

Proposição de diretrizes para dimensionamento de estruturas de dissipação de energia do escoamento: contribuição para mitigação de danos e perdas em regiões de geomorfologia complexa sujeitas a desastres hidrológicos

Guidelines to design energy dissipation structures: contribution to mitigate damages and losses in complex geomorphology regions subjected to hydrological disaster

Herlander Mata-Lima^{1(*)}

Roberto Aguiar²

Andreilcy Alvino-Borba³

Tatiane Jesus⁴

José António Almeida⁵

Resumo

As estruturas de dissipação de energia do escoamento (EDE) são fundamentais para prevenir a erosão e a degradação ambiental, bem como a ruptura de infraestruturas na sequência de eventos hidrológicos extremos. Este trabalho analisa diferentes soluções para dissipação de energia do escoamento, assim como os respectivos critérios de dimensionamento das estruturas, geralmente, localizadas a jusante de bueiros (*culverts*) que atravessam as vias de comunicação (e.g. estrada, caminho de ferro), em alguns trechos de canais (naturais ou artificiais), nas encostas íngremes, nos sistemas de rega e nos vertedores de barragem. Realizou-se uma profunda revisão bibliográfica para sintetizar o conhecimento disperso e construir um procedimento integrado – baseado nas características do escoamento e do meio ambiente – para

-
- 1 Dr.; Engenheiro de Recursos Hídricos; Professor de Engenharia Civil de Infraestrutura da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, UNILA; Endereço: Avenida Tancredo Neves, 6731, CP: 2044, CEP: 85867-970, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil; E-mail: herlander.lima@unila.edu.br (*) Autor para correspondência.
 - 2 Engenheiro; Mestre em Engenharia Civil pela Universidade da Madeira, UMA; Endereço: *Campus* da Penteada, CEP: 9000-490, Funchal, Portugal; E-mail: raguiar@uma.edu.pt
 - 3 Geógrafa; Mestre em Estudos Regionais e Locais; Doutoranda na Universidade Aberta de Lisboa; Portugal; Email: aborba@uab.edu.pt
 - 4 Dr.; Graduada Tecnologia Hidráulica; Professor Adjunta do Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas da Universidade Federal do ABC, CECS-UFABC; Endereço: Avenida dos Estados, 5001, CEP: 09210-580, Santo André, São Paulo, Brasil; Email: t.jesus@ufabc.edu.br
 - 5 Dr.; Engenheiro Geólogo; Professor Associado do Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, FCT/UNL; Endereço: *Campus* da Caparica, Almada, Portugal; Email: jaa@fct.unl.edu.pt

Recebido para publicação em 30/01/2015 e aceito em 25/02/2016

Ambiência Guarapuava (PR) v.12 n.4 p. 933 - 953 Set./Dez. 2016 ISSN 2175 - 9405
DOI:10.5935/ambiencia.2016.04.12

avaliar a necessidade, selecionar e dimensionar EDE. Foram estabelecidos os domínios de aplicação das estruturas mais adequadas para diferentes condições de escoamento e características biofísicas do território (em termos da geomorfologia), atribuindo ênfase às situações de orografia complexa. Em situações de acentuada declividade das encostas e dos canais do escoamento, a solução mais adequada é aquela que evita (ou atenua significativamente) a ocorrência do escoamento em regime supercrítico. Nesse tipo de solução, incluem-se as estruturas de queda abrupta e em degraus, pois estas permitem regular a declividade, de modo a evitar trechos de aceleração além de dissiparem a energia do escoamento ao longo das quedas sucessivas. Este trabalho constitui uma ferramenta útil para os organismos públicos reguladores com responsabilidade na área de aprovação e fiscalização de projetos de infraestruturas, ordenamento do território e planejamento ambiental, assim como para os projetistas vocacionados para concepção e execução de projetos de infraestruturas de engenharias civil, ambiental e agrônômica.

Palavras-chave: estruturas de dissipação de energia; escoamento superficial; critério de seleção; dimensionamento; controle de erosão.

Abstract

Energy dissipation structures are essential to prevent erosion and environmental degradation as well as the breakdown of infrastructure during extreme hydrological events. This work analyzes the different solutions for the flow energy dissipation, as well as their criteria for design of structures, usually located downstream of culverts (culverts) crossing the communication routes (e.g. road, railway) in some channel (natural or artificial) sections in irrigation systems and dam spillways. Starting from the definition of the applicability of energy dissipaters (EDE), and design criteria, we propose a procedure that evaluates the need for implementation of EDE, select the appropriate type of structure, and design the structure. The research led to the description of the fields of application of the most appropriate structures for different flow and land (in terms of geomorphology) conditions giving emphasis on complex terrain situations. The combined assessment of different structures analyzed with geomorphological conditions of the regions, shows that in situations of steep slopes of the hill slopes and outlets the appropriate solution is the one that avoids (or reduces significantly) the occurrence of supercritical flow. This type of solution includes the drop structures and stepped spillways as they allow the regularization of channel slope avoiding acceleration and dissipate the flow energy. This work serves essentially as a useful tool for public regulators with responsibility in the area of approval and supervision of infrastructure projects, land use and environmental planning as well as for practitioners on the area of civil engineering, environmental and Agronomic projects.

Key words: energy dissipation structures; runoff; design criteria; erosion control.

Introdução

O crescimento demográfico tem sido particularmente expressivo em áreas urbanas, desencadeando o aumento da magnitude do escoamento superficial – como consequência da excessiva remoção da vegetação e impermeabilização (KUMAR et al., 2013; MATA-LIMA et al., 2007; YIN; LI, 2001) – e suscitando muitos outros aspectos ambientais e socioeconômicos adversos (YNOUYE et al., 2015; HAAS; BAN, 2014; MATA-LIMA et al., 2014; PATHIRANA et al., 2014). Essa situação, agravada pelo aumento progressivo da frequência e intensidade dos fenômenos hidrometeorológicos extremos em certas regiões como, por exemplo, *Small Islands* (do atlântico, pacífico e Caribe) e América Latina – onde se observa aumento da precipitação no sudeste da América do Sul, noroeste de Peru e Equador (IPCC, 2012, 2014), requer cada vez mais sistemas avançados de infraestruturas (incluindo novos códigos de construção específicos para regiões vulneráveis) o que impõe desafios ao Ambiente Construído, designadamente no que concerne à eficiência, segurança e vida útil das infraestruturas. É consensual que os principais problemas referentes à estrutura da gestão urbana dizem respeito ao planejamento e gestão do solo, infraestrutura (e.g. relacionada à rede viária, de abastecimento de água e drenagem, de energia e transporte) e gestão socioambiental.

As Estruturas de Dissipação de Energia do Escoamento (doravante designada EDE) assumem particular importância quando as variáveis hidrodinâmicas do escoamento (e.g. vazão, velocidade, pressão) são suficientemente elevadas para provocar a degradação do meio devido a processos erosivos no leito e margens do canal/meio receptor do escoamento. Tais

processos erosivos podem mesmo provocar a instabilidade e consequente colapso de outras estruturas de engenharia civil, em áreas adjacentes, tais como estradas construídas nas imediações dos cursos d'água, levando, algumas vezes, a elevados danos materiais e perda de vidas humanas (LIRA et al., 2013; SDDOT, 2011; USBR, 2010; USDOT, 2006). Essas estruturas são normalmente implantadas a jusante de bueiros – também denominados de passagens hidráulicas – (*culvert*, em inglês) (MARTINS; PINHEIRO, 2003), ao longo de canais (naturais ou artificiais) (CHANSON, 1994), nos sistemas de rega e nos vertedores (descarregadores) de barragem (MEIRELES et al., 2005; MATOS, 1999).

