



PLANILHA ELETRÔNICA PARA AUXÍLIO NO DIMENSIONAMENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS DE DISSIPACÃO DE ENERGIA

*Gabriel Furtado*¹; *Jacinto de Assunção Carvalho*²; *Karina Vilela Rodrigues*³ & *Michael Silveira Thebaldi*⁴

RESUMO – escoamentos com altas velocidades apresentam elevado poder erosivo com capacidade de causar grandes danos às estruturas hidráulicas ou às margens e leitos de canais, justificando a necessidade da instalação de obras de dissipação de energia a jusante de comportas de fundo, extravasores de barragens e no final de tubulações. As condições hidráulicas e topográficas do local influenciam diretamente na escolha do tipo de estrutura de dissipação e no seu dimensionamento, assim, uma série de análises e cálculos é necessária para garantir a efetividade da obra. O uso de ferramentas eletrônicas pode ser um grande aliado nesse processo, assim, o objetivo deste trabalho foi desenvolver uma planilha eletrônica para facilitar a escolha da estrutura de dissipação mais adequada às necessidades do usuário, e auxiliar em seu dimensionamento. Foi utilizada então a plataforma Excel e uma programação modular desenvolvida em linguagem VBA, para produzir uma planilha eletrônica com uma interface simples e intuitiva. Os resultados obtidos com o programa foram comparados aos publicados de diversos autores, e verificou-se equivalência entre eles, certificando um dimensionamento efetivo e assistência ao usuário na escolha da estrutura.

ABSTRACT– High-speed flows have a high erosive power with the capacity to cause great damage to hydraulic structures or to the margins and beds of channels, justifying the need for the installation of hydraulic structures for energy dissipation downstream of bottom floodgates, dam spills and at the end of pipes. The hydraulic and topographic conditions of the place directly influence the choice of the dissipation structure type and its design, thus, a series of analyzes and calculations are necessary to guarantee the structure effectiveness. The use of electronic tools can be a great ally in this process, thus, the objective of this work was to develop an electronic spreadsheet to facilitate the choice of the most suitable dissipation structure to the user's needs, and assist in its design. For this, the Excel platform and modular programming developed in VBA language were used to produce an electronic spreadsheet with a simple and intuitive interface. The results obtained with the program were compared to the published results of several authors, and there was an equivalence between them, certifying an effective design and assistance to the user when choosing the structure.

Palavras-Chave – Energia hidráulica; Estruturas de dissipação; Módulos de programação.

INTRODUÇÃO

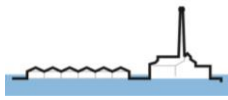
Obras hidráulicas de dissipação de energia são extremamente necessárias, uma vez que um escoamento que atinge altas velocidades adquire grande poder erosivo. Dessa forma as estruturas de dissipação de energia (EDE) devem ser instaladas, por exemplo, na saída de passagens hidráulicas e

1) Universidade Federal de Lavras, Caixa Postal 3037, Campus Universitário, 37200-900, Lavras – MG, Brasil, (35) 98418-7225, gabrielfurtadocdm@estudante.ufla.br

2) Universidade Federal de Lavras, Caixa Postal 3037, Campus Universitário, 37200-900, Lavras – MG, Brasil, (35) 991923042, jacintoc@ufla.br

3) Universidade Federal de Lavras, Caixa Postal 3037, Campus Universitário, 37200-900, Lavras – MG, Brasil, (35) 98819-0815, karina.vilela02@gmail.com

4) Universidade Federal de Lavras, Caixa Postal 3037, Campus Universitário, 37200-900, Lavras – MG, Brasil, (37) 98406-3707, michael.thebaldi@ufla.br



tubulações, após vertedores de barragens, na saída de comportas de fundo e em transições de canais com leitos diferentes, garantindo a diminuição da energia cinética do escoamento, minimizando a capacidade erosiva da água e os riscos deterioração do leito e margens do canal a jusante (Mata-Lima *et al.*, 2016).

Definir o tipo de EDE mais adequada para um determinado caso e dimensioná-la buscando máxima eficiência no processo de dissipação de energia são os aspectos de maior dificuldade encontrados na construção desse tipo de obra hidráulica. O processo de dimensionamento de uma EDE passa por uma análise de diversos parâmetros, dentre os principais pode-se destacar as condições do escoamento à montante e jusante, a seleção do tipo de estrutura, as condições topográficas do local e o tipo de revestimento do canal a jusante, além dos aspectos econômicos e ambientais (Chanson, 2004; Mata-Lima *et al.*, 2016).

