

# DETERMINAÇÃO DE CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DE SOLEIRAS TERMINAIS NUMA BACIA DE DISSIPACÃO A JUSANTE DE UM DESCARREGADOR EM DEGRAUS

## Criteria Determination for the Design of End Sills in a Stilling Basin Downstream of Stepped Spillway

DIOGO ALMEIDA <sup>(1)</sup>, FRANCISCO TAVEIRA-PINTO <sup>(2)</sup>, ELSA CARVALHO <sup>(3)</sup> e MARCELO GIULIAN MARQUES <sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Mestre em Engenharia Civil, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, diogo\_fma@hotmail.com

<sup>(2)</sup> Professor Catedrático, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, fpinto@fe.up.pt

<sup>(3)</sup> Professora Auxiliar, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, elsac@fe.up.pt

<sup>(4)</sup> Professor Titular, Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
Av. Bento Gonçalves 9500, Agronomia, Porto Alegre, RS, Brasil, mmarques@iph.ufrgs.br

### Resumo

Os descarregadores em degraus têm vindo a ser utilizados com maior frequência, devido às técnicas inovadoras e práticas, que facilitam a sua construção, mas também à dissipação de energia conseguida, permitindo uma diminuição do comprimento da bacia de dissipação. A existência de soleiras terminais em bacias de dissipação possibilita uma perda de energia adicional. Esta combinação de dissipação de energia (descarregador e bacia de dissipação) é considerada como uma técnica económica e segura, contudo não existem muitos critérios para o dimensionamento das soleiras terminais, nomeadamente no que se refere à altura e posição. Este estudo pretende demonstrar a influência da altura, posição e inclinação das soleiras terminais e definir as características que permitem melhorar rendimento das mesmas. Neste trabalho apresenta-se também a análise das pressões registadas numa bacia de dissipação de energia com soleira terminal a jusante de um descarregador em degraus, com o objetivo de definir critérios de dimensionamento dessa soleira, quer em relação à sua altura, quer ao seu posicionamento.

**Palavras-chave:** Descarregador em degraus, bacia de dissipação, ressalto hidráulico, soleira terminal, pressões.

### Abstract

Stepped spillways have been more used due to innovative methods of construction which help the creation of these structures, but also due to the energy dissipation along the steps, which will decrease the stilling basin length. The end sill may be used to contribute in the energy dissipation besides the spillway. These dissipation methods (stepped spillway and stilling basin) ensure an economic and safe technique although end sills don't have too many dimension criteria, especially when it refers to their height and position. This experiment aims to show the influence of the height, position and slope in an end sill and also find in which way we can take its best performance. This study exposes a pressure analysis in a stilling basin with an end sill on the downstream of a stepped spillway, in order to define design criteria of such structure, whether for its height or position.

**Keywords:** Stepped spillways, stilling basin, hydraulic jump, end sill, pressures.

### 1. Introdução

Na construção de um aproveitamento hidráulico, uma das principais preocupações aquando da sua execução é saber como se vai processar a dissipação da energia do escoamento resultante da descarga dos caudais de cheia. Estas descargas originam uma grande energia na base da estrutura, podendo causar sérios danos como a erosão e puncionamento da estrutura.

Para mitigar estes danos, o escoamento deve dissipar o máximo de energia ao longo do descarregador ou na base da estrutura, antes de retomar o leito do rio.

Na escolha e no dimensionamento de dissipadores deve-se ter em conta o desnível a ser vencido, o caudal descarregado, as características topográficas e geológicas a jusante do dissipador e as condições de operação e manutenção.

O descarregador em degraus constitui um tipo de dissipador que permite a dissipação de uma parcela significativa de energia ao longo do descarregador, diminuindo a quantidade de energia a ser dissipada na bacia a jusante do mesmo. A dissipação de energia ao longo do descarregador pode chegar a 60% a 80% da energia total a montante (Tozzi, 1992; Sanagiotto, 2003; Dai Prá, 2004). A combinação de descarregadores em degraus com bacias de dissipação por ressalto hidráulico a jusante diminui a parcela de energia a ser dissipada na bacia, o que permite obter estruturas menores e poupança económica.

Atualmente cerca de 30% das barragens em BCC (Betão compactado por cilindros) possuem descarregadores em degraus como forma de dissipação de energia. Sendo na maioria dos casos adotado a jusante deste dissipador, bacias de dissipação por ressalto hidráulico com soleiras terminais.

No entanto, são poucos os estudos que analisam a influência da soleira terminal na dissipação de energia.

Em função do que foi referido, este trabalho tem como objetivo estudar a dissipação de energia por ressalto hidráulico a jusante de um descarregador em degraus com a presença de uma soleira terminal na bacia de dissipação. Pretende-se determinar quais as melhores características geométricas a serem adotadas para a soleira (altura e posição) em função do número de Froude do escoamento.

O trabalho experimental foi elaborado no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH), do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, onde existe um modelo reduzido de um descarregador não convencional em degraus. Esta dissertação dá continuidade ao projeto "Determinação de Critérios de Dimensionamento de Soleira Terminal em Bacia de Dissipação a Jusante de Vertedouro em Degraus", elaborado por Eliane Conterato (2014) e tem como principal objetivo confirmar a aplicabilidade da metodologia proposta pela autora. Para isso são apresentados resultados obtidos para diferentes características geométricas da soleira terminal.

## 2. Enquadramento Teórico

### 2.1. Dissipação de energia

Na construção de um aproveitamento hidráulico, pretende-se que a restituição dos caudais de descarga de cheias, a jusante desse aproveitamento, se processe nas condições o mais semelhante possível às do escoamento do curso de água natural. Esta obra vai originar um desnível entre as superfícies livre de água a montante e jusante e, conseqüentemente, a passagem de escoamento de montante para jusante determinará uma perda de carga de valor apreciável. A dissipação da maior parte desta energia ocorre, em geral, a jusante dos descarregadores, nas bacias de dissipação, com exceção dos descarregadores em degraus, que permitem uma dissipação de energia adicional.

A dissipação de energia em excesso será feita pelo atrito do escoamento com as fronteiras, pela turbulência do escoamento, pelo atrito e emulsão de jatos com o ar ou pelo impacto e atrito de jatos com a lâmina de água a jusante. É desejável que a turbulência originada e o contacto do escoamento com as fronteiras não origine erosões no leito do rio que possam pôr em risco a estabilidade da obra. Caso ocorram, essas erosões deverão estar afastadas da obra e da sua fundação.

O tipo de dissipação de energia a utilizar vai depender do tipo de aproveitamento em causa, dos valores dos caudais descarregados, das características topográficas e geológicas do local.

Na dissipação de energia associada à descarga de caudais de cheia são geralmente utilizados fenómenos como o ressalto hidráulico e os escoamentos por jatos que, pelas suas características, proporcionam a obtenção do objetivo em questão. Em geral, são utilizados os seguintes órgãos de dissipação de energia:

- Bacias de dissipação de energia por ressalto;

- Bacias de dissipação de energia por trampolim submerso ("roller bucket" ou concha de rolo);
- Bacias de dissipação de energia por jatos;
- Dissipação por macro-rugosidades;
- Dissipação por impacto de jatos com estruturas especificamente criados para tal.

A necessidade de redução de custos, sobretudo nas obras de dissipação e, em certos casos, na construção do próprio descarregador levou à ideia de provocar a dissipação ao longo do canal descarregador, através do uso de descarregadores em degraus. O objetivo pretendido, da obtenção de uma maior dissipação de energia antes de ser atingida a bacia de dissipação, é conseguido com o aumento da rugosidade das paredes dos canais descarregadores e pelos próprios degraus.

### 2.2. Bacias de dissipação por ressalto hidráulico

As bacias de dissipação por ressalto hidráulico são estruturas que são desenvolvidas baseadas na teoria do ressalto hidráulico, que ocorre quando há transição de um escoamento rápido para um escoamento lento, num determinado comprimento, designado de comprimento do ressalto (Figura 1).

