

## Desenvolvimento de software para caracterização e pré-dimensionamento de bacias de dissipação USBR do tipo I, II, III e IV

## Development of software for design and pre-dimensioning USBR type I, II, III and IV stilling basins

*Gabriel Caetano Abrantes de Quadros(1); Ana Rúbia de Carvalho Bonilha Silva(2)*

1 Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil.

E-mail: gabriel\_tl1@hotmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6369-106X>

2 Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil.

E-mail: arbonilha@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0937-8216>

**Revista de Engenharia Civil IMED**, Passo Fundo, vol. 8, n. 1, p. 145-164, janeiro-junho, 2021 - ISSN 2358-6508

[Recebido: julho 4, 2020; Aceito: setembro 19, 2020]

DOI: <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2021.v8i1.4201>

### Endereço correspondente / Correspondence address

Rua Projetada A, N 85, APTO 1301.

Bairro: Jardim Petrópolis, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil.

CEP: 78070-015

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

Editora: Richard Thomas Lermen

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui/click here!](#)

## Resumo

Bacias de dissipação são estruturas hidráulicas responsáveis por evitar a erosão do leito do rio devido a velocidade da água a jusante do vertedor de barragens. Tais bacias ocasionam a dissipação de energia, sendo dimensionadas para atender as diversas condições do escoamento. As bacias de dissipação USBR do tipo I, II, III e IV são bacias que apresentam a dissipação de energia através da formação de um ressalto hidráulico contido em sua estrutura. Dentro deste contexto, por meio de um estudo sobre os diversos métodos de cálculos usados no dimensionamento destes tipos de bacia de dissipação, foi desenvolvido software capaz de caracterizar o tipo de bacia recomendado para determinada situação do escoamento. Além de pré-dimensionar esse tipo de estrutura hidráulica é possível também de exportar estes resultados em um arquivo em PDF. Ademais, foram testados exemplos de dimensionamento encontrados na literatura destes tipos de bacias para verificar a validade do programa. Os resultados obtidos pelo programa apresentaram convergência com os resultados encontrados na literatura. Desta forma, o software demonstrou aptidão na caracterização de bacias de dissipação, sendo uma ferramenta capaz de auxiliar o usuário no dimensionamento destas estruturas.

**Palavras-chave:** Estruturas hidráulicas. Programação. Dissipação de energia.

## Abstract

The stilling basins are hydraulic structures responsible for preventing erosion of the riverbed due to the speed of water at downstream of the spillway at a dam. They cause the energy dissipation, being sized for attend various conditions from the water flow. USBR type I, II, III and IV stilling basins are basins that present energy dissipation through the formation of a hydraulic jump contained in its structure. In this context, through a study that was carried out on the different calculation methods used in the design of these types of stilling basins, a software was developed to characterize and pre-size the type of basin recommended for a certain flow situation. Besides to pre-size this hydraulic structure, it exports these results in a PDF file. In addition, examples of pre-sizing of these types of basins found in the literature were tested to verify the validity of the software. The results obtained by the software presented convergence with the results found in the literature. Thus, the software demonstrated ability in the computational modeling of stilling basins, being a tool that be able to assist the user in the dimensioning of these structures.

**Keywords:** Hydraulics structures. Programming. Energy dissipation.

## 1 Introdução

Uma parte de suma importância para a implantação e dimensionamento de uma barragem é o estudo do controle de vazão das estruturas extravasoras e a energia oriunda deste escoamento. Isto é necessário para evitar processos erosivos e, conseqüentemente, destrutivos nas fundações da própria estrutura ou do corpo receptor do escoamento (BAYON et al., 2019). Dentro deste contexto, existem inúmeros tipos de estruturas que visam dissipar a energia a jusante de barragens, interrompendo a alta energia cinética do escoamento e a transformando em turbulência (DOKE et al., 2019).

Segundo Baptista e Coelho (2016), as bacias de dissipação são estruturas que efetuam a dissipação de energia através da transição do regime supercrítico para o regime subcrítico do escoamento, ocasionando ressalto hidráulico. De acordo com Novakoski et al. (2017), o conhecimento sobre a geometria do ressalto hidráulico é importante para a concepção e pré-dimensionamento de estruturas dissipadoras de energia, visto que esse fenômeno é capaz de gerar flutuações de pressão e velocidade que podem causar danos à estas estruturas.

Com a finalidade de proteger as estruturas hidráulicas da energia do escoamento, o *United States Department of the Interior Bureau of Reclamation* (USBR) estabeleceu a *Monography* No. 25 em 1964 para dissipadores de energia das estruturas hidráulicas. Neste documento, o fenômeno do ressalto hidráulico foi dividido em quatro formas dependente dos Números de Froude. Foram classificados 10 tipos de bacias de dissipação e dissipadores de energia apropriados para cada tipo de escoamento diferente (KIM et al., 2015). Destes tipos de bacias de dissipação e dissipadores de energia classificados, destacam-se as bacias de dissipação USBR do tipo I, II, III e IV como bacias em que a dissipação de energia ocorre pela formação do ressalto hidráulico (AGUIAR, 2012).

O principal problema associado à ruína ocorrentes em bacias de dissipação a jusante de estruturas hidráulicas, é a incontrolável erosão que pode ocorrer devido a falhas de concepção e dimensionamento destas bacias (CHANSON, 2004). Um caso de ruína das estruturas hidráulicas de uma barragem aconteceu na barragem de El Guapo localizada na Venezuela, em 1999. Esta barragem apresentou falhas no estudo hidrológico e, conseqüentemente, houve dimensionamento inadequado das estruturas hidráulicas, como a bacia de dissipação, durante sua concepção. Durante uma grande chuva em 1999, houve o aumento do nível de água da barragem, o que ocasionou a formação do ressalto hidráulico com altura superior às paredes laterais da bacia de dissipação, havendo transbordamento, erosões a jusante da bacia e, por fim, o rompimento de toda estrutura (FIEDLER, 2016; USBR, 2019).

