



GABRIEL FURTADO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLANILHA ELETRÔNICA
PARA AUXÍLIO NO DIMENSIONAMENTO DE OBRAS
HIDRÁULICAS DE DISSIPACÃO DE ENERGIA**

**LAVRAS-MG
2020**

GABRIEL FURTADO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLANILHA ELETRÔNICA PARA AUXÍLIO NO
DIMENSIONAMENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS DE DISSIPACÃO DE ENERGIA**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Jacinto de Assunção Carvalho
Orientador

**LAVRAS-MG
2020**

GABRIEL FURTADO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLANILHA ELETRÔNICA PARA AUXÍLIO NO
DIMENSIONAMENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS DE DISSIPACÃO DE ENERGIA**

**DEVELOPMENT OF AN ELECTRONIC SPREADSHEET FOR AID IN THE
DIMENSIONING OF HYDRAULIC WORKS FOR ENERGY DISSIPATION**

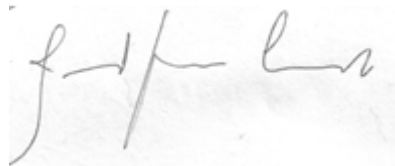
Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

Aprovado em 19 de agosto de 2020

Prof.º Dr. Jacinto de Assunção Carvalho – UFLA

Prof.º Dr. Michael Silveira Thebaldi – UFLA

Prof.º Dr. Geraldo Magela Pereira – UFLA



Prof.º Dr. Jacinto de Assunção Carvalho
Orientador

**LAVRAS-MG
2020**

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Universidade Federal de Lavras, por me garantir o acesso a um ensino de qualidade com professores extremamente qualificados. Dessa forma também quero agradecer de forma individual a cada um desses professores que contribuíram de alguma maneira para meu crescimento profissional e pessoal.

Ao Prof.º Dr. Jacinto de Assunção Carvalho, pela orientação ao longo deste trabalho, por sempre se mostrar disponível e prestativo a esclarecer minhas dúvidas e compartilhar seu vasto conhecimento na área.

Aos meus pais, Alexandre e Luciana, que tornaram a realização desse sonho possível, através de seu apoio e amor incondicional, proporcionaram as condições para que eu me tornasse a pessoa que sou hoje.

E por fim, à Karina por sempre me apoiar, principalmente nos momentos de maior dificuldade; e ao seletivo grupo de amigos que me acompanharam e dividiram experiências ao longo desta caminhada.

RESUMO

Qualquer escoamento que atinja altas velocidades adquire um elevado poder erosivo com capacidade de causar grandes danos às estruturas hidráulicas ou às margens e leitos de canais, principalmente aqueles sem revestimentos específicos. Esse fato justifica a necessidade da instalação de obras de dissipação de energia em diversos casos, como por exemplo, no fim de tubulações, a jusante de comportas de fundo e extravasores de barragens. 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 sucesso na dissipação de energia pela obra construída. O uso de ferramentas eletrônicas pode ser um grande aliado nesse processo, aumentando a produtividade e confiabilidade dos resultados encontrados. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de uma planilha eletrônica que facilitasse ao usuário a escolha da estrutura de dissipação mais adequada às suas necessidades, e também auxiliasse em seu dimensionamento. Para isso, utilizando a plataforma Excel, foi criada a planilha eletrônica com uma interface simples e intuitiva, e com o uso de uma programação modular desenvolvida em linguagem VBA o dimensionamento de diversas estruturas de dissipação pôde ser realizado. Os resultados obtidos com o programa desenvolvido foram comparados com resultados publicados de diversos autores, e verificou-se uma grande equivalência entre eles. Dessa forma, conclui-se que o objetivo do trabalho foi alcançado, e que a planilha eletrônica desenvolvida com uma aparência simples e amigável, auxilia o usuário na escolha da estrutura e executa seu dimensionamento de forma efetiva.

Palavras-chave: Estruturas de dissipação. Energia hidráulica. Módulos de programação.

ABSTRACT

Any flow that reaches high speeds acquires a high erosive power with the capacity to cause great damages to the hydraulic structures or to the margins and beds of channels, mainly those without specific coatings. This fact justifies the need to install energy dissipation works in several cases, such as, at the end of pipelines, downstream of bottom gates and dam spills. The hydraulic and topographic conditions of the place directly influence the choice of the type of dissipation structure and its dimensioning, thus, a series of analyzes and calculations is necessary to guarantee success in the dissipation of energy by the construction work. The use of electronic tools can be a great ally in this process, increasing the productivity and reliability of the results found. In this sense, the objective of this work was the development of an electronic spreadsheet that would facilitate the user to choose the most suitable dissipation structure for their needs, and also help in its design. For that, using the Excel platform, the electronic spreadsheet was created with a simple and intuitive interface, and with the use of a modular programming developed in VBA language the design of several dissipation structures could be performed. The results obtained with the developed program were compared with published results from several authors, and there was a great equivalence between them. Thus, it is concluded that the objective of the work was achieved, and that the electronic spreadsheet developed with a simple and friendly appearance, assists the user in the choice of the structure and performs its design effectively.

Keywords: Dissipation structures. Hydraulic energy. Design. Programming modules.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Erosão causada pelo Rio do Quilombo a jusante de um bueiro sob a Rua Soldado	3
Figura 2 – Erosão no final de uma rede de galerias entre os bairros Jardim Lisboa e Parque.....	3
Figura 3 – Tipos de ressalto hidráulico.	5
Figura 4 – Localização do ressalto em vertedores.....	6
Figura 5 – Energia específica em função da altura do escoamento.	6
Figura 6 – Representação de uma bacia de dissipação de energia do tipo USBR I.	7
Figura 7 – Representação de uma bacia de dissipação de energia do tipo USBR II.....	8
Figura 8 – Bacia do tipo USBR II sendo esvaziada para reparos.	9
Figura 9 – Representação de uma bacia de dissipação de energia do tipo USBR III.	10
Figura 10 – Representação de uma bacia de dissipação de energia do tipo USBR IV.....	11
Figura 11 – Representação de uma bacia de dissipação do tipo SAF - Planta baixa.....	12
Figura 12 – Representação de uma bacia de dissipação do tipo SAF - Corte AA'.....	13
Figura 13 – Bacia de dissipação do tipo SAF.....	13
Figura 14 – Representação de uma bacia de dissipação do tipo PWD e suas dimensões.....	14
Figura 15 – Bacia de dissipação do tipo PWD.	14
Figura 16 – Representação de uma bacia de dissipação do tipo WES e suas dimensões.	15
Figura 17 – Esboço de uma estrutura de dissipação do tipo USBR VI.	16
Figura 18 – Estrutura de dissipação do tipo USBR VI em atividade.	16
Figura 19 – Esboço de uma estrutura de dissipação do tipo USBR IX.	18
Figura 20 – Estrutura de dissipação do tipo USBR IX.	18
Figura 21 – Tapete de enrocamento a jusante de uma tubulação de fundo.....	20
Figura 22 – Representação das zonas encontradas na bacia de queda abrupta.....	21
Figura 23 – Bacia de dissipação por queda abrupta simples.....	21
Figura 24 – Vertedor de cheias em Degraus da barragem de New Croton, EUA.	22
Figura 25 – Representação das variações no regime de escoamento em estruturas de quedas	22
Figura 26 – Dados de entrada e saída para o Caso 1.	27
Figura 27 – Dados de entrada e saída para o Caso 2.	28
Figura 28 – Dados de entrada e saída referentes a bacia tipo USBR I.....	30
Figura 29 – Dados de entrada e saída referentes a bacia tipo PWD - Vista superior.	35
Figura 30 – Dados de entrada e saída referentes a bacia tipo PWD - Vista lateral.	35

Figura 31 – Dados de entrada e saída referentes a bacia tipo WES - Vista superior.	36
Figura 32 – Dados de entrada e saída referentes a bacia tipo WES - Vista lateral.....	36
Figura 33 – Dados de entrada e saída referentes a bacia tipo USBR VI - Vista superior.	37
Figura 34 – Dados de entrada e saída referentes a bacia tipo USBR VI - Vista lateral...	37
Figura 35 – Dados de entrada e saída referentes a bacia tipo USBR IX.....	39
Figura 36 – Dados de entrada e saída referentes ao tapete de enrocamento.	41
Figura 37 – Dados de entrada e saída referentes a bacia de dissipação por queda simples.	42
Figura 38 – Dados de entrada e saída referentes a bacia de dissipação por quedas sucessivas.	44
Figura 39 – Tela inicial do programa.	45
Figura 40 – Tela de descrição da bacia do tipo USBR II.	46
Figura 41 – Tela de dimensionamento da bacia do tipo USBR II.....	46
Figura 42 – Sub-rotina de dimensionamento da bacia do tipo USBR II - Parte 1.	47
Figura 43 – Sub-rotina de dimensionamento da bacia do tipo USBR II - Parte 2.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de dimensionamento da bacia de dissipação do tipo USBR IV. .	37
Tabela 2 – Dimensões do tapete de enrocamento.	40
Tabela 3 – Dados de entrada para validação dos resultados - USBR I.	49
Tabela 4 – Resultados para validação do dimensionamento - USBR I.	49
Tabela 5 – Dados de entrada para validação dos resultados 1 - USBR II.....	49
Tabela 6 – Resultados para validação do dimensionamento 1 - USBR II.....	50
Tabela 7 – Dados de entrada para validação dos resultados 2 - USBR II.....	50
Tabela 8 – Resultados para validação do dimensionamento 2 - USBR II.....	50
Tabela 9 – Dados de entrada para validação dos resultados 1 - USBR III.	51
Tabela 10 – Resultados para validação do dimensionamento 1 - USBR III.	52
Tabela 11 – Dados de entrada para validação dos resultados 2 - USBR III.	52
Tabela 12 – Resultados para validação do dimensionamento 2 - USBR III.	53
Tabela 13 – Dados de entrada para validação dos resultados - SAF.....	54
Tabela 14 – Resultados para validação do dimensionamento - SAF.	54
Tabela 15 – Dados de entrada para validação dos resultados - USBR IX.	55
Tabela 16 – Resultados para validação do dimensionamento - USBR IX.....	55
Tabela 17 – Dados de entrada para validação dos resultados - Tapete de enrocamento.	56
Tabela 18 – Resultados para validação do dimensionamento - Tapete de enrocamento.	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	REFERENCIAL TEÓRICO	2
2.1	Obras de dissipação de energia	2
2.2	Dissipação de energia por ressalto hidráulico.....	4
2.2.1	Dissipador do tipo USBR I.....	7
2.2.2	Dissipador do tipo USBR II	8
2.2.3	Dissipador do tipo USBR III.....	9
2.2.4	Dissipador do tipo USBR IV	10
2.2.5	Dissipador do tipo SAF	11
2.2.6	Dissipador do tipo PWD.....	13
2.2.7	Dissipador do tipo WES	14
2.3	Dissipadores de energia por impacto e macrorugosidades	15
2.3.1	Dissipador por impacto do tipo USBR VI.....	15
2.3.2	Rampa com blocos do tipo USBR IX	17
2.3.3	Tapete de enrocamento	19
2.4	Dissipação de energia através de quedas	20
2.4.1	Dissipação por queda abrupta simples	20
2.4.2	Dissipação por quedas consecutivas (escada).....	21
3	MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1	Interface.....	24
3.2	Cota da bacia.....	24
3.3	Descrição do algoritmo.....	25
3.3.1	Cota da Bacia – Caso 1.....	25
3.3.2	Cota da Bacia – Caso 2.....	27
3.3.3	Bacias de dissipação por ressalto – USBR I	29
3.3.4	Bacias de dissipação por ressalto – USBR II.....	30
3.3.5	Bacias de dissipação por ressalto – USBR III	30
3.3.6	Bacias de dissipação por ressalto – USBR IV	31
3.3.7	Bacias de dissipação por ressalto – SAF	32
3.3.8	Bacias de dissipação por ressalto – PWD	34
3.3.9	Bacias de dissipação por ressalto – WES.....	35
3.3.10	Dissipação por impacto ou macrorugosidades – USBR VI.....	36
3.3.11	Dissipação por impacto ou macrorugosidades – USBR IX.....	38

3.3.12	Dissipação por impacto ou macrorugosidades – Tapete de enrocamento.....	39
3.3.13	Dissipação por quedas – Queda simples	41
3.3.14	Dissipação por quedas – Quedas sucessivas	42
3.4	Validação do dimensionamento realizado pelo programa.....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
4.1	Interface e programação desenvolvidas.....	45
4.2	Resultados da validação do dimensionamento realizado pelo programa.....	48
4.2.1	Bacia de dissipação tipo USBR I	48
4.2.2	Bacia de dissipação tipo USBR II.....	49
4.2.3	Bacia de dissipação tipo USBR III	51
4.2.4	Bacia de dissipação tipo SAF	53
4.2.5	Bacia de dissipação tipo USBR IX	55
4.2.6	Tapete de enrocamento	56
4.2.7	Demais estruturas de dissipação.....	57
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
5.1	Sugestões para melhorias da planilha eletrônica	58

1 INTRODUÇÃO

Obras hidráulicas de dissipação de energia são extremamente necessárias, uma vez que o escoamento que atinge altas velocidades adquire grande poder erosivo. Dessa forma as estruturas de dissipação de energia devem ser instaladas, por exemplo, na saída de passagens hidráulicas e tubulações, após extravasores de barragens, na saída de comportas de fundo e em transições de canais com leitos diferentes, garantindo que o escoamento prossiga com as velocidades adequadas, minimizando a capacidade erosiva da água e os riscos desse escoamento danificar o leito e margens do canal a jusante.

Definir o tipo de estrutura de dissipação 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 escolha da estrutura passa por uma análise de diversos parâmetros, dentre os principais pode-se destacar as condições do escoamento à montante e jusante, a estrutura de dissipação, as condições topográficas do local e o tipo de revestimento do canal a jusante, além dos aspectos econômicos e ambientais.

Os cálculos relacionados ao dimensionamento das obras de dissipação de energia seguem, muitas vezes, um passo a passo que envolvem muitas equações e análise de valores limitantes recomendados por autores em várias literaturas, além do fato que esses mesmos cálculos podem ter a necessidade de serem repetidos devido a condições de escoamentos diferentes que venham a transpor a estrutura de dissipação ou devido a fatores topográficos que restringem a instalação da obra dimensionada. Nesse contexto introduzir o auxílio 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 desse cenário, o objetivo deste trabalho foi fornecer uma ferramenta eletrônica que facilite e torne a escolha e os cálculos relacionados ao dimensionamento de alguns dos tipos de dissipadores de energia comumente utilizados mais simples e interativa, seguindo as proposições e equações descritas na literatura por diversos autores.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Obras de dissipação de energia

Em locais com escoamentos de elevadas velocidades e turbulências, que geram um excesso de energia cinética com potencial erosivo, faz-se necessária a instalação de obras hidráulicas capazes de dissipar grande parte dessa energia para minimizar danos em estruturas ou canais subseqüentes (PINHEIRO,2009).

Essas zonas, onde ocorrem as perturbações mais críticas geradas pelo excesso de energia dos escoamentos, são comumente encontradas após saídas de tubulações e comportas de fundo, ao pé de extravasores de barragens, etc, pois nessas regiões, em muitos casos, a velocidade de saída pode ultrapassar o valor máximo suportado pelo revestimento natural do leito ou das margens. Assim, todo o processo de dissipação de energia passa pela escolha ou desenvolvimento de uma estrutura capaz de absorver as perturbações causadas pelo escoamento e diminuir a velocidade do mesmo para valores adequados (HENRIQUES, 2014).

A definição da melhor estrutura de dissipação a ser instalada em uma determinada localidade passa por uma análise detalhada das características hidráulicas, topográficas e geológicas do local, para que além do sucesso na dissipação de energia os custos econômicos e ambientais sejam os menores possíveis. (SOUSA, 2011).

As obras de dissipação de energia segundo Conterato (2014) tem como “finalidade, independente da geometria adota, transpor o escoamento para o leito natural de maneira segura e econômica, com a menor parcela possível de energia residual”.

Para Henriques (2014) a erosão do leito e margens dos canais onde o escoamento percorre é a principal justificativa para a necessidade da execução das obras de dissipação de energia, já que o processo erosivo que depende diretamente da velocidade e altura da água é a principal consequência da inexistência desse tipo de estrutura e a depender da intensidade desse processo grandes danos materiais e ambientais podem ocorrer.

As Figuras 1 e 2 ilustram o potencial erosivo de escoamentos, os quais não foram submetidos a estruturas de dissipação de energia. As duas figuras tratam-se de saídas de bueiros que passam por baixo de vias de trânsito, nelas é possível observar como o escoamento lançado diretamente no canal sem nenhuma proteção ou estrutura de dissipação pode afetar negativamente o seu leito e as margens.

Figura 1 – Erosão causada pelo Rio do Quilombo a jusante de um bueiro sob a Rua Soldado Passarinho, Pindamonhangaba - SP.



Fonte: Exército Brasileiro (2018).

Figura 2 – Erosão no final de uma rede de galerias entre os bairros Jardim Lisboa e Parque Bandeirantes, Umuarama - PR.



Fonte: Prefeitura Municipal de Umuarama (2018).

De acordo com Mata-Lima et al. (2016) o parâmetro hidráulico com maior influência na escolha de uma estrutura de dissipação de energia é o número de Froude (Fr). Através desse parâmetro é possível classificar o tipo de regime do escoamento, e, indicar o tipo de dissipador de maior eficiência para o caso em questão. Segundo French (1987) o regime de um escoamento pode ser classificado em subcrítico, crítico e supercrítico quando seu o número de Froude (Fr) for menor, igual ou maior que a unidade, respectivamente.