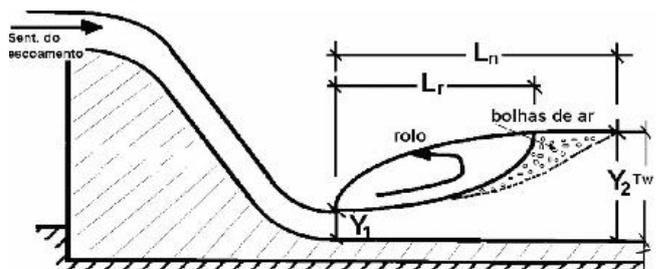


Figura 1. Esquema do ressalto hidráulico (United States Bureau of Reclamation, 1987).

Existem quatro tipos de bacia (United States Bureau of Reclamation, 1987), que se podem dividir em dois grupos: a bacia tipo I, que não possui qualquer tipo de obstáculos (figura 2) e as bacias tipo II, III e IV (figuras 3, 4 e 5, respetivamente). Estas últimas três bacias utilizam acessórios, tais como blocos de queda (*Chute Block*), blocos de impacto (*Baffle Piers*) ou soleiras terminais, dentadas ou não (*End Sill- dented or not*), que permitem diminuir o comprimento do ressalto e conseqüentemente o comprimento da bacia que conduzirá, provavelmente, a opções mais económicas.

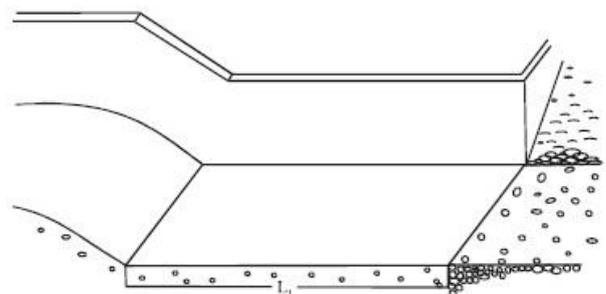


Figura 2. Bacia tipo I, sem obstáculos (United States Bureau of Reclamation, 1987).

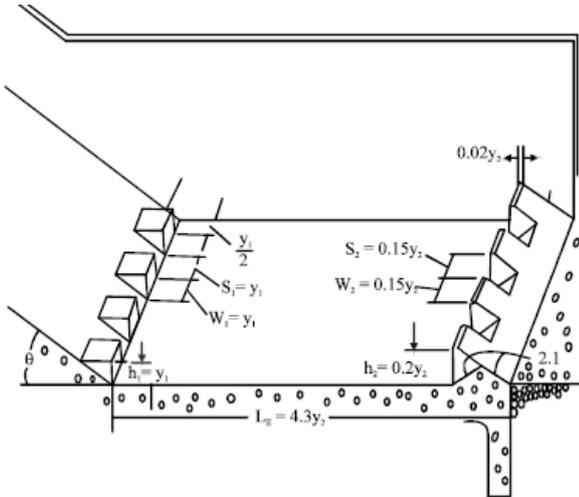


Figura 3. Bacia tipo II, com blocos de queda e soleira terminal com dentes (United States Bureau of Reclamation, 1987).

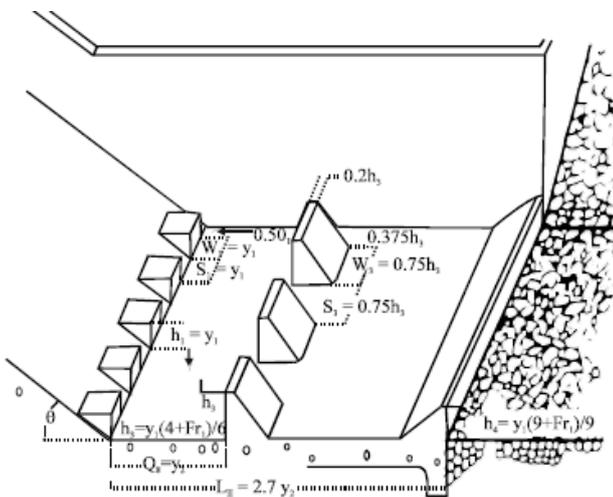


Figura 4. Bacia tipo III, com blocos de queda, blocos de impacto e soleira terminal (United States Bureau of Reclamation, 1987).

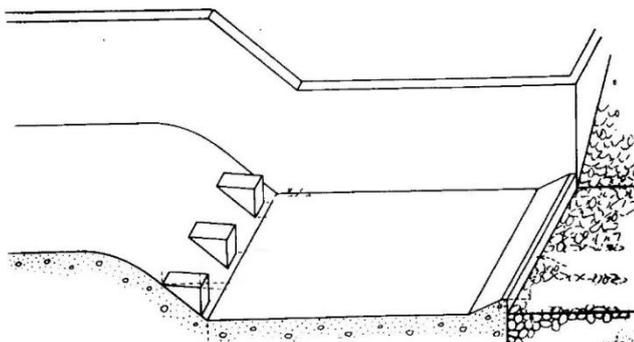


Figura 5. Bacia tipo IV, com blocos de queda e soleira terminal (United States Bureau of Reclamation, 1987).

### 2.3. Descarregadores em degraus

Nos descarregadores em degraus, dependendo do nível de água e do caudal que passa pelo descarregador, podem ocorrer diversos tipos de escoamento.

O escoamento pode ser dividido em três tipos diferentes: escoamento em quedas sucessivas (*nappe-flow*), escoamento deslizante sobre turbilhões (*skimming-flow*) e escoamento de transição (*transition-flow*), Chanson (2002).

O escoamento em quedas sucessivas (Figura 6) é caracterizado por uma sucessão de quedas livres do jato de água proveniente do degrau anterior cuja lâmina atinge total ou parcialmente o degrau imediatamente a jusante. Este tipo de escoamento é geralmente observado em descarregadores com baixa inclinação ou caudais pouco significativos. Neste caso, a energia pode ser dissipada pelo atrito do jato com o ar, pelo impacto do jato sobre o degrau incidente ou ainda, caso ocorra, por ressalto hidráulico.

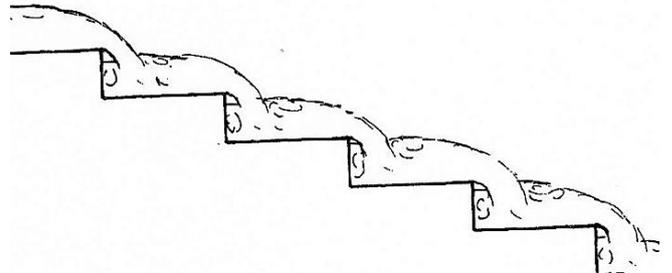


Figura 6. Escoamento em quedas sucessivas (Vischer e Hager, 1998).

O escoamento deslizante sobre turbilhões (Figura 7) é caracterizado por um fluxo principal deslizando sobre os degraus e por um fluxo secundário que preenche o espaço formado pelos degraus (Chanson, 2002). A dissipação de energia é, neste caso, dissipada essencialmente nos vórtices gerados nas cavidades formadas pelos degraus. Os vórtices são mantidos devido às tensões de corte provenientes do fluxo (Morris, 1955, 1961, referido por Sorensen, 1985 e Rajaratnam, 1990).

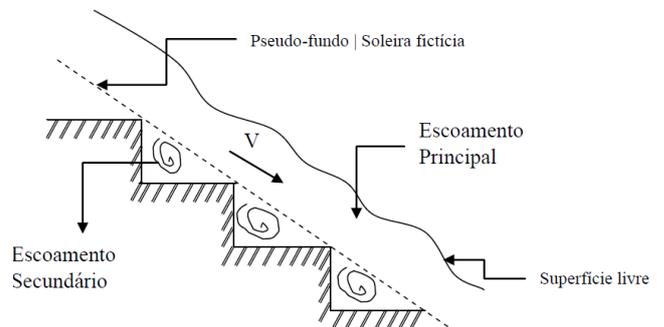


Figura 7. Escoamento deslizante sobre turbilhões (Antunes, 2011).

O escoamento de transição ocorre entre os maiores caudais do escoamento em quedas sucessivas e menores caudais do escoamento deslizante sobre turbilhões, gerando um modo de transição entre os dois. Não existe um consenso entre os vários autores para determinar ao certo onde se iniciam e terminam estes dois escoamentos anteriormente referidos.