Concomitantemente à necessidade do dimensionamento correto destas estruturas para evitar desastres impactantes ao meio ambiente, a tecnologia computacional

mostra-se um utensílio de grande importância no dimensionamento de estruturas. Isto ocorre devido ao elevado poder de processamento dos computadores atuais que são capazes auxiliar na resolução de problemas de natureza complexa, cuja solução manual seria inviável pelo tempo necessário para tal. Sendo assim, as respostas que rapidamente são fornecidas por estes meios eletrônicos podem ser mais bem analisadas (NOGUEIRA; BEZERRA, 2017).

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo apresentar a caracterização e o pré-dimensionamento de bacias de dissipação USBR tipo I, II, III e IV a partir do desenvolvimento de *software* em linguagem Java. Este programa caracteriza e pré-dimensiona estas estruturas, auxiliando o usuário na realização de cálculos necessários de maneira ágil e eficaz, além de poder exportar os resultados encontrados.

## 2 Revisão de literatura

As bacias de dissipação por ressalto hidráulico ocasionam a transição do escoamento supercrítico para o escoamento subcrítico e, conseqüentemente a dissipação de energia pela turbulência.

Contudo, é necessário o correto dimensionamento destas estruturas para evitar danos ao próprio barramento no processo de dissipação, uma vez que devido à grande variação de pressões, problemas ligados a fadiga, cavitação e deterioração tendem a afetar os elementos constituídos por concreto (DAI PRÁ et al., 2016).

Além disso, quando o ressalto hidráulico é envolvido no problema, mesmo com a presença de bacias de dissipação para proteger o leito do rio, é possível ocorrer processos erosivos regressivos a jusante dessas estruturas, podendo comprometer toda a estabilidade da obra (OVELAR, 2018). Dessa maneira, fica implícito que é necessário o correto dimensionamento da estrutura dissipadora para que haja, ao menos, o mínimo de segurança ao barramento.

Dentro desse contexto, para se obter mais facilmente as raízes de uma equação, como as utilizadas no processo de dimensionamento, que resultam em uma imagem igual a zero, foram elaborados métodos numéricos iterativos, tais como: bissecção, falsa posição e secante. (COSTA; SILVA, 2009).

O método da bissecção, utilizado no presente trabalho, consiste no teste de contínuos ciclos na busca de um intervalo até se obter uma imagem aproximadamente igual à zero, e, desta forma, uma resposta contundente com um erro praticamente insignificante (CHAPRA; CANALE, 2008).

Com isso, preliminarmente, para o dimensionamento de bacias de dissipação é necessário avaliar o escoamento. Assim, para obtenção da altura conjugada do ressalto hidráulico e a dissipação de energia, em um canal retangular, foram utilizadas as seguintes equações apresentadas por Porto (2006):

$$Y_2 = \frac{Y_1}{2} \cdot (\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 1) \quad (\text{Eq. 1})$$

$$Fr_1 = \frac{Q}{B \cdot \sqrt{g \cdot Y_1^3}} \quad (\text{Eq. 2})$$

**Em que:**

$Y_2$ : altura subcrítica do escoamento (m);

$Y_1$ : altura supercrítica do escoamento (m);

$Fr_1$ : o número de Froude do escoamento supercrítico;

$Q$ : vazão do escoamento (m<sup>3</sup>/s);

$B$ : largura do canal (m);

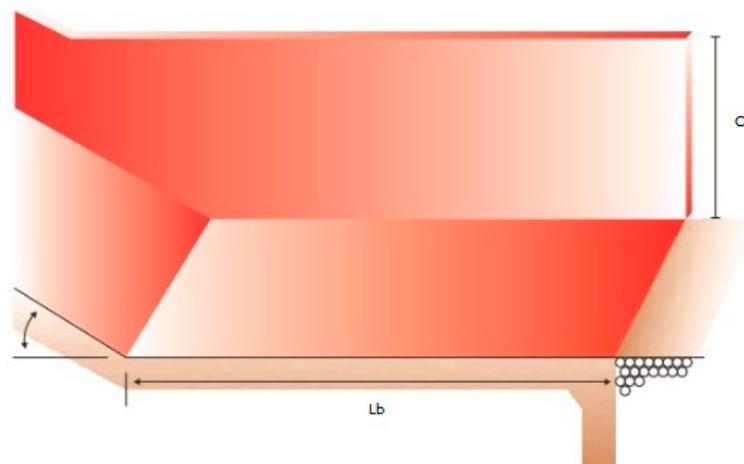
$g$ : aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>).

## 2.1 Bacia de dissipação USBR tipo I

Segundo Baptista e Coelho (2016), esta bacia de dissipação é adequada para os números de Froude supercrítico entre 1,7 e 2,5. Não existe a necessidade de algum órgão ou dispositivo complementar, devendo-se assegurar somente a horizontalidade da estrutura e a proteção lateral para evitar a erosão.

Para números de Froude maiores que 2,5 a formação do ressalto começa a se intensificar, inviabilizando economicamente a concepção da bacia USBR tipo I (AGUIAR, 2012). Esta bacia pode ser observada na Figura 1.

**Figura 1** – Bacia de dissipação USBR tipo I e seus respectivos componentes



**Legenda**

CL – Altura das paredes laterais

Lb – Comprimento da bacia

Fonte: Autoria Própria.

### 2.1.1 Critério de dimensionamento

Simões (2008) apresenta uma equação que relaciona o comprimento da bacia de dissipação ( $L_b$ ), a altura subcrítica do escoamento ( $Y_2$ ) e número de Froude do escoamento supercrítico ( $Fr_1$ ). A equação citada é:

$$L_b = Y_2 \left( \frac{Fr_1^2 - 81,85Fr_1 + 61,13}{-0,62 - 10,71Fr_1} \right) \quad (\text{Eq. 3})$$

Conforme USBR (1987), as bacias de dissipação por ressalto hidráulico devem conter uma folga nas paredes laterais. Deste modo, a seguinte equação, válida para as bacias USBR tipo I, II, III e IV, foi desenvolvida:

$$F = 0,1(V_1 + Y_2) \quad (\text{Eq. 4})$$

**Em que:**

$F$ : folga nas paredes laterais (m);

$Y_2$ : altura subcrítica do escoamento (m);

$V_1$ : velocidade supercrítica do escoamento (m/s).