As EDEs desempenham um papel relevante como medida estrutural de prevenção de perdas e danos nas regiões onde os cenários de alterações climáticas apontam para maior frequência e intensidade de episódios de precipitações extremas (IPCC, 2007).

Dentre essas regiões, destacam-se as designadas por *Small Island Development States* (SIDS), onde se insere a Região Autónoma da Madeira – RAM, em Portugal, e sudeste e sul do Brasil – RSB, onde predominam desastres relacionados à inundação e deslizamento de terra (CARMO; ANAZAWA, 2014). Em tais regiões, as chuvas intensas de curta duração (<6h) provocam enchentes rápidas (*flash-floods*) (XIA et al., 2011, p. 987) nos leitos dos cursos d'água, desencadeando a erosão e o transporte dos sedimentos para jusante, com excessiva energia, além de estarem associadas a deslizamentos de terra (*landslide*). Desse modo, torna-se pertinente analisar e sistematizar os mecanismos de dissipação de energia do escoamento, visando propor um algoritmo para seleção

e dimensionamento de EDE, pois são de suma importância nas regiões de orografia complexa sujeitas a precipitações intensas. As características geomorfológicas (e.g. encostas declivosas e vales encaixados) e climáticas (e.g. precipitações intensas) das duas regiões acima referidas, como exemplo, propiciam a ocorrência de escoamentos torrenciais com elevada capacidade de transporte de sedimentos, cujos efeitos destrutivos ficaram muito bem evidentes nos últimos desastres de fevereiro de 2010 e janeiro de 2011, respectivamente, na RAM (LIRA et al., 2013) e Região Serrana do Rio de Janeiro (CARMO; ANAZAWA, 2014, p.3675-76). Uma das características comuns às regiões de orografia complexa é a localização das populações e intervenção humana, essencialmente, nos fundos de vales (LIRA et al., 2013, p. 709) (zonas de menores cotas e declividades), fato que agrava a vulnerabilidade em situação de enchentes.

Relativamente à seleção e ao dimensionamento de estruturas de dissipação de energia do escoamento (EDE), importa ainda ressaltar que o principal problema associado à ineficiência ou ao colapso desse tipo de infraestrutura hidráulica, é a intensa erosão que pode ocorrer devido à falhas na concepção e dimensionamento (CHANSON, 2004):

- inadequado comprimento das bacias de dissipação de energia do escoamento por forma a garantir que a dissipação da energia ocorra no interior dela;
- deficiente construção da bacia e dos acessórios (blocos de queda, de leito e soleiras);
- subdimensionamento das EDE, i.e., ocorrência de escoamentos com vazões superiores àquela considerada no projeto;
- erosão do leito da EDE devido à ocorrência de cavitação e abrasão

consequente do transporte de material sólido por arrastamento e saltação.

Às falhas supramencionadas deve-se acrescentar, ainda, a inadequada seleção do tipo de EDE.

Na sequência do exposto, o presente artigo foi elaborado com o intuito de propor um procedimento sequencial, consubstanciando linhas de orientação que contribuam para seleção e dimensionamento de EDE, visando minimizar os impactos negativos dos escoamentos rápidos associados aos eventos de chuvas intensas.

Para alcançar o objetivo proposto adotou-se uma estratégia de abordagem que contemplou, de modo sequencial, as seguintes atividades:

- realização de uma revisão do estado atual do conhecimento, para caracterizar as estruturas de dissipação da energia do escoamento;
- classificação das estruturas de dissipação de energia do escoamento quanto ao âmbito de aplicação e condições de funcionamento;
- construção de um algoritmo, para seleção e dimensionamento de estruturas de dissipação da energia, em função das condições do escoamento e das características fisiográficas do local onde se pretende implantar a estrutura. Pretende-se que o algoritmo sirva de base de trabalho para as entidades reguladoras (responsáveis pelo planejamento do território e gestão ambiental) e para os profissionais que atuam neste domínio.

Estruturas de Dissipação de Energia do Escoamento - EDE

Em determinadas circunstâncias em que o escoamento apresenta velocidade excessiva (regime supercrítico com número

de Froude muito superior à unidade, conforme se descreve na seção 3), capaz de produzir efeitos destrutivos pela erosão do leito e margens dos cursos d'água, torna-se necessário adotar soluções que promovam a redução da velocidade, dissipando grande parte da energia, de modo a devolver o escoamento com características (velocidade, tensão de arrastamento) que não degradem o meio receptor a jusante. Por conseguinte, as EDEs são estruturas frequentemente construídas, por exemplo, ao longo de canais, a jusante dos elementos de drenagem transversal (bueiros/passagens hidráulicas) e longitudinal (valas) de rodovias, nas descidas do escoamento, nas encostas laterais às rodovias e descarregadores de barragens, com a função de reduzir a energia cinética ($U^2/2g$) do escoamento (minimizar a sua capacidade erosiva).

A ausência e/ou dimensionamento inadequado das EDEs está na origem de muitos danos materiais (TDOT, 2011; SDDOT, 2011; USDHS, 2004), assim como de vítimas humanas (XIA et al., 2011; COLLIER, 2007), decorrentes de chuvas intensas com a consequente enchente rápida (*flash-floods*). A conjugação de fenômenos de chuva intensa com a complexidade geomorfológica (marcada pela presença de planos de encostas e canais naturais de escoamento com declividades acentuadas e material erodível), a suscetibilidade dos solos à erosão, a elevada impermeabilização e densidade urbana, bem como a ocupação de zonas de fundo de vale (leito de cheia) está na base da severidade dos desastres naturais de origem hidrológica. Importa ainda salientar que diversos trabalhos (LESKENS et al., 2014; LIRA et al., 2013; MATA-LIMA et al., 2013) realçaram que muitos desastres naturais (com elevados danos

materiais e vítimas humanas) resultam de fenômenos hidrológicos os quais, que em situações de adequado planejamento do território (i.e., distribuição da ocupação e uso do solo em função da sua aptidão e análise de risco sistêmico), não causariam mais do que inundações e aluviões (deslizamento e acumulação de terra em zonas de fraca declividade) sem impactos socioeconômicos significativos.

A dissipação de energia do escoamento pode ser promovida por meio de diferentes tipos de estruturas, podendo variar de rígidas (estruturas dispendiosas de concreto) a flexíveis (construídas a base de enrocamento) (Figura 1).

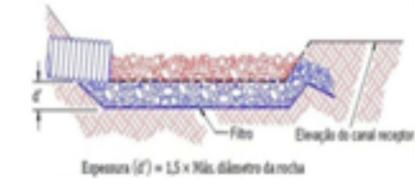
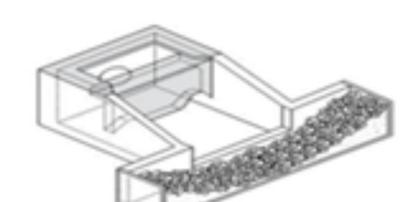
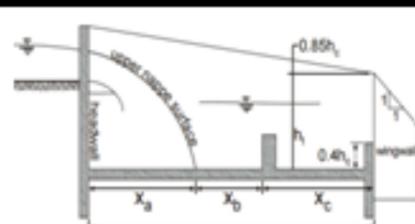
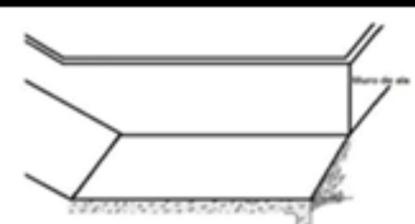
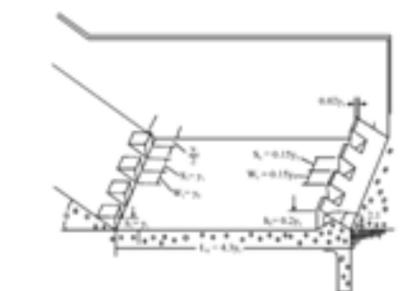
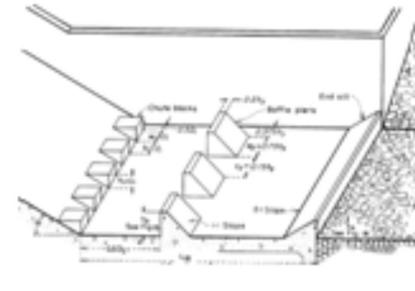
A experiência que se possui sobre o dimensionamento das estruturas de dissipação de energia permite agrupá-las em dois grandes grupos: (1) EDEs aplicáveis a áreas de declividade suave (< 25%); e (2) EDEs aplicáveis a áreas de declividade moderada a acentuada ($\geq 25\%$). Tais estruturas serão esmiuçadas mais adiante conjugando as características intrínsecas do escoamento (e.g. vazão, velocidade, número de Froude, fluxo detrítico) com as condições biofísicas do meio (e.g. geomorfologia e o ambiente construído).