Ao longo dessas estruturas hidráulicas a dissipação da energia em excesso decorre do

atrito gerado pelo escoamento com os demais elementos da estrutura, pelo atrito e incorporação de ar no líquido, pelo impacto com fronteiras físicas ou com a lâmina de água a jusante e pela turbulência gerada pelas mudanças no tipo de escoamento (ressalto hidráulico). A forma como a energia será dissipada de maneira mais acentuada depende do tipo da obra realizada (ALMEIDA et al., 2014).

Segundo Aguiar (2012) as obras de dissipação de energia do escoamento mais utilizadas são as bacias de dissipação por ressalto hidráulico (simples ou composta de acessórios), bacias de enrocamento, estruturas de impacto, rampas com macrorugosidades, estruturas de queda abrupta ou de queda com soleira em degraus e os poços de dissipação.

2.2 Dissipação de energia por ressalto hidráulico

As bacias de dissipação por ressalto hidráulico estão entre as estruturas mais adotadas no processo de diminuição da energia contida no escoamento. Esses sistemas podem ser posicionados de maneira inclinada ou na horizontal, com auxílio ou não de outros acessórios (FONTANELLI, 2017).

A bacia deve ser devidamente ancorada e drenada, e dimensionada considerando que a dissipação de energia ocorra dentro da estrutura para que a restituição do escoamento a jusante seja feita de forma suave atendendo as necessidades do canal (MENDONÇA, 2013).

O ressalto hidráulico ocorre na transição de um regime supercrítico, onde o número de Froude (Fr) é maior que a unidade, para um regime subcrítico, no qual Froude tem valor menor que um (MATA-LIMA et. al., 2016). Essa transição pode ocorrer com elevada turbulência, grande incorporação de ar e em muitos casos em uma curta distância, o que caracteriza um escoamento bruscamente variado e com elevada dissipação de energia (FIGUEIREDO, 2010).

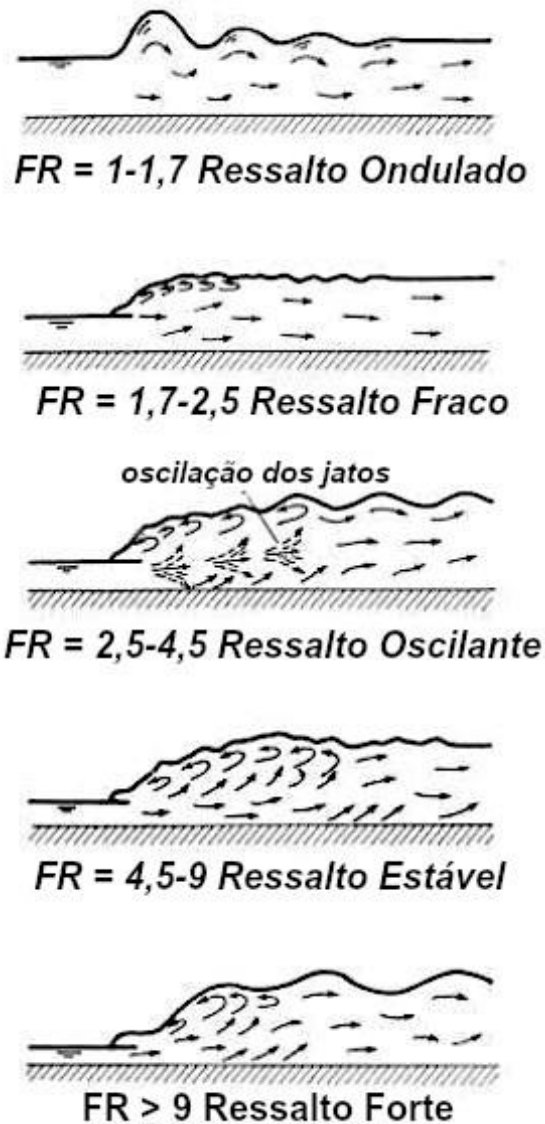
Uma vez que o ressalto hidráulico pode gerar grande turbulência no escoamento, consequentemente, grandes flutuações de pressões e velocidades podem ocorrer ocasionando problemas como fadiga, cavitação e ressonância, problemas estes que são grandes causadores de erosão e danos ao leitos e margens dos canais, justificando a necessidade de se conhecer a distribuição das flutuações de pressão para a execução de um projeto correto e eficiente desse tipo de obra hidráulica (TEIXEIRA, 2003).

O comprimento do ressalto é outra característica fundamental para o dimensionamento desse tipo de bacia de dissipação, pois é somente após o fim do ressalto que se deve considerar o fim do revestimento usado ao longo da estrutura. É importante ressaltar que o projeto desse tipo de bacia deve considerar além do escoamento de máxima vazão, escoamentos de menores

dimensões, devido a mudanças no tipo de ressalto que podem diminuir a eficiência da estrutura (RIJO, 2007).

De acordo com Raimundo (2007), condicionados pelo número de Froude, o ressalto hidráulico pode ser subdividido em diferentes categorias, conforme apresentado pela Figura 3.

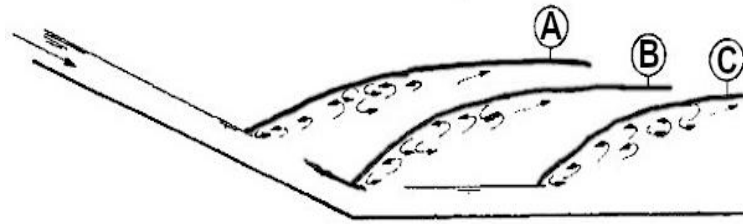
Figura 3 – Tipos de ressalto hidráulico.



Fonte: Adaptado de Chow (1959).

Segundo Gomes (2000) “a posição do início do ressalto depende, principalmente, das condições de contorno do canal e do tipo de estrutura que o precede (comporta ou vertedor), podendo se formar livre ou afogado”. Assim a Figura 4 ilustra as formas como o ressalto pode se formar após um vertedor. Em A tem-se um ressalto afogado, em B e em C tem-se a formação de um ressalto livre, sendo o primeiro formado ao pé do vertedor e o segundo mais a jusante.

Figura 4 – Localização do ressalto em vertedores.

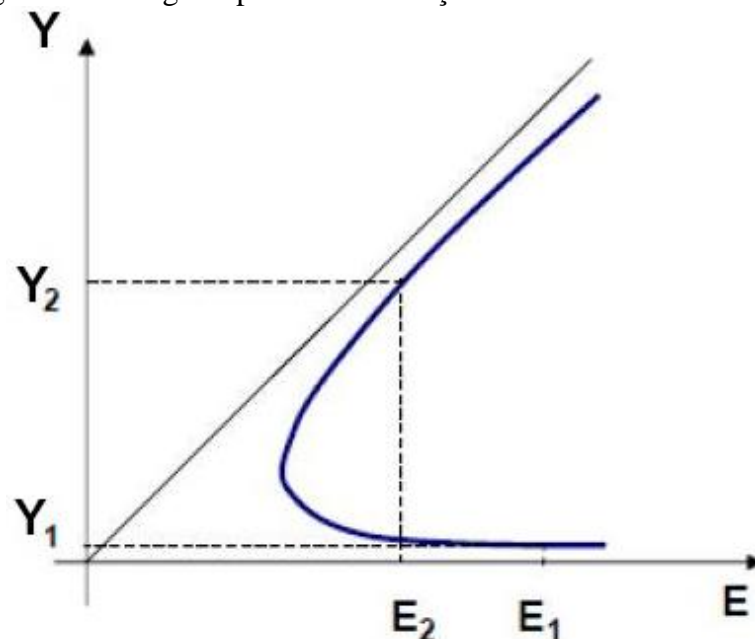


Fonte: Adaptado de Gomes (2000).

As alturas conjugadas do ressalto hidráulico são os parâmetros correspondentes às alturas do escoamento a montante (Y_1) e a jusante (Y_2) do mesmo (HENRIQUES, 2014).

A passagem da altura conjugada Y_1 para Y_2 representa a passagem da energia E_1 para E_2 , que ocorre através da dissipação de energia dentro do ressalto hidráulico. A relação entre as energias dos escoamentos supercríticos e subcríticos são demonstradas na Figura 5. O escoamento é supercrítico, ou seja, com um número de Froude (Fr_1) maior que um no ponto de coordenadas (E_1 ; Y_1). Esse regime continua supercrítico à medida que o ponto se move para a esquerda, até alcançar o menor valor de energia, chamada de energia crítica, com a ordenada correspondente à altura crítica. A partir desse ponto a curva se desloca para direita, mas em aclave até o ponto de coordenada (E_2 , Y_2) com um número de Froude (Fr_2) menor que um, caracterizando um regime de escoamento subcrítico. A diferença entre E_1 e E_2 é uma das formas de se encontrar o valor da quantidade de energia dissipada dentro do ressalto hidráulico (SOUSA, 2011).

Figura 5 – Energia específica em função da altura do escoamento.



Fonte: Adaptado de Sousa (2011).

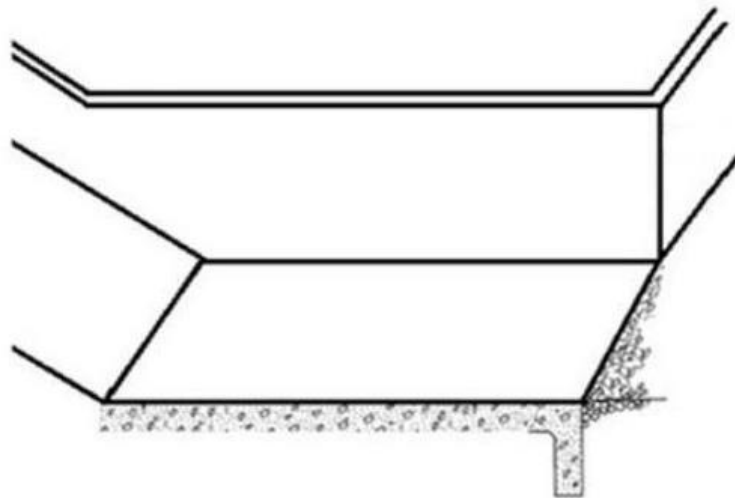
O dimensionamento das bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico são condicionadas pelos parâmetros de escoamento à entrada (Y_1, V_1, Fr_1) e a saída (Y_2, V_2, Fr_2) da mesma, esse processo implica na determinação das características geométricas da bacia, como comprimento, dimensões e posicionamento de acessórios quando utilizados, cota da soleira da bacia e altura das paredes laterais (PINHEIRO, 2009).

Assim, os principais objetivos das bacias de dissipação são fixar a posição onde o ressalto hidráulico deve ocorrer e diminuir seu comprimento, além de aumentar a eficiência de dissipação de energia (BAPTISTA; LARA, 2010). Dentre as estruturas de dissipação de energia por ressalto hidráulico, as mais comumente utilizadas são as apresentadas por Peterka (1978), proposta pelo *United States Bureau of Reclamation* (USBR), sendo as bacias do tipo USBR I, II, III e IV. Além dessas, ainda são bastante aplicadas as bacias do tipo SAF (*Saint Anthony Falls – Soil Conservation Service*), PWD (*Public Work Department - Austrália*) e WES (*Waterways Experiment Station – United States Army Corps of Engineers*) (HENRIQUES, 2014).

2.2.1 Dissipador do tipo USBR I

A bacia de dissipação USBR do tipo I, corresponde a uma bacia de dissipação sem acessórios, assim ela é basicamente um canal retangular de fundo plano e horizontal, revestida de um material relativamente liso, com o comprimento necessário para conter todo o ressalto hidráulico (SOUSA, 2011). Esse tipo de bacia é ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Representação de uma bacia de dissipação de energia do tipo USBR I.



Fonte: Adaptado de Baptista e Lara (2010).

Por ter essa configuração de bacia, o estudo da dissipação de energia se torna mais simplificado, dessa forma se torna possível a estimativa das solicitações que a estrutura ou leito a jusante estarão sujeitos dentro do intervalo de vazões que atuarão ao longo de sua vida útil (CONTERATO, 2014).

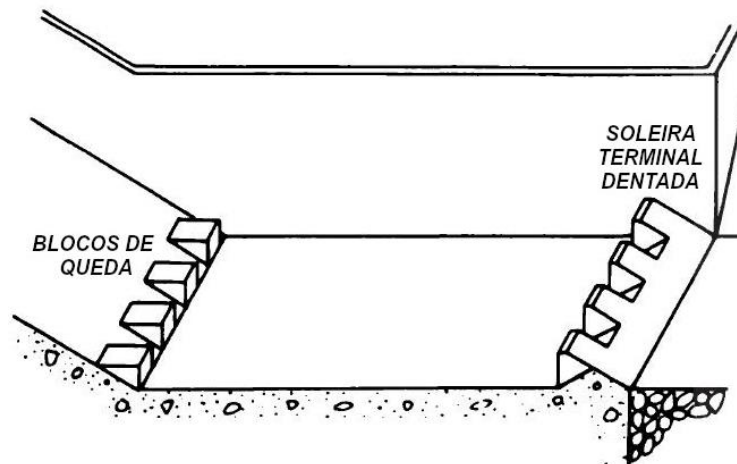
A estrutura dessa bacia é recomendada para uma curta faixa de números de Froude ($1,7 \leq Fr \leq 2,5$) por razões econômicas e de desempenho, já que nesse intervalo apenas cerca de 20% da energia é dissipada pelo ressalto hidráulico (THOMPSON; KILGORE, 2006).

Para Aguiar (2012), ressaltos formados a partir de escoamentos com número de Froude superiores a 2,5 fazem esse tipo de estrutura economicamente inviável, pois os ressaltos se intensificam, o que promove um aumento considerável de sua extensão e conseqüentemente da bacia, uma vez que, de acordo com Peterka (1978) a laje de fundo da bacia e suas paredes laterais devem ter o mesmo comprimento do ressalto hidráulico.

2.2.2 Dissipador do tipo USBR II

Essa estrutura é dotada de blocos de queda a montante, na junção do canal inclinado com a bacia de dissipação, e de uma soleira terminal dentada a jusante, entre o fim da bacia e a continuação do canal, como ilustra a Figura 7. A utilização desses acessórios garante a contenção do ressalto além da diminuição de seu comprimento, e conseqüentemente o da bacia, que tem seu tamanho reduzido de 63% a 72% do comprimento da bacia de dissipação USBR do tipo I (RIJO, 2007).

Figura 7 – Representação de uma bacia de dissipação de energia do tipo USBR II.



Fonte: Adaptado de Peterka (1978).

Os blocos de queda têm a função de dividir o escoamento gerando uma elevada agitação na água, causando o início da dissipação de energia, além disso eles contribuem para a diminuição do comprimento da bacia e da tendência do deslocamento do ressalto para jusante. Já a soleira terminal dentada além de elevar as correntes do fundo da soleira para uma altura superior à da superfície do canal à jusante, ajuda na dissipação de energia devido ao impacto do escoamento em seus blocos (MARTINS, 2000).

O dimensionamento das bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico das estruturas dotadas de acessórios é similar ao de uma bacia de dissipação por ressalto livre, excetuando apenas o dimensionamento e posição dos demais acessórios utilizados (AGUIAR, 2012).

A Figura 8 apresenta uma bacia desse tipo no momento em que a mesma deixou de ser utilizada e está sendo drenada para possibilitar reparos internos em sua estrutura.

Figura 8 – Bacia do tipo USBR II sendo esvaziada para reparos.

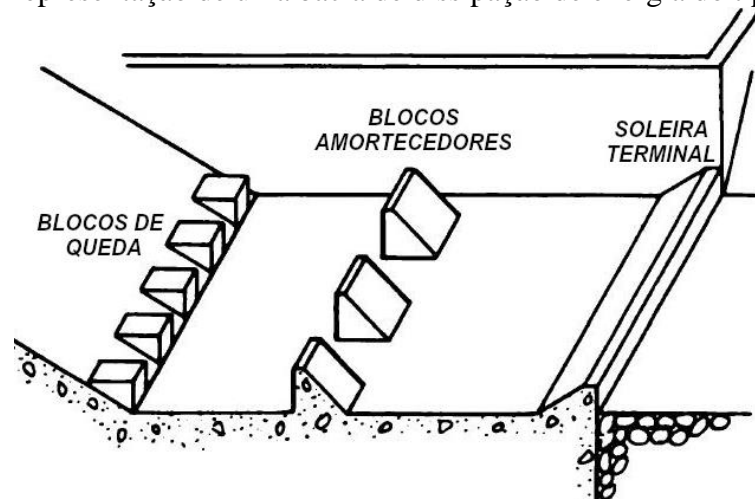


Fonte: FEMA (2010).

2.2.3 Dissipador do tipo USBR III

Esses dissipadores de energia são compostos de blocos de queda iguais aos da bacia USBR tipo II, blocos de amortecimento ou blocos de impacto e soleira terminal contínua a jusante, como ilustrado na Figura 9. Os acessórios corretamente dispostos e dimensionados garantem que o comprimento dessa bacia seja de 38% a 45% do comprimento da bacia USBR do tipo I e aproximadamente 63% do comprimento da bacia USBR do tipo II (RIJO, 2007).

Figura 9 – Representação de uma bacia de dissipação de energia do tipo USBR III.



Fonte: Adaptado de Peterka (1978).

Os blocos de queda têm a mesma função que apresentada na bacia anterior, assim os blocos de amortecimento dissipam a energia ao sofrerem o impacto do escoamento, criando mais turbulência no líquido e importantes flutuações de pressão. Por fim, a soleira terminal lisa garante que as correntes do fundo da bacia sejam levadas para uma altura superior ao do fundo do canal (MARTINS, 2000).