Sendo assim, a altura das paredes laterais ( $CL$ ) da bacia USBR I é calculado da seguinte maneira:

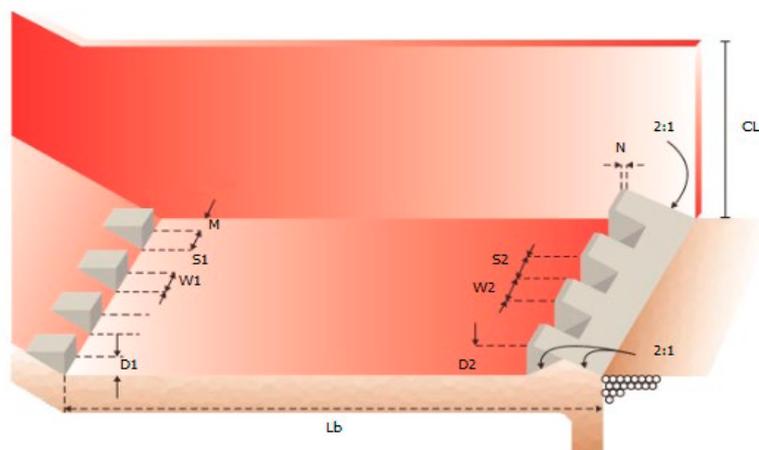
$$CL = F + Y_2 \quad (\text{Eq. 5})$$

### 2.2 Bacia de dissipação USBR tipo II

A bacia de dissipação USBR tipo II é uma bacia que contém blocos de quedas e uma soleira dentada terminal. Estes acessórios permitem uma bacia com extensão mais reduzida (PETERKA, 1984).

De acordo com Chanson (2015), este modelo de bacia foi concebido para números de Froude iguais ou superiores a 4,5 e velocidade superiores a 18,3 m/s. Além disso, Baptista e Coelho (2016) dizem que a profundidade de saída da estrutura apresenta-se cerca de 5% maior que a altura subcrítica do escoamento ( $Y_2$ ). Esta bacia é mostrada na Figura 2.

**Figura 2** – Bacia de dissipação USBR tipo II e seus respectivos componentes



### Legenda

CL – Altura das paredes laterais

Lb – Comprimento da bacia

D1 – Altura dos blocos de queda

W1 – Largura dos blocos de queda

S1 – Espaçamento dos blocos de queda

M – Espaçamento dos blocos de quedas da parede lateral

D2 – Altura da soleira dentada

W2 – Largura dos dentes da soleira

S2 – Espaçamento dos dentes da soleira

N – Largura do topo da soleira

Fonte: Autoria Própria.

### 2.2.1 Critério de dimensionamento

Peterka (1984) exhibe uma equação que relaciona o comprimento da bacia de dissipação ( $L_b$ ) e a altura subcrítica do escoamento ( $Y_2$ ). A equação citada é:

$$L_b = 4,28 Y_2 \quad (\text{Eq. 6})$$

A altura das paredes laterais ( $CL$ ) pode ser dimensionada, seguindo as recomendações de USBR (1987) e Coelho e Batista (2014), como:

$$CL = F + 1,05 Y_2 \quad (\text{Eq. 7})$$

Seguindo, ainda, as determinações de Peterka (1984) para o dimensionamento dos acessórios deste modelo de bacia, tem-se as seguintes equações para os blocos de leito:

$$D1 = Y1 \quad (\text{Eq. 8})$$

$$W1 = Y1 \quad (\text{Eq. 9})$$

$$S1 = Y1 \quad (\text{Eq. 10})$$

$$M = \frac{Y1}{2} \quad (\text{Eq. 11})$$

**Em que:**

D1: altura dos blocos de queda (m);

W1: largura dos blocos de queda (m);

S1: espaçamento entre os blocos de queda (m);

M: espaçamento dos blocos da parede lateral (m).

Tem-se as seguintes equações para a soleira dentada:

$$D2 = 0,2 Y2 \quad (\text{Eq. 12})$$

$$W2 = 0,15 Y2 \quad (\text{Eq. 13})$$

$$S2 = 0,15 Y2 \quad (\text{Eq. 14})$$

$$N = 0,02 Y2 \quad (\text{Eq. 15})$$

**Em que:**

D2: altura da soleira dentada (m);

W2: largura dos dentes da soleira (m);

S2: espaçamento entre os dentes da soleira (m);

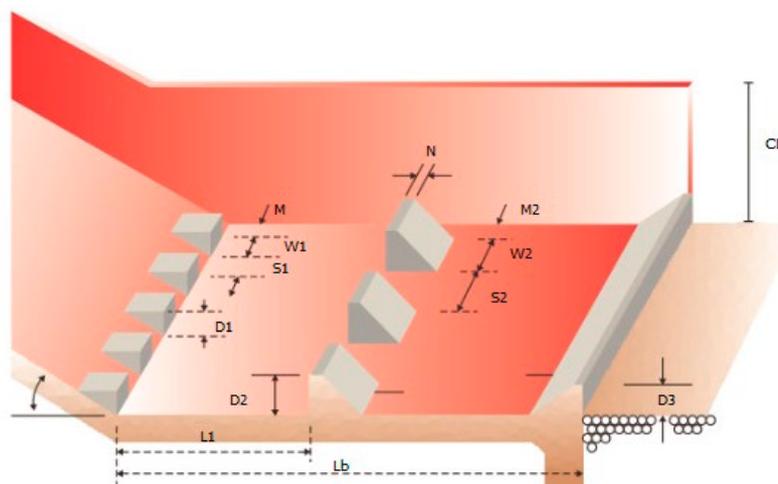
N: largura do topo da soleira dentada (m).

### 2.3 Bacia de dissipação USBR tipo III

A bacia de dissipação USBR tipo III é um modelo de bacia que dispõe de blocos de queda, blocos de leito e uma soleira terminal.