Análise Comparativa das Estruturas de Dissipação de Energia (EDE)

O âmbito de aplicação de cada tipo de Estruturas de Dissipação de Energia do escoamento (EDE) é condicionado por fatores hidráulicos (e.g. número de Froude do escoamento e nível de água a jusante), geotécnicos, topográficos, econômicos (custo da estrutura) e ambientais (sensibilidade do meio receptor do escoamento).

O número de Froude do escoamento (Fr) é o parâmetro com maior influência

Figura 1- Exemplo de estruturas de dissipação da energia do escoamento (EDE)

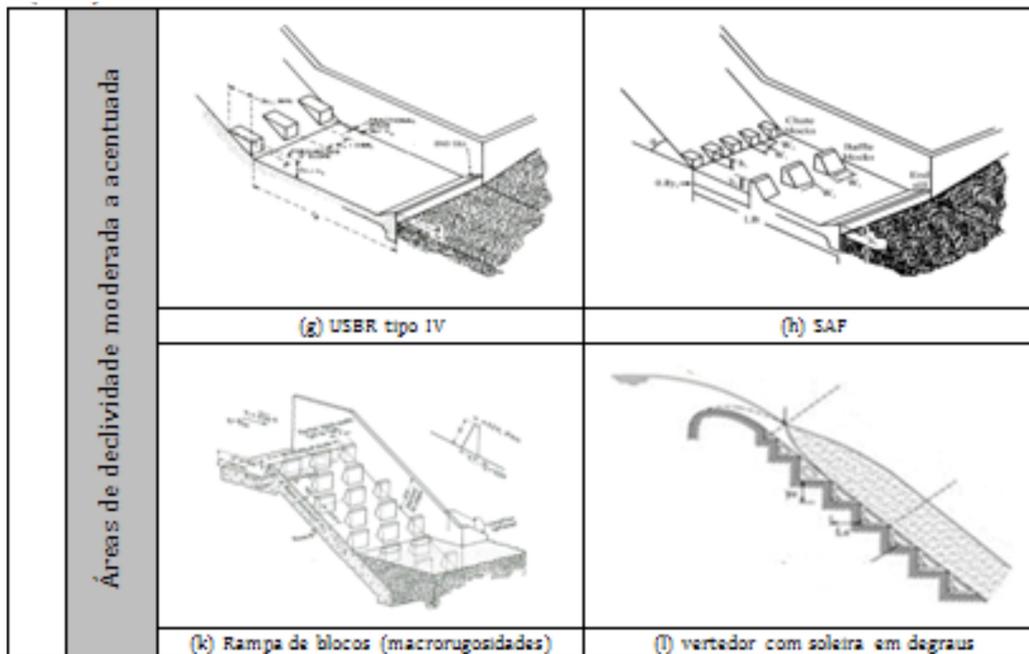
Estruturas de Dissipação de Energia do Escoamento (EDE)	Áreas de declividade suave	 <p>(a) Enrocamento a jusante do bueiro</p>	 <p>(b) PWD</p>	
		 <p>(c) WES</p>	 <p>(d) USBR tipo VI (dissipação por impacto)</p>	
		Áreas de declividade moderada a acentuada	 <p>(e) Queda abrupta</p>	 <p>(f) Resalto simples</p>
			 <p>(g) USBR tipo II</p>	 <p>(h) USBR tipo III</p>

(Continua...)

Fonte: Compilação dos Autores (2015) com base em FEMA (2010), USDOT (2006), Martins e Pinheiro (2003), ADOT (2001), USBR (1987) e Peterka (1978).

Figura 1- Exemplo de estruturas de dissipação da energia do escoamento (EDE)

(...Conclusão)



Fonte: Compilação dos Autores (2015) com base em FEMA (2010), USDOT (2006), Martins e Pinheiro (2003), ADOT (2001), USBR (1987) e Peterka (1978).

na escolha da melhor solução. É através deste que se consegue prever e classificar o regime de escoamento, remetendo para um determinado tipo de EDE, pois o tipo de estrutura é fundamentalmente condicionado pela faixa de números de Froude, para as quais as estruturas garantem adequada operacionalidade e eficiência no que concerne à dissipação de energia.

Para baixos números de Froude ($Fr \leq 2.5$), onde a turbulência no escoamento não é significativa, deve optar-se apenas por bacias de dissipação de energia do escoamento com um comprimento apropriado, de forma a garantir que a dissipação de energia ocorra ao longo da extensão da bacia de dissipação (USBR, 1987). Nessas situações, a preferência deve ser atribuída às bacias

de dissipação de menor comprimento, ou por bacias que conduzem a uma solução menos onerosa (e.g. na existência de material rochoso de boa qualidade nas proximidades da obra, a solução da bacia de dissipação por enrocamento (*riprap*) pode, do ponto de vista econômico, ser a melhor). Para números de Froude superiores a 2.5, o número de soluções aumenta, e a escolha deve ser executada mediante a ponderação de todas as variáveis que podem tornar a obra menos dispendiosa (e.g. volume de escavação e aterro, volume e tipo de concreto).

O nível de água a jusante (*tailwater*, T_w) é uma variável importante para seleção e dimensionamento de EDE, principalmente para aquelas que promovem o ressalto hidráulico como meio de dissipação da

energia. O nível de *tailwater* exigido, mediante o tipo de estrutura em estudo, tem o objetivo de localizar o ressalto hidráulico dentro dos limites do comprimento da EDE. Nas bacias de dissipação por impacto e por enrocamento, bem como na rampa de blocos, a influência da existência de *tailwater* é na redução da erosão no leito do canal de restituição.

A topografia do local de implantação das EDEs também é um fator a ter em conta, pois deve ter-se em consideração a existência de soluções que, em função da sua geometria, adaptam-se ao relevo do local de implantação (e.g. bacias de dissipação por ressalto hidráulico, USBR e SAF, adequam-se a grandes desníveis entre a passagem hidráulica e o leito do canal/meio receptor) ou soluções em que a EDE é implantada para dissipar a energia do escoamento e regular a declividade do curso d'água, tornando-o menos acentuado (e.g. EDE por queda abrupta).