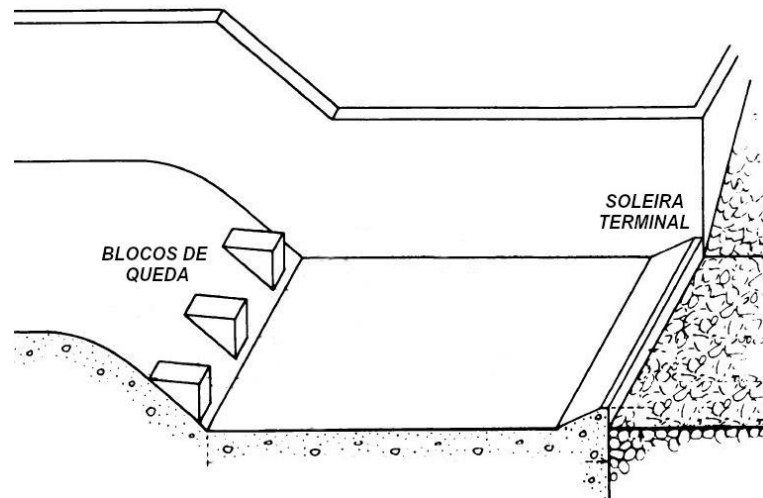
Thompson e Kilgore (2006) recomendam que esse tipo de bacia não receba vazões unitárias superiores a $18,6 \text{ m}^3/\text{s.m}$, que a velocidade à entrada da bacia seja de no máximo $18,3 \text{ m/s}$ e que o número de Froude esteja contido entre 4,5 e 17.

2.2.4 Dissipador do tipo USBR IV

Segundo Rijo (2007) o dissipador USBR do tipo IV é especialmente indicado para os casos onde o escoamento apresenta um limite definido para o número de Froude ($2,5 \leq Fr \leq 4,5$) que representa o ressalto oscilante. Esse tipo de ressalto é caracterizado pela oscilação de jatos entre o fundo e a superfície, sendo que esta pode gerar uma onda de complexo amortecimento que tem potencial de ser propagada por grandes distâncias. Dessa forma, a eficiência da bacia USBR IV é garantida pelos seus acessórios que amenizam de forma consistente essas ondulações.

Aguiar (2012) informa que os blocos de queda têm a função principal de diminuir a formação de ondulações na superfície do escoamento, já que estes direcionam os jatos de água para a parte inferior do ressalto hidráulico. E, ao fim da estrutura, a soleira terminal é colocada para garantir que o processo de erosão não ocorra no leito do canal.

Figura 10 – Representação de uma bacia de dissipação de energia do tipo USBR IV.



Fonte: Adaptado de Peterka (1978).

Thompson e Kilgore (2006) afirmam que as paredes laterais da bacia de dissipação USBR tipo IV devem ser paralelas, para que o ressalto funcione da forma mais eficiente na dissipação de energia.

Segundo Martins (2000) esse tipo de estrutura apresenta comprimento elevado, mesmo possuindo acessórios sua extensão é superior ao da bacia tipo SAF, por isso não é tão comumente utilizada.

2.2.5 Dissipador do tipo SAF

A bacia de dissipação do tipo SAF foi desenvolvida pelo laboratório de *Saint Anthony Falls* na Universidade de Minnessota, tomando como base as bacias do tipo USBR. Ela também possui acessórios, tais como blocos de queda, blocos de amortecimento e soleira terminal, todos com a mesma finalidade de permitir o encurtamento da bacia que pode chegar a ser 80% menor que a do ressalto hidráulico da bacia USBR tipo I. Seu uso é recomendado para estruturas menores como pequenos vertedouros, na saída de tubulações e em canais de drenagem de rampa com um número de Froude variando 1,7 a 17 (THOMPSON; KILGORE, 2006).

Esse tipo de bacia pode ter sua estrutura subdividida em três zonas: zona de transição, zona da bacia propriamente dita e zona de saída. A zona de transição se inicia a jusante da passagem hidráulica e vai até a base da bacia, formada por um canal inclinado com blocos de queda em sua parte final. A zona da bacia se inicia após esses blocos e termina após a soleira terminal, nessa região a bacia é plana e no seu interior são alocados os blocos de amortecimento. Por fim, na zona de saída, a jusante da soleira terminal é colocado o revestimento de

enrocamento para a restituição completa e segura do escoamento (HENRIQUES, 2014).

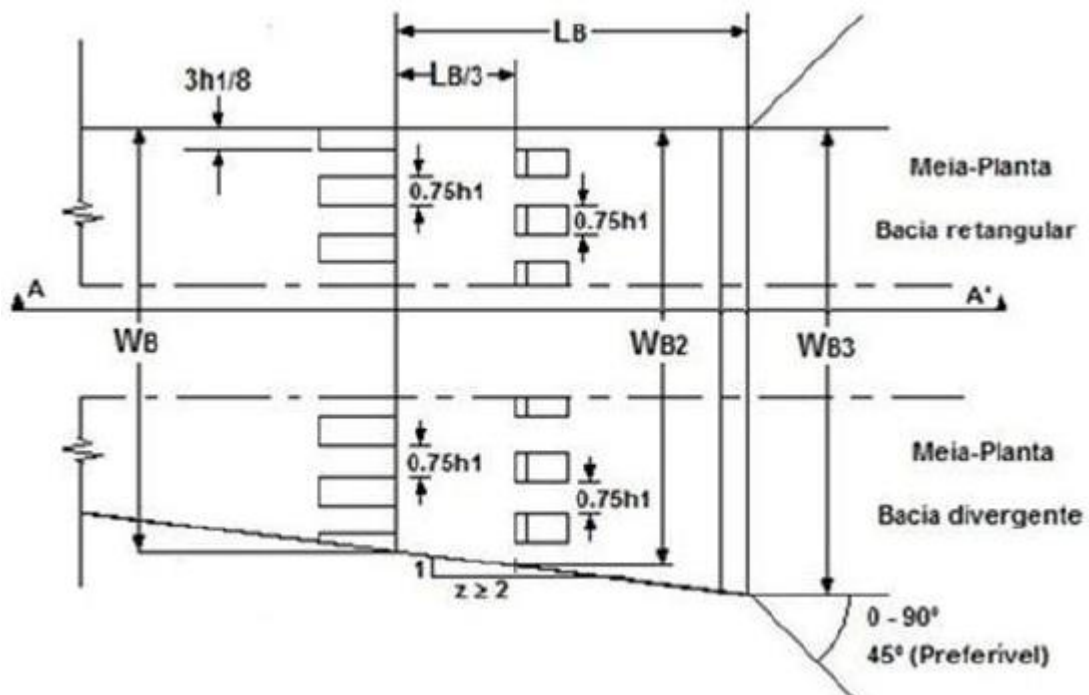
Thompson e Kilgore (2006) apresentam que essa estrutura de dissipação é muito econômica, pois graças aos acessórios utilizados permite uma redução do seu comprimento, economizando espaço e material em sua construção.

Henriques (2014) diz que “o dimensionamento implica a determinação das características geométricas da bacia, nas quais se incluem o comprimento, largura, dimensões dos acessórios, definição da cota da soleira da bacia de dissipação.”

Dessa forma, as configurações adotadas para a bacia SAF consistem em determinar as características do fluxo de saída do conduto, comparar a altura da entrada do escoamento a montante com a altura da saída do escoamento a jusante, com intuito de estimar a profundidade necessária da bacia, determinar as dimensões da bacia e dos acessórios e determinar o formato das paredes laterais, ou seja, paralelas ou com ampliação da largura (TDOT, 2010).

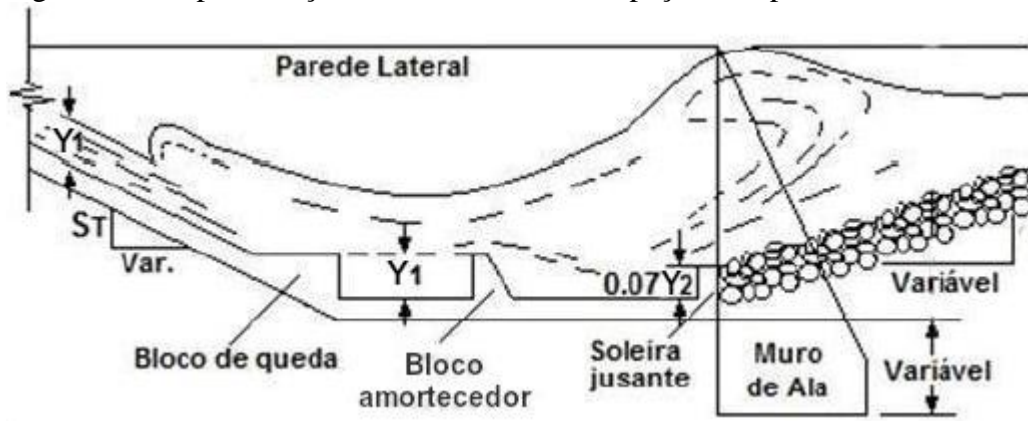
Para exemplificar, as Figuras 11, 12 e 13 ilustram esse tipo de bacia. A planta baixa dessa estrutura de dois modos, com as paredes laterais paralelas ou divergentes são mostradas pela Figura 11. Já a Figura 12 trata-se de um corte transversal da bacia apresentada pela Figura 11 e por fim, a Figura 13 ilustra uma obra já executada de tal estrutura.

Figura 11 – Representação de uma bacia de dissipação do tipo SAF - Planta baixa.



Fonte: Adaptado de Blaisdell (1959).

Figura 12 – Representação de uma bacia de dissipação do tipo SAF - Corte AA'.



Fonte: Adaptado de Blaisdell (1959).

Figura 13 – Bacia de dissipação do tipo SAF.



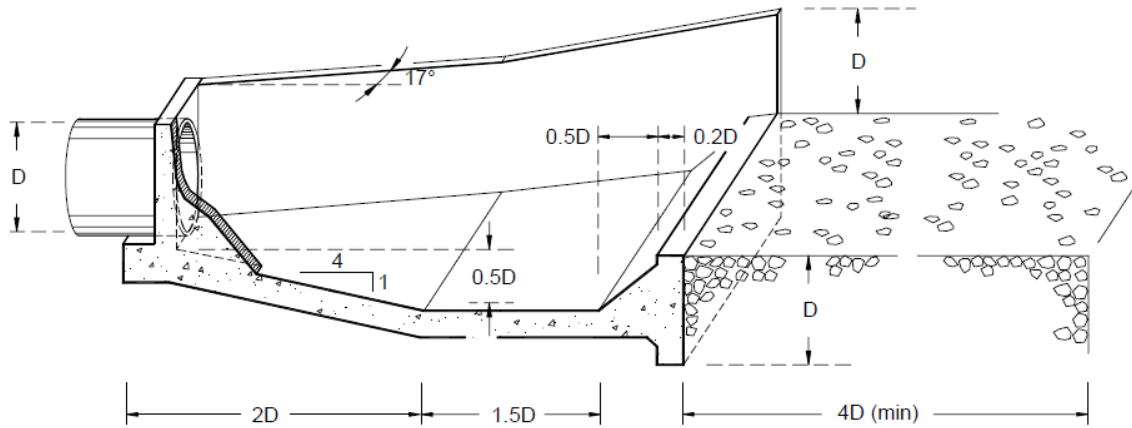
Fonte: FEMA (2010).

2.2.6 Dissipador do tipo PWD

A bacia de dissipação do tipo PWD foi desenvolvida pelo *Public Works Department* para ser utilizada a jusante de saídas de tubulações circulares com diâmetros entre 450 mm e 1850 mm e para cargas menores que três vezes o diâmetro do tubo (MARTINS, 2000).

A geometria da bacia é relativamente simples, não possuindo acessórios como blocos de queda e de amortecimento, apenas uma soleira terminal. Além disso, todas as dimensões das estruturas são obtidas em função do diâmetro do conduto, como pode ser observado na Figura 14 (HENRIQUES, 2014).

Figura 14 – Representação de uma bacia de dissipação do tipo PWD e suas dimensões.



Fonte: Pinheiro (2006).

Segundo Martins (2000) é recomendado que a extensão total da bacia seja igual a 4 vezes o diâmetro do conduto e que sua largura seja aproximadamente igual a 3,45 vezes o valor do diâmetro. A soleira da bacia deve estar em uma cota inferior em relação a base da passagem hidráulica em aproximadamente metade do diâmetro e as paredes laterais da bacia tem inclinação de 17° em relação ao eixo do conduto. Por fim, a jusante da bacia de dissipação ainda deverá ser disposta uma proteção de enrocamento com mesma cota que a soleira terminal e com um comprimento mínimo de quatro vezes o diâmetro da passagem.

Uma bacia de dissipação do tipo PWD já executada pode ser vista na Figura 15.

Figura 15 – Bacia de dissipação do tipo PWD.



Fonte: FEMA (2010).

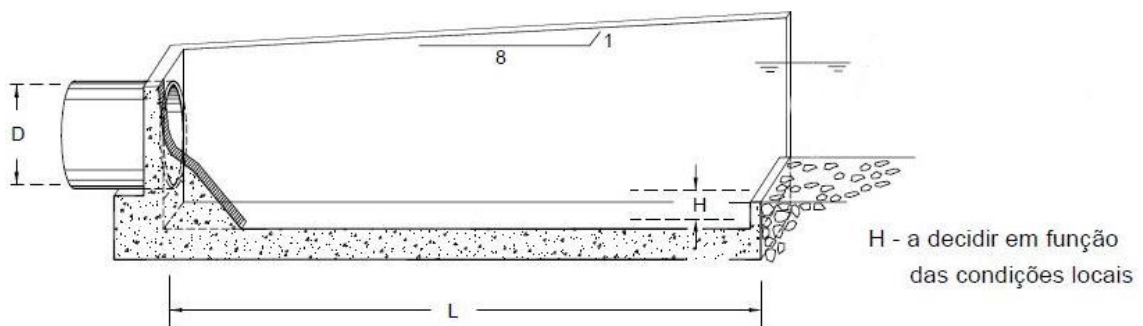
2.2.7 Dissipador do tipo WES

A bacia de dissipação do tipo WES foi desenvolvida pelo *U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station* e a principal diferença entre a bacia do tipo WES e a bacia do

tipo PWD é a angulação que as paredes laterais fazem com a saída da canalização, que neste caso é aproximadamente 7° menor, além de apresentarem um comprimento maior (MARTINS, 2000).

O comprimento total da bacia é igual a 5 vezes o diâmetro do conduto e as paredes laterais tem uma inclinação que respeita a relação 8:1 (comprimento:largura), como pode ser observado na Figura 16. A soleira tem um desnível em relação a base do conduto que depende das condições do local de instalação da obra. O desnível também é o que dita a altura da soleira terminal (FLETCHER; GRACE, 1972).

Figura 16 – Representação de uma bacia de dissipação do tipo WES e suas dimensões.



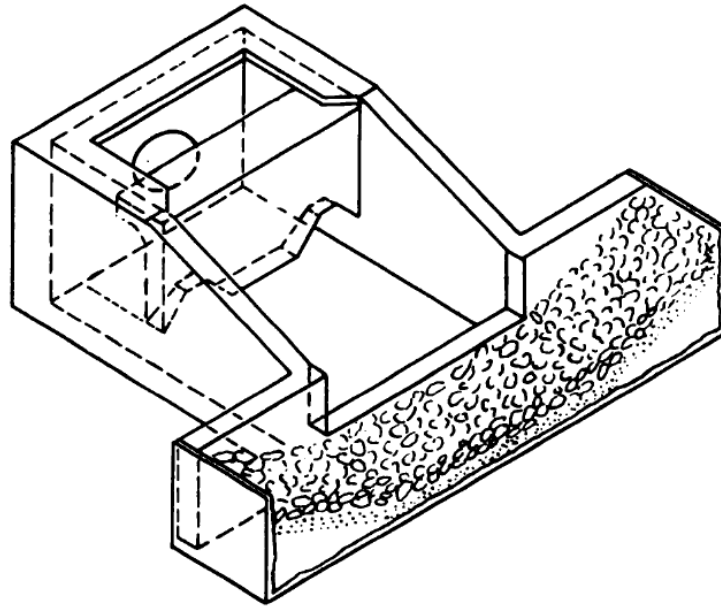
Fonte: Adaptado de Pinheiro (2006).

2.3 Dissipadores de energia por impacto e macrorugosidades

2.3.1 Dissipador por impacto do tipo USBR VI

O dissipador por impacto do tipo USBR VI é utilizado ao fim de condutos forçados, como por exemplo, ao fim da tubulação de fundo de uma barragem. Sua estrutura é composta por uma caixa dotada de uma viga transversal com a seção em “L” invertido (Figura 17) e é o impacto do escoamento projetado contra essa viga que garante a dissipação de energia desse tipo de estrutura (FIGUEIREDO, 2010). Já a Figura 18 apresenta uma bacia de dissipação de energia por impacto do tipo USBR VI em atividade.

Figura 17 – Esboço de uma estrutura de dissipação do tipo USBR VI.



Fonte: Peterka (1978).

Figura 18 – Estrutura de dissipação do tipo USBR VI em atividade.



Fonte: Henriques (2014).

Aguiar (2012) afirma que “a dissipação de energia do escoamento ocorre devido à turbulência e aos remoinhos resultantes do impacto de água, proveniente da passagem hidráulica, no elemento em concreto armado (vertical)”.

Essa estrutura de dissipação não requer condições de níveis de água a jusante para garantir seu funcionamento eficiente, mas os valores da quantidade de energia dissipada tendem a ser maiores quando a altura da água a jusante não ultrapassa a metade da altura do bloco defletor. Já a montante, o escoamento à saída do conduto deve ter uma velocidade máxima de 9 m/s e o diâmetro da tubulação deve atender ao limite de 1,80 m (RIJO, 2007).

Com relação a vazão, é recomendado que a dissipação de energia nesta estrutura se limite a descargas menores que $11 \text{ m}^3/\text{s}$ (FEMA, 2010). Já sobre o número de Froude, a faixa recomendada vai de 1,1 a 10 (BEICHLEY, 1971).