### 3. Instalação Experimental

Para a realização deste estudo foi utilizado um modelo físico de um descarregador em degraus a que se segue uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico a jusante, existente no Laboratório de Obras Hidráulicas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS) em Porto Alegre, Brasil.

### 3.1. Descrição do modelo

As soleiras terminais da bacia de dissipação foram ajustadas consoante as necessidades do estudo. O modelo apresenta as seguintes características:

- Altura do descarregador ( $H$ ) = 2,45 m;
- Inclinação do descarregador = 1(V):0,75(H);
- Descarregador constituído por 33 degraus de 0,06m de altura;
- Comprimento do canal a jusante do descarregador = 5m,
- Largura do canal = 0,40m.

As Figuras 8 e 9 mostram o canal hidráulico utilizado e um esquema do mesmo, respetivamente. Como se pode verificar pelo esquema, a montante do descarregador há um pequeno reservatório para que ocorra a tranquilização do escoamento. Uma das paredes laterais do canal é revestida por acrílico, de modo a poder visualizar-se o comportamento do escoamento. A jusante do canal existe uma comporta que permite controlar o nível e um piezómetro para fazer as respetivas leituras.



Figura 8. Canal hidráulico.

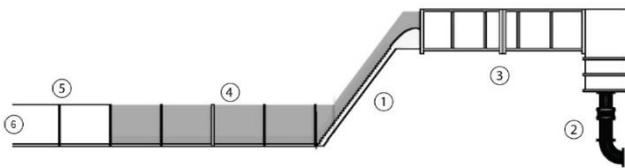


Figura 9. Esquema do canal hidráulico utilizado: 1 - Descarregador em degraus; 2 - Sistema de alimentação; 3 - Reservatório a montante; 4 - Canal a jusante com visualização (5 m, altura 1 m); 5 - Canal a jusante sem visualização (3m, altura 1 m); 6 - Comporta de controlo de nível para canal de retorno (Conterato, 2014).

### 3.2. Critério de semelhança adotado

O critério de semelhança adotado para estabelecer a relação entre o modelo e o protótipo foi o critério de semelhança de Froude, obedecendo à igualdade da relação entre forças de inércia e gravidade. Conterato (2014) sugere a utilização de uma escala inferior a 10, em função dos efeitos de escala, devido ao emulsão de ar nos degraus do descarregador. As seguintes equações estabelecem as relações entre modelo e protótipo para velocidade, caudal e caudal específico:

$$V_M/V_P = \lambda_l^{1/2} \quad [1]$$

em que  $V_M$  representa a velocidade no modelo,  $V_P$  a velocidade no protótipo e  $\lambda_l$  a escala geométrica;

$$Q_M/Q_P = \lambda_l^{5/2} \quad [2]$$

em que  $Q_M$  representa o caudal no modelo e  $Q_P$  o caudal no protótipo;

$$q_M/q_P = \lambda_l^{3/2} \quad [3]$$

em que  $q_M$  representa o caudal específico no modelo e  $q_P$  o caudal específico no protótipo.

### 3.3. Soleiras utilizadas

Como já foi referido, este estudo dá continuidade ao que foi realizado por Conterato (2014). Nessa investigação, foram utilizadas as soleiras representadas na Figura 10, onde se encontram as soleiras com inclinação 1:1 com as alturas de 24, 18, 12 e 10 cm. Já na Figura 11 estão apresentadas as soleiras utilizadas neste estudo, todas elas com 6 cm de altura, mas com inclinações de 1:1 e 1:3.

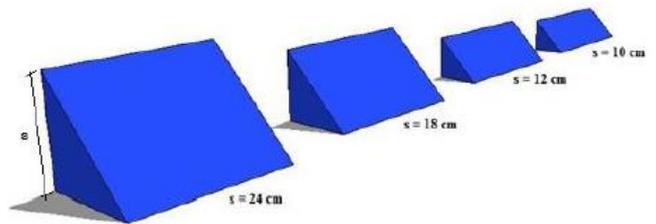


Figura 10. Soleiras utilizadas por Conterato (2014).

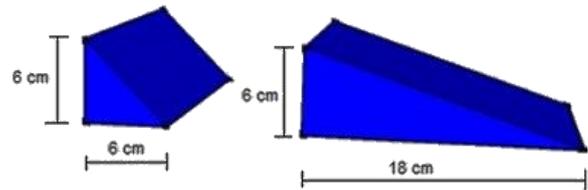


Figura 11. Soleiras utilizadas no presente estudo 1(V):1(H) e 1(V):3(H).

### 3.4. Equipamento de medição

As principais medições a serem efetuadas são os caudais e as alturas a jusante do ressalto hidráulico. Em relação aos caudais, recorreu-se a um medidor eletromagnético posicionado na tubagem a montante do descarregador, que permitia registar o um caudal instantâneo para os diversos ensaios realizados. Em relação às alturas a jusante, os seus valores foram registados a partir de um piezómetro colocado no final do canal. Estes dois equipamentos de medição estão representados na Figura 12.



Figura 12. Dispositivo de medição de caudal (a) e piezómetro (b).

### 3.5. Aquisição de dados

Os equipamentos de medição de pressão foram ligados a um sistema de aquisição de dados, uma placa da National Instruments NI USB-6225 e registados através do software LabView, que posteriormente exportará esses dados para um ficheiro Excel de forma a serem analisados.

Cada ensaio durava oito minutos com uma frequência de 256 Hz, o que significa que para cada ensaio foram recolhidos 122880 dados de pressão por cada transdutor. Foram utilizados 24 transdutores na bacia de dissipação, testados 5 caudais para as 3 posições de cada uma das 2 soleiras, o que perfaz um total de cerca de 90 milhões de dados registados.

As pressões instantâneas ao longo da bacia de dissipação foram adquiridas através de transdutores piezoresistivos da marca Sitron, modelo SP96 com precisão de +/- 0,5%, com um intervalo de aquisição entre -0,5 a 1,5 m.c.a. Na figura 13 apresenta-se a disposição de alguns dos transdutores na bacia de dissipação.

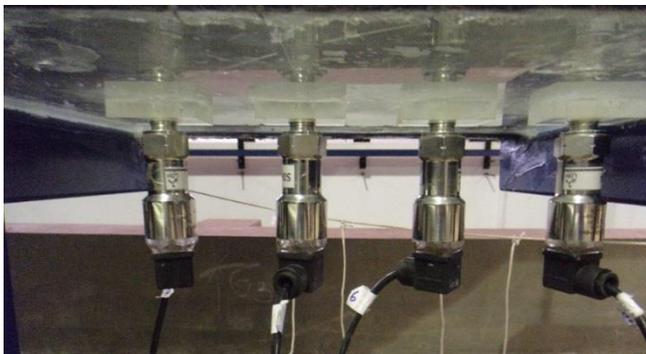


Figura 13. Disposição de alguns transdutores de pressão na bacia de dissipação.

### 3.6. Considerações gerais sobre os ensaios

Conterato (2014) utilizou quatro soleiras terminais de alturas diferentes (10, 12, 18 e 24 cm) com a mesma inclinação de 1:1, dispostas em três posições diferentes ao longo da bacia de dissipação. No presente trabalho pretendeu-se utilizar uma soleira terminal de 6 cm, com duas inclinações diferentes (1:1 e 1:3).

De modo a ter alguma segurança no que se refere à coerência entre os resultados dos dois estudos, repetiram-se os ensaios da soleira de 10cm, tendo-se obtido valores praticamente idênticos aos obtidos por Conterato (2014), demonstrando-se assim a repetibilidade dos ensaios.

As três posições referidas são a 245, 163 e 122,5 cm, medidas desde o final do descarregador, correspondentes a 1H, 2/3H e 1/2H, respetivamente, sendo H a altura do descarregador, ou seja, 2,45 m. A Figura 14 representa um esquema do descarregador e da bacia de dissipação com as soleiras localizadas nessas três posições e ensaiadas separadamente.