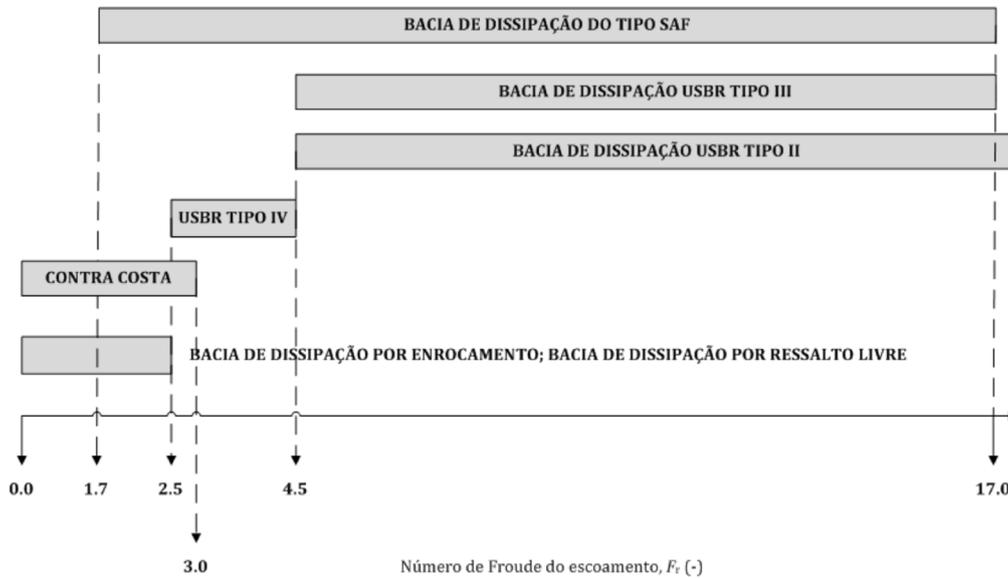
O tipo de solo existente no leito do canal é um parâmetro geotécnico que importa ter em consideração. O tipo de solo é determinante para a estabilidade da EDE, bem como para o fato de potenciar ou não a erosão no leito do canal a jusante da estrutura. Quando na presença de solos e rochas de fraca qualidade geotécnica (coesão – resistência à erosão) (KNAPEN et al., 2007), a capacidade destrutiva do escoamento agrava a erosão do leito e margens do canal e encostas, colocando em risco a estabilidade da EDE e de outras estruturas vizinhas. Para reduzir a incerteza na tomada de decisão, é

necessário conjugar todos os parâmetros que contribuem para solução mais eficiente sob o ponto de vista ambiental (i.e. conservação ou melhoria das condições ambientais) e econômico (e.g. minimização de volumes de escavação e aterro, do comprimento da EDE e das operações de manutenção).

No que concerne às EDEs por ressalto hidráulico, a utilização dos acessórios permite uma redução muito significativa do comprimento da estrutura. A utilização de acessórios (e.g. blocos de queda, blocos de leito e soleira de jusante), nas EDEs atenua o custo econômico mediante redução do comprimento da EDE, na seguinte ordem de eficiência (FATHI-MOGHADAM, 2011; CHOW, 1959): bacia do tipo SAF; bacia USBR tipo III; USBR tipo II (não possui blocos de leito para fratura ou divisão do escoamento), bacia de dissipação horizontal com uma soleira no leito.

No âmbito deste trabalho, analisaram-se várias Estruturas de Dissipação de Energia do Escoamento, (EDE) com o intuito de sintetizar e comparar os critérios de dimensionamento para definir o domínio de aplicação e as respectivas restrições, conforme se apresenta na figura 2 e tabela 1. Assim, resultaram (Figura 2 e Tabela 1) de uma extensa e profunda análise e constituem elemento fundamental no processo de seleção e dimensionamento de EDE visto que sintetizam o domínio de aplicação, bem como as principais restrições, limitações e vantagens de cada tipo de estrutura.

Figura 2 - Domínio de aplicação das EDE em função do número de Froude do escoamento.
Nota: relativamente à bacia de dissipação do tipo II, a USBR não estabeleceu limite máximo do Fr admissível



Fonte: Mata-Lima, H. et al. (2014).

Esta figura 2 deve ser conjugada com a tabela 1 para auxiliar na seleção da EDE mais adequada para cada caso visto que, além do número de Froude (Fr), existem outras variáveis relevantes, tais como as condições do canal/meio receptor do escoamento (e.g. vazão, existência de tailwater – T_w e geomorfologia).

Proposição de um Procedimento para Seleção e Dimensionamento de Estruturas de Dissipação de Energia do Escoamento

As estruturas de dissipação de energia do escoamento podem fazer parte de um sistema integrado de adução de água para rega e abastecimento público ou de drenagem de águas pluviais. Por exemplo, a drenagem transversal de uma rodovia pode ser composta por estruturas de controle de

detritos (sedimentos), estruturas de entrada, *culverts* (passagens hidráulicas), e a jusante das passagens hidráulicas implantam-se frequentemente EDE para proteger o canal/meio receptor contra o efeito erosivo do escoamento.

As estruturas de dissipação de energia (EDE) podem ser internas – implantadas ao longo do trecho da passagem hidráulica (*culvert*), canais e vertedores – ou externas – quando implantadas a jusante (ver ilustrações em PWUD, 2004).

No dimensionamento de EDE implantadas a jusante de passagens hidráulicas ou ao longo de canais (naturais ou artificiais), deve obter-se primeiramente os dados referentes à geometria e rugosidade das seções transversal e longitudinal e as características do escoamento a montante da EDE:

Tabela 1 – Domínio de aplicação de estruturas de dissipação da energia do escoamento (EDE)

Tipo de estrutura	Aplicação comum	Condições do escoamento à entrada da EDE	Nível da água a jusante (<i>tailwater</i> , T_w)	Observações	Fonte
Bacia de dissipação por ressalto hidráulico livre	Canais; Vertedores e bueiros (passagens hidráulicas ou <i>culverts</i>).	$q^* < 45 \text{ m}^3/\text{s/m}$	$T_w \geq h_2$	<ul style="list-style-type: none"> - Solução normalmente adotada para quedas superiores a 60 m; - q^* é a vazão de descarga por metro de largura da bacia; - h_2 é a altura do escoamento a jusante do ressalto hidráulico, i.e. na seção de saída da bacia (EDE); - Limitada a Fr inferiores a 2,5 pelo fato de não dispor de acessórios que permitam a redução do comprimento do ressalto hidráulico, e consequentemente da bacia de dissipação. 	USBR (1987) Lencastre (1996) USDOT (2006) Novak et al. (2007)
		$Fr < 2,5$			
Bacia de dissipação USBR do tipo II	Grandes barragens; Vertedores de barragens de terra; Canais.	$Fr > 4.5$	$T_w \geq 1.05h_2$	<ul style="list-style-type: none"> - Solução normalmente adotada para quedas inferiores a 65 m; - U_1 é a velocidade de aproximação (i.e. a entrada da bacia) - Dispõe de acessórios na bacia (blocos de queda e soleira de jusante); - Os acessórios, permitem uma redução do comprimento da bacia de cerca de 33% em relação a uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico livre. 	Chow (1959) Peterka (1978) USBR (1987) Lencastre (1996) Chanson (2004)
		$U_1 \geq 18.3 \text{ m/s}$			
Bacia de dissipação USBR do tipo III	Canais; Pequenos vertedores de barragens; e a jusante de bueiros (<i>culvert</i>).	$4.5 < Fr < 17$	$T_w \geq h_2$	<ul style="list-style-type: none"> - Solução normalmente adotada para quedas inferiores a 50 m; - Dispõe de acessórios (blocos de queda, blocos de leito e soleira de jusante); - Devem ser evitadas velocidades superiores a 18,3 m/s porque pode ocorrer cavitação nos blocos de leito; - A colocação dos acessórios permite uma redução do comprimento da bacia e do ressalto hidráulico na ordem dos 60%. 	Chow (1959) Peterka (1978) USBR (1987) Chanson (2004) Chaudhry (2008)
		$U_1 \leq 18.3 \text{ m/s}$			
Bacia de dissipação USBR do tipo III	Estruturas em canais; Pequenos vertedores de barragens.	$2.5 < Fr < 4.5$	$T_w \geq 1.1h_2$	<ul style="list-style-type: none"> - Solução adotada somente em canais de seção transversal retangular; - Dispõe de blocos defletores a montante da bacia e uma soleira de jusante; - Pode ser dimensionada com blocos de leito e soleira de jusante - É necessário que haja água a jusante da queda (<i>tailwater</i>). 	Chow (1959) Peterka (1978) USBR (1987) Lencastre (1996)
		$U_1 \leq 15.2 \text{ m/s}$			

(Continua...)