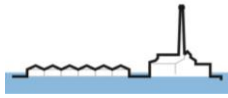
Os cálculos relacionados ao dimensionamento de uma EDE seguem, muitas vezes, metodologias que envolvem muitas equações e análise de valores limitantes recomendados por diversos autores, além disso, pode ser necessário que esses cálculos sejam repetidos, devido a condições de escoamentos diferentes que venham a transpor a estrutura de dissipação ou a fatores topográficos que restringem a instalação da obra dimensionada. Nesse cenário, fazer o uso de softwares ou planilhas eletrônicas que proporcionem maior eficiência e produtividade na tomada de decisões e execução de dimensionamentos é uma alternativa extremamente viável e amplamente difundida em diversos ramos da engenharia.

Diante disso, o objetivo deste trabalho foi fornecer uma ferramenta eletrônica que facilite e torne a escolha e os cálculos relacionados ao dimensionamento de alguns tipos de dissipadores de energia mais comumente utilizados mais simples e interativa, seguindo as proposições e equações descritas por diversos autores.

MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste estudo optou-se por uma programação feita de modo que suas partes ou módulos trabalhem de forma independente e executando tarefas específicas, chamada de programação modular. Dessa forma foi escolhida a plataforma Excel, pois trata-se de um software muito difundido no meio acadêmico e profissional, e através dela seria possível a criação de uma interface amigável e simples de ser entendida, utilizando as ferramentas disponíveis na guia do desenvolvedor. Além disso, tendo a possibilidade da criação de rotinas ou macros de cálculos através da programação VBA (*Visual Basic for Applications*) disponível na plataforma.

Assim, cada módulo é formado por uma série de comandos responsáveis por fazer a leitura dos dados, os cálculos necessários e imprimir os resultados junto a interface criada. As rotinas e sub-



rotinas desenvolvidas dentro de cada módulo permitem que possíveis alterações, correções e complementos sejam realizados com maior facilidade no código.

A execução correta de cada módulo depende apenas dos dados de entrada inseridos pelo usuário. Assim, quando estes são corretamente inseridos, basta clicar na tecla configurada de dimensionamento, e os resultados são impressos na tela.

O fluxograma apresentado na Figura 1 retrata de forma simples como o programa foi elaborado. No início tem-se as abas de apresentação, feitas com o intuito de dar instruções ao usuário sobre a planilha e as estruturas de dissipação. Após a leitura das instruções o usuário é capaz de seguir para a escolha da estrutura desejada, onde insere os dados de entrada requeridos e aperta o botão “Dimensionar”, obtendo os resultados do dimensionamento. A partir disso, o usuário faz sua interpretação dos resultados e se conveniente ele pode fazer novos dimensionamentos, após apertar o botão “Limpar”, ou pode voltar e escolher uma nova estrutura.

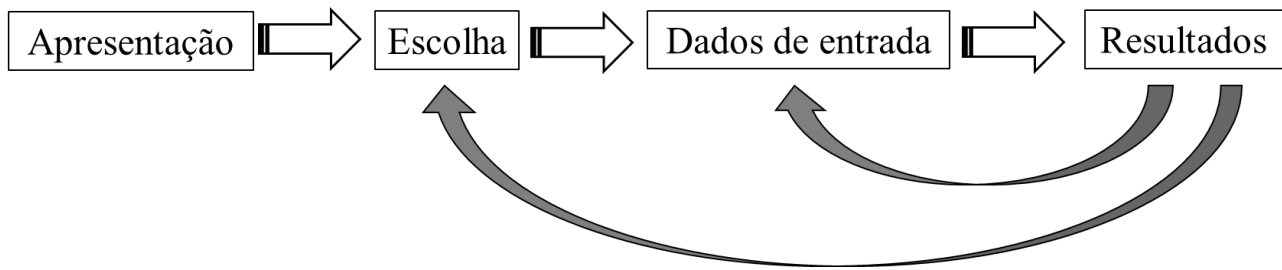
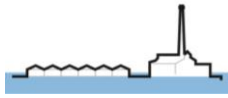


Figura 1 – Fluxograma geral.

O programa foi elaborado para oferecer o dimensionamento das bacias de dissipação por ressalto USBR (*United States Bureau of Reclamation*) I, II, III, IV, seguindo as equações e orientações propostas por Carvalho (2009), SAF (*Saint Anthony Falls – Soil Conservation Service*), utilizando o equacionamento de Thompson e Kilgore (2006), PWD (*Public Work Department – Austrália*), seguindo o dimensionamento proposto por Argue (1961), e WES (*Waterways Experiment Station – United States Army Corps of Engineers*), calculada de acordo com o dimensionamento apresentado por Fletcher e Grace (1972).