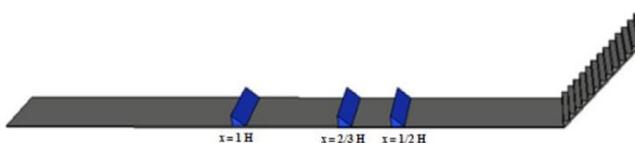


Figura 14. Esquema representativo das três posições da soleira ao longo da bacia de dissipação (Conterato, 2014).

Nos ensaios foram considerados cinco caudais, nomeadamente, 40, 60, 80, 100 e 110 L/s. Com a ajuda das comportas a jusante ajustou-se a altura correspondente ao escoamento lento ( $Y_2$ ), previamente estabelecida, para cada um dos caudais. Estes valores de nível de jusante foram os equivalentes às alturas dos escoamentos lentos obtidas para cada caudal numa bacia tipo I, medidos em ensaios neste modelo, para que o ressalto se iniciasse no final do descarregador, ou seja, no início da bacia. A escolha dos caudais tem por base o fato de o caudal mínimo lido pelo medidor utilizado ser de aproximadamente 40 L/s e caso se utilizassem caudais muito superiores a 110 L/s poder-se-ia estar perante uma situação de transbordamento de água do canal. O Quadro 1 mostra as características de cada uma das condições de ensaio (altura, velocidade e número de Froude) a montante e jusante.

Quadro 1. Características dos ensaios com descarregadores em degraus.

Q (L/s)	JUSANTE			MONTANTE		
	$Y_2$ (m)	$V_2$ (m/s)	$FR_2$ (-)	$Y_1$ (m)	$V_1$ (m/s)	$FR_1$ (-)
40	0.265	0.38	0.23	0.026	3.79	7.44
60	0.339	0.44	0.24	0.036	4.16	6.98
80	0.409	0.49	0.24	0.044	4.54	6.91
100	0.459	0.54	0.26	0.054	4.62	6.34
110	0.478	0.58	0.27	0.060	4.59	5.98

A altura conjugada associada ao regime rápido ( $Y_1$ ) foi determinada a partir da equação de Bélanger [4], adotando-se como altura conjugada associada ao regime lento ( $Y_2$ ), a altura de água a jusante onde não apresentava mais influência do ressalto. Esta altura  $Y_2$  foi medida no modelo de modo a que o ressalto se posicionasse no final do descarregador.

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) \quad [4]$$

em que  $Fr_1$  representa o número de Froude, dado pela expressão,

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gY_1}} \quad [5]$$

em que g representa a aceleração da gravidade.

Comparando-se os números de Froude obtidos a jusante de um descarregador em degraus com o número de Froude a jusante de um descarregador de perfil liso (descarregador convencional) verificou-se uma redução significativa deste número para o escoamento a jusante do descarregador em degraus, devido à dissipação de energia ao longo do perfil do descarregador que pode atingir os 80% em alguns casos.

## 4. Análise de Resultados

### 4.1. Pressões médias em bacia com soleira terminal com inclinação 1:1

#### 4.1.1. Pressões médias brutas

Na Figura 15 apresenta-se a comparação da distribuição longitudinal das pressões médias obtidas com a soleira de 6 cm, na posição 1/1H (45 cm), com os dados da bacia tipo I, sem soleira.

A análise da Figura 15 permite verificar que no local onde se encontra posicionada a soleira há uma pequena perturbação, o que provoca um aumento das pressões a montante e uma diminuição a jusante, todavia essas pressões a jusante da soleira terminal tendem a igualar os valores registados da bacia tipo I. Este comportamento foi observado nos restantes ensaios e para as três posições da soleira estudadas. O ligeiro aumento de pressões a montante deve-se ao afogamento provocado pela soleira, que diminui as flutuações de pressão na bacia de dissipação, o que é muito importante para o combate à erosão.

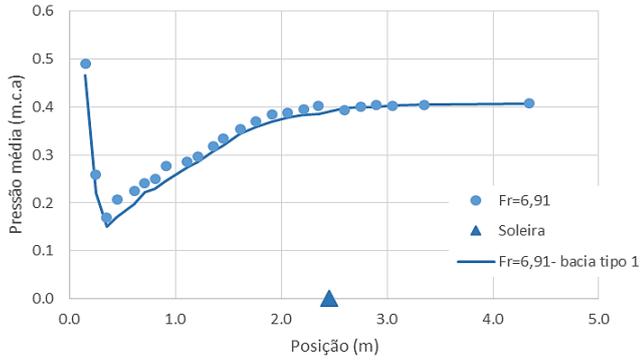


Figura 15. Distribuição longitudinal das pressões médias numa bacia do tipo I e numa bacia com soleira de 6 cm, na posição 1/1H, para um caudal de 80L/s (Fr=6,91).

4.1.2. Pressões médias adimensionalizadas

De forma a analisar e comparar as pressões médias, foi utilizada uma metodologia proposta por Marques *et al.* (1996). Sendo assim, definiram-se dois parâmetros: o parâmetro  $y_p$ , que representa a pressão adimensionalizada e  $x_p$  que corresponde à distância adimensionalizada, definidos pelas expressões [6] e [7]

$$y_p = \frac{(P - Y_1)}{(Y_2 - Y_1)} \quad [6]$$

em que  $P$  representa a pressão média bruta (em mca) e

$$x_p = \frac{x}{(Y_2 - Y_1)} \quad [7]$$

em que  $x$  representa a distância medida a partir da base do descarregador.

Os resultados das pressões médias brutas foram então adimensionalizados. A Figura 16 mostra os resultados referentes para um caudal de 80L/s (Fr=6,91) e posição 2/3H e a sua comparação com os resultados obtidos para a bacia do tipo I.

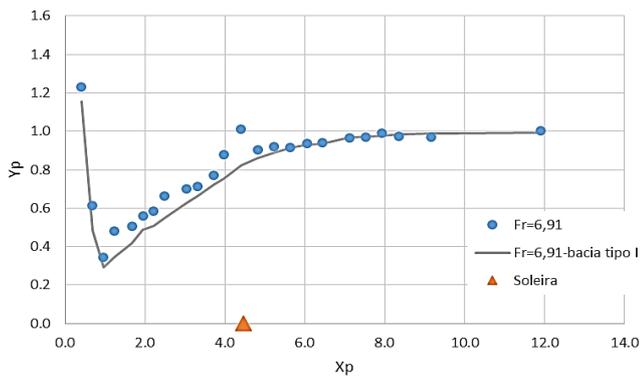


Figura 16. Distribuição longitudinal das pressões médias adimensionalizadas, para a soleira de 6 cm de altura, na posição 2/3H e caudal 80L/s (Fr=6,91) em comparação com os resultados de bacia tipo I.

De forma a analisar a influência da altura da soleira nas pressões médias procedeu-se à comparação dos resultados com os do estudo realizado por Conterato (2014), apresentada na Figura 17.

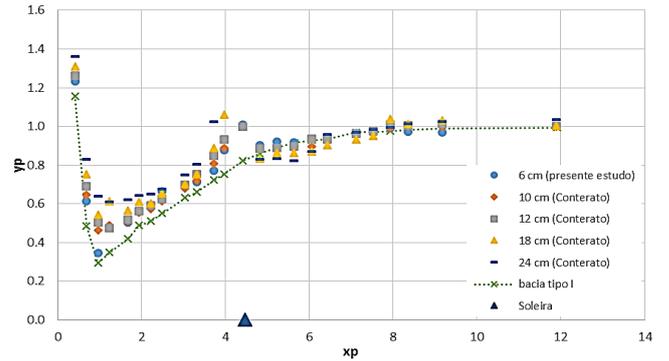


Figura 17. Distribuição longitudinal das pressões médias adimensionalizadas, para diferentes alturas de soleira, na posição 2/3H e caudal 80L/s (Fr=6,91) em comparação com os resultados de bacia do tipo I.

Analisando o gráfico da Figura 17 constata-se que as pressões a montante da soleira são todas maiores do que as correspondentes a uma bacia do tipo I e que os valores das pressões aumentam com a altura da soleira.