Tabela 1 – Domínio de aplicação de estruturas de dissipação de energia do escoamento (EDE)

Tipo de estrutura	Aplicação comum	Condições do escoamento à entrada da EDE	Nível da água a jusante (<i>tailwater, Tw</i>)	Observações	Fonte
Estruturas de queda com soleira em degraus	Cascatas em degraus nos rios; Vertedores de cheias de barragens; Sistemas de drenagem de esgotos	-	-	<p>O regime de escoamento em quedas sucessivas, pode ser analisado como se tratasse de um conjunto de estruturas de queda abrupta;</p> <p>- Para declividades acentuadas (e.g. 1V:0.75H) adota-se normalmente o critério que conduz ao escoamento deslizante sobre turbilhões, por garantir uma maior dissipação de energia ao longo do vertedor (descarregador).</p>	Chanson (1993) Chanson e Toombes, (1997) Chanson (1994)
Bacia de dissipação por enrocamento (<i>riprap</i>)	A jusante de bueiros	$F_1 < 2.5$	-	<p>- A declividade do trecho de enrocamento deve ser igual ou inferior ao do canal, preferencialmente zero;</p> <p>- Dissipa a energia do escoamento reduzindo a velocidade (devido à rugosidade do enrocamento) e protegendo o canal receptor (natural) contra a erosão;</p> <p>- O inadequado dimensionamento do comprimento e do diâmetro médio do enrocamento são as principais causas para o fracasso desta solução.</p>	ADOT (2001) PWUD (2004)
Dissipador de energia por poço	Em sistemas de drenagem pluvial	-	-	<p>- Solução equacionada em escoamentos onde seja fraco o transporte de detritos, mas pode ser adotada em situação de escoamento com transporte de areia ou silte;</p> <p>- Solução frequentemente utilizada em sistemas de drenagem de águas pluviais nas rodovias;</p> <p>- Não necessita de <i>tailwater</i> para que seja eficiente, contudo na existência de <i>tailwater</i> a dissipação de energia é maior;</p> <p>- A parte superior do poço deve ser protegida com uma grade para que não entrem detritos que obstruam a passagem do escoamento..</p>	USACE (1963) USDOT (2008, 2006)
Bacia de dissipação do tipo PWD	A jusante de bueiros (<i>culvert</i>)	$U < \sqrt{gD}$ $450 \text{ mm} \leq D \leq 1850 \text{ mm}$	-	<p>- Solução a implantar a jusante de bueiro circular quando a carga hidráulica a montante do bueiro (H) é pequena (i.e. $H < 3D$). D é o diâmetro do bueiro;</p> <p>- Declividade suave à saída do bueiro deve ser 25% (1V:4H).</p>	Argue (1961) NRCS (1969) Martins e Pinheiro (2003)

(Continua...)

Tabela 1 – Domínio de aplicação de estruturas de dissipação da energia do escoamento (EDE)

(...Conclusão)

Tipo de estrutura	Aplicação comum	Condições do escoamento à entrada da EDE	Nível da água a jusante (<i>taiwaater</i> , T_w)	Observações	Fonte
Bacia de dissipação do tipo WES	A jusante de bueiros (<i>culvert</i>)	$\frac{Q_d}{D^{5/2}} \leq 2,90 \frac{h_f}{D} \left(\frac{L_b}{D} \right)^{0,40(D/h_f)^{1/3}}$	-	<ul style="list-style-type: none"> - Esta solução difere da bacia de dissipação do tipo PWD por ter paredes laterais com um ângulo de divergência menor ($\sim 7^\circ$), e serem mais alongadas; - O leito da bacia é horizontal (não apresenta qualquer declividade); - Significado das variáveis: Q_d – vazão de dimensionamento do bueiro, D – diâmetro do bueiro; h_f – altura da água da jusante do bueiro (<i>taiwaater</i>, T_w); L_b – comprimento da bacia (<i>SD</i>). 	Argue (1961) Fletcher e Grace (1972) Martins e Pinheiro (2003)
Bacia de dissipação do tipo contra costa	A jusante de bueiros (<i>culvert</i>)	$h_o \leq 0,5D$ $F_r < 3,0$	Facultativo	<ul style="list-style-type: none"> - Preferencialmente para uso em áreas urbanas onde se existem canais com seção e percurso bem definidos; - Funciona melhor quando a altura do escoamento a saída (h_o) é $\leq 50\%$ da altura ou diâmetro do bueiro (D); - A eficiência na dissipação da energia melhora quando existe <i>taiwaater</i>. 	USDOT (2006)

Nota: dentre as EDE indicadas na tabela, apenas cinco (e.g. bacia de dissipação por Impacto, Enrocamento, PWD, WES e Contracosta) possuem aplicação limitada às condições fisiográficas que viabilizem a implantação da bacia com declividade suave (<25%).

Fonte: Mata-Lima, et al. (2015).

- tipo de geometria da seção (e.g. circular, retangular, trapezoidal);
- descrição da seção transversal e longitudinal: altura (D_0), largura (W_0), coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler (n) e declividade (S_0);
- características do escoamento: vazão de dimensionamento (Q_d), profundidade do escoamento à entrada da EDE (y_0, h_0); velocidade do escoamento à entrada da EDE (U_0) e número de Froude do escoamento à entrada da EDE (F_0).

O cálculo das características do escoamento em regime uniforme (h_0, U_0) deve ser efetuado pela equação de Manning-Strickler (equação 1). A vazão de projeto (Q), geralmente obtido pelo método racional (MATA-LIMA, 2007, 2006), utilizada para o dimensionamento da passagem hidráulica/bueiro (*culvert*) ou do canal de montante é a mesma a ser usada para o dimensionamento da estrutura de dissipação de energia (EDE).

$$Q = 1/n A R_h^{2/3} S_0^{1/2} \quad (1)$$

onde: Q - vazão [m^3/s]; n - coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler [$m^{-1/3}s$]; A - área da seção transversal do escoamento [m^2]; R_h - raio hidráulico do escoamento [m]; S_0 - declividade do canal ou coletor [m/m].

Após conhecer as características do escoamento no canal de montante, torna-se necessário conhecer as características do escoamento no canal/meio receptor (nível de água a jusante, T_w , e velocidade do escoamento, U_n), de modo a comparar as duas situações, para auxiliar no processo de tomada de decisão visto que a velocidade e o número de Froude do escoamento após as realizações

de obras de engenharia não podem superar as condições preexistentes (antes da realização da obra).

Se as características do escoamento (velocidade e a altura do escoamento) à saída da passagem hidráulica forem aproximadamente iguais às características do escoamento do canal/meio receptor, geralmente, não é necessário implantar estruturas de dissipação de energia (e.g. USDOT, 2006). Caso sejam consideravelmente superiores, deve colocar-se dispositivos de dissipação de energia do escoamento (EDE).