USDOT (2006) recomenda a utilização desta bacia, com a intenção de evitar cavitação na mesma, para número de Froude compreendido entre 4,5 e 17, vazão unitária inferior a 18,6 m<sup>3</sup>/(s.m) e velocidade inferior a 18,3 m/s. A visualização desta bacia é feita na Figura 3.

**Figura 3** – Bacia de dissipação USBR tipo III e seus respectivos componentes



### Legenda

CL – Altura das paredes laterais

Lb – Comprimento da bacia

L1 – Distância dos blocos de leito aos blocos de queda

D1 – Altura dos blocos de queda

W1 – Largura dos blocos de queda

S1 – Espaçamento dos blocos de queda

M – Espaçamento dos blocos de quedas da parede lateral

D2 – Altura dos blocos de leito

W2 – Largura dos blocos de leito

S2 – Espaçamento blocos de leito

M2 – Espaçamento dos blocos de leito da parede lateral

N – Largura do topo dos blocos de leito

D3 – Altura da soleira terminal

Fonte: Autoria Própria.

### 2.3.1 Critério de dimensionamento

Para o dimensionamento do comprimento deste modelo de bacia, Perteka (1984) propõe a seguinte equação:

$$Lb = 2,75 \cdot Y2 \quad (\text{Eq. 16})$$

A altura das paredes laterais (CL) pode ser dimensionada utilizando a equação (5), adequando-se à análise de borda livre proposta por USBR (1987).

Baptista e Coelho (2016) propõe as equações subsequentes para o dimensionamento de alguns acessórios da bacia de dissipação. As equações são:

$$D2 = Y1(0,1652 Fr1 + 0,6768) \quad (\text{Eq. 17})$$

$$D3 = Y1(0,0542 Fr1 + 1,0167) \quad (\text{Eq. 18})$$

**Em que:**

D2: altura dos blocos de leito (m);

D3: altura da soleira terminal (m).

Para o dimensionamento dos blocos de queda são utilizadas as equações de (8) a (11).

Os demais acessórios desta bacia são dimensionados a partir das seguintes equações propostas por Peterka (1984):

$$L1 = 0,8 Y2 \quad (\text{Eq. 19})$$

$$W2 = 0,75 D2 \quad (\text{Eq. 20})$$

$$S2 = 0,75 D2 \quad (\text{Eq. 21})$$

$$M2 = 0,375 D2 \quad (\text{Eq. 22})$$

$$N = 0,2 D2 \quad (\text{Eq. 23})$$

**Em que:**

L1: distância entre os blocos de leito e blocos de queda (m);

W2: largura dos blocos de leito (m);

S2: espaçamento entre os blocos de leito (m);

M2: espaçamento dos blocos de leito da parede lateral (m);

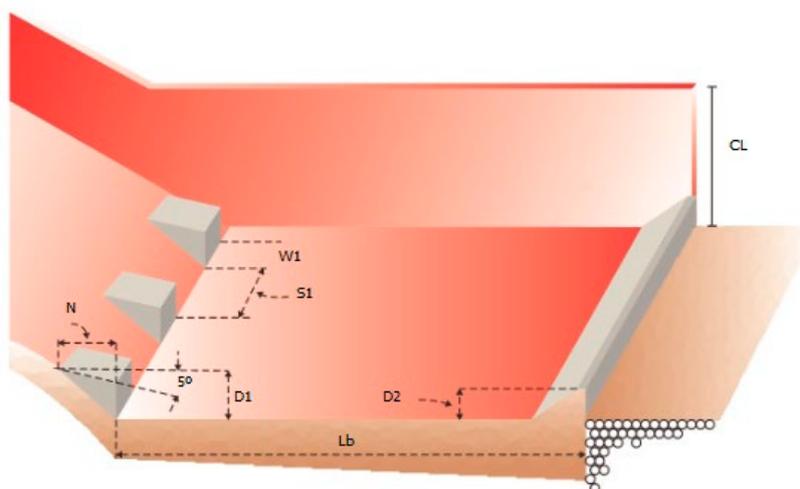
N: largura do topo dos blocos de leito (m).

## 2.4 Bacia de dissipação USBR tipo IV

A bacia de dissipação USBR tipo IV é uma bacia utilizada para números de Froude entre 2,5 e 4,5, além disso, ela dispõe de blocos de queda, com inclinação de sua soleira orientada em 5° para a jusante, e uma soleira terminal (PETERKA, 1984).

A profundidade de saída desta estrutura é 10% maior que a altura subcrítica do escoamento (Y2) (BAPTISTA; COELHO, 2016). Esta bacia de dissipação é mostrada na Figura 4.

**Figura 4** – Bacia de dissipação USBR tipo IV e seus respectivos componentes



### Legenda

CL – Altura das paredes laterais

Lb – Comprimento da bacia

L1 – Distância dos blocos de leito aos blocos de queda

D1 – Altura dos blocos de queda

W1 – Largura dos blocos de queda

S1 – Espaçamento dos blocos de queda

N – Largura do topo dos blocos de queda

D2 – Altura da soleira terminal

Fonte: Autoria Própria.

#### 2.4.1 Critério de dimensionamento

Baptista e Coelho (2016) apresentam uma equação, que relaciona o número de Froude ( $Fr_1$ ) e a altura subcrítica do escoamento ( $Y_2$ ), para o cálculo do comprimento deste modelo de bacia de dissipação ( $L_b$ ). A equação citada é:

$$L_b = Y_2(2,0543 \ln Fr_1 + 2,8865) \quad (\text{Eq. 24})$$

Atendendo as recomendações de Coelho e Baptista (2014) e USDOT (2006) para o dimensionamento da altura das paredes laterais ( $CL$ ), é possível utilizar a seguinte equação:

$$CL = F + 1,10 Y_2 \quad (\text{Eq. 25})$$

USDOT (2006) fornece a equação ulterior para o dimensionamento da altura da soleira terminal:

$$D2 = Y1(0,0536 Fr_1 + 1,04) \quad (\text{Eq. 26})$$

Para o dimensionamento dos blocos de queda, que devem ter inclinação de sua soleira em 5° para a jusante, Peterka (1984) faz uso das seguintes equações:

$$D1 = 2 Y1 \quad (\text{Eq. 27})$$

$$W1_{m\acute{a}x} = Y1 \quad (\text{Eq. 28})$$

$$S1 = 2,5 Y1 \quad (\text{Eq. 29})$$

$$N_{min} = 2 Y1 \quad (\text{Eq. 30})$$

**Em que:**

D1: altura dos blocos de queda (m);

W1<sub>máx</sub>: largura máxima dos blocos de queda (m);

S1: espaçamento entre os blocos de queda (m);

N<sub>min</sub>: largura mínima do topo dos blocos de queda (m).