A jusante da soleira terminal obtiveram-se pressões menores nos primeiros transdutores, comparativamente com a bacia do tipo I, e a tendência é que estes valores igualem os registados para esse tipo de bacia. Estas pressões menores podem explicar-se devido a uma recirculação do escoamento de jusante para montante, pois quanto maior for a altura da soleira, maior é a distância onde vai ser projetado esse jato e mais visível é essa recirculação, provocando as baixas pressões logo a jusante da soleira terminal. Este estudo com a inclusão da soleira de 6 cm veio corroborar estas mesmas conclusões. Verifica-se que para a situação de montante, se registaram pressões maiores do que na bacia do tipo I e menores do que as demais soleiras anteriormente utilizadas; para a situação de jusante, como seria de esperar, nas primeiras posições que se seguem à soleira terminal, as pressões registadas são maiores quando comparadas com as outras soleiras, uma vez que essa recirculação referida não é tão significativa para soleiras menores. A Figura 18 mostra os resultados de pressões médias adimensionalizadas para diferentes configurações da bacia, sem soleira e com a soleira de 6 cm nas três posições estudadas, para um caudal de 80L/s (Fr=6,91).

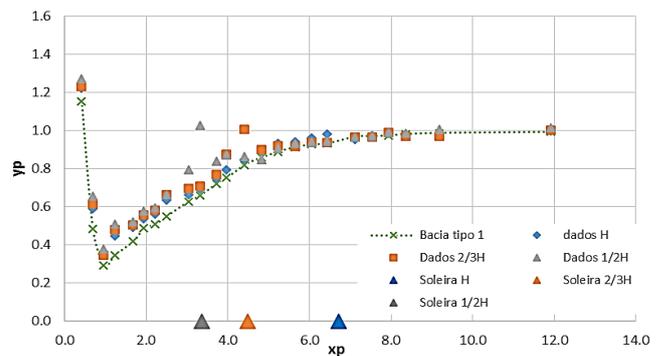


Figura 18. Distribuição longitudinal das pressões médias adimensionalizadas, para uma bacia com soleira de 6 cm e caudal 80L/s (Fr=6,91) para diferentes posições, em comparação com a bacia do tipo I.

Como se constata facilmente, quanto mais próxima estiver a soleira do descarregador, maior é a pressão no ponto imediatamente a montante da soleira terminal.

Tal como já foi explicado, a velocidade incidente numa soleira é tanto maior quanto mais próxima esta esteja do descarregador, o que pode explicar esse pico de pressão logo a montante da soleira.

Outro aspeto a considerar é que a pressão média no interior da bacia (a montante da soleira terminal) pode sofrer influência da posição em que é colocada, aumentando as pressões médias à medida que a soleira se aproxima do final do descarregador.

A análise das pressões médias adimensionalizadas não é suficiente para definir com exatidão qual a melhor altura e posição da soleira a utilizar, de modo a obter-se o seu melhor rendimento. Procedeu-se, então, à análise das flutuações de pressão ao longo da bacia e a jusante dela, de modo a definir qual a melhor geometria e posicionamento da soleira terminal.

#### 4.2. Flutuações de pressão em bacias com soleira terminal com Inclinação 1:1

##### 4.2.1. Flutuações médias brutas

A presença de uma soleira terminal numa bacia de dissipação provoca um afogamento artificial do escoamento, provocando um amortecimento dos valores nas flutuações de pressão.

Para jusante, as flutuações tendem a diminuir para depois aumentarem na região de impacto do escoamento, voltando rapidamente à situação normal do escoamento.

Na Figura 19 apresenta-se a distribuição longitudinal das flutuações de pressão para uma bacia do tipo I e com uma soleira de 6 cm de altura, para a posição 2/3H, para um caudal de 80L/s (Fr=6,91).

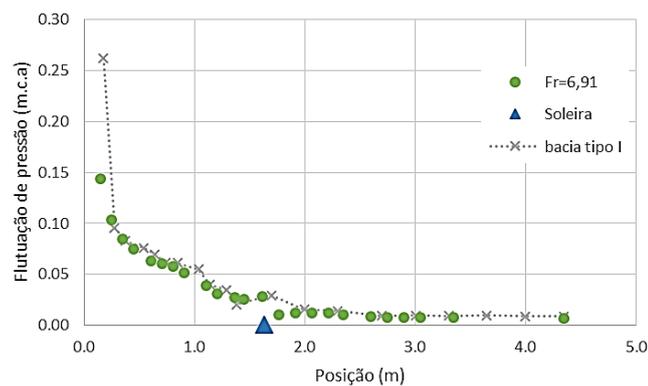


Figura 19. Distribuição longitudinal das flutuações de pressão (desvio padrão da amostra) no fundo da bacia do tipo I e com soleira terminal de 6 cm e posição 2/3H, para um caudal de 80L/s (Fr=6,91).

Como é possível confirmar pela Figura 19, as flutuações no interior das bacias diminuem na presença de soleiras. As diferenças de flutuações de pressão entre os dois casos são mais significativas no início do ressalto, uma vez que a utilização de uma soleira provoca um afogamento artificial do escoamento, tornando as variações de pressão mais suaves. Assim, como foi mencionado para as pressões médias, a recirculação a jusante da soleira também influencia as flutuações de pressão.

Essa recirculação é tanto maior, quanto maior for a altura do soleira, já que o jato de água é projetado para uma posição mais a jusante em relação a soleiras menores, havendo uma flutuação maior na mesma posição na presença de soleiras mais pequenas. No entanto, após alguma distância a jusante da soleira terminal, as flutuações de pressão tendem a igualar os valores registados numa bacia do tipo I. Em relação à posição da soleira, as flutuações de pressão são ligeiramente superiores à medida que esta se encontra mais próxima do descarregador, porém, para a soleira em estudo (6 cm), essa diferença não é muito significativa.

##### 4.2.2. Flutuações médias adimensionalizadas

De forma a comparar as flutuações de pressão, tal como nas pressões médias, aplicou-se a metodologia proposta por Marques *et al.* (1996), ao adimensionalizar as flutuações de pressão e as suas posições como mostra a equação [8],

$$\sigma_p = \frac{\sigma}{H_t} \frac{Y_2}{Y_1} \quad [8]$$

em que  $\sigma_p$  representa a flutuação de pressão adimensionalizada,  $\sigma$  a flutuação de pressão e  $H_t$  a perda de carga ao longo do ressalto.

As posições das soleiras foram igualmente adimensionalizadas, de acordo com a equação [7].

Na Figura 20 apresenta-se a distribuição longitudinal das flutuações de pressão adimensionalizadas obtidas neste estudo para a bacia do tipo I e para a bacia com soleira de 6cm, para a posição 2/3H, para um caudal de 80L/s (Fr=6,91), assim com os resultados obtidos por Conterato (2014) para as restantes soleiras.

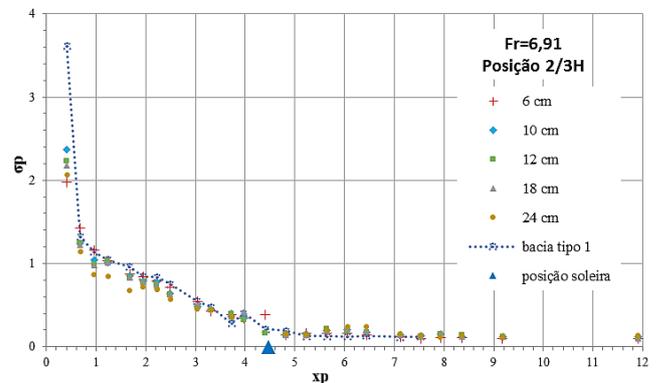


Figura 20. Distribuição longitudinal das flutuações de pressão adimensionalizadas para a bacia do tipo I e para a bacia com soleiras diferentes, para a posição 2/3H, para um caudal de 80L/s (Fr=6,91).