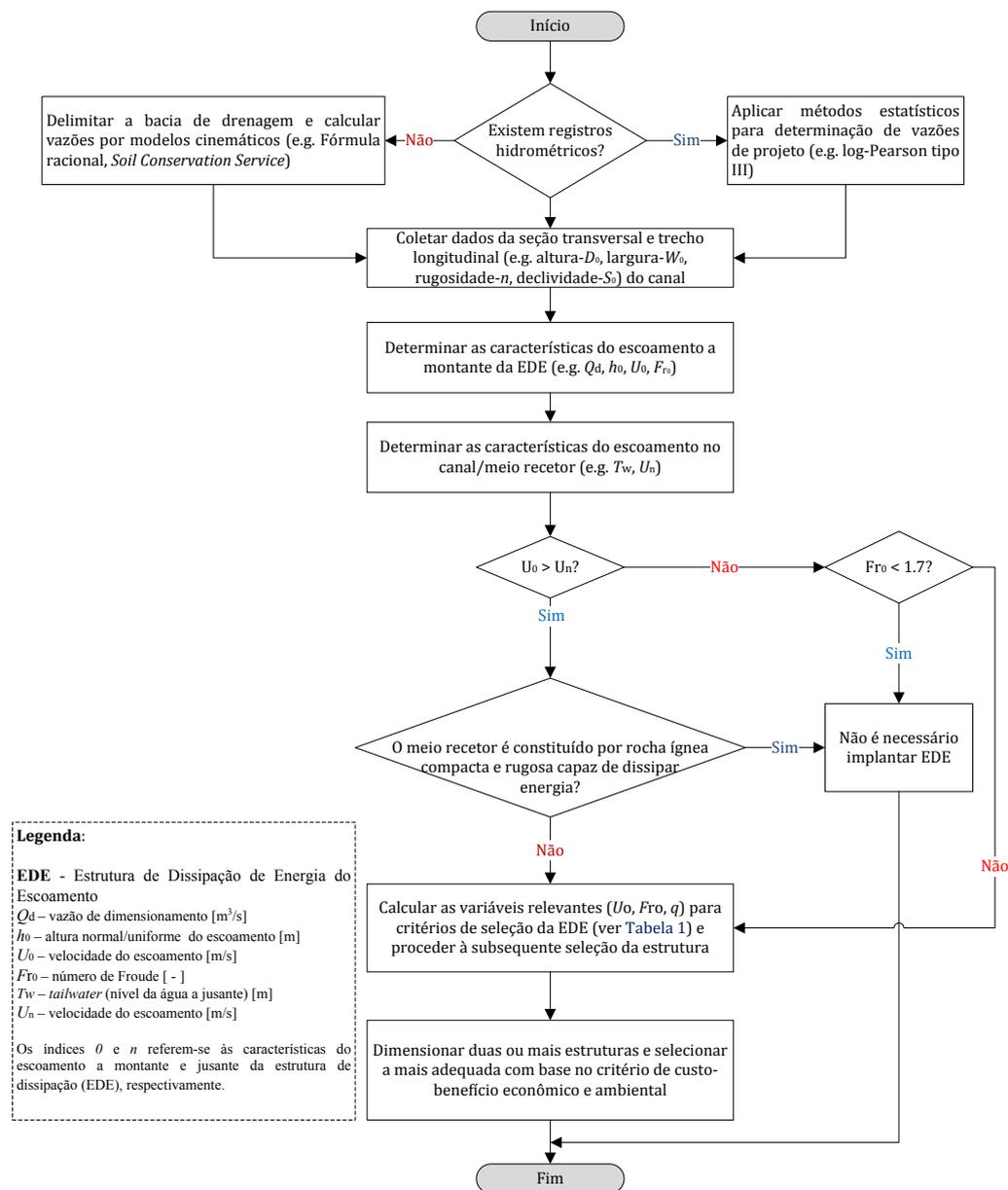
Em caso de necessidade de implantação de EDE, devem avaliar-se os dados obtidos no estudo das características do escoamento que antecedem a estrutura, as características do local de implantação, e comparar com as condições de uso das estruturas de dissipação descritas na seção 2 e sintetizadas na tabela 1. Desta forma, deve-se dimensionar duas ou mais soluções que se adaptem aos dados analisados anteriormente, permitindo uma adequada seleção da solução de dissipação de energia, tendo em conta a melhor combinação de custo vs benefício na redução da velocidade, garantindo a segurança da estrutura.

A figura 3 apresenta um fluxograma que sintetiza o procedimento para seleção e dimensionamento de Estruturas de Dissipação de Energia do Escoamento (EDE).

Uma vez dimensionada a estrutura de dissipação de energia, importa também dimensionar o enrocamento de proteção contra erosão a ser localizado a jusante da EDE. Esta situação justifica-se uma vez que parte da energia é dissipada a jusante da EDE e o enrocamento evita o desenvolvimento de cavidades de erosão que, em casos extremos, podem provocar o colapso da estrutura.

Propuseram-se equações empíricas para o cálculo do diâmetro médio do

Figura 3 - Fluxograma com descrição sequencial do procedimento para seleção e dimensionamento das estruturas de dissipação de energia do escoamento.



Fonte: Mata-Lima, H. et al. (2014).

Nota: os métodos racional e do Soil Conservation Service (SCS) já estão amplamente descritos em trabalhos anteriores (e.g. PAZ-PELLAT, 2009; MATA-LIMA et al, 2006, 2007; PRUSKI et al. 2001) e, por essa, razão não foram incluídos neste artigo.

enrocamento com base nas características do escoamento (e.g. velocidade, número de Froude – Fr) à saída da estrutura de dissipação de energia (EDE). Por conseguinte, e tendo em consideração que o enrocamento é relativamente acessível em termos econômicos, propõe-se a seguinte equação combinada para o cálculo do diâmetro mais adequado para o enrocamento:

$$D_{50} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{0.68U^2}{g\gamma_w} \\ 0.2D \left(\frac{Q}{\sqrt{g}D^{2.5}} \right)^{4/3} \left(\frac{D}{T_w} \right), \text{ se a passagem hidráulica for circular} \\ 1.1 \left(h_1 \left(\frac{(Fr + 2.2)}{10.2} \right)^{2.0} \right), \text{ com } Fr = \frac{U}{\sqrt{gh_m}} \end{array} \right. \quad (3)$$

onde: D_{50} – diâmetro do enrocamento a ser adotado [m]; U – é a velocidade média do escoamento [m/s]; g – aceleração da gravidade [m/s^2]; γ_w, γ_s – são respectivamente o peso específico da água [$9800 \text{ N}\cdot\text{m}^{-3}$] e do material rochoso [$26500 \text{ N}\cdot\text{m}^{-3}$]; D – diâmetro da passagem hidráulica [m]; Q – vazão do escoamento [m^3/s]; T_w – altura da água a jusante da estrutura (*tailwater depth*, em inglês) [m]; Fr – número de Froude do escoamento à entrada [-]; h_1 – altura do escoamento à entrada da estrutura de dissipação [m]; h_m – altura média do escoamento.

O diâmetro do enrocamento a adotar (D_{50}) será o valor máximo de uma das três equações que compõem a equação 1, sendo que correspondem, na ordem decendente, às equações propostas por Richardson et al. (1990), Fletcher e Grace (1972) e Rice e Kadavy (1992).

Blocos de concretos articulados (*articulated concrete blocks* – ACB) correspondem a uma solução que pode ser usada em substituição de enrocamento (HCFCD, 2001; USDA, 2007). Porém, além

de ser mais onerosa, é frequente surgirem problemas de desprendimento dos blocos de concreto no leito do canal que, por sua vez, requer uma manutenção frequente.