### 3 Metodologia

Com a intenção de possibilitar a execução do programa computacional em diferentes sistemas operacionais sem demasiada complicação, optou-se pelo desenvolvimento do programa em linguagem Java. Para tal, houve a necessidade de utilização de uma IDE (*Integrated Development Environment*), que é um ambiente com ferramentas que facilita o processo da programação. A Netbeans IDE foi escolhida devido seus recursos para programação, fácil instalação e acessibilidade.

A partir das equações empregadas no cálculo das bacias de dissipação, foram determinados os dados de entrada necessários para realizar a caracterização e o pré-dimensionamento das bacias de dissipação. Esses dados são exibidos no Quadro 1.

**Quadro 1** – Dados de entrada do programa

| Símbolo | Descrição           | Unidade de medida |
|---------|---------------------|-------------------|
| Q       | Vazão               | m <sup>3</sup> /s |
| B       | Largura             | m                 |
| Y1      | Altura supercrítica | m                 |

**Fonte:** Autoria Própria.

Além disso, optou-se pela utilização do tipo *double* para as variáveis aplicadas no processo de cálculo. Este tipo de variável é capaz de armazenar até quinze casas decimais, tornando confiáveis os resultados mostrados pelo programa computacional.

Ademais, para verificar a eficiência e o funcionamento do software desenvolvido, testou-se a aplicação de diferentes exercícios encontrados na literatura.

Os exercícios da literatura testados no software e suas respectivas fontes são apresentados no Quadro 2.

**Quadro 2** – Dados de entrada e fonte das aplicações testadas

| Aplicação | Fonte                       | Dados de Entrada             |                |                            |
|-----------|-----------------------------|------------------------------|----------------|----------------------------|
|           |                             | Vazão<br>(m <sup>3</sup> /s) | Largura<br>(m) | Altura<br>supercrítica (m) |
| 1         | Example 2 de Peterka (1987) | 445,93                       | 10,00          | 1,353                      |
| 2         | USDOT (2006)                | 11,80                        | 3,00           | 0,322                      |

**Fonte:** Autoria Própria.

A partir dos exercícios da literatura supracitados, realizou-se a inserção de seus respectivos dados de entrada após iniciar o *software* e, como resultado, obteve-se a caracterização e o dimensionamento da bacia de dissipação.

## 4 Resultados e discussões

O programa computacional foi desenvolvido para auxiliar o usuário no dimensionamento de bacias de dissipação USBR do tipo I, II, III e IV. Com a finalidade de averiguar a eficiência do programa desenvolvido, foram inseridos os dados de entrada dos exercícios citados anteriormente.

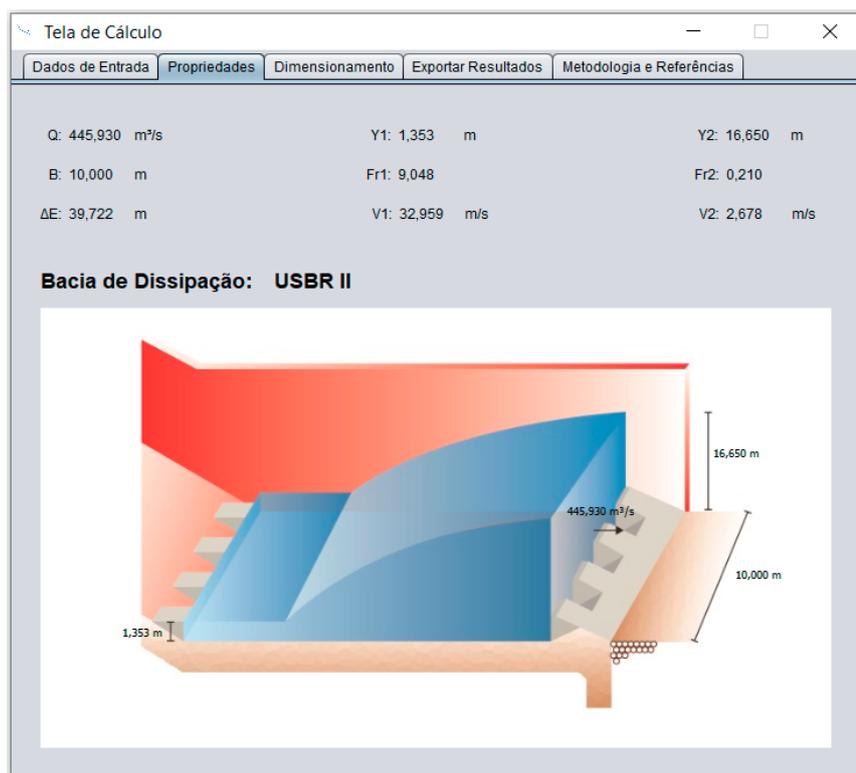
Após a inserção dos dados de entrada, foram encontradas as propriedades do ressalto e da bacia de dissipação recomendada para a Aplicação 1 e a Aplicação 2. Estes resultados são apresentados na Figura 7.

Primeiramente, destaca-se que nenhum dos autores informaram as propriedades do escoamento (velocidade e número de Froude) subcrítico e a dissipação ocasionada pelo ressalto. Desta forma, foi possível comparar, exclusivamente, as propriedades do escoamento supercrítico e apenas a altura conjugada subcrítica. Para as propriedades do escoamento subcrítico, é possível apenas analisar os resultados obtidos pelo programa.