A análise da Figura 20 e dos restantes resultados obtidos para as restantes posições da soleira (1/2H e 1/1H) permite verificar que:

- O ponto de máxima flutuação de pressão ocorre na região de impacto do jato ( $\sigma_{pm\acute{a}x}$ );
- A flutuação de pressão diminui rapidamente até à posição  $(4 X)/(Y_2 - Y_1)$  - ponto de descolamento do escoamento segundo Lopardo (1986) e Marques (1997);
- Após a soleira, as flutuações apresentam uma diminuição, contudo no ponto onde o escoamento foi lançado pela soleira é registado o ponto de flutuação máxima ( $\sigma_{pm\acute{a}x}$ ) que, de seguida, diminuirá até encontrar o valor de flutuação normal do escoamento se não houvesse soleira.

Ao fazer uma análise pormenorizada a jusante da soleira, denota-se que há um pico correspondente a um máximo do valor da flutuação.

Na Figura 21 exemplifica-se a existência deste pico para a bacia do tipo I e para a bacia com soleira de 6cm, para a posição 2/3H, para um caudal de 80L/s ( $Fr=6,91$ ). Esse valor máximo pode ser explicado como sendo o valor da máxima flutuação que ocorre a jusante de uma soleira na região de incidência do jato (Marques, 1995).

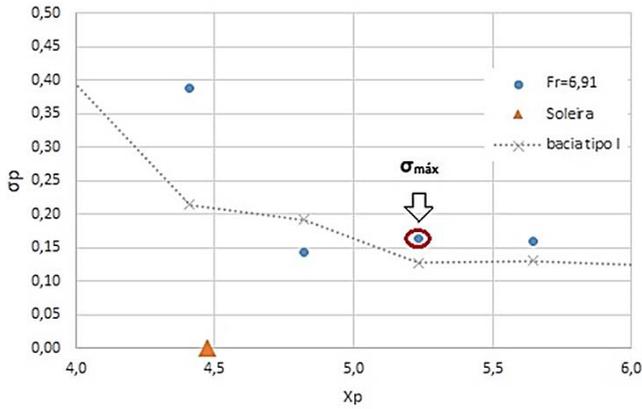


Figura 21. Análise das flutuações de pressão adimensionalizadas no trecho a jusante da soleira, para a bacia do tipo I e para a bacia com soleira de 6 cm, para a posição 2/3H, para um caudal de 80L/s ( $Fr=6,91$ ).

É desejável que este valor de flutuação máxima seja o menor possível, de modo a que o escoamento volte às condições naturais a jusante do descarregador o mais rapidamente possível, reduzindo a possibilidade de erosão do leito e de danos a jusante, o que constitui o principal objetivo do dimensionamento de uma bacia de dissipação.

Todavia, a quantificação desse valor de flutuação máxima não é o único fator a ser levado em consideração no dimensionamento.

A localização da incidência do escoamento após a soleira (local de máxima flutuação de pressão) também tem a sua importância. Caso o escoamento incida próximo da estrutura, a erosão do leito pode comprometer a segurança da estrutura.

Segundo Elevarstosky (1959), o comprimento da bacia ( $L_b$ ), e portanto a posição da soleira terminal, deve ter em conta as características geológicas a jusante da estrutura, nomeadamente:

- solos facilmente erodíveis:  $L_b \geq 6,9 (Y_2 - Y_1)$ ;
- solos não facilmente erodíveis:  $L_b \geq 4,2 (Y_2 - Y_1)$ .

Com base na recomendação de Elevarstosky (1959), foram feitas suposições de análises para situações de:

- solos facilmente erodíveis - encontrar a condição do menor valor de flutuação de pressão máxima a jusante da soleira (menor valor de  $\sigma_{pm\acute{a}x}$ );
- solos não facilmente erodíveis - encontrar a menor relação ( $\varpi$ ) entre a flutuação de pressão máxima a jusante adimensionalizada ( $\sigma_{pm\acute{a}x}$ ) e a distância relativa à soleira ( $\Delta x_{m\acute{a}x}$ ), para a qual ocorre  $\sigma_{pm\acute{a}x}$ .

#### 4.2.3. Análise do parâmetro $\varpi$

Foi estabelecido um critério que relaciona a flutuação máxima a jusante da soleira terminal ( $\sigma_{pm\acute{a}x}$ ) com a distância a que esta flutuação ocorre ( $\Delta x_{m\acute{a}x}$ ):

$$\varpi = \frac{\sigma_{pm\acute{a}x}}{\Delta x_{m\acute{a}x}} \quad [9]$$

A altura da soleira foi adimensionalizada pela altura conjugada associada ao escoamento rápido (equação [10]), de forma a ser relacionada com a relação entre a flutuação máxima adimensionalizada após a soleira e a distância adimensionalizada desde a soleira até ao ponto onde essa flutuação ocorre,

$$\frac{s}{Y_1}, \quad [10]$$

em que  $s$  representa a altura da soleira.

Nesta análise incluiu-se também a bacia do tipo I ( $s=0$  cm), sendo considerado o seu final com as três posições estudadas ( $H$ ,  $2/3H$  e  $1/2H$ ). Deve-se realçar que para bacias do tipo I deve haver um comprimento mínimo que tem em conta o tipo de geologia e o comprimento do ressalto e este valor deve estar após a região de máxima flutuação de pressão no interior da bacia, ou seja superior ou igual a  $2 (Y_2 - Y_1)$ , sendo recomendado que seja superior ou igual a  $4 (Y_2 - Y_1)$ , após o ponto de descolamento do escoamento, posição em que as velocidades começam a diminuir rapidamente no ressalto. Elevarstosky (1959) recomenda para solos não facilmente erodíveis que  $L_b \geq 4,2 (Y_2 - Y_1)$ .

As flutuações de pressão em bacias do tipo I tendem a diminuir com o decorrer do escoamento, principalmente quando se atinge a posição aproximada de  $2 (Y_2 - Y_1)$ , como mostra a Figura 22.

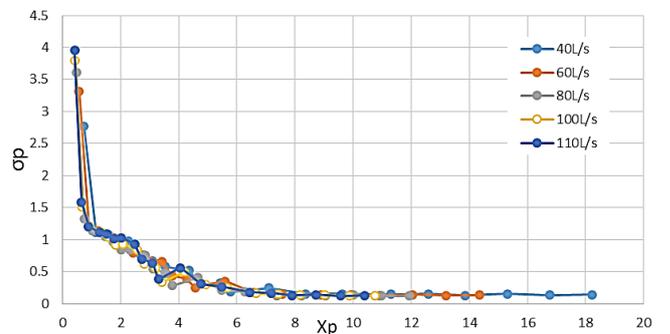


Figura 22. Flutuações de pressão em bacias do tipo I para diferentes caudais.

Então, para o caso da bacia do tipo I, foi considerada como flutuação máxima aquela que ocorre na posição final da bacia,  $\Delta x_{m\acute{a}x} = (Y_2 - Y_1)$ , uma vez que para pontos a montante desta posição, a relação entre a flutuação máxima adimensionalizada após a soleira e a distância adimensionalizada desde a soleira até ao ponto onde essa flutuação ocorre,  $\varpi$ , tende para infinito. A escolha da posição ( $Y_2 - Y_1$ ) foi considerada razoável, já que a jusante desta os valores das flutuações tendem para valores mais baixos.

A Figura 23 apresenta os valores obtidos por Conterato (2014) (símbolos preenchidas) acrescido dos valores do presente estudo (figuras sem preenchimento) em função da altura da soleira adimensionalizada para cada posição de soleira, para o caudal de 80 L/s ( $Fr=6,91$ ).

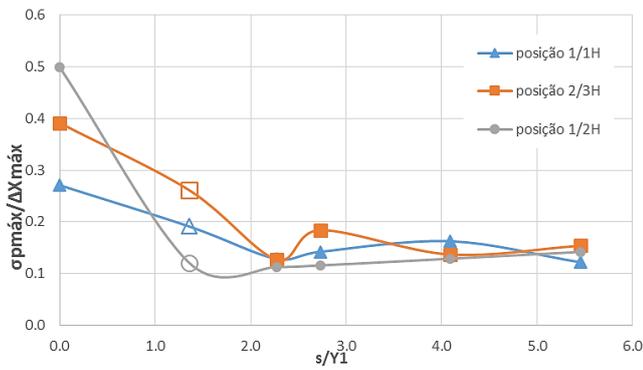


Figura 23. Resultados do parâmetro  $\varpi$  em função da altura adimensionalizada da soleira para diferentes posições, para o caudal de 80 L/s ( $Fr=6,91$ ).