Importa frisar que, apesar do procedimento ilustrado na figura 2 dispensar a implantação de EDE quando existe rocha ígnea compacta para dissipar a energia do escoamento, deve-se adotar um plano de monitoramento para controlar a degradação da rocha por agentes de meteorização (e.g. água, temperatura) visto que pode ser desencadeada uma erosão progressiva.

Considerações Finais e Recomendações

As estruturas de dissipação de energia são fundamentais para reduzir a velocidade (e o número de Froude) do escoamento em canais declivosos, minimizando a ocorrência de erosão no leito e nas margens, visando garantir a integridade dos ecossistemas, bem como mitigar os impactos socioeconômicos a jusante (e.g. degradação de infraestruturas e eventuais vítimas humanas).

O principal motivo associado ao colapso das estruturas de dissipação de energia do escoamento (EDE) diz respeito à erosão que pode ocorrer nas imediações (sobretudo a jusante das estruturas) devido à insuficiente capacidade para conter o escoamento e assegurar uma eficiente dissipação de energia dentro dos limites da estrutura. Esta situação enfatiza a importância de selecionar e dimensionar EDE adequada para as condições geomorfológica, hidrológica e hidráulica de cada caso em análise.

A análise efetuada às diferentes estruturas de dissipação de energia permitiu sintetizar um conjunto de critérios de seleção e dimensionamento que asseguram

a eficiência e segurança das estruturas, prolongando o tempo de vida útil.

Dentre os fatores determinantes para seleção e dimensionamento de EDE destacam-se os seguintes: (1) enquadramento biofísico (e.g. tipo de maciço terroso ou rochoso, tipo de infraestruturas existentes a jusante, existência ou não de um nível de água permanente a jusante – T_w); (2) declividade da encosta e canal (natural e artificial); (3) número de Froude e vazão do escoamento; e (4) geometria da seção transversal do escoamento que aflui à EDE.

De um modo geral, para escoamentos com número de Froude elevados, as soluções mais adequadas são as bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico com acessórios (e.g. USBR tipo III e SAF), pois o ressalto hidráulico é um ótimo mecanismo de dissipação de energia do escoamento. Acrescenta-se ainda que, conforme referido na seção 2, estudos anteriores indicam que a bacia do tipo SAF conduz a custos financeiros inferiores quando comparados com os da USBR tipo III.

Em locais que apresentam declividades suaves, é viável implantar bacias de dissipação por ressalto hidráulico simples (sem acessórios) e de dimensionamento expedito (e.g. WES, PWD, enrocamento) contanto que se respeitem os critérios estabelecidos na tabela 1 e figura 2. A bacia de dissipação por enrocamento, quando aplicável, deve ser priorizada devido ao seu

baixo custo econômico e menor perturbação ambiental comparativamente com as estruturas de concreto.

Em síntese, nas regiões de orografia complexa as EDE que satisfazem os critérios de seleção são as bacias de dissipação por ressalto hidráulico (livre ou com acessórios), rampa de blocos, estruturas de queda abrupta, e estruturas de queda em degraus. Por outro lado, o transporte de material sólido é uma das principais limitações para a aplicação das bacias de dissipação por ressalto hidráulico e rampas de blocos, pois os acessórios e laje de fundo das bacias de dissipação por ressalto hidráulico acabam por deteriorar-se devido à abrasão. Nas rampas de blocos, os blocos destroem-se e os espaçamentos horizontais entre blocos ficam obstruídos devido à acumulação de detritos. Assim, as estruturas deixam de ser eficientes na dissipação de energia do escoamento, tornando-se ineficazes. Por esta razão, é necessário adotar medidas complementares para a proteção das EDE (e.g. criando sistemas de retenção de sedimentos a montante), bem como o monitoramento e manutenção periódica.

Agradecimento

O primeiro autor agradece ao CNPq pelo apoio concedido no âmbito do projeto "Geo-environmental modelling ..." (Processos 407507/2012-4 & 401425/2012-6) que estimulou a realização deste artigo.

Referências

ADOT. **Alaska Highway Drainage Manual**. Alaska Department of Transportation (ADOT), Chapter 16: Erosion and Sediment Control, Alaska, 2001.

ARGUE, O. R. Stilling basins and energy dissipation. **Proc. Am. Soc. Civil Engrs., Symposium**, Series 5, June, p.19-33, 1961.

BEICHLEY, G. L. Hydraulic design of stilling basin for pipe or channel outlets. **A Water Resources Technical Publication**, Research Report N° 24, United States Bureau of Reclamation, U.S. Department of the Interior, Denver, 1978.

BLAISDELL, F.W. **The SAF Stilling Basin**. A structure do dissipate the destructive energy in high velocity flow from spillways. Agricultural Handbook N° 156, Agricultural Research Service and St. Anthony Falls Laboratory, University of Minnesota, Minneapolis, 1959.

CARMO, R. L.; ANAZAWA, T. M. Mortalidade por desastres no Brasil: o que mostram os dados. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 19, n. 9, p. 3669-3681, 2014.

CHANSON, H. Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. **Journal of Hydraulic Research**, v. 32, n. 2, p. 213-218, 1993.

CHANSON, H. Hydraulics of stepped spillways and cascades. **International Conference on Hydraulics in Civil Engineering, National Conference Publications**, n. 94/1, p. 217-222, 1994.

CHANSON, H.; TOOMBES, L. Energy dissipation in stepped waterway. CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRAULIC RESEARCH, 27., 1997, California. **Proceedings...** California: [S.I.], 1997. p. 595-600.

CHANSON, H. **The hydraulics of open channel flow: an introduction**. 2. ed. Oxford: Elsevier publications, Oxford, 2004.

CHAUDHRY, M. H. **Open-channel flow**. Columbia, USA: Springer Science Business Media, 2008.

CHOW, V.T. **Open channel hydraulics**. New York, USA: McGraw-Hill Book Company, 1959.

COLLIER, C. G. Flash flood forecasting: what are the limits of predictability? **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.133, p.3-23, 2007.

DONNELLY, C. A.; BLAISDELL, F.W. **Straight drop spillways stilling basin**. University of Minnesota, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, Technical paper, n. 15, Series B, 1954.

FATHI-MOGHADAM, M.; HAGHIGHIPOUR, S.; LASHKARARA, B.; AGHTOUMAN, P. Reduction of stilling basin length with tall end sill. **Journal of Hydrodynamics**, Serie. B, v. 23, n. 4, p. 498-502, 2011.

FCDMC. **Drainage design Manual**. Flood Control District of Maricopa County (FCDMC), v. 2, Chapter 7: Hydraulic Structures, Maricopa County, Arizona, 1996.

FEMA. **Technical Manual: Outlet works energy dissipators**. Best Practices for Design, Construction, Problem Identification and Evaluation, Inspection, Maintenance, Renovation, and Repair. FEMA P-679. Federal Emergency Agency (FEMA), 2010.

FLETCHER, B. P.; GRACE, J. L. **Practical guidance for estimating and controlling erosion at culvert outlets**. Misc. Paper H-72-5. U.S. Army Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 1972.

HAAS, J.; BAN, Y. Urban growth and environmental impacts in Jing-Jin-Ji, the Yangtze, River Delta and the Pearl River Delta. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 30, p. 42-55, 2014.

HCFCDC. **Design Manual for Articulating Concrete Block Systems**. Houston, Texas: Harris County Flood Control District, 2001.

IPCC. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; MILLER, H. L. (Ed.)]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007.

IPCC. **Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation**. A special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

IPCC. **Climate change 2014: impacts, adaptation and vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

KNAPEN A.; POESEN, J.; GOVERS, G.; GYSSELS, G.; NACHTERGAELE, J. Resistance of soils to concentrated flow erosion: a review. **Earth-Science Reviews**, v. 80, n. 1-2, p. 75-109, 2007.