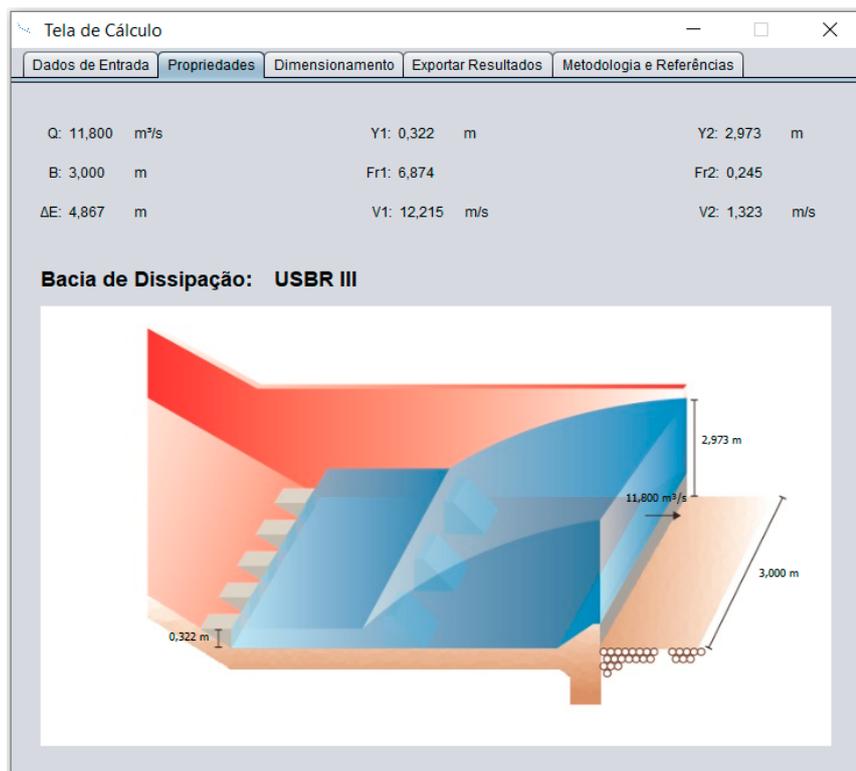
Ao se comparar os resultados obtidos para propriedades do escoamento supercrítico e altura conjugada subcrítica do software e literatura apresentada, observou-se convergência entre eles. Sendo que, em ambos é possível perceber a alta velocidade no início do ressalto hidráulico, característico do escoamento supercrítico ( $Fr_1 > 1$ ) e transição para uma altura maior em seu final.

Para os resultados das propriedades subcríticas do escoamento, o programa informou uma baixa velocidade e número de Froude menor que um, característico desse tipo de escoamento. Para a dissipação de energia, é notada uma considerável dissipação de energia em ambas aplicações. Todavia nenhum dos trabalhos da literatura utilizados na comparação apresentam as propriedades do escoamento subcrítico e a dissipação ocasionada pelo ressalto.

**Figura 7** – Resultados das propriedades do ressalto hidráulico e da bacia de dissipação recomendada pelo *software*. a) Aplicação 1; b) Aplicação 2



a)



b)

Fonte: Autoria Própria.

Por fim, as bacias de dissipação recomendadas por ambos os meios foram concordantes: USBR tipo II para a Aplicação 1 e USBR tipo III para Aplicação 2. Isto se deve à similaridade dos resultados de número de Froude dos meios avaliados.

A comparação dos resultados das propriedades do ressalto hidráulico e bacia recomenda dos meios avaliados é mostrada por meio do Quadro 3.

**Quadro 3** – Comparação entre os resultados obtidos pelo programa computacional e os resultados da literatura para as propriedades do ressalto hidráulico