Segundo Henriques (2014), a efetividade da dissipação de energia é garantida respeitando algumas diretrizes acerca da localização da viga em “L” invertido ou defletor de suspensão vertical, da soleira terminal e da passagem hidráulica a montante da bacia, dessa forma, o defletor não deve ter altura menor que a parte superior do conduto, para que o escoamento não passe por cima do defletor, a soleira terminal também deve respeitar um alinhamento com a parte inferior do defletor, não podendo ser mais baixa que o defletor e o canal de entrada deve estar alinhando verticalmente com a viga.

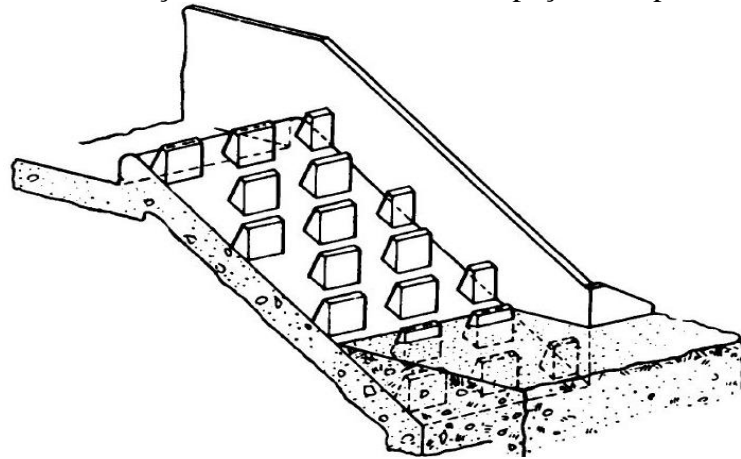
A montante da bacia de dissipação USBR tipo VI a inclinação da passagem hidráulica não deve exceder 15° , e para casos onde a inclinação seja superior deve-se incrementar um trecho horizontal antes da saída com um comprimento mínimo de duas vezes a largura ou diâmetro da passagem (AGUIAR, 2012).

2.3.2 Rampa com blocos do tipo USBR IX

A rampa com blocos é utilizada na dissipação de energia a jusante de uma passagem hidráulica ou em drenagens longitudinais quando a saída do canal ou conduto se localiza em uma cota elevada em relação ao canal de restituição, já que este tipo de obra tem a capacidade de vencer grande desníveis (HENRIQUES, 2014).

Esta estrutura de dissipação de energia é formada por uma rampa com blocos colocados de forma intercalada na horizontal e na vertical, como ilustra a Figura 19, com dimensões e formas determinadas de acordo com a vazão do escoamento. O impacto sucessivo do escoamento com os blocos gera uma alta dissipação de energia e impede a aceleração do escoamento ao longo da rampa (FIGUEIREDO, 2010).

Figura 19 – Esboço de uma estrutura de dissipação do tipo USBR IX.



Fonte: Peterka (1978).

Segundo Raimundo (2007) a rampa deve ser dimensionada com uma declividade de 1:2 (vertical:horizontal) ou menor, recomenda-se também que as vazões específicas descarregadas nessas estruturas não devem ter valores superiores a $5,6 \text{ m}^3/\text{s.m}$, e por fim, considera-se que para o funcionamento correto da rampa com boa eficiência de dissipação da energia, é necessário um valor mínimo de quatro fileiras de blocos, como ilustra a Figura 20, sendo que a última delas deve ser mantida submersa.

Figura 20 – Estrutura de dissipação do tipo USBR IX.



Fonte: FEMA (2010).

O escoamento a montante da estrutura, no início da rampa deve apresentar regime subcrítico, com número de Froude menor que a unidade, assim sua principal função é evitar a aceleração do escoamento, consequentemente da sua energia cinética, enquanto o mesmo passa pela rampa para vencer um determinado desnível (THOMPSON; KILGORE, 2006).

2.3.3 Tapete de enrocamento

O uso do enrocamento é uma solução viável, tanto em aspectos técnicos como econômicos, para a proteção do leito de canais contra erosões causadas por uma velocidade excessiva do escoamento. O princípio básico desse tipo de estrutura consiste na utilização de blocos de pedra natural sobre a superfície, normalmente plana, nas saídas de passagens hidráulicas, por exemplo, para aumento da rugosidade de um trecho do canal e consequente dissipação de energia do escoamento. Para sua correta utilização é preciso analisar as condições topográficas do local, a velocidade do escoamento e a dimensão da passagem hidráulica a montante (HENRIQUES, 2014).

O tapete de enrocamento é indicado quando a velocidade de saída do escoamento no fim de canais ou tubulações for inferior a 4,5 m/s e o diâmetro da passagem hidráulica à montante tenha diâmetro menor que 1,5 m. Nestes casos, a construção de outras estruturas de dissipação de energia representaria maiores custos, pois apenas o enrocamento seria suficiente para a dissipação da energia (MARTINS, 2000).

Para que o enrocamento dissipe a energia de forma eficiente, recomenda-se que o mesmo esteja no mesmo nível que o canal, ou no máximo poucos centímetros abaixo e que sua declividade seja igual ou menor que a da passagem hidráulica, sendo a melhor opção com declividade nula, se a topografia do terreno permitir (AGUIAR, 2012).

Henriques (2014) apresenta que “os elementos principais no dimensionamento do tapete de enrocamento são o tamanho do enrocamento, o comprimento e espessura do tapete de proteção”. Além disso, segundo o DNIT (2006) o enrocamento deve ser constituído com pedras distribuídas da forma mais desordenada possível, com geometrias irregulares e com diâmetro devidamente calculado de acordo com a vazão e velocidade do escoamento.

Assim, tem-se que o uso do tapete de enrocamento ou “rip-rap” é extremamente recomendado na dissipação da energia residual que possa existir na saída de outras estruturas de dissipação de energia, complementando o amortecimento do escoamento (DNIT, 2006). As vantagens desse tipo de revestimento além da eficiente dissipação de energia, são a relativa facilidade de instalação, baixa necessidade de manutenção e durabilidade (LEMOS, 2008).

Para ilustrar esse tipo obra de dissipação de energia é apresentada a Figura 21.

Figura 21 – Tapete de enrocamento a jusante de uma tubulação de fundo.



Fonte: FEMA (2010).

2.4 Dissipação de energia através de quedas

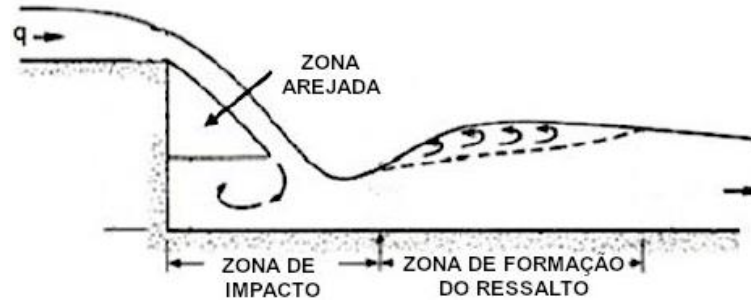
2.4.1 Dissipação por queda abrupta simples

De acordo com Aguiar (2012) “as estruturas de queda abrupta têm como principal função regular o declive do canal”. Ainda nas palavras do autor retrocitado a implantação desse tipo de estrutura no decorrer do percurso do escoamento permite que o declive do canal diminua, pois dá a oportunidade de se criar vários trechos entre estruturas de quedas com declividades suaves.

A estrutura de dissipação de energia por queda simples é adequada para situações onde o regime de escoamento a montante é lento, com número de Froude inferior a 1, assim quando o escoamento passa pelo topo do vertedouro, ele sofre uma queda brusca que aumenta sua velocidade, transformando o escoamento subcrítico em supercrítico. Com o impacto desse escoamento na soleira da bacia, este sofre um ressalto hidráulico, dissipando sua energia e voltando ao regime subcrítico (THOMPSON; KILGORE, 2006).

Para Henriques (2014) as estruturas de queda simples podem ser divididas em duas zonas, sendo a primeira a zona de impacto do escoamento com a soleira da bacia, causada pela queda abrupta. À montante do escoamento em queda também pode ser observada uma zona arejada, e a segunda a zona de formação do ressalto hidráulico, como ilustrado na Figura 22.

Figura 22 – Representação das zonas encontradas na bacia de queda abrupta.



Fonte: Adaptado de Thompson e Kilgore (2006).

Com isso, esse tipo de estrutura é relativamente simples de ser executada, necessitando apenas de uma laje de fundo e de paredes laterais que protejam o leito do canal do impacto da água e que tenha comprimento que suporte todo o ressalto hidráulico (AGUIAR, 2012). Uma estrutura desse tipo, executada e em funcionamento, pode ser vista na Figura 23.

Figura 23 – Bacia de dissipação por queda abrupta simples.



Fonte: Precon (2020).

2.4.2 Dissipação por quedas consecutivas (escada)

Desde que a topografia do local permita sua construção, o vertedor em degraus (Figura 24) é uma das estruturas hidráulicas mais utilizadas na dissipação de energia, pois além da facilidade de construção, também possui uma boa viabilidade econômica, já que agrega em uma única obra a estrutura de controle de entrada do escoamento e a de dissipação de energia, podendo ser construída em concreto ou gabião revestido de argamassa (RAIMUNDO, 2007).

Figura 24 – Vertedor de cheias em Degraus da barragem de New Croton, EUA.

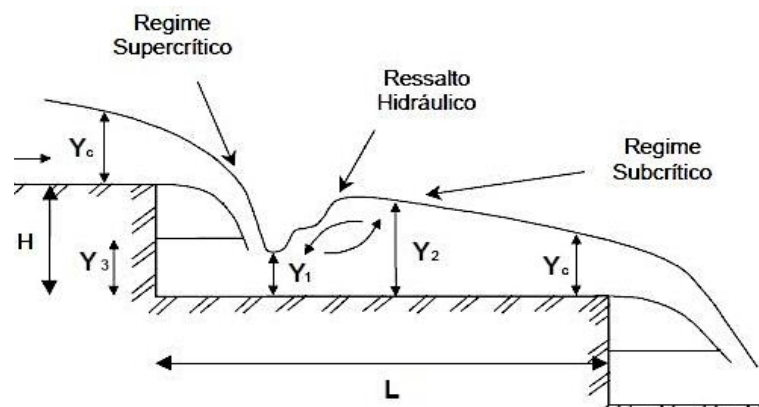


Fonte: Antunes (2011).

Nesse tipo de estrutura o escoamento pode se desenvolver de três maneiras diferentes: por quedas sucessivas (*nappe flow*), de transição e deslizante sobre turbilhões (*skimming flow*). O tipo de escoamento é dado pela inclinação da soleira em degrau e pela vazão do escoamento a montante (HENRIQUES, 2014).

O escoamento em quedas consecutivas é representado por uma série de quedas livres de jatos de água oriundas dos degraus anteriores que atingem os degraus posteriores. A dissipação de energia nessa estrutura ocorre pelo atrito e incorporação do ar com a água, pelo impacto do jato sobre o degrau subsequente, e caso o comprimento do degrau permita, pela formação de um ressalto hidráulico (ALMEIDA et al., 2014), como mostrado na Figura 25. Dessa forma, esse regime de escoamento necessita de degraus relativamente grandes, condicionando sua ocorrência a locais com soleiras de pouca inclinação ou com pequenas vazões (ARANTES, 2007).

Figura 25 – Representação das variações no regime de escoamento em estruturas de quedas sucessivas.



Fonte: Adaptado de Chanson (1994 a).

De acordo com Sanagiotto (2003) na zona de transição o escoamento apresenta propriedades mistas dos outros dois tipos de regime, *nappe flow* e *skimming flow*, porém não de forma tão bem definida.

Por fim, condicionado por vazões e inclinações maiores de sua soleira, o regime deslizante sobre turbilhões apresenta um escoamento principal que desliza sobre os degraus e um outro escoamento secundário com a formação de vórtices nas cavidades de cada degrau (SIMÕES, 2008).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Interface

Partindo do fato que o objetivo principal deste trabalho é fornecer uma forma rápida e simples de auxiliar o processo de dimensionamento de obras hidráulicas de dissipação de energia, a escolha mais lógica foi optar pela plataforma Excel, já que a mesma é amplamente utilizada e difundida no meio acadêmico, além de permitir a criação de interfaces mais receptivas por meio de planilhas operacionais e possibilitar o desenvolvimento do algoritmo de dimensionamento através da programação modular na linguagem *Visual Basic for Applications* (VBA).

A interface apresentada ao usuário do programa tem a finalidade principal de tornar a experiência de utilização mais simples e intuitiva. Dessa forma, ela apresenta de forma simplificada informações necessárias para uma correta utilização do usuário, informações para auxílio na escolha da estrutura de dissipação que melhor atenda às suas necessidades, teclas de acionamento para o caminhar dentro do programa, células destinadas a entrada e saída dos dados (resultados) relacionados ao dimensionamento e teclas de acionamento que auxiliam no processo de acesso aos módulos de dimensionamento.

3.2 Cota da bacia

Os módulos do programa contidos nesse item, “Cota da bacia”, não estão relacionados ao dimensionamento de uma bacia de dissipação específica, eles devem ser usados para se obter os parâmetros necessários ao dimensionamento de bacias de dissipação de energia pelo ressalto hidráulico usadas na base de vertedores.

O caso 1 trata-se da situação em que se conhece apenas as condições de escoamento na saída do vertedor e a cota onde deve ser instalada a bacia de dissipação. Outro ponto importante neste caso é que não é necessário considerar as características do escoamento à jusante da bacia. Assim, tem-se que os resultados deste módulo são as características iniciais do escoamento antes do ressalto hidráulico.

O caso 2 trata-se da situação em que se conhece as condições de escoamento na saída do vertedor e no canal após a bacia de dissipação, a jusante do ressalto hidráulico. Assim para se encontrar os resultados desse módulo, é necessário primeiramente verificar a cota em que se encontra a bacia de dissipação e a partir disso obter as características do escoamento a montante

do ressalto, visto que a altura conjugada do ressalto, Y_2 deve coincidir com a altura do escoamento do canal a jusante da bacia.

3.3 Descrição do algoritmo

A metodologia apresentada neste trabalho foi desenvolvida de forma que suas partes ou módulos trabalhem de forma independente e executem tarefas específicas, chamada de programação modular. 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.

Nesse contexto, a interface do programa permite ao usuário acesso à aba de dimensionamento de uma estrutura de dissipação de energia específica. Portanto, para cada tipo de estrutura abordada pelo programa existe uma tecla de acionamento que inicia o processo de cálculos estruturados dentro das rotinas e sub-rotinas de cada módulo.

A execução correta de cada módulo depende apenas dos dados de entrada iniciais inseridos pelo usuário. Assim, com os dados de entrada corretamente inseridos, basta clicar na tecla configurada de dimensionamento, e os resultados são impressos na tela. O processo de execução de cada módulo do programa é apresentado nos itens 3.3.1 a 3.3.14. Além disso, alguns desses itens apresentam as mesmas imagens contidas na planilha eletrônica desenvolvida, elas são utilizadas para facilitar o entendimento do usuário a respeito da estrutura, e indicar parâmetros e dimensões calculadas.

3.3.1 Cota da Bacia – Caso 1

Os passos 1 a 11 revelam de forma detalhada como o processo de cálculos é realizado. Todo o dimensionamento utilizado nos algoritmos contidos nos itens 3.3.1 a 3.3.6 seguem as equações e orientações propostas por Carvalho (2009).

Passo 1 – Inserir os dados de entrada em suas determinadas células.

Em que:

Y_0 – altura do escoamento na saída do vertedouro, m;

V_0 – velocidade do escoamento na saída do vertedouro, m/s;

Z_0 – cota do vertedouro, m;

Q – vazão do escoamento, m^3/s ;

b – largura do canal retangular, m;

Z_1 – cota da bacia de dissipação, m.

Passo 2 – Pressionar o botão “Dimensionamento”.

Os passos de 3 a 10 descrevem todos os cálculos que são realizados dentro do algoritmo desse módulo para efetuar o dimensionamento e expressão dos resultados.

Passo 3 – Cálculo da vazão unitária do escoamento através da Equação 1:

$$q = \frac{Q}{b} \quad (1)$$

Em que:

q – vazão unitária do escoamento, $m^3/s.m$.

Passo 4 – Isolar V_1 da Equação 2 do balanço de energias do escoamento entre o vertedor e o ponto de início do ressalto hidráulico obtendo a Equação 3.

$$Y_0 + \frac{V_0^2}{2g} + Z_0 = Y_1 + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 \quad (2)$$

Em que:

Y_1 – altura do escoamento a montante do ressalto hidráulico, m;

V_1 – velocidade do escoamento a montante do ressalto hidráulico, m/s;

g – aceleração da gravidade, m/s^2 .

$$V_1 = \sqrt{2 \left(Y_0 + \frac{V_0^2}{2g} + Z_0 - Y_1 - Z_1 \right)} \quad (3)$$

Passo 5 – Primeiramente, o cálculo é executado excluindo Y_1 da equação, resultando na Equação 4.

$$V_1 = \sqrt{2 \left(Y_0 + \frac{V_0^2}{2g} + Z_0 - Z_1 \right)} \quad (4)$$

Passo 6 - Calcular Y_1 a partir do valor de V_1 obtido pela Equação 4 utilizando a equação 5.

$$Y_1 = \frac{q}{V_1} \quad (5)$$

Passo 7 – Utilizar a Equação 3, e calcular um novo valor de V_1 .

Passo 8 – Com o novo valor para V_1 , calcula-se novamente Y_1 com a Equação 5.

Passo 9 – Os passos 7 e 8 são repetidos dentro de uma estrutura de repetição até que aconteça uma convergência nos valores de Y_1 e V_1 .