KUMAR, D. S.; ARYA, D. S.; VOJINOVIC, Z. Modeling of urban growth dynamics and its impacts on surface runoff characteristics. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 41, p. 124-135, 2013.

LENCASTRE, A. **Hidráulica geral**. Edição do Autor, Lisboa, 1996.

LESKENS, J. G.; BRUGNACH, M.; HOEKSTRA, A. Y.; SCHUURMANS, W. Why are decisions in flood disaster management so poorly supported by information from flood models? **Environmental Modelling & Software**, v. 53, p. 53-61, 2014.

LIRA, C.; LOUSADA, M.; FALCÃO, A. P.; GONÇALVES, A. B.; HELENO, S.; MATIAS, M.; PEREIRA, M. J.; PINA, P.; SOUSA, A. J.; OLIVEIRA, R.; ALMEIDA, A.B. The 20 February 2010 Madeira Island flash-flood: VHR satellite imagery processing in support of landslide inventory and sediment budget assessment. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 13, p.709-719, 2013.

MARTINS, F.; PINHEIRO, A. Passagens hidráulicas. Dimensionamento hidrológico e hidráulico e estimativa de custos assistidos por computador. **Recursos Hídricos**, v. 24, n. 3, p.37-51, 2003.

MATA-LIMA, H.; SILVA, E.S.; RAMINHOS, C. Bacias de retenção para gestão do escoamento: métodos de dimensionamento e instalação. **Rem: Revista Escola de Minas, Ouro Preto**, v. 59, n. 1, p. 97-109, 2006.

MATA-LIMA, H.; CARVALHO, J.; GONÇALVES, M.; CAETANO, H.; MARQUES, A.; RAMINHOS, C. Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso. **Rem: Revista Escola de Minas, Ouro Preto**, v. 60, n. 3, p. 525-536, 2007.

MATA-LIMA, H.; ALVINO-BORBA, A.; MATA-LIMA, A.; PINHEIRO, A.; ALMEIDA, J. A. Impactos dos desastres naturais nos sistemas ambiental e socioeconômico: o que faz a diferença? **Ambiente & Sociedade**, v. 16, n. 3, p.45-64, 2013.

MATA-LIMA, H.; SILVA, F. N.; ALVINO-BORBA, A.; ALMEIDA, J. A. Environmental management in organizations: Is ISO 14001 implementation growing fast enough to improve environmental conditions in the metropolitan areas of developing countries? **Environmental Quality Management**, v. 24, n. 2, p. 61-77, 2014.

MATOS, J.S. **Emulsão de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degraus**. 1999. [s.p]. Tese (Doutoramento em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1999.

MEIRELES, I.; MATOS, J.; MELO, J. Altura piezométrica e energia específica do escoamento deslizante sobre turbilhões no pé de descarregadores de cheias em degraus. **Revista Recursos Hídricos**, v. 26, n. 1, p. 7-15, 2005.

NOVAK, P.; MOFFAT, A.I. B.; NALLURI, C. E.; NARAYANAN, R. **Hydraulic structures**. Fourth Edition, Oxon, London: Taylor & Francis Group, 2007.

NRCS. **Gated Outlet Appurtenances**. Earth Dams. Technical Release TR-46, Natural Resource Conservation Service, 1969.

PATHIRANA, A.; DENEKEW, H. B.; VEERBEEK, W.; ZEVENBERGEN, C.; BANDA, A. T. Impact of Urban Growth-driven Landuse Change on Microclimate and Extreme Precipitation – A Sensitivity Study. **Atmospheric Research**, v. 138, p. 59-72, 2014.

PAZ-PELLAT, F. Mitos y Falacias del Método Hidrológico del Número de Curva del SCS/ NRCS. **Agrociencia**, v. 43, n. 5, p. 521-528, 2009.

PETERKA, A. J. **Hydraulic design of stilling basin and energy dissipators**. A Water Resources Technical Publication, Engineering Monograph N° 25, United States Bureau of Reclamation, U.S. Department of the Interior, Denver, 1978.

PRUSKI, F. F.; GRIEBELER, N. P.; SILVA, D. D. Comparação entre dois métodos para a determinação do volume de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 2, p. 403-420, 2001.

PWUD. **Drainage criteria Manual**. Public Works and Utilities Department (PWUD), Chapter 7: Energy dissipaters. Lincoln, 2004.

RICE, C. E.; KADAVY, K. C. Riprap Design for SAF Stilling basins. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE)**, v. 35, n. 6, p. 1817-1825, 1992.

RICE, C. E.; KADAVY, K. C.; ROBINSON, K. M. Franklin County Lake Principal Spillway, Mississippi-Physical Model Study Results, ASAE Paper No. 992041, CA. Julho 18-21 de 1999, **Annual International Meeting**, Toronto, Ontario, 1999.

RICHARDSON, E. V.; SIMONS, D. B.; JULIEN, P. **Highway in the River Environment**. FHWA HI-90-016, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., 1990.

SDDOT. **Drainage Manual**. South Dakota Department of Transportation (SDDOT), Office of Bridge Design, Chapter 11: Energy Dissipators, South Dakota, 2011.

TDOT. **Drainage Manual**. Tennessee Department of Transportation (TDOT), Design Division, Chapter 9: Energy Dissipators, Tennessee, 2011.

UDFCD. Urban Drainage and Flood Control District. **Urban Storm Drainage**. v. 2, Criteria Manual, Chapter 8: Hydraulic structures, Denver, Colorado, 2008.

USACE. **Impact-Type Energy Dissipator for Storm-Drainage Outfalls Stilling Well Design**. U.S. Army Corps of Engineers (USACE), Technical Report N^o. 2-620 March, WES, Vicksburg, Mississippi, 1963.

USBR. **Design of small dams**. A Water Resources Technical Publication, Third Edition, United States Bureau of Reclamation, U.S. Department of the Interior, Washington, D.C., 1987.

USBR. **Overtopping of walls and stilling basin failure**. United States Bureau of Reclamation (USBR), Instruction Material of the Training Course of Best Practices and Risk Methodology, Chapter 21, USA, 2010.

USDA. **Gated Outlet Appurtenances - Earth Dams**. United States Department of Agriculture (USDA), Soil Conservation Service, Engineering Division, Technical Release N^o 46, Section F: Outlet Structures, Portland, Oregon, 1969.

USDA. **Use of Articulating Concrete Block**. Revetment Systems for Stream Restoration and Stabilization Projects. United States Department of Agriculture (USDA). Technical Supplement 14L. Part 654, National Engineering Handbook, 2007.

USDHS. United States of Homeland Security. **The National Dam Safety Program**. Workshop on Outlet Works, Section 4, 25-27 de Maio de 2004, Denver, Colorado, 2004.

USDOT. **Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels**. Hydraulic Engineering Circular N^o 14, Third Edition, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 2006.

USDOT. **Introduction to Highway Hydraulics**. Hydraulic Design Series N^o 4, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 2008.

XIA, J.; FALCONER, R. A.; LIN, B.; TAN, G. Numerical assessment of flood hazard risk to people and vehicles in flash floods. **Environmental Modelling & Software**, v. 26, p.987-998, 2011.

YIN, H.; LI, C. Human impact on floods and flood disasters on the Yangtze River. **Geomorphology**, v. 41, n. 2.3, p. 105-109, 2001.

YNOUYE, C. E. N.; SOUSA Jr., W. C.; FREITAS, D. M.; SIMÕES, E. Modelling the spatial dynamics of urban growth and land use changes in the north coast of Sao Paulo, Brazil. **Ocean & Coastal Managem**, v. 108, p. 147-157, 2015.