A partir da análise das Figuras 22 e 23 identificou-se, para cada um dos caudais, qual o que apresentava a melhor solução para cada uma das posições, isto é, a que apresentava o menor parâmetro  $\varpi$ .

A inserção da soleira de altura menor que as propostas por Conterato (2014) veio demonstrar que esta alternativa de soleira não é a solução ideal, visto que para todos os caudais e posições, o parâmetro  $\varpi$  encontrado foi sempre maior. Deste modo, a melhor solução, em relação ao parâmetro  $\varpi$ , poderá estar numa altura entre estas duas referidas (6 cm e 10 cm).

No que respeita à análise do parâmetro  $\varpi$ , estes valores devem ser aplicados apenas a solos não facilmente erodíveis. Na análise seguinte, relativa às flutuações máximas a jusante da soleira terminal, o principal foco é para solos facilmente erodíveis, já que a erosão a jusante da bacia de dissipação é um fenómeno de máxima importância e procurar-se-á um critério para se obter o menor valor de flutuação de pressão máxima a jusante da soleira ( $\sigma_{pmáx}$ ).

Sendo assim, o principal objetivo da próxima análise passa por encontrar o menor valor de flutuação máxima a jusante da soleira terminal.

#### 4.2.4. Máximo valor de flutuação a jusante de uma soleira terminal

Outra abordagem realizada com o intuito de complementar a análise anterior, foi verificar onde se registava o máximo valor de flutuação ( $\sigma_{pmáx}$ ) a jusante da soleira terminal e também para uma bacia do tipo I.

Para uma bacia do tipo I, Conterato (2014) considerou que o valor máximo de flutuação a jusante da soleira seria o ponto onde se registasse a maior flutuação a jusante de onde a soleira estivesse hipoteticamente colocada.

A Figura 24 representa a relação das flutuações máximas adimensionalizadas ( $\sigma_{pmáx}$ ) com as alturas de soleiras adimensionalizadas, para um número de Froude igual a 6,91.

A análise dos resultados obtidos para todas as condições de ensaio permite verificar que a soleira de 6 cm de altura induz uma flutuação máxima menor, comparativamente às demais soleiras estudadas anteriormente por Conterato (2014), como era expectável.

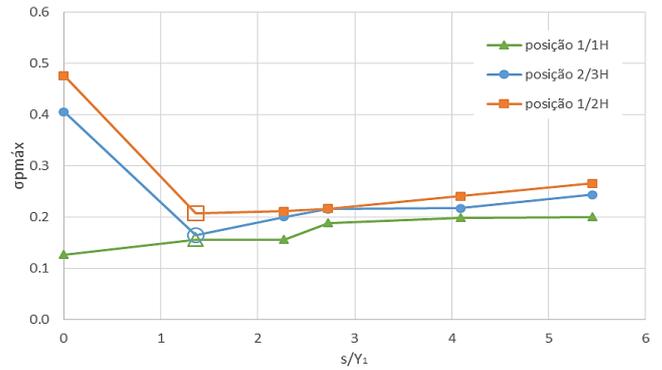


Figura 24. Valores adimensionalizados de máxima flutuação em função da altura adimensionalizada da soleira para as 3 posições e um caudal de 80L/s.

Da análise dos diferentes resultados, verifica-se que:

- Para a posição 1/1H,  $L_s = 6,71 (Y_2 - Y_1)$ , o valor de  $\sigma_{pmáx}$  é proporcional a  $s/Y_1$  e o menor valor de  $\sigma_{pmáx}$  ocorreu sempre para a bacia do tipo I ( $s/Y_1=0$ ). Isto pode dever-se ao fato de a posição adimensionalizada ser maior que 6 ( $Y_2 - Y_1$ ), ou seja, encontra-se na zona de final do rolo do ressalto (Lopardo, 1986 e Marques *et al.*, 1996), zona essa onde se verificou que grande parte da energia já tinha sido dissipada (cerca de 90%) e não existiam grandes flutuações de pressão.
- Para a posição 2/3H,  $L_s = 4,47 (Y_2 - Y_1)$ , os valores máximos de  $\sigma_{pmáx}$  encontram-se para a bacia do tipo I. Como já foi referido anteriormente, os valores mínimos de flutuação máxima foram encontrados para a soleira de 6 cm de altura. Para as restantes alturas, o valor das flutuações aumenta de uma forma quase proporcional. As velocidades diminuem gradualmente até encontrarem a velocidade média lenta no fim do ressalto. Nesta posição a soleira funciona como uma rampa de lançamento, projetando o escoamento para uma posição mais a jusante, afastado do fim da bacia, onde se verificam as maiores flutuações.
- Para a posição 1/2H, o comportamento é idêntico ao da posição 2/3H, no entanto com valores de flutuação mais elevados, presumivelmente devido à velocidade de lançamento do escoamento. Essa velocidade faz com que o impacto do jato seja lançado mais a jusante, comparativamente com a posição 2/3H.

A partir da análise de todos os resultados, retirou-se o menor valor de  $\sigma_{pmáx}$  para cada posição da soleira. Esses valores foram relacionados com o posicionamento adimensionalizado da soleira, para cada número de Froude. A maior parte desses menores valores de flutuações máximas adimensionalizadas foram encontrados para a soleira de 6 cm, o que permitiu uma atualização dos resultados de Conterato (2014), Figura 25. Outra análise efetuada foi relacionar a altura adimensionalizada com a posição adimensionalizada para os casos onde se registaram os menores valores de  $\sigma_{pmáx}$ . A Figura 26 mostra essa análise realizada por Conterato (2014), enquanto a Figura 27 apresenta a análise do presente estudo. A principal diferença entre estas figuras deve-se ao valor da altura, já que foi para a soleira de 6 cm que se encontraram os menores valores de flutuação máxima adimensionalizada.

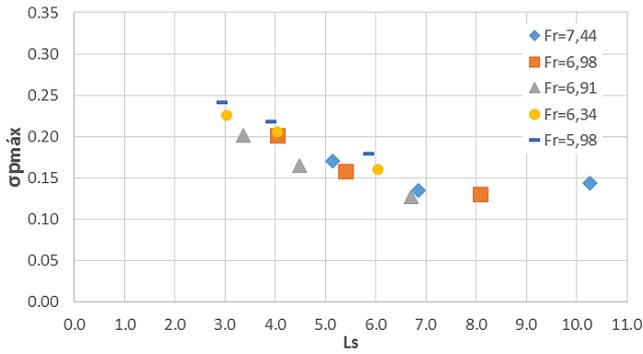


Figura 25. Menores valores de flutuação máxima adimensionalizada encontrados, em função da posição da soleira adimensionalizada.

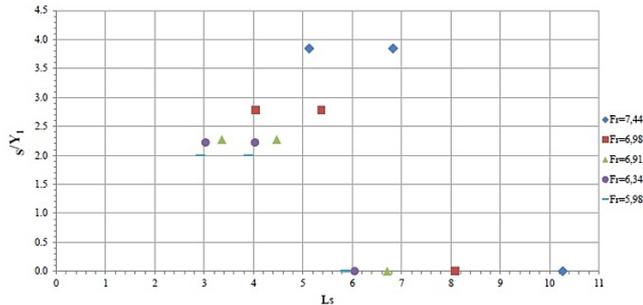


Figura 26. Valores de altura adimensionalizada em função da posição adimensionalizada, para cada número de Froude (Conterato, 2014).