Passo 10 – Utilizando os valores encontrados para Y_1 e V_1 é calculado valor de Fr_1 utilizando a Equação 6.

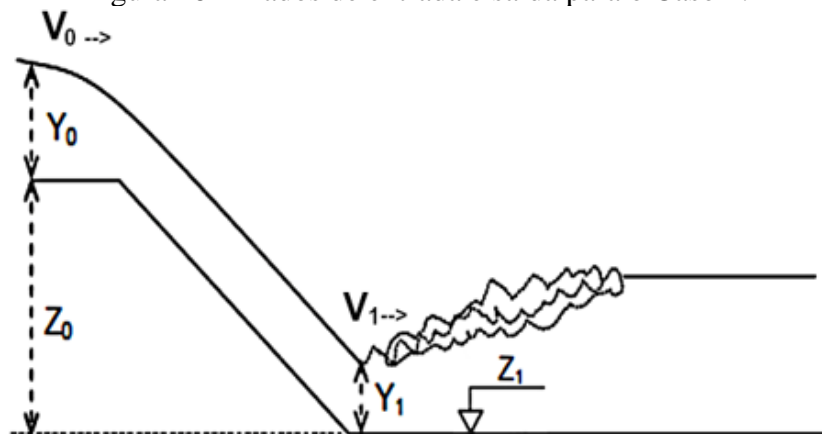
$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g Y_1}} \quad (6)$$

Em que:

Fr_1 – número de Froude a montante do ressalto hidráulico.

Passo 11 – Por fim, os dados de saída encontrados ao longo do processo de cálculo realizado pelo algoritmo, Y_1 , V_1 e Fr_1 são mostrados na tela em suas respectivas células. Os dados de entrada e saída utilizados nesse módulo podem ser vistos na Figura 26.

Figura 26 – Dados de entrada e saída para o Caso 1.



Fonte: Adaptado de Carvalho (2009).

3.3.2 Cota da Bacia – Caso 2

Os passos 1 a 14 revelam o detalhamento dos cálculos realizados para esse módulo.

Passo 1 – Inserir os dados de entrada, Y_0 , V_0 , Z_0 , Q , b , Y_3 , V_3 , Z_3 .

Em que:

Y_3 – altura do escoamento a jusante da bacia de dissipação, m;

V_3 – velocidade do escoamento a jusante da bacia de dissipação, m/s;

Z_3 – cota do canal a jusante da bacia, m;

Passo 2 – Pressionar o botão “Dimensionamento”.

Novamente, a partir do passo 3, são descritos os cálculos utilizados pelo algoritmo até a expressão dos resultados na tela.

Passo 3 – Cálculo da vazão unitária do escoamento através da Equação 1.

Passo 4 – Isolar V_1 da equação 2 do balanço de energias do escoamento entre o vertedor e o ponto de início do ressalto hidráulico obtendo a Equação 3, nesse caso, inicialmente considera-se Z_1 igual a Z_3 .

Passo 5 – O cálculo é executado excluindo Y_1 da equação, resultando na Equação 4.

Passo 6 - Calcular Y_1 a partir do valor de V_1 obtido pela equação 4 utilizando a Equação 5.

Passo 7 – Utilizar a Equação 3, e calcular um novo valor de V_1 .

Passo 8 – Com o novo valor para V_1 , calcula-se novamente Y_1 com a Equação 5.

Passo 9 – Utilizando os valores encontrados para Y_1 e V_1 é calculado o valor de Fr_1 utilizando a Equação 6.

Passo 10 – Cálculo o valor de Y_2 através da Equação 7.

$$Y_2 = \frac{Y_1}{2} \left(\sqrt{(1 + 8 Fr_1^2)} - 1 \right) \quad (7)$$

Em que:

Y_2 – altura conjugada do ressalto hidráulico, m.

Passo 11 – Cálculo de V_2 utilizando a Equação 8.

$$V_2 = \frac{q}{Y_2} \quad (8)$$

Em que:

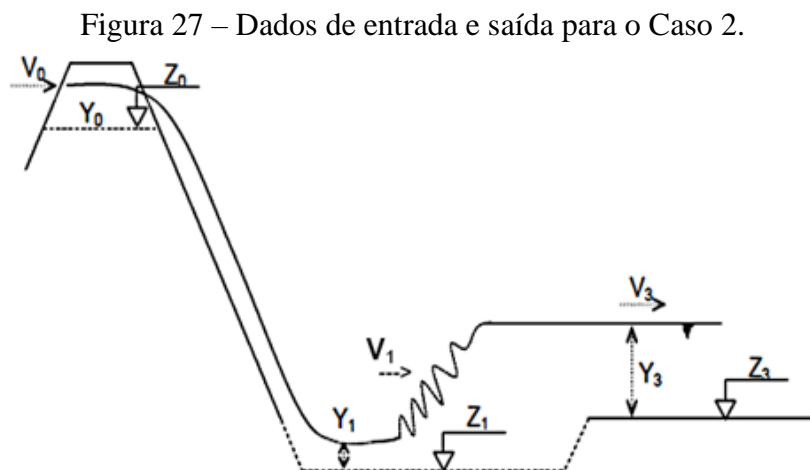
V_2 – velocidade do escoamento a jusante do ressalto hidráulico, m/s.

Passo 12 – Cálculo do valor de Z_2 utilizando a Equação 9.

$$Z_2 = Y_1 + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 - Y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (9)$$

Passo 13 – O valor de Z_1 é igualado ao valor de Z_2 e os passos de 4 a 12 são repetidos dentro de uma estrutura de repetição até que os valores de Z_1 e Z_2 se igualem.

Passo 14 – Finalmente, os dados de saída, Y_1 , V_1 , Z_1 e Fr_1 são expressos na tela em suas respectivas células e alguns desses parâmetros são apresentados na Figura 27.



Fonte: Adaptado de Carvalho (2009).

3.3.3 Bacias de dissipação por ressalto – USBR I

O grupo de estruturas que utilizam o ressalto hidráulico como principal forma de dissipação de energia do escoamento tem seus dimensionamentos apresentados pelos itens 3.3.3 a 3.3.9. Este módulo efetua o dimensionamento de uma bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico do tipo USBR I. Os passos 1 a 11 revelam de forma detalhada como todo o processo é realizado.

Passo 1 – Inserir dados de entrada, Y_1 e V_1 .

Passo 2 – Acionar o botão “Dimensionamento”.

Os próximos passos descrevem todos os cálculos que são realizados dentro do algoritmo que efetua o dimensionamento da bacia e expressão os resultados.

Passo 3 – Cálculo da vazão unitária do escoamento através da Equação 10.

$$q = V_1 Y_1 \quad (10)$$

Passo 4 – Definição do número de Froude do escoamento pela Equação 6.

Passo 5 – Determinação da altura conjugada do ressalto, Y_2 , pela Equação 7.

Passo 6 – Determinação da velocidade a jusante do ressalto, V_2 , pela Equação 8.

Passo 7 – Utilizando os valores encontrados para Y_2 e V_2 é calculado valor de Fr_2 utilizando a Equação 11.

$$Fr_2 = \frac{V_2}{\sqrt{g Y_2}} \quad (11)$$

Em que:

Fr_2 – número de Froude a jusante do ressalto hidráulico.

Passo 8 – Cálculo da altura do ressalto hidráulico, Y_R , utilizando a Equação 12.

$$Y_R = Y_2 - Y_1 \quad (12)$$

Passo 9 – Cálculo da porcentagem de energia dissipada pelo ressalto hidráulico, ε , aplicando os resultados anteriores na Equação 13.

$$\varepsilon = \left(\frac{(Y_1 + \frac{V_1^2}{2g}) - (Y_2 + \frac{V_2^2}{2g})}{Y_1 + \frac{V_1^2}{2g}} \right) 100 \quad (13)$$

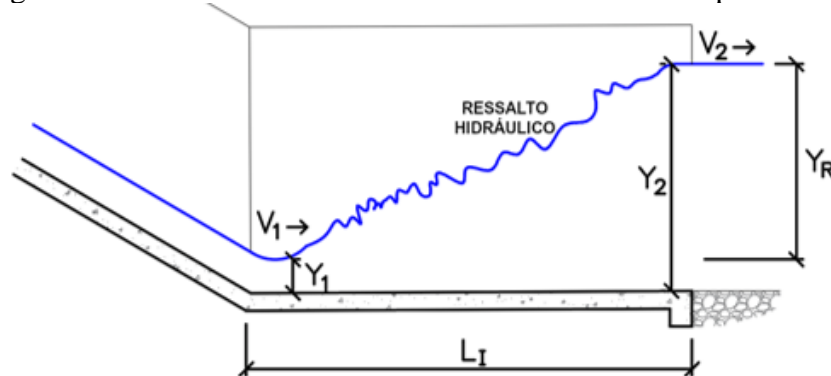
Passo 10 – Cálculo do comprimento total da bacia de dissipação em metros, L_I , através da Equação 14.

$$L_I = 6,9 Y_R \quad (14)$$

Passo 11 – Por fim, os resultados do dimensionamento, Y_2 , V_2 , Fr_2 , Y_R , ε e L_I , são apresentados. Alguns dos parâmetros dimensionados e outros usados como dados de entrada

podem ser observados na Figura 28.

Figura 28 – Dados de entrada e saída referentes a bacia tipo USBR I.



Fonte: Do autor (2020).

3.3.4 Bacias de dissipação por ressalto – USBR II

A bacia de dissipação do tipo USBR II tem o início de seu dimensionamento conforme o dimensionamento do item 3.3.3, assim os passos 1 a 9 são repetidos nesse módulo, a partir disso tem-se o cálculo do comprimento da bacia e o dimensionamento dos acessórios presentes nessa estrutura.

Passo 10 – Cálculo do comprimento total da bacia de dissipação em metros, L_{II} , utilizando da Equação 15.

$$L_{II} = 4,3 Y_2 \quad (15)$$

Passo 11 – Dimensionamento dos blocos de queda.

Os blocos de queda têm suas dimensões de altura, largura e espaçamento entre blocos iguais a altura Y_1 .

Passo 12 – Dimensionamento da soleira terminal dentada.

A altura da soleira terminal é igual a $1/5$ da altura Y_2 e sua largura e espaçamento dos dentes igual $3/20$ da altura Y_2 .

Passo 13 – Por último, tem-se os dados de saída do dimensionamento apresentados na tela.

3.3.5 Bacias de dissipação por ressalto – USBR III

Os passos 1 a 9 do item 3.3.3 repetem-se, a partir disso, são calculados os demais parâmetros do dimensionamento.

Passo 10 - Cálculo do comprimento total da bacia de dissipação em metros, L_{III} , com o

uso da Equação 16.

$$L_{III} = 2,7 Y_2 \quad (16)$$

Passo 11 – Cálculo do parâmetro y_3 através da Equação 17.

$$y_3 = (0,1625 Fr_1 + 0,6768) Y_1 \quad (17)$$

Em que:

y_3 – parâmetro para dimensionamento dos acessórios da estrutura.

Passo 12 – Cálculo do parâmetro y_4 através da Equação 18.

$$y_4 = (0,0542 Fr_1 + 1,1067) Y_1 \quad (18)$$

Em que:

y_4 – parâmetro para dimensionamento dos acessórios da estrutura.

Passo 13 - Dimensionamento dos blocos de queda.

Os blocos de queda têm as dimensões de altura, largura e espaçamento entre blocos iguais ao valo de Y_1 .

Passo 14 – Dimensionamento dos blocos amortecedores.

A altura dos blocos amortecedores é equivalente a y_3 , a largura e o espaçamento entre os blocos são equivalentes a $3/4$ de y_3 , e pôr fim a distância entre os blocos é de $4/5$ de Y_2 .

Passo 15 - Dimensionamento da soleira terminal.

A altura da soleira terminal corresponde ao valor de y_4 .

Passo 16 – Finalmente, os resultados são expressos em suas células.

3.3.6 Bacias de dissipação por ressalto – USBR IV

Para esse tipo de estrutura, os passos 1 a 9 são exatamente iguais aos das estruturas anteriores.

Passo 10 - Cálculo do comprimento total da bacia de dissipação em metros, L_{IV} , com o uso da Equação 19.

$$L_{IV} = 2,05 Fr_1 + 2,9 \quad (19)$$

Passo 11 – Cálculo do parâmetro y_4 através da Equação 18.

Passo 12 – Dimensionamento dos blocos de queda.

Os blocos de queda têm altura igual a duas vezes o valor de Y_1 , largura igual a Y_1 e espaçamento entre blocos igual a $5/2$ de Y_1 .

Passo 13 – Dimensionamento da soleira terminal.

A altura da soleira terminal é definida pelo valor de y_4 .

Passo 14 – Impressão dos resultados do dimensionamento na tela.

3.3.7 Bacias de dissipação por ressalto – SAF

O algoritmo pertencente a este módulo, executa o dimensionamento da bacia de dissipação do tipo SAF através dos Passos 1 a 13, utilizando as equações e proposições de Thompson e Kilgore (2006).

Passo 1 - Inserir os dados de entrada, D, Q, Z₀, Y₁, V₁, Z₁, z, St, Ss, S₀.

Em que:

D – diâmetro da tubulação de saída, m;

Z₀ – cota da bacia na saída da tubulação, m;

z – alargamento da bacia (m/m), z:1(largura:comprimento);

St – inclinação da transição de entrada na bacia (m/m), St:1 (vertical:horizontal);

Ss – inclinação à saída da bacia (m/m), Ss:1 (vertical:horizontal);

S₀ – inclinação da tubulação de saída a montante da bacia (m/m), S₀:1 (vertical:horizontal).

Passo 2 – Determinar Fr₁ através da Equação 6.

Passo 3 – Determinar Y₂ através da Equação 7.

Passo 4 – Determinar o valor do coeficiente C utilizando a Equação 20.

$$\begin{aligned}
 C &= 1,1 - \frac{Fr_1^2}{120} && \text{para } 1,7 \leq Fr_1 < 5,5 \\
 C &= 1,1 - \frac{Fr_1^2}{120} && \text{para } 5,5 \leq Fr_1 < 11 \\
 C &= 1,1 - \frac{Fr_1^2}{800} && \text{para } 11 \leq Fr_1 < 17
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

Em que:

C – coeficiente em função do número de Froude.

Passo 5 – Calcular o comprimento de transição em metros, Lt, utilizando a Equação 21.

$$Lt = \frac{Z_0 - Z_1}{St}
 \tag{21}$$

Passo 6 – Calcular o comprimento da bacia de dissipação em metros, Lb, utilizando a Equação 22.

$$Lb = \frac{4,5 Y_2}{C Fr_1^{0,76}}
 \tag{22}$$

Passo 7 – Calcular o comprimento da zona de saída da bacia em metros, Ls, utilizando a Equação 23.

$$L_s = \frac{L_t (S_t - S_0) - L_b S_0}{S_s + S_0} \quad (23)$$

Passo 8 – Calcular o comprimento total da bacia, L_{SAF} , dado em metros, através da soma dos resultados das Equações 21, 22 e 23, o que gera a Equação 24.

$$L_{SAF} = L_t + L_b + L_s \quad (24)$$

Passo 9 – Calcular a largura da bacia na seção dos blocos de queda, W_{b1} , a largura da bacia na seção dos blocos de amortecimento, W_{b2} , e a largura da bacia na seção da soleira terminal, W_{b3} , dados pelas Equações 25, 26 e 27, respectivamente, com todos os resultados em metro.

$$W_{b1} = 1,7 D \left(\frac{Q}{\sqrt[2]{g} D^{2,5}} \right) \quad (25)$$

$$W_{b2} = W_{b1} + \left(\frac{2 z L_b}{3} \right) \quad (26)$$

$$W_{b3} = W_{b1} + 2 z L_b \quad (27)$$

Nos casos em que as paredes laterais da bacia não sofrem alargamento, adota-se $z = 0$, consequentemente, os valores de W_{b1} , W_{b2} e W_{b3} serão iguais.

Passo 10 – Dimensionamento dos blocos de queda.

A altura dos blocos tem dimensão igual ao valor de Y_1 e o número de blocos de queda, $N1$, é dado pela Equação 28.

$$N1 = \frac{W_{b1}}{1,5 Y_1} \quad (28)$$

A largura e o espaçamento dos blocos de queda são iguais a $3/4$ de Y_1 .

Passo 11 – Dimensionamento dos blocos amortecedores.

A altura dos blocos tem dimensão igual ao valor de Y_1 e o número de blocos amortecedores, $N2$, é dado pela Equação 29.

$$N2 = \frac{W_{b2}}{1,5 Y_1} \quad (29)$$

A largura e o espaçamento dos blocos amortecedores são iguais a $3/4$ de Y_1 , a distância entre os blocos de queda e os blocos amortecedores adotada, é igual a $1/3$ da distância L_b , e por fim, a folga que deve ser colocada entre os blocos amortecedores e as paredes laterais é equivalente a $3/8$ de Y_1 .

Passo 12 – Dimensionamento da soleira vertical.

A altura da soleira terminal corresponde ao valor de Y_1 multiplicado por 0,07 e dividido por C .

Passo 13 – Expressão dos resultados. Alguns dos parâmetros dimensionados podem ser observados nas Figuras 11 e 12.

3.3.8 Bacias de dissipação por ressalto – PWD

Os passos 1 a 6 descrevem o cálculo dos parâmetros dentro desse módulo para o dimensionamento de uma bacia de dissipação do tipo PWD como descrito por Argue (1961, citado por Pinheiro, 2006).

Passo 1 – Inserir o diâmetro do conduto.