Além das bacias de dissipação por ressalto, o programa também disponibiliza o dimensionamento das bacias de dissipação por impacto ou macrorugosidade USBR VI, IX, utilizando os dimensionamentos propostos por Peterka (1978) e Carvalho (2009), e tapete de enroncamento, calculado de acordo com o equacionamento apresentado por Thompson e Kilgore (2006). Além disso, de bacias de dissipação por queda simples, seguindo o dimensionamento de Thompson e Kilgore (2006), e dissipação por quedas sucessivas, utilizando o equacionamento apresentado por Chanson (1994).

Além disso, o programa oferece auxílio na determinação dos dados de entrada necessários para o cálculo das estruturas de dissipação USBR I, II, III e IV, na aba “Cota da bacia”, calculada de acordo



com as equações e orientações propostas por Carvalho (2009), com as opções “Caso 1”, para a situação em que são conhecidas apenas as condições de escoamento na saída do vertedor e a cota onde deve ser instalada a bacia de dissipação, e “Caso 2”, para a situação em que são conhecidas as condições de escoamento na saída do vertedor e no canal após a bacia de dissipação, a jusante do ressalto hidráulico.

Uma maneira de validar os dimensionamentos realizados com o auxílio do programa é comparar seus resultados com os de outros autores. Dessa forma, foram utilizados os resultados do dimensionamento obtidos por meio do programa desenvolvido com aqueles apresentados em publicações e livros de alguns autores citados como referência neste trabalho. Foram simuladas situações com os mesmos dados de entrada utilizados pelos autores citados, sendo que, em algumas situações, foram feitas conversões para o sistema internacional de unidades.

Todas as variáveis de entrada e saída que estão apresentadas por suas siglas neste trabalho encontram-se na planilha, e em cada aba de dimensionamento é possível obter o esclarecimento sobre suas definições.

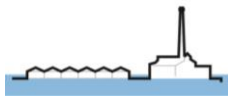
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a estrutura de dissipação por ressalto hidráulico do tipo USBR I foi utilizado o exemplo extraído de Peterka (1978) que tem seus dados de entrada Y_1 igual a 1,71 m (5,6 ft) e V_1 igual a 25,91 m/s (85 ft/s). A validação dos resultados é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados para validação do dimensionamento - USBR I.

Dados de saída	Resultados segundo Peterka (1978)	Resultados obtidos pelo programa
Y_2	47,60 ft ou 14,51 m	14,48 m
V_2	Não calculado	3,06 m/s
Fr_2	0,21	0,26
YR	42,00 ft ou 12,80 m	12,77 m
LI	292,00 ft ou 89,00 m	88,11 m
ϵ (%)	58,00	58,37

Na Tabela 1 é possível observar uma boa proximidade dos resultados, diferenciando-se apenas por algumas casas decimais, o que pode ser atribuído aos arredondamentos utilizados pelo programa e pelo autor. Por se tratar de obras com grandes extensões em suas dimensões, esses centímetros de diferença encontrados não devem representar riscos ou diminuição da efetividade do objetivo principal da estrutura que é a dissipação de energia.



Ainda na Tabela 1 observa-se que a variável V_2 aparece como “Não calculado”, isso significa que essa variável não foi apresentada pelo autor, no entanto, optou-se por exibir todos os parâmetros obtidos no programa.

Para validação do dimensionamento da bacia de dissipação por ressalto do tipo USBR II foi utilizado outro exemplo de Peterka (1978). Os dados de entrada utilizados no programa foram Y_1 igual a 1,35 m (4,44 ft) e V_1 igual a 32,97 m/s (108,2 ft/s). Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados para validação do dimensionamento - USBR II.

Dados de saída		Resultados segundo Peterka (1978)	Resultados obtidos pelo programa
	Y_2	54,60 ft ou 16,64 m	16,64 m
	V_2	Não calculado	2,67 m/s
	Fr_2	Não calculado	0,21
	Y_R	50,16 ft ou 15,29 m	15,29 m
	L_{II}	234,00 ft ou 71,32 m	71,55 m
	ϵ (%)	Não calculado	70,04
Blocos de queda	Altura, largura e espaçamento	4' 6" ou 1,37 m	1,35 m
	Altura	11 ft ou 3,35 m	3,33 m
Soleira terminal dentada	Largura e espaçamento	8' 3" ou 2,51 m	2,50 m

Como observado na comparação de resultados do dimensionamento da bacia USBR I, os resultados apresentados na Tabela 2 são muito próximos ou iguais. Novamente, as pequenas diferenças se devem a arredondamentos realizados e não devem afetar a dissipação de energia na estrutura.

