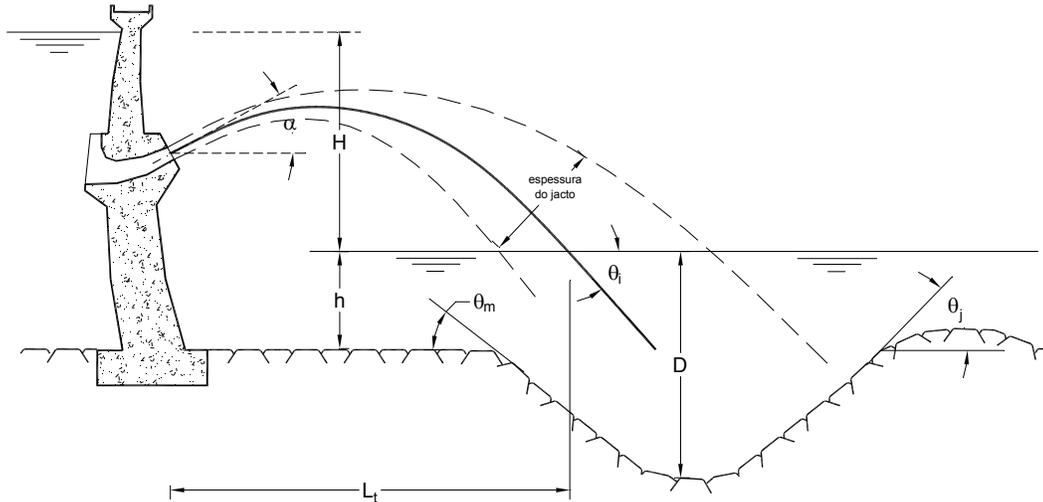


Figura 19 –Fossa de erosão. Profundidade.

Mason e Arumugam (1985) analisaram um extenso conjunto de dados de observação de modelos e de protótipos tendo proposto uma fórmula que se adapta particularmente bem aos dados disponíveis, tanto em protótipo, como em modelo

$$D = K \frac{q^x H^y h^{0,15}}{g^{0,30} d_m^{0,10}}, \quad \text{válida para unidades do sistema SI} \quad (9)$$

com $K=(6,42 - 3,10H^{0,10})$, $x=(0,60 - H/300)$, $y=(0,15 - H/200)$. Para os protótipos, os autores aconselham que se considere $d_m=0,25$ m, independentemente da natureza do leito a jusante. Segundo os autores, esta expressão apresenta coeficientes de variação de 35,4% e de 30,1% e relações $D_{calculado}/D_{observado}$ de 1,01 e 1,07, respectivamente, para modelos e para protótipos. Os autores referem que para foram considerados dados de protótipos com $15,8 < H < 109,0$ m, sendo aplicável quer a leitos rochosos, quer a leitos compostos de materiais granulares, com ou sem coesão,. No que se refere aos modelos, foram considerados dados referentes a ensaios com $0,33 < H < 2,15$ m. Recomendam que não seja considerada a influência do ângulo de incidência do jacto, nem a redução de H devida à perda de carga do escoamento ao longo do descarregador de cheias. Julga-se, no entanto, que esta última recomendação não será aplicável a descarregadores em canal de encosta, para os quais a perda de carga ao longo do canal poderá representar uma parcela significativa da queda bruta disponível.

BIBLIOGRAFIA

- Argue, J.R. 1961. Stilling basins and energy dissipation. *Proc. American Society of Civil Engineering Symposium*, series 5, June: 19-33.
- Blaidell, F.W. 1948. Development and hydraulic design, Saint Anthony Falls stilling basin. *Trans. ASCE* 113: 483-561
- Blaisdell, F.W. & Anderson, C.L. 1991. Pipe plunge pool energy dissipator. *J. Hydraulics Division*, ASCE, 117(3): 303-323.
- Bremen, R. & Hager, W.H. 1993. T-jump in abruptly expanding channel. *J. Hydraulic Research*, 31(1): 61-78.
- Bremen, R. & Hager, W.H. 1994. Expanding stilling basin. *Proc. Institution Civil Engineers. Water, Maritime and Energy*, 106: 215-228.
- Chow, V.T. 1981. *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill.
- Fletcher, B.P. & Grace Jr., J.L. 1972. *Practical guidance for estimating and controlling erosion at culvert outlets*. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station. Miscellaneous Paper , H-72-5, Vicksburg
- French, R.H. 1986. *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill.
- Hager, W.H. 1995. Stilling basins. *In Energy Dissipators*, Eds. D.L. Vischer & W.H. Hager, IAHR Hydraulics Structures Design Manual, 9. A.A. Balkema.
- Lemos, F.O. & Ferreira, J.P.L. 1978. *Estruturas compactas para dissipação de energia por ressalto*. Memória nº 502 do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Martins, R. 1973. *Acção erosiva de jactos livres a jusante de estruturas hidráulicas*. Memória nº 424 do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Mason, P.J. 1989. Effect of air entrainment on plunge pool scour. *J. Hydraulic Engineering*, 115(3): 385-399.
- Mason, P.J. 1993. Practical guidelines for the design of flip buckets and plunge pools. *Water Power & Dam Construction*, Set/Out, 40-45.
- Mason, P.J. & Arumugam, K. 1985. Free jet scour below dams and flip buckets. *J. Hydraulic Engineering*, 111(2): 220-235.
- Nosedá, G. 1964.
- Peterka, A.J. 1978. *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*. United States, Bureau of Reclamation, Denver.

- Quintela, A.C. & Samora, M.M. 1995. Dimensionamento de enrocamentos para protecção de canais contra a acção erosiva do escoamento, Recursos Hídricos, 16(2): 37-48.
- Ramos, C. M. 1982. Energy dissipation on free jet spillways. Bases for its study in hydraulic model. Memória nº 575 do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Sinniger, R.O. & Hager, W.H. 1987. *Constructions Hydrauliques*. Presses Polytechniques Romands, Lausanne.
- Stevens, M.A. & Simons, D.B. 1971. Experimental programs and basic data studies of scour in riprap at culvert outfalls. Colorado State University, CER 70-7-MAS-DBS-57.
- Taraimovich, I.I. 1978. Deformations of channels below high-head spillways on rock formations. *Hydrotechnical Construction*, Sept.
- USBR. 1987. *Design of small dams*. 3^{ed}. United States Bureau of Reclamation. Water Resources Technical Publication. US. Dept. Interior, Washington.
- UDOT. 2005. *UDOT Drainage Manual*. Chapter 11 - Energy dissipators. Utah Department of Transportation
- Vischer, D.L. e Hager, W.H. 1995. *Energy dissipators*. IAHR Hydraulic Structures Design Manual 9. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Wilken, P.S. 1978. *Engenharia de drenagem superficial*. CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. São Paulo, Brasil.