Passo 2 – Calcular as dimensões da bacia, sendo que todas são obtidas a partir do diâmetro da tubulação de saída. Sendo assim, tem-se o cálculo dos comprimentos de L1 a L6 através das Equações 30 a 35.

$$L1 = 2 D \quad (30)$$

$$L2 = 1,5 D \quad (31)$$

$$L3 = 0,5 D \quad (32)$$

$$L4 = 0,2 D \quad (33)$$

$$L5 = 4 D \quad (34)$$

$$L6 = 2 (4,2 D \tan(17)) + D \quad (35)$$

Passo 3 – Cálculo das elevações apresentadas na bacia, utilizando as Equações 36 e 37.

$$h1 = 0,5 D \quad (36)$$

$$h2 = D \quad (37)$$

Passo 4 – Cálculo da velocidade máxima de entrada, $V_{\text{máx.}}$, suportada pela bacia de dissipação em m/s, dada pela Equação 38.

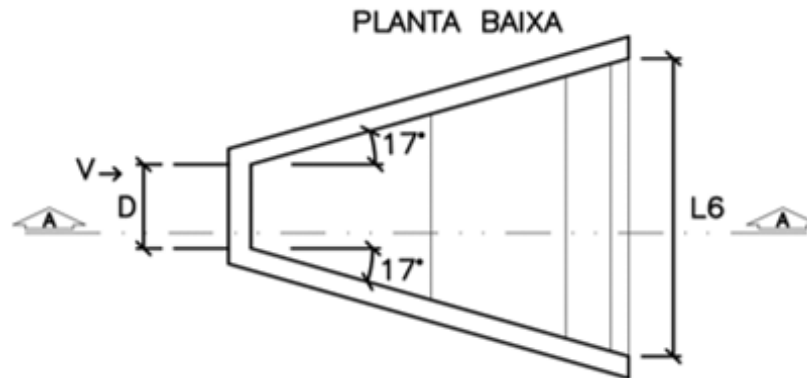
$$V_{\text{máx.}} = 2 \sqrt{g D} \quad (38)$$

Passo 5 – Cálculo da carga hidráulica máxima, h , suportada pela bacia de dissipação em m, dada pela Equação 39.

$$h = 3 D \quad (39)$$

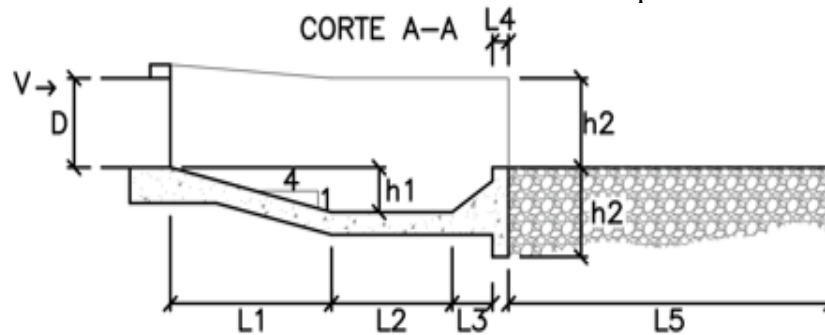
Passo 6 – Fim da execução do módulo com os dados de saídas expressos na tela. Parte dos valores dimensionados são apresentados nas Figuras 29 e 30.

Figura 29 – Dados de entrada e saída referentes a bacia tipo PWD – Vista superior.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 30 – Dados de entrada e saída referentes a bacia tipo PWD – Vista lateral.



Fonte: Do autor (2020).

3.3.9 Bacias de dissipação por ressalto – WES

Os passos 1 a 6 descrevem os parâmetros calculados dentro desse módulo para o dimensionamento de uma bacia de dissipação do tipo PWD de acordo com Fletcher e Grace (1972).

Passo 1 – Inserir o diâmetro do conduto.

Passo 2 – Cálculo das dimensões da bacia de dissipação. Assim como no item 3.3.8, a altura e os comprimentos dimensionados são obtidos neste módulo são dependentes do diâmetro da tubulação de descarga, assim tem-se as Equações 40, 41 e 42.

$$L1 = 5 D \quad (40)$$

$$L2 = 2,25 D \quad (41)$$

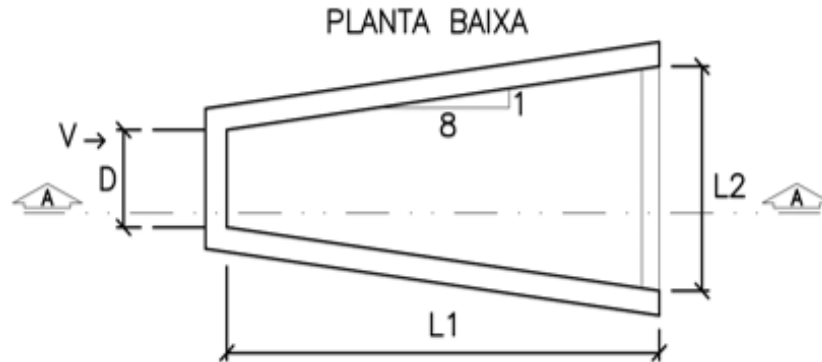
$$h_{\text{máx.}} = 0,5 D \quad (42)$$

A Equação 42 trata-se do desnível máximo recomendado entre a parte inferior da tubulação e a soleira da bacia de dissipação.

Passo 3 – Cálculo da velocidade máxima de entrada, $V_{\text{máx.}}$, suportada pela bacia de dissipação em m/s, dada pela Equação 38.

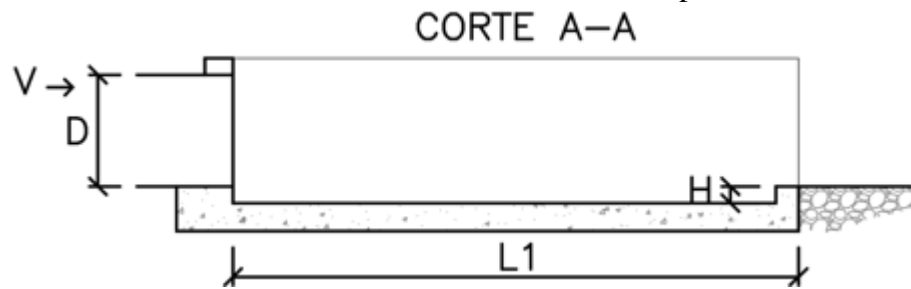
Passo 4 – Expressão dos resultados do dimensionamento ao final da execução do módulo. Algumas das dimensões usadas como dados de entrada ou saída podem ser observados nas Figuras 31 e 32.

Figura 31 – Dados de entrada e saída referentes a bacia tipo WES – Vista superior.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 32 – Dados de entrada e saída referentes a bacia tipo WES – Vista lateral.



Fonte: Do autor (2020).

3.3.10 Dissipação por impacto ou macrorugosidades – USBR VI

As descrições contidas nos módulos 3.3.10 a 3.3.12 apresentam os cálculos utilizados dentro de seus respectivos módulos para cada uma das estruturas de dissipação. Estruturas as quais tem como principal forma de dissipação de energia o impacto do jato de água contra um determinado elemento ou a elevada perda de carga provocada por macrorugosidades que formam a estrutura.

Dessa forma, este item trata do dimensionamento da bacia de dissipação por impacto do tipo USBR VI segundo Peterka (1978) e Carvalho (2009).

Os passos 1 a 4 apresentam o processo de dimensionamento realizado pelo programa.

Passo 1 – Selecionar o diâmetro da tubulação de saída ou aquele que mais aproxime do caso que deseja obter o dimensionamento.

Passo 2 – Pressionar a tecla de acionamento do dimensionamento.

Passo 3 – A partir da opção de diâmetro selecionada o programa utiliza a Tabela 1 para obter os parâmetros de dimensionamento da estrutura.

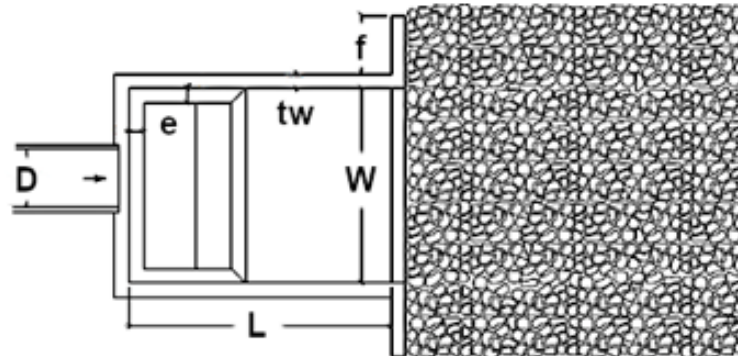
Tabela 1 – Parâmetros de dimensionamento da bacia de dissipação do tipo USBR IV.

D (pol)	D (m)	Q (m ³ /s)	H (m)	L (m)	W (m)	a (m)	b (m)	c (m)	d (m)	e (m)	f (m)	g (m)	tw (m)	tf (m)	tb (m)	tp (m)
18	0,46	0,60	1,30	2,25	1,70	1,00	1,25	0,70	0,30	0,15	0,45	0,65	0,15	0,15	0,15	0,15
24	0,61	1,10	1,60	2,75	2,00	1,20	1,55	0,80	0,40	0,15	0,60	0,75	0,15	0,15	0,15	0,15
30	0,76	1,70	1,90	3,25	2,45	1,40	1,85	1,00	0,45	0,20	0,75	0,90	0,15	0,15	0,20	0,20
36	0,91	2,40	2,20	3,75	2,80	1,60	2,15	1,15	0,50	0,20	0,90	1,05	0,20	0,20	0,20	0,20
42	1,07	3,30	2,45	4,25	3,20	1,85	2,45	1,35	0,55	0,25	0,90	1,20	0,20	0,20	0,25	0,20
48	1,22	4,30	2,75	4,80	3,60	2,05	2,70	1,50	0,60	0,25	0,90	1,35	0,25	0,25	0,25	0,20
54	1,37	5,40	3,00	5,30	3,95	2,25	3,05	1,65	0,65	0,30	0,90	1,50	0,25	0,25	0,25	0,20
60	1,52	6,70	3,30	5,80	4,35	2,45	3,35	1,80	0,75	0,30	0,90	1,65	0,30	0,30	0,30	0,20
72	1,83	9,60	3,75	6,70	5,00	2,80	3,90	2,10	0,85	0,40	0,90	1,90	0,30	0,30	0,30	0,20

Fonte: Adaptado de Carvalho (2009).

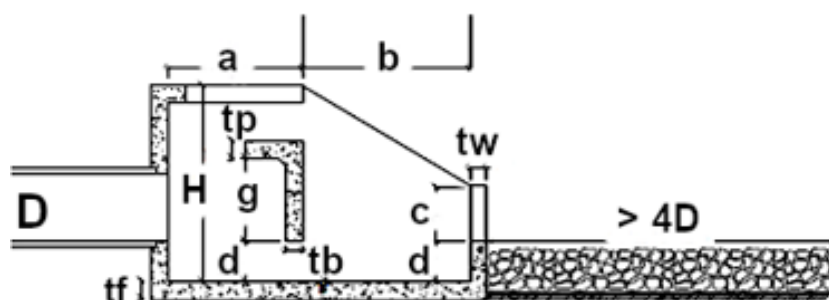
Passo 4 – Os parâmetros retirados a partir da tabela são expressos como resultados do dimensionamento. Dessa forma, todos eles são indicados em suas devidas posições na bacia de dissipação por impacto do tipo USBR VI apresentada nas Figuras 33 e 34.

Figura 33 – Dados de entrada e saída referentes a bacia tipo USBR VI – Vista superior.



Fonte: Adaptado de Carvalho (2009).

Figura 34 – Dados de entrada e saída referentes a bacia tipo USBR VI – Vista lateral.



Fonte: Adaptado de Carvalho (2009).

3.3.11 Dissipação por impacto ou macrorugosidades – USBR IX

A bacia de dissipação do tipo USBR IX ou rampa com blocos tem seu dimensionamento descrito pelos passos 1 a 8, seguindo as equações e proposições apresentadas por Peterka (1978).

Passo 1 – Inserir os dados de entrada do dimensionamento, Q , b , H e z .

Em que:

b – largura da rampa, m;

H – desnível entre o início e o fim da rampa, medido verticalmente, m;

z – inclinação da rampa ($z:1$) (horizontal:vertical).

A inclinação da rampa deve ser preferencialmente 2:1 ou menor, os valores mais comumente utilizados na execução dessa estrutura para z variam de 2 a 4.

Passo 2 – Iniciar o processo de dimensionamento pressionando a tecla de acionamento do dimensionamento.

Passo 3 – O algoritmo inicia o processo de dimensionamento calculando o valor da vazão unitária do escoamento utilizando a Equação 1.

Passo 4 – Com o resultado anterior é calculada a altura crítica do escoamento, Y_c , através da Equação 43 e a velocidade inicial máxima de entrada ($V_{0, \text{máx.}}$) recomendada para essa estrutura por meio da Equação 44.

$$Y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (43)$$

$$V_{0, \text{máx.}} = \sqrt[3]{g q^2} - 1,53 \quad (44)$$

Passo 5 – Com o resultado obtido para a altura crítica do escoamento são calculadas as dimensões dos blocos.

A altura, H_B , do bloco é dada pela multiplicação de Y_c por 0,8. E a partir desse valor são tomadas as outras medidas. A parte superior do bloco é dada por $0,2 H_B$, limitada por um mínimo de 25 centímetros, e a base do bloco é equivalente a $0,7 H_B$. A largura dos blocos e a distância entre eles em uma mesma fileira é equivalente ao valor de $1,5 H_B$. O distanciamento entre as fileiras de blocos dispostas em posições intercaladas é igual a $2 H_B$ e o muro lateral da rampa com blocos tem altura de $3 H_B$.

Passo 6 – Cálculo do comprimento da rampa, L_R , utilizando a Equação 45.

$$L_R = \sqrt{H^2 + (z H)^2} \quad (45)$$

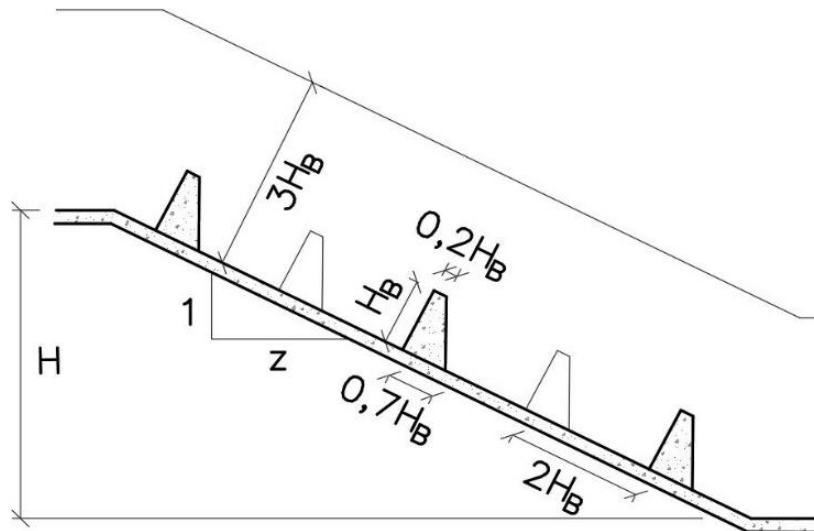
Passo 7 – Cálculo do número de fileiras de blocos que serão construídas ao longo da rampa utilizando a Equação 46.

A primeira fileira de blocos deve ser colocada com um desnível horizontal de 30 centímetros, portanto esse valor deve ser descontado no comprimento utilizado para o cálculo do número de fileiras de blocos, N_F .

$$N_F = \frac{L_R - 0,3 Z}{2 H_B} \quad (46)$$

Passo 8 – Por fim, os resultados do dimensionamento são expressos no programa. Como pode ser visto na Figura 35, muitos dos parâmetros calculados são obtidos a partir da altura dos blocos (H_B).

Figura 35 – Dados de entrada e saída referentes a bacia tipo USBR IX.



Fonte: Do autor (2020).

3.3.12 Dissipação por impacto ou macrorugosidades – Tapete de enrocamento

Este item tem a função de descrever o processo de dimensionamento do tapete de enrocamento utilizado a jusante de condutos pontuando os passos de 1 a 6 realizados no programa e no respectivo módulo, sendo que as equações e cálculos utilizados são os mesmos descritos por Thompson e Kilgore (2006).

Passo 1 – Inserir os dados de entrada, Q , D e H_j .

Em que:

H_j – altura do escoamento a jusante do tapete de enrocamento, m.

Quando o valor de $(H_j/D) < (0,4D)$, adota-se $H_j = 0,4D$. O mesmo valor deve ser adotado quando H_j for desconhecido.

Passo 2 – Início do processo de dimensionamento, pressionando a tecla de acionamento.

Passo 3 – Encontrar o valor de D_{50} , a partir da Equação 47.

$$D_{50} = 0,2 D \left(\frac{Q}{\sqrt[2]{g} D^{2,5}} \right) \frac{D}{H_j} \quad (47)$$

Em que:

D_{50} – diâmetro médio do material granular utilizado no tapete de enrocamento, m.

Passo 4 – Com o auxílio da Tabela 2 e usando o resultado encontrado pela Equação 47, são obtidos alguns parâmetros do tapete de enrocamento, o comprimento do tapete, L_t , e a espessura do tapete, E_t .

Tabela 2 – Dimensões do tapete de enrocamento.

D_{50} (m)	Comprimento do tapete (m)	Espessura do tapete (m)
0,125	4D	3,5 D_{50}
0,150	4D	3,3 D_{50}
0,250	5D	2,4 D_{50}
0,350	6D	2,2 D_{50}
0,500	7D	2,0 D_{50}
0,550	8D	2,0 D_{50}

Fonte: Adaptado de Thompson e Kilgore (2006).