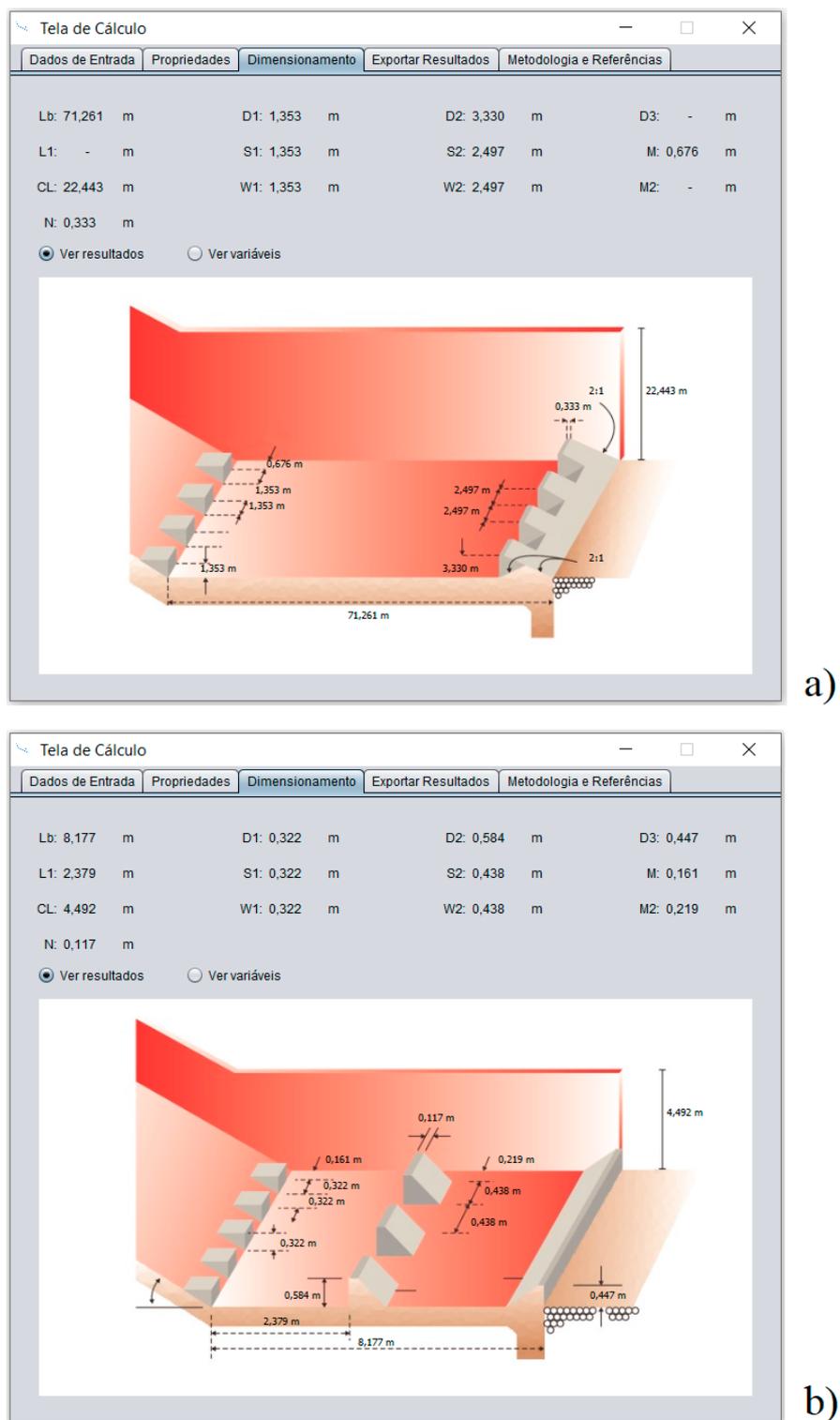
| Aplicação | Meio avaliado         | Propriedades do ressalto hidráulico |        |           |             |          |                   | Bacia recomendada |
|-----------|-----------------------|-------------------------------------|--------|-----------|-------------|----------|-------------------|-------------------|
|           |                       | V1<br>(m/s)                         | $Fr_1$ | Y2<br>(m) | V2<br>(m/s) | $Fr_2$   | $\Delta E$<br>(m) |                   |
| 1         | Literatura            | 32,98                               | 9,04   | 16,64     | Não Inf.    | Não Inf. | Não Inf.          | USBR tipo II      |
|           | Software Desenvolvido | 32,96                               | 9,05   | 16,65     | 2,68        | 0,21     | 39,72             | USBR tipo II      |
| 2         | Literatura            | 12,20                               | 6,90   | 2,98      | Não Inf.    | Não Inf. | Não Inf.          | USBR tipo III     |
|           | Software Desenvolvido | 12,22                               | 6,87   | 2,97      | 1,32        | 0,25     | 4,87              | USBR tipo III     |

**Legenda:** Velocidade supercrítica (V1); Número de Froude supercrítico ( $Fr_1$ ); Altura subcrítica (Y2); Velocidade subcrítica (V2); Número de Froude supercrítico ( $Fr_2$ ); Dissipação de energia ( $\Delta E$ ).

**Fonte:** Autoria Própria.

Além disso, os resultados do pré-dimensionamento das bacias de dissipação obtidos para a Aplicação 1 e Aplicação 2 são mostrados na Figura 8.

**Figura 8** – Resultados do pré-dimensionamento da bacia de dissipação. a) Aplicação 1;  
b) Aplicação 2



Fonte: Autoria Própria.

Salienta-se que, para o pré-dimensionamento das bacias de dissipação, os valores para a altura das paredes laterais (*CL*) não foram informados por nenhum dos autores dos exemplos aplicados. Dessa forma, não foi possível comparar os resultados do software sobre esse elemento importante para evitar erosões laterais ou transbordamentos da bacia de dissipação.

Quanto ao comprimento da bacia ( $L_b$ ), os meios avaliados forneceram resultados convergentes, mostrando a eficiência do *software* em pré-dimensionar um dos elementos de extrema importância da bacia, visto que, com este elemento, é possível assegurar a formação do ressalto dentro da estrutura.

Para os demais elementos constituintes das bacias de dissipação, tanto para a Aplicação 1 quanto para a Aplicação 2, o *software* mostrou resultados bem próximos aos resultados apresentados pela literatura, variando poucos centímetros em algumas situações. Variações estas, possivelmente atribuídas às variáveis do tipo *double* utilizadas no *software* que aumentam a precisão do processo de cálculo realizado.

A comparação dos resultados do pré-dimensionamento das bacias de dissipação é mostrada por meio do Quadro 4.

**Quadro 4** – Comparação entre os resultados obtidos pelo programa computacional e os resultados da literatura para o pré-dimensionamento das bacias de dissipação

| Aplicação | Meio avaliado                | Caracterização da Bacia | Pré-dimensionamento |        |          |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------|------------------------------|-------------------------|---------------------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|           |                              |                         | Lb (m)              | L1 (m) | CL (m)   | D1 (m) | W1 (m) | S1 (m) | D2 (m) | W2 (m) | S2 (m) | D3 (m) |
| 1         | Literatura                   | USBR II                 | 71,32               | -      | Não Inf. | 1,35   | 1,37   | 1,37   | 3,35   | 2,51   | 2,51   | -      |
|           | <i>Software</i> Desenvolvido | USBR II                 | 71,26               | -      | 22,43    | 1,35   | 1,35   | 1,35   | 3,33   | 2,50   | 2,50   | -      |
| 2         | Literatura                   | USBR III                | 8,00                | 2,38   | Não Inf. | 0,32   | 0,30   | 0,30   | 0,56   | 0,38   | 0,38   | 0,45   |
|           | <i>Software</i> Desenvolvido | USBR III                | 8,18                | 2,38   | 4,49     | 0,32   | 0,32   | 0,32   | 0,58   | 0,44   | 0,44   | 0,44   |

**Legenda:** Comprimento da bacia ( $L_b$ ); Distância entre os blocos de leito e os blocos de queda ( $L_1$ ); Altura das paredes laterais ( $CL$ ); Altura dos blocos de queda ( $D_1$ ); Largura dos blocos de queda ( $W_1$ ); Espaçamento entre os blocos de queda ( $S_1$ ); Altura dos blocos de leito ( $D_2$ ); Largura dos blocos de leito ( $W_2$ ); Espaçamento entre os blocos de leito ( $S_2$ ); Altura da soleira terminal ( $D_3$ ).