O dimensionamento da bacia do tipo USBR III foi comparado aos dados retirados de Carvalho (2009). Em que, a mesma análise feita para as USBR I e II pode ser utilizada para a USBR III, já que os resultados apresentados também foram extremamente próximos ou iguais. As diferenças encontradas não devem afetar de forma relevante a dissipação de energia realizada pela estrutura.

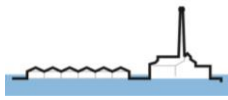
Para validar a o dimensionamento da bacia tipo SAF foi utilizado o exemplo de Thompson e Kilgore (2006). Os dados iniciais utilizados no dimensionamento foram: $D = 1,80$ m; $Q = 11,80$ m³/s; $Z_0 = 30,50$ m; $Y_1 = 0,348$ m; $V_1 = 10,40$ m; $Z_1 = 27,80$ m; $z = 0$; St e $S_s = 0,50$ e $S_0 = 0,065$. A Tabela 3 apresenta os resultados encontrados.



Tabela 3 – Resultados para validação do dimensionamento - SAF.

Dados de saída		Resultados segundo	Resultados obtidos pelo programa
		Thompson e Kilgore (2006)	
	Wb ₁ (m)	3,00	2,65
	Wb ₂ (m)	3,00	2,65
	Wb ₃ (m)	3,00	2,65
	Lt (m)	5,40	5,40
	Lb (m)	3,20	3,22
	Ls (m)	3,80	3,79
	L _{SAF} (m)	12,40	12,41
	Altura (m)	0,35	0,35
Blocos de queda	Largura e espaçamento (m)	0,25	0,26
	Nº de blocos	6,00	5,00
	Altura (m)	0,35	0,35
	Largura e espaçamento (m)	0,25	0,26
Blocos amortecedores	Distância entre os blocos de queda e amortecedores (m)	1,10	1,07
	Nº de blocos	6,00	5,00
	Folga (m)	Não calculado	0,13
Soleira Terminal	Altura (m)	0,20	0,20

A principal diferença apresentada é relativa as larguras distribuídas ao longo da bacia. Como inicialmente foi atribuído um valor de $z = 0$, a estrutura tem formato retangular e os valores de Wt_1 , Wt_2 e Wt_3 são iguais. No entanto, o exemplo apresentado por Thompson e Kilgore (2006) tem a largura também dada como um parâmetro inicial, enquanto que no programa ela foi calculada, justificando essa diferença apresentada na largura da bacia e também no número de blocos de queda e blocos amortecedores, uma vez que uma bacia mais estreita necessita de menos blocos. Excetuando esses parâmetros, todas as outras dimensões são muito similares, o que serve de indício para afirmar que mesmo com as pequenas diferenças apresentadas a bacia tem sua efetividade garantida.



Para comparação dos resultados de dimensionamento de uma bacia USBR IX foi utilizado um exemplo apresentado por Thompson e Kilgore (2006), em que os dados de entrada utilizados foram: $Q = 2,80 \text{ m}^3/\text{s}$; $b = 1,20 \text{ m}$; $H = 8,0 \text{ m}$ e $z = 3,0$. Os resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados para validação do dimensionamento - USBR IX.

Dados de saída	Resultados segundo Thompson e Kilgore (2006)	Resultados obtidos pelo programa
Altura do bloco (m)	0,66	0,66
Comprimento do topo do bloco (m)	Não calculado	0,25
Comprimento da base do bloco (m)	Não calculado	0,46
Largura e espaçamento entre blocos (m)	0,99	0,99
Distância entre as fileiras de blocos (m)	1,87	1,32
Altura das paredes laterais (m)	1,98	1,98
Comprimento da rampa (m)	25,30	25,30
Número de fileira de blocos (m)	13,00	18,50
V_0 , máx (m/s)	Não calculado	1,31

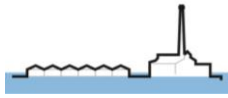
Na Tabela 4 é possível notar valores diferentes para o distanciamento entre as fileiras de blocos, essa diferença se dá porque o autor afirma que quanto menor a inclinação da rampa, maior pode ser o espaçamento entre as fileiras. Como é dado que $z = 3$, ele aumenta esse espaçamento entre as fileiras, o que gera a diminuição no número de fileiras.