Passo 5 – Cálculo das larguras iniciais e finais do enrocamento utilizando as Equações 48 e 49.

$$W_{t1} = 3 D \quad (48)$$

$$W_{t2} = 3 D + \frac{2}{3} L_t \quad (49)$$

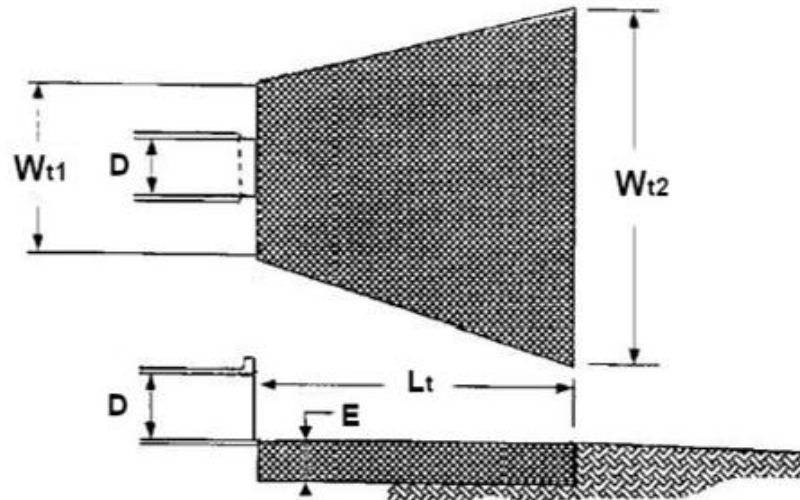
Em que:

W_{t1} – largura mínima do enrocamento junto a saída da passagem hidráulica, m;

W_{t2} – largura mínima do tapete ao final do comprimento, m.

Passo 6 – Expressão dos resultados do dimensionamento na interface do programa. Os parâmetros dimensionados são apresentados na Figura 36.

Figura 36 – Dados de entrada e saída referentes ao tapete de enrocamento.



Fonte: Adaptado de Thompson e Kilgore (2006).

3.3.13 Dissipação por quedas – Queda simples

Os itens 3.3.13 e 3.3.14 são relativos aos dimensionamentos de estruturas em quedas. Assim, este módulo apresenta os procedimentos realizados para obtenção das dimensões de uma bacia de queda simples utilizando as equações propostas por Thompson e Kilgore (2006).

Passo 1 – Inserir os dados de entrada, Q , b e H_d .

Em que:

b – largura da estrutura de queda, m.

H_d – altura da queda, m.

Passo 2 – Início do processo de dimensionamento realizado pelo algoritmo do módulo, após pressionar a tecla de “Dimensionamento”.

Passo 3 – Cálculo da vazão unitária do escoamento utilizando a Equação 1.

Passo 4 – Cálculo de N_q utilizando a Equação 50.

$$N_q = \frac{q^2}{g H_d^3} \quad (50)$$

Em que:

N_q – Número de queda;

Passo 5 – Cálculo das alturas Y_1 , Y_2 e Y_3 através das Equações 51, 52 e 53, respectivamente.

$$Y_1 = 0,54 H_d N_q^{0,425} \quad (51)$$

$$Y_2 = 1,66 H_d N_q^{0,27} \quad (52)$$

$$Y_3 = H_d N_q^{0,22} \quad (53)$$

Em que:

Y_1 – altura do escoamento no início do ressalto hidráulico, m;

Y_2 – altura do escoamento no fim do ressalto hidráulico, m;

Y_3 – altura do escoamento abaixo da zona arejada, m.

Passo 6 – Cálculo dos comprimentos L_1 e L_2 por meio das Equações 54 e 55, respectivamente.

$$L_1 = 4,3 H_d N_q^{0,27} \quad (54)$$

$$L_2 = 6,9 (Y_2 - Y_1) \quad (55)$$

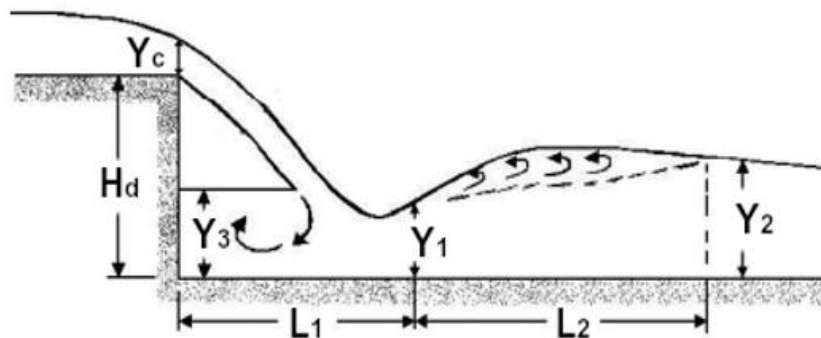
Em que:

L_1 – comprimento entre a parede da queda e o início do ressalto, m;

L_2 – comprimento do ressalto hidráulico, m.

Passo 7 – Fim do algoritmo contido no módulo e expressão dos resultados. Alguns dos dados de entrada e calculados podem ser vistos na Figura 37.

Figura 37 – Dados de entrada e saída referentes a bacia de dissipação por queda simples.



Fonte: Adaptado de Thompson e Kilgore (2006).

3.3.14 Dissipação por quedas – Quedas sucessivas

A estrutura descrita no item 3.3.14 trata-se de um dissipador de energia com escoamento em quedas sucessivas (*nappe flow*), dessa forma na soleira de cada degrau após o impacto do jato de água vindo do degrau anterior ocorre a formação do ressalto hidráulico. O dimensionamento realizado no programa garante que os degraus tenham o comprimento necessário para conter esse ressalto hidráulico por completo. Os passos de 1 a 9 revelam tal dimensionamento.

Passo 1 – Inserir os dados de entrada, Q , b , H , H_d

Em que:

b – largura da estrutura em quedas sucessivas;

H – altura total das quedas sucessivas;

H_d – altura de cada degrau.

Passo 2 – Iniciar o dimensionamento pressionando a tecla de “Dimensionamento”.

Passo 3 - Cálculo da vazão unitária do escoamento utilizando a Equação 1.

Passo 4 – Cálculo da altura crítica do escoamento através da Equação 43.

Passo 5 – Cálculo do número de degraus, N_d , utilizando a Equação 56.

$$N_d = \frac{H}{H_d} \quad (56)$$

Passo 6 – Cálculo do comprimento do degrau, L_d , respeitando a Equação 57 descrita por Chanson (1994 b).

$$\frac{Y_c}{H_d} \leq 0,0916 \left(\frac{H_d}{L_d} \right)^{-1,276} \quad (57)$$

Inicialmente, assume-se um valor de L_d igual a duas vezes o valor de H_d , caso a verificação feita através de Equação 57 não seja verdadeira, o valor de L_d é acrescido em cinco centímetros, até que a verificação se torne verdadeira. Assim o comprimento do degrau obtido garante a formação completa do ressalto hidráulico.

Passo 7 – Cálculo do comprimento total da estrutura de quedas sucessivas, L , através da Equação 58.

$$L = N_d L_d \quad (58)$$

Passo 8 – Cálculo da perda de carga, ΔH , em metros provocada no escoamento devido a passagem deste pela estrutura em quedas sucessivas utilizando a Equação 59 proposta por Chanson (1994 b).

$$\Delta H = \left(1 - \frac{0,54 \left(\frac{Y_c}{H_d} \right)^{0,275} + 0,54 \left(\frac{Y_c}{H_d} \right)^{-0,55}}{1,5 + \frac{P}{Y_c}} \right) H_1 \quad (59)$$

Em que:

P – altura total da estrutura de quedas, m;

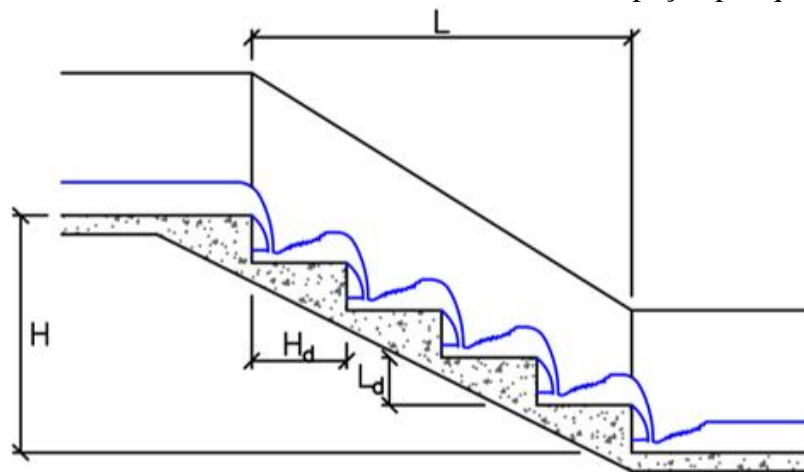
H_1 – carga hidráulica a montante da estrutura, $H_1 = P + 1,5Y_c$, em metros.

Passo 9 – Cálculo da porcentagem de energia dissipada (ε) utilizando a Equação 60.

$$\varepsilon = \left(\frac{\Delta H}{H} \right) 100 \quad (60)$$

Passo 10 – Expressão dos resultados na aba do programa. Parte dos dados de entrada e dos dados de saída são apresentados na Figura 38.

Figura 38 – Dados de entrada e saída referentes a bacia de dissipação por quedas sucessivas.



Fonte: Do autor (2020).

3.4 Validação do dimensionamento realizado pelo programa

Uma maneira de validar os dimensionamentos realizados com o auxílio do programa é comparar seus resultados com os de outros autores. Dessa forma, foram colocados lado a lado os resultados do dimensionamento utilizando o programa com aqueles apresentados em publicações e livros de alguns autores citados como referência neste trabalho.

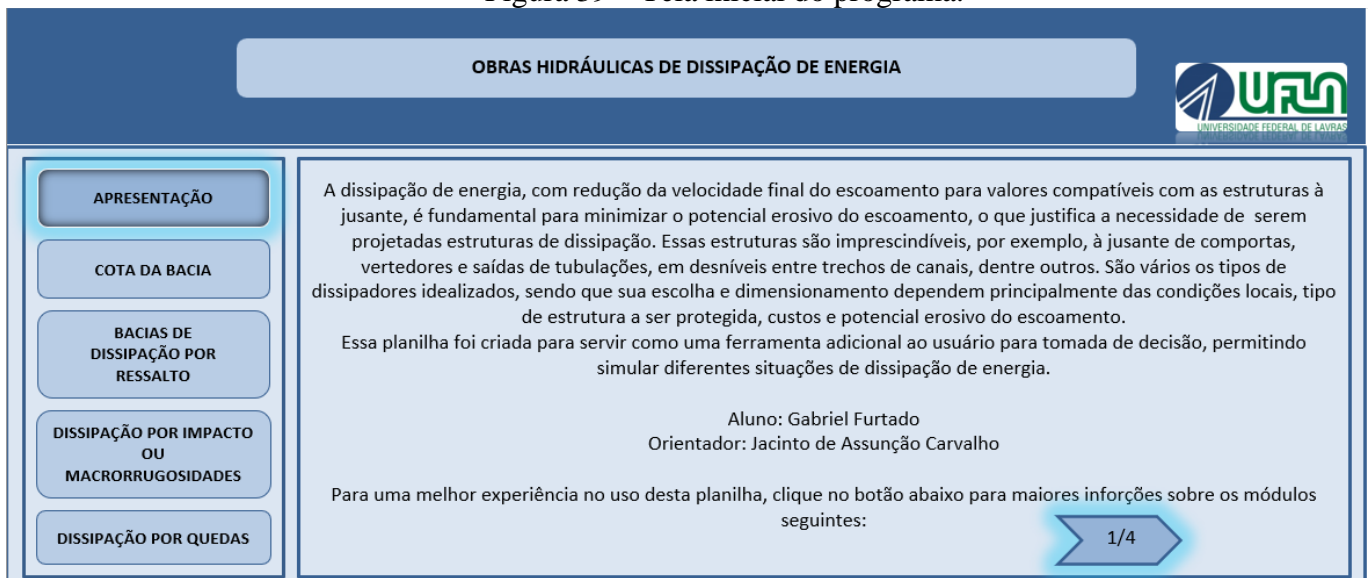
Foram simuladas situações com os mesmos dados iniciais utilizados pelos autores citados, sendo que, em algumas situações, foram feitas conversões para o sistema internacional de unidades.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Interface e programação desenvolvidas

A interface final do programa contou com 35 abas, todas interligadas de maneira a facilitar a navegação entre elas. Foram criadas 7 abas iniciais para apresentação e exibir instruções para facilitar sua utilização pelo usuário, sendo estas incluídas no tópico “Apresentação”. A Figura 39 ilustra a tela inicial do programa. As outras 28 abas estão relacionadas às abas de definição e detalhamento das obras de dissipação de energia e suas respectivas abas de dimensionamento.

Figura 39 – Tela inicial do programa.



Fonte: Do autor (2020)

O tópico “Cota da bacia” contém 4 abas, sendo duas para apresentação do Caso 1 e Caso 2 e as outras duas com seus respectivos dimensionamentos.


O item “Bacia de dissipação por ressalto” apresenta às abas relacionadas as sete bacias de dissipação por ressalto hidráulico descritas pelo programa, juntamente com suas telas de dimensionamento.

Os tópicos “Dissipação por impacto ou macrorrugosidades” e “Dissipação por quedas” contém também as abas de descrição das estruturas e as de dimensionamento.

Para exemplificar as Figuras 40 e 41 apresentam a tela de descrição e dimensionamento da bacia de dissipação do tipo USBR II.

Figura 40 – Tela de descrição da bacia do tipo USBR II.

OBRAS HIDRÁULICAS DE DISSIPACÃO DE ENERGIA



APRESENTAÇÃO

COTA DA BACIA

BACIAS DE DISSIPACÃO POR RESSALTO

DISSIPACÃO POR IMPACTO OU MACRORRUGOSIDADES

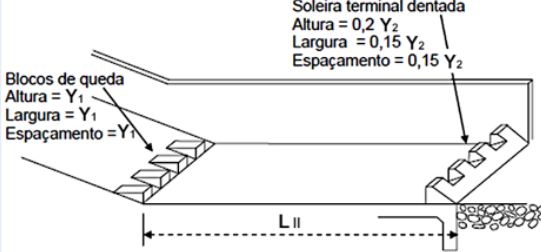
DISSIPACÃO POR QUEDAS

USBR I
USBR II
USBR III
USBR IV
SAF
PWD
WES

Bacia de dissipação recomendada para escoamentos com as seguintes características:
 Valores de Fr1 maiores que 4,5;
 Velocidade de entrada superiores a 15 m/s.

A estrutura é dotada de blocos de queda e uma soleira terminal dentada. O comprimento do fundo da bacia é, aproximadamente, 4,3 vezes a altura de jusante do ressalto hidráulico ($L_{II} \geq 4,3 Y_2$).

Soleira terminal dentada
 Altura = $0,2 Y_2$
 Largura = $0,15 Y_2$
 Espaçamento = $0,15 Y_2$




DIMENSIONAMENTO

Fonte: Do autor (2020)

Figura 41 – Tela de dimensionamento da bacia do tipo USBR II.

OBRAS HIDRÁULICAS DE DISSIPACÃO DE ENERGIA



APRESENTAÇÃO

COTA DA BACIA

BACIAS DE DISSIPACÃO POR RESSALTO

DISSIPACÃO POR IMPACTO OU MACRORRUGOSIDADES

DISSIPACÃO POR QUEDAS

USBR II
DIMENSIONAMENTO

DADOS DE ENTRADA:

Y1 (m):

V1 (m/s):

Y1

Altura do escoamento a montante do ressalto

DIMENSIONAR

DADOS DE SAÍDA:

Y2 (m):

V2 (m/s):

Fr2:

Yr (m):

Lii (m):

ε (%):

Blocos de queda:
 Altura, largura e espaçamento (m):

Soleira terminal:
 Altura:
 Largura e espaçamento:

LIMPAR

Fonte: Do autor (2020)

Dentre as 28 abas relativas as obras de dissipação de energia, 14 delas são específicas para o dimensionamento de cada uma, assim a programação desenvolvida foi dividida em 14 módulos que funcionam de forma totalmente independente.

Cada módulo contém uma sub-rotina que realiza os cálculos necessários para o dimensionamento de cada estrutura, além de ser responsável por imprimi-los na tela, estes ligados a tecla de acionamento “Dimensionar”. E uma segunda sub-rotina ligada a tecla de acionamento “Limpar”, responsável por reiniciar as variáveis do dimensionamento e apagar todos os dados inseridos nas células de entrada e saída. As Figuras 42 e 43 exibem, como

exemplo, as sub-rotinas relativas ao dimensionamento da bacia de dissipação do tipo USBR II.