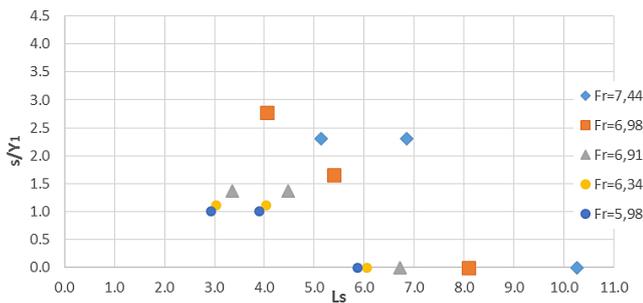


Figura 27. Valores de altura adimensionalizada em função da posição adimensionalizada, para cada número de Froude.

A tendência observada foi praticamente a mesma. À exceção da posição 1/1H, para o mesmo número de Froude, as alturas adimensionalizadas que originaram os menores valores de  $\sigma_{pmáx}$  foram as mesmas, apresentando um valor constante. O único caudal em que tal não sucedeu foi o de 60L/s ( $Fr_1=6,98$ ) em que, relativamente à posição 2/3H, a melhor opção seria a soleira de 6 cm, enquanto para a posição 1/2H a melhor solução seria a de 10 cm.

Através destas análises foi construído um gráfico que relaciona a altura da soleira adimensionalizada correspondente ao menor valor de  $\sigma_{pmáx}$  com o número de Froude, tal como foi feito na análise da relação entre flutuação máxima adimensionalizada após soleira e distância adimensionalizada desde a soleira até ao ponto onde essa flutuação ocorre.

Conterato (2014) concluiu que a melhor condição e altura de soleira encontrada na análise de flutuação máxima foi a mesma da análise da relação entre flutuação máxima adimensionalizada após soleira e a distância adimensionalizada desde a soleira até ao ponto onde essa flutuação ocorre.

Todavia o presente estudo não veio demonstrar a mesma relação, já que no que diz respeito à flutuação de pressão foi encontrada uma melhor solução, Figura 28.

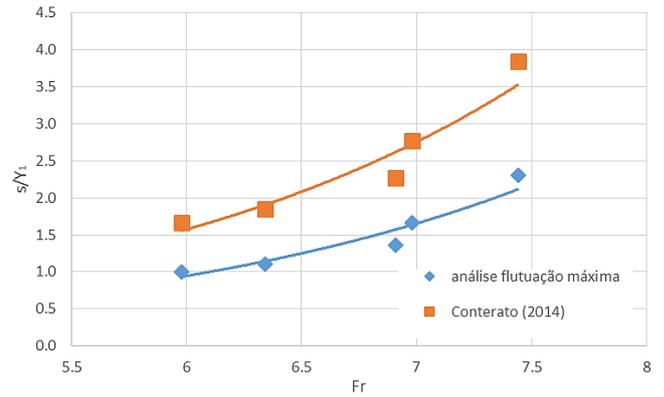


Figura 28. Valores de altura de soleira adimensionalizados que originam o menor valor de flutuação máxima adimensionalizada, em função do número de Froude, em contraste com os resultados de Conterato (2014).

#### 4.2.5. Análise do Máximo Valor de Flutuação a Montante da Soleira Terminal

Esta análise parte do que já foi observado por Conterato (2014). À medida que a altura da soleira terminal aumenta, as flutuações a montante tendem a diminuir. O afogamento artificial causado pela inserção da soleira contribui para a estabilização do escoamento no interior da bacia, diminuindo as flutuações de pressão.

Estes valores de flutuação podem ser mais reduzidos para soleiras de altura maior, no entanto, para algumas situações, Conterato (2014) verificou que o escoamento atinge a altura crítica sobre a soleira, funcionando esta como um descarregador, Figura 29.

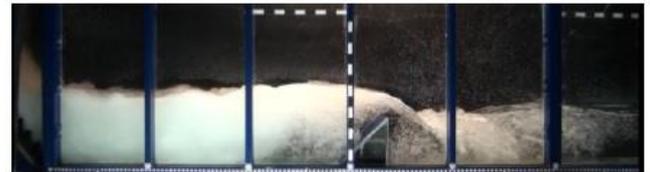


Figura 29. Funcionamento como descarregador (Conterato, 2014).

Este tipo de escoamento foi observado para algumas posições, para um número de Froude de 7,44 nas soleiras de 18 e 24 cm e para um número de Froude de 6,98 para a soleira de 24 cm. Para evitar este facto é necessário que o nível acima da soleira ( $Y_3$ ) seja maior que a altura crítica, onde se estabeleceram as seguintes equações:

$$Y_3 - h_c > 0 \quad [10]$$

$$Y_3 = Y_2 - s \quad [11]$$

Com as equações [10] e [11] determinou-se a altura limite para que não se provoque este tipo de escoamento indesejado.

No Quadro 2 apresentam-se os valores de  $s$  que limitam o funcionamento da soleira como descarregador, da relação  $s/Y_1$  que originaram a menor flutuação a montante da soleira e a relação adotada. Com estes resultados foi possível obter o gráfico da Figura 30, que revela a altura ideal no que se refere às flutuações a montante da soleira: flutuações mínimas e não funcionamento da soleira como descarregador.

Quadro 2. Alturas adimensionalizadas utilizadas.

Fr (-)	Y <sub>1</sub> (m)	S <sub>limite</sub> (m)	S <sub>lim</sub> /Y <sub>1</sub> (-)	s/Y <sub>1</sub> * (-)	s/Y <sub>1</sub> adotado (-)
7.44	0.026	0.16	6.34	9.23	6.34
6.98	0.036	0.21	5.77	6.67	5.77
6.91	0.044	0.25	5.69	5.45	5.45
6.34	0.054	0.27	5.09	4.44	4.44
5.98	0.060	0.28	4.69	4.00	4.00

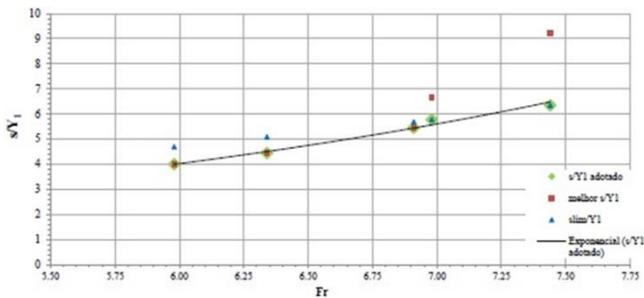


Figura 30. Altura ideal da soleira para que as flutuações sejam mínimas e que a soleira não funcione como descarregador (Conterato, 2014).

A Figura 31 resume todas as informações obtidas para determinar a melhor altura de soleira adimensionalizada na bacia de dissipação em função do número de Froude, Conterato (2014). Porém, o presente estudo veio mostrar um pequeno desenvolvimento naquilo que se considera como zona admissível para a altura da soleira, Figura 32.

As Figuras 31 e 32 apresentam duas linhas, uma superior que resultou da análise de flutuação a montante, onde se definiu a altura adimensionalizada limite para evitar o funcionamento da soleira como descarregador quando a altura crítica ocorria sobre a soleira e uma inferior decorrente da análise de flutuação máxima e do parâmetro  $\omega$  a jusante da soleira terminal. Como já foi referido na secção 4.2.4, nesta pesquisa foram encontrados valores máximos de flutuação menores para a soleira de 6 cm, o que contribuiu para que essa linha inferior aumentasse essa zona admissível para a altura da soleira. É recomendável que a altura adotada se situe na zona limitada pelas linhas inferior e superior, apresentadas na Figura 32.

Em relação à posição ideal da soleira terminal, a proposta de Conterato (2014) matém-se válida, uma vez que a posição que apresentou os menores valores do parâmetro  $\omega$ , na soleira em estudo, para as vários caudais utilizadas foi a posição 1/2H, Figura 33.

No gráfico da Figura 33, a reta superior com a posição adimensionalizada de 6,0 (Y<sub>2</sub>-Y<sub>1</sub>) corresponde ao limite mínimo do comprimento da bacia recomendado para solos facilmente erodíveis. Já a reta inferior de 4,0 (Y<sub>2</sub>-Y<sub>1</sub>) corresponde ao limite mínimo do comprimento da bacia recomendado para solos não facilmente erodíveis. Analisando a Figura 33 verifica-se que para números de Froude menores que 7,10 se poderiam utilizar bacias mais curtas, no entanto tal não é aconselhável.