**Fonte:** Autoria Própria.

Por fim, o *software* ainda oferece a opção ao usuário de exportar os resultados encontrados para um arquivo de extensão PDF e conferir as equações utilizadas.

## 5 Considerações finais

O *software* desenvolvido apresentado neste trabalho é útil no dimensionamento de bacias de dissipação, auxiliando no entendimento e visualização do comportamento do escoamento. Devido à programação em linguagem Java, pode ser executado em qualquer sistema operacional.

Ademais, visto à agilidade na resolução dos dimensionamentos pode auxiliar o usuário na escolha da melhor estrutura que se aplica às condições locais. Além de oferecer opções como consulta às equações utilizadas e relatório dos resultados em formato PDF.

Quanto aos testes realizados, o software apresentou resultados concordantes com os exemplos expostos pela literatura para as bacias de dissipação. Tanto para as propriedades do resalto, como para o pré-dimensionamento das bacias, os resultados tiveram pouca oscilação, fato que pode ser explicado pelo método numérico e quantidade de casas decimais em que o programa realiza as operações matemáticas.

Desta forma, é possível concluir que o software desenvolvido apresenta eficiência na resolução de problemas relacionados às bacias de dissipação, podendo, assim, ser usado tanto para fins acadêmicos, como em atuação profissional na área de barragens.

Para trabalhos futuros, pode-se utilizar o software desenvolvido para realizar um processo reverso com a inserção de dados de uma bacia de dissipação já existente e, com isso, comparar os elementos já construídos na bacia com os sugeridos pelo programa. Tendo em vista a ausência de algumas variáveis e dimensões importantes nos exemplos da literatura utilizados, o processo reverso pode auxiliar no preenchimento de tais lacunas na comparação.

## Referências

- AGUIAR, R. J. A. *Directrizes para dimensionamento de estruturas de dissipação de energia do escoamento em regiões de orografia complexa*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade da Madeira, Funchal. 2012. 136 p.
- BAPTISTA, B. P.; COELHO, M. M. L. P. *Fundamentos de engenharia hidráulica*. 4ª ed. Belo Horizonte: UFMG, 2016.
- BAYON, A.; MORADI, M.; SAJJADI, M.; VALLES-MORAN, F. J. *Numerical modeling of multi-horizontal submerged jets (MHSJ) stilling basins using CFD techniques* in Proceedings do 38<sup>th</sup> International Symposium on Hydraulic Structures (IAHR) World Congress, Panamá City, 2019.
- CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. *Métodos Numéricos para Engenharia*. 5ª ed. Porto Alegre: AHGM, 2008.
- CHANSON, H. *The hydraulics of open channel flow: an introduction*. 2ª ed. Oxford: Elsevier, 2004.
- CHANSON, H. *Energy dissipation in hydraulic structures*. London: CRC Press / Balkema, 2015.
- COSTA, P. T.; SILVA, L. S. *Métodos numéricos para zeros e funções*. Dissertação de Especialização em Matemática. Universidade Federal de Santa Catarina, Açailândia, 2009. 43 p.
- DAI PRÁ, M.; PRIEBE, P. S.; TEIXEIRA, E. D.; MARQUES, M. G. *Avaliação das flutuações de pressão em ressalto hidráulico pela dissociação de esforços*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v. 21, n. 1, p. 222-231, 2016.
- DOKE, N.; JAKATE, S.; SUDHANSHU, M.; TAVATE, P.; PATIL, D. Design of energy dissipator for Khadakwasla Dam to control the velocity flow. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, v. 6, n. 3, p. 7652-7656, 2019.
- FIEDLER, W. *Managing Dam Safety Risks Related to Hydraulic Structures*: B Crookston, B Tullis, editors. 6th International Symposium on Hydraulic Structures (IAHR), Portland; 2016. p. 508-518.
- KIM, Y.; CHOI, G.; PARK, H.; BYEON, S. *Hydraulic jump and energy dissipation with sluice gate*. Water. v. 7, n. 9, p. 5115-5133, 2015.
- NOVAKOSKI, C. K.; CONTERATO, E.; MARQUES, M.; TEIXEIRA, E. D.; LIMA, G. A.; MEES, A. Macro-turbulent characteristics of pressures in hydraulic jump formed downstream of a stepped spillway. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 22, n. 22, 2017.
- NOGUEIRA, L. G. O.; BEZERRA, E. M. F. *Ferramenta em ambiente excel para análise estrutural de treliças espaciais pelo método dos elementos finitos* in Proceedings do XXXVIII Iberian Latin-American Congress in Computational Methods in Engineering, Florianópolis, 2017.
- PETERKA, A. J. *Hydraulic design of stilling basin and energy dissipators*. A Water Resources Technical Publication, Engineering Monograph N° 25. United States Bureau of Reclamation. Department of the Interior, Denver, USA, 1984.

VELAR, C. O. S. *Vertedouros com pilares alargados e bacia de dissipação: avaliação do potencial erosivo e comprimento da bacia com modelo hidráulico reduzido*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018. 98 p.

PORTO, R. M. *Hidráulica Básica*. 4ª ed. São Carlos: EESC/ USP, 2006.

SIMÕES, A. L. A. *Considerações sobre a hidráulica de vertedores em degraus: metodologias adimensionais para pré-dimensionamento*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. 286 p.

USBR (1987). *Design of small dams*. A Water Resources Technical Publication. 3ª ed. United States Bureau of Reclamation. Department of the Interior, Washington, D.C., USA, 1987.

USBR (2019). *Overtopping of Walls and Stilling Basin Failure*. Instruction Material of the Training Course of Best Practices and Risk Methodology. Chapter F-2. Department of the Interior, Washington, D.C., USA, 2019.

USDOT (2006). *Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels*. Hydraulic Engineering Circular N° 14. 3ª ed. United States Department of Transportation. Federal Highway Administration, Washington, D.C., USA, 2006.