Figura 42 – Sub-rotina de dimensionamento da bacia do tipo USBR II - Parte 1.

```

Sub usbr2 ()

Dim y1 As Double
Dim v1 As Double

y1 = Range("B30")
v1 = Range("B31")

Dim q As Double
Dim fr1 As Double
Dim y2 As Double
Dim v2 As Double
Dim fr2 As Double
Dim yr As Double
Dim lii As Double
Dim deltae As Double
Dim efi As Double
Dim bq As Double
Dim sta As Double
Dim stle As Double

q = y1 * v1
fr1 = Round(v1 / Sqr((9.81 * y1)), 2)

y2 = Round((y1 / 2) * (Sqr(1 + (8 * fr1 ^ 2)) - 1), 2)
Range("D30") = y2

v2 = Round(q / y2, 2)
Range("D31") = v2

fr2 = Round(v2 / Sqr((9.81 * y2)), 2)
Range("D32") = fr2

```

Fonte: Do autor (2020)

Figura 43 – Sub-rotina de dimensionamento da bacia do tipo USBR II - Parte 2.

```

Microsoft Visual Basic for Applications - OHDE 1.0.xlsm - [Módulo2 (Código)]
Arquivo  Editar  Exibir  Inserir  Formatar  Depurar  Executar  Ferramentas  Suplementos  Janela  Ajuda
Ln 44, Col 1

Projeto - VBAProject
VBAProject (OHDE 1.0.xlsm)
  Microsoft Excel Objetos
  Módulos
    Módulo1
    Módulo10
    Módulo11
    Módulo12
    Módulo13
    Módulo14
    Módulo2
    Módulo3
    Módulo4
    Módulo5
    Módulo6
    Módulo7
    Módulo8
    Módulo9

(Geral)  usbr2

fr2 = Round(v2 / Sqr((9.81 * y2)), 2)
Range("D32") = fr2

yr = y2 - y1
Range("D33") = Round(yr, 2)

l1i = Round(4.3 * y2, 2)
Range("D34") = l1i

deltae = (y1 + (v1 ^ 2 / 19.62)) - (y2 + (v2 ^ 2 / 19.62))

efi = Round((deltae / (y1 + (v1 ^ 2 / 19.62))) * 100, 2)
Range("D35") = efi

bq = y1
Range("F30") = Round(bq, 2)

sta = Round(0.2 * y2, 2)
Range("F31") = sta

stle = Round(0.15 * y2, 2)
Range("F32") = stle

End Sub

Sub limpar2()

Range("B30:B31").ClearContents
Range("D30:D35").ClearContents
Range("F30:F32").ClearContents

End Sub

```

Fonte: Do autor (2020)

4.2 Resultados da validação do dimensionamento realizado pelo programa

4.2.1 Bacia de dissipação tipo USBR I

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 expressos na Tabela 3 e os resultados apresentados na Tabela 4 junto com os resultados apresentados pelo programa.

Tabela 3 – Dados de entrada para validação dos resultados - USBR I.

Y_1	5,6 ft	1,71 m
V_1	85 ft/s	25,91 m/s

Fonte: Do autor (2020).

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

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

Fonte: Do autor (2020).

Como apresentado na Tabela 4, observa-se 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.

Também é possível observar na Tabela 4 que a variável V_2 não foi apresentada pelo autor, assim como deu-se a preferência por apresentar todos os parâmetros obtidos através da utilização do programa, as variáveis que não forem apontadas nos exemplos selecionados para comparação pelos autores aparecerão nas tabelas como “Não calculado”.

4.2.2 Bacia de dissipação tipo USBR II

Para validação do dimensionamento da bacia de dissipação por ressalto do tipo USBR II foram utilizados dois exercícios resolvidos, sendo o primeiro de Peterka (1978) e o segundo de Chow (1959). As Tabelas 5 e 7 expõe os dados de entrada utilizados no programa e pelos autores, e as Tabelas 6 e 8 exibem os resultados de ambos.

Tabela 5 – Dados de entrada para validação dos resultados 1 - USBR II.

Y_1	4,44 ft	1,35 m
V_1	108,2 ft/s	32,97 m/s

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 6 – Resultados para validação do dimensionamento 1 - USBR II.

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

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 7 – Dados de entrada para validação dos resultados 2 - USBR II.

Y_1	3,8 ft	1,16 m
V_1	79 ft/s	24,08 m/s

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 8 – Resultados para validação do dimensionamento 2 - USBR II.

Dados de saída		Resultados segundo Chow (1959)		Resultados obtidos pelo programa
	Y_2	36,90 ft	11,25 m	11,15 m
	V_2	Não calculado		2,51 m/s
	Fr_2	Não calculado		0,24
	Y_R	35,74 ft	10,09 m	9,99 m
	L_{II}	154,00 ft	46,94 m	47,94 m
	ε (%)	Não calculado		62,65 m
Blocos de queda	Altura, largura e espaçamento	3' 10"	1,17 m	1,16 m
Soleira terminal dentada	Altura	7' 5"	2,26 m	2,23 m
	Largura e espaçamento	5' 6"	1,68 m	1,67 m

Fonte: Do autor (2020).

Da mesma forma como observado na comparação de resultados do dimensionamento da bacia USBR I, os resultados apresentados nas Tabelas 6 e 8 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 valor mais discrepante trata-se do comprimento total da bacia apresentado na Tabela 8, os valores diferem-se em 1 metro, isso ocorre porque a equação usada por Chow (1959) adota um coeficiente um pouco menor (4,16) do que a Equação 15 utilizada no algoritmo do programa, explicando o fato da bacia dimensionada pelo programa ser um pouco maior.

4.2.3 Bacia de dissipação tipo USBR III

Outros dois exemplos de dimensionamento são comparados aos realizados pelo programa, utilizando a bacia do tipo USBR III e os dados retirados de Carvalho (2009) e Peterka (1978). As Tabelas 9 e 11 apresentam os parâmetros iniciais utilizados no dimensionamento, enquanto as Tabelas 10 e 12 revelam os resultados obtidos.

Tabela 9 – Dados de entrada para validação dos resultados 1 - USBR III.

Y₁ (m)	0,22
V₁ (m/s)	10,40
Fonte: Do autor (2020).	

Tabela 10 – Resultados para validação do dimensionamento 1 - USBR III.

Dados de saída		Resultados segundo Carvalho (2009)	Resultados obtidos pelo programa
	Y_2 (m)	2,10	2,10
	V_2 (m/s)	não calculado	1,07
	Fr_2	não calculado	0,24
	Y_R (m)	não calculado	1,88
	L_{III} (m)	5,70	5,67
	ε (%)	não calculado	62,35
Blocos de queda	Altura, largura e espaçamento (m)	0,22	0,22
	Altura (m)	0,40	0,40
Blocos amortecedores	Largura e Espaçamento (m)	0,30	0,30
	Distância entre os blocos de queda e amortecedores	1,70	1,67
Soleira terminal	Altura	0,30	0,31

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 11 – Dados de entrada para validação dos resultados 2 - USBR III.

Y_1	1,13 ft	0,34 m
V_1	69 ft/s	21,03 m/s

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 12 – Resultados para validação do dimensionamento 2 - USBR III.

Dados de saída		Resultados segundo Peterka (1978)		Resultados obtidos pelo programa
	Y_2	17,80 ft	5,43 m	5,37 m
	V_2	Não calculado		1,33 m
	Fr_2	Não calculado		0,18
	Y_R	16,67 ft	5,08 m	5,03 m
	L_{III}	48,95 ft	14,92 m	14,50 m
	ϵ (%)	Não calculado		76,14
Blocos de queda	Altura, largura e espaçamento	1,13 ft	0,34 m	0,34 m
	Altura	2,83 ft	0,86 m	0,87 m
Blocos amortecedores	Largura e espaçamento	25,5"	0,65 m	0,65 m
	Distância entre os blocos de queda e amortecedores	14,24 ft	4,34 m	4,30 m
Soleira terminal	Altura	1,81 ft	0,55 m	0,56 m

Fonte: Do autor (2020).

A mesma análise feita para as Tabelas 6 e 8 pode ser utilizada para as Tabelas 10 e 12, em que os resultados apresentados também são extremamente próximos ou iguais. A maior diferença encontrada é relativa ao comprimento da bacia, L_{III} , na Tabela 12, o valor maior obtido pelo autor é ocasionado devido ao uso de um coeficiente maior (2,75) que o utilizado na Equação 16, porém esses 42 centímetros de diferença não devem afetar de forma palpável a dissipação de energia realizada pela estrutura.

4.2.4 Bacia de dissipação tipo SAF

As Tabelas 13 e 14 são usadas como exemplo para validar a o dimensionamento da bacia do tipo SAF. A Tabela 13 exhibe os dados iniciais do dimensionamento e a Tabela 14 apresenta os resultados encontrados pelo programa e por Thompson e Kilgore (2006).

Tabela 13 – Dados de entrada para validação dos resultados - SAF.

D (m)	1,80	Z₁ (m)	27,80
Q (m³/s)	11,80	z (m/m)	0
Z₀ (m)	30,50	St (m/m)	0,50
Y₁ (m)	0,348	Ss (m/m)	0,50
V₁ (m/s)	10,40	S₀ (m/m)	0,065

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 14 – Resultados para validação do dimensionamento - SAF.

Dados de saída		Resultados segundo Thompson e Kilgore (2006)	Resultados obtidos pelo programa
	W_{b1} (m)	3,00	2,65
	W_{b2} (m)	3,00	2,65
	W_{b3} (m)	3,00	2,65
	L_t (m)	5,40	5,40
	L_b (m)	3,20	3,22
	L_s (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

Fonte: Do autor (2020).

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 W_{t1} , W_{t2} e W_{t3} 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 utilizando a Equação 25, 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.

4.2.5 Bacia de dissipação tipo USBR IX

Para comparação dos resultados de dimensionamento de uma bacia USBR IX foram utilizados dados (Tabela 15) do exemplo apresentado por Thompson e Kilgore (2006), cujos resultados são apresentados na Tabela 16.

Tabela 15 – Dados de entrada para validação dos resultados - USBR IX.

Q (m³/s)	2,80
b (m)	1,20
Desnível - H (m)	8,00
Inclinação - z (1:z)	3,00

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 16 – 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

Fonte: Do autor (2020).

A partir da análise da Tabela 18 pode-se 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.

4.2.6 Tapete de enrocamento

As Tabelas 17 e 18 apresentam os dados utilizados para a comparação entre os resultados obtidos por Thompson e Kilgore (2006) e os obtidos pelo dimensionamento realizado no programa para o tapete de enrocamento.

Tabela 17 – Dados de entrada para validação dos resultados - Tapete de enrocamento.

Q (m³/s)	2,33
D (m)	1,50
H_j (m)	0,50

Fonte: Do autor (20220).

Tabela 18 – Resultados para validação do dimensionamento - Tapete de enrocamento.

Dados de saída	Resultados segundo Thompson e Kilgore (2006)	Resultados obtidos pelo programa
D₅₀ (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

Fonte: Do autor (2020).

Os resultados observados 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.

4.2.7 Demais estruturas de dissipação

Os resultados obtidos para o dimensionamento da bacia de dissipação por impacto do tipo USBR VI não foram comparados com exemplos da literatura, porém mesmo sem a comparação é possível validar o dimensionamento realizado pelo programa, pois todas as dimensões da bacia são retiradas da Tabela 1, assim qualquer bacia dimensionada usando como referência Carvalho (2009) será igual a bacia gerada pelo programa.

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.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi possível constatar que ferramentas computacionais, como a planilha eletrônica e programação desenvolvida podem auxiliar no processo dos cálculos para os dimensionamentos com maior produtividade 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 auxiliando o usuário na escolha da obra de dissipação de energia que mais se adequa às suas necessidades.

Os dimensionamentos apresentados com o auxílio da planilha eletrônica foram satisfatórios, visto que, todos os exemplos utilizados e as comparações feitas com dados de outros autores garantiram a validade dos resultados, confirmando também a efetividade dos módulos de programação desenvolvidos.

Nesse contexto, é válido salientar que a planilha eletrônica cumpriu com seu objetivo principal de auxiliar de forma rápida e simples o usuário a escolher e dimensionar uma estruturada de dissipação de energia hidráulica.

5.1 Sugestões para melhorias da planilha eletrônica

No processo de desenvolvimento da planilha eletrônica observou-se que alguns aspectos poderiam ser melhorados, mas exigiriam uma maior disponibilidade de tempo. Assim alguns pontos podem ser citados como forma de tornar o programa ainda mais eficaz no dimensionamento de obras de dissipação de energia.

- Adicionar avisos que informem ao usuário que um determinado dado de entrada possa ter sido digitado errado ou mesmo esquecido de ser preenchido;
- Desenvolver um método de expressão de resultados mais dinâmico, como por exemplo, impressão dos dados de saída diretamente sobre as imagens que exemplificam cada bacia;
- Adicionar outros tipos de estruturas de dissipação de energia;
- Adicionar alguns aspectos ou cálculos relacionados aos custos da execução da estrutura.

REFERÊNCIAS

- Aguiar, R. J. A.; **Diretrizes para dimensionamento de estruturas de dissipação de energia do escoamento em regiões de orografia complexa**. 2012. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade da Madeira, Lisboa. 2012.
- Almeida, D. et al.; **Determinação de critérios de dimensionamento de soleiras terminais numa bacia de dissipação a jusante de um descarregador em degraus**. In: 9.^{as} Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, 9, 2014, Porto. Anais: Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- Antunes, M. J. F. A. M.; **Descarregadores de cheia em canal, em betão, não convencionais**. 2011. 164 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. 2011.
- Arantes, E. J.; **Caracterização do escoamento sobre vertedouros em degraus via cfd**. 2007. 178 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Carlos. 2007.
- Baptista, M.; Lara M.; **Fundamentos de engenharia hidráulica**. 3. ed. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2010.
- Beichley, G. L.; **Hydraulic design of stilling basin for pipe or channel outlets**. A water resources technical publication – Research report, No. 24. Denver: Ed. United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, 1971.
- Blaisdell, F. W.; **The SAF stilling basin: a structure to dissipate the destructive energy in high-velocity flow from spillways**. Washington: Ed. United States Department of Agriculture, 1959.
- Carvalho, J. de A.; **Obras hidráulicas**. Texto acadêmico 63. Lavras: Ed. UFLA. 2009.
- Chanson H. **Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes**. 1994. *Journal of hydraulic research*, Brisbane, v. 32, n. 2, p. 213 – 218, 1994 - a.
- Chanson H. **Hydraulics of nappe flow regime above stepped chutes and spillways**. 1994. *Australian Civil Engineering Transactions*, Brisbane, v. 36, n. 1, p. 69 – 76, 1994 - b.
- Chow, V. T.; **Open-channel hydraulics**. New York: Ed. McGraw-Hill Book, 1959.
- Conterato, E.; **Determinação de critérios de dimensionamento de soleira terminal em bacia de dissipação a jusante de vertedouro em degraus**. 2014. 156 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2014.
- DNIT; **Manual de drenagem de rodovias**. Ed. Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre, 2006.

Exército Brasileiro. **AMAZONLOG17**. 2018. Disponível em:< http://www.eb.mil.br/amazonlog17/noticias/-/asset_publisher/BsJDxIc4XCbS/content/operacao-chapadao-conclui-trabalhos-de-engenharia-para-evitar-erosoes-nesse-periodo-de-chuvas-/8032597>. Acesso: 06 de julho de 2020.

FEMA; **Outlet works energy dissipators: Best practices for design, construction, problem identification and evaluation, inspection, maintenance, revonation, and repair**. Ed. Federal Emergency Management Agency, 2010.

Figueiredo, N. A. X.; **Dissipação de energia a jusante de um descarregador não convencional**. 2010. 263 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. 2010.

Fletcher, J. L.; Grace, Jr; **Practical guidance for estimating and controlling erosion at culvert outlets**. Vicksburg: U. S. Army Waterways Experiment Station, 1972.

Fontanelli, C.; **Utilização de pilares de vertedouros com seção variável para redução de processos erosivos a jusante de estruturas hidráulicas**. 2017. 175 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.2017.

French, R. H.; **Open-channel hydraulics**. Singapura: Ed. McGraw-Hill Book, 1987.

Gomes, J. F.; **Visualização de escoamento macroturbulento: Ressalto hidráulico a jusante de uma comporta**. 2000. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2000.

Henriques, T. M. S.; **Dimensionamento de obras de dissipação de energia em drenagem de vias de comunicação**. 2014. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa. 2014.

Lemos, M. T. R. F.; **Regularização e proteção contínua de cursos de água**. 2008. 166 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. 2008.

Martins, F. J. P.; **Dimensionamento hidrológico e hidráulico de passagens inferiores rodoviárias para águas pluviais**. 2000. 278 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Coimbra – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Coimbra. 2000.

Mata-Lima, H. et al.; **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 sujeita a desastres hidrológicos**. **Ambiência**, Guarapuava, v. 12, n. 4, p. 933 – 953, 2016.

Mendonça, M.; **Estudo hidráulico em modelo reduzido de descarregadores de cheias: Utilização de conchas de rolo na dissipação de energia do escoamento**. 2013. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa. 2013.

Peterka, A. J.; **Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators**. Denver: Ed. United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, 1978.

Pinheiro, A. N.; **Estruturas hidráulicas: Obras de dissipação de energia**. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2009.

Precon. **Check/Drop structure**, 2020. Disponível em: <<http://precon.ca/check-drop-structure/>>. Acesso: 15 de julho de 2020.

Prefeitura Municipal de Umuarama. Umuarama, 2018. Disponível em:<<http://www.umuarama.pr.gov.br/noticias/obras-planejamento-urbano-e-projetos-tecnicos/prefeitura-constroi-galerias-e-recupera-erosao-nas-proximidades-da-apae>>. Acesso: 06 de julho de 2020.

Raimundo, A. P.; **Estruturas hidráulicas utilizadas em reservatórios de controles de cheia**. 2007. 178 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2007.

Rijo, M.; **Estruturas hidráulicas: Barragens**. Évora: Universidade de Évora, 2007.

Sanagiotto, D. G.; **Características do escoamento sobre vertedouros em degraus de declividade 1V:0,75H**. 2003. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2003.

Simões, A. L. A.; **Considerações sobre a hidráulica de vertedores em degraus: Metodologias adimensionais para pré-dimensionamento**. 2008. 258 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos. 2008.

Sousa, P. M. B. M. de; **Estudo da dissipação de energia por ressalto hidráulico a jusante de descarregadores não convencionais**. 2011. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. 2011.

TDOT; **Design division drainage manual**. Ed. Tennessee Department of Transportation, 2010.

Teixeira, E. D.; **Previsão dos valores de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico**. 2003. 116 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2003.

Thompson, P. L.; Kilgore, R. T.; **Hydraulic desing of energy dissipators for culverts and channels**: Hydraulic Engineering Circular. 3rd ed. Denver: Ed. U. S. Department of Transportation, 2006.