Essa adaptação torna a bacia dimensionada pelos autores de menor custo que a dimensionada pelo programa, em contra partida, a rampa com menor espaçamento e mais fileiras de blocos aumenta significativamente a dissipação de energia do escoamento. O restante dos parâmetros é equivalente nos dois casos.

Para validar o dimensionamento realizado no programa para tapete de enrocamento foi utilizado o exemplo de Thompson e Kilgore (2006), os dados de entrada utilizados foram: $Q = 2,33 \text{ m}^3/\text{s}$; $D = 1,50 \text{ m}$ e $H_j = 0,50 \text{ m}$. Os resultados encontrados estão na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados para validação do dimensionamento - Tapete de enrocamento.

Dados de saída	Resultados segundo Thompson e Kilgore (2006)	Resultados obtidos pelo programa
D_{50} (m)	0,15	0,15
L_t (m)	6,00	6,00
W_{t1} (m)	Não calculado	4,50
W_{t2} (m)	8,50	8,50
E_t (m)	0,50	0,49



Os resultados apresentados na Tabela 5 são, em sua maioria, iguais ou com uma diferença mínima, garantindo que os dimensionamentos realizados são equivalentes e garantem um tapete de enrocamento eficaz na dissipação de energia.

Os resultados obtidos para o dimensionamento da bacia de dissipação por impacto do tipo USBR VI não foram comparados com exemplos da literatura, porém é possível validar o dimensionamento realizado pelo programa, pois todas as dimensões da bacia são dadas usando como referência valores tabelados retirados do estudo de Carvalho (2009).

Quanto aos demais dimensionamentos realizados, cota da bacia - caso 1 e caso 2, bacias de dissipação do tipo USBR IV, PWD e WES, e dissipação por queda simples e quedas consecutivas, mesmo não tendo seus resultados comparados ao de publicações de outros autores, todos passaram por revisões na programação junto a cálculos manuais utilizando dados de entrada hipotéticos.

CONCLUSÃO

Neste estudo foi possível observar que ferramentas computacionais, como a planilha eletrônica e a programação desenvolvida, podem facilitar o processo de dimensionamento por parte do usuário.

A interface criada mostrou ser de uso relativamente simples, necessitando de poucas teclas de comandos, exibindo diversas informações a respeito do modo de utilização do programa e auxílio ao usuário na escolha da EDE que mais se adequa às suas necessidades.

Os dimensionamentos apresentados por intermédio da planilha eletrônica foram satisfatórios, visto que, todas as comparações feitas com dados de outros autores garantiram a validade dos resultados, confirmando também a efetividade dos módulos de programação desenvolvidos.

Para contribuição na esfera acadêmica, foi deliberado o livre acesso à planilha denominada OHDE 1.0 por meio do endereço eletrônico: <http://www.deg.ufla.br/documentos/download>. Assim, o leitor pode beneficiar-se dos seus recursos.

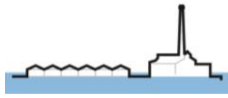
REFERÊNCIAS

ARGUE, J.R. (1961). “*Stilling basins and energy dissipation*”. Proc. American Society of Civil Engineering Symposium, series 5, pp. 19-33.

CARVALHO, J.de.A. (2009). *Obras hidráulicas*. Texto acadêmico 63. Editora UFLA, Lavras – MG, 266 p.

CHANSON, H. (1994). “*Hydraulics of nappe flow regime above stepped chutes and spillways*”. Australian Civil Engineering Transactions 36(1), pp. 69 – 76.

CHANSON, H. (2004). *The hydraulics of open channel flow: an introduction* (2 ed.). Elsevier Publications, Oxford-UK, 585 p.



FLETCHER, J.L.; GRACE, Jr. (1972). *Practical guidance for estimating and controlling erosion at culvert outlets*. Engineers Hydraulics Division U. S. Army Waterways Experiment Station, Vicksburg - US. 51 p.

MATA-LIMA, H.; AGUIAR, R.; ALVINO-BORBA, A.; JESUS, T.; ALMEIDA, J.A. (2016). “*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*”. *Ambiência* 12(4), pp. 933-953

PETERKA, A.J. (1978). *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*. United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, Denver - US. 222 p.

THOMPSON, P.L.; KILGORE, R.T. (2006). *Hydraulic design of energy dissipators for culverts and channels: Hydraulic Engineering Circular* (3 ed.). U. S. Department of Transportation, Denver – US, 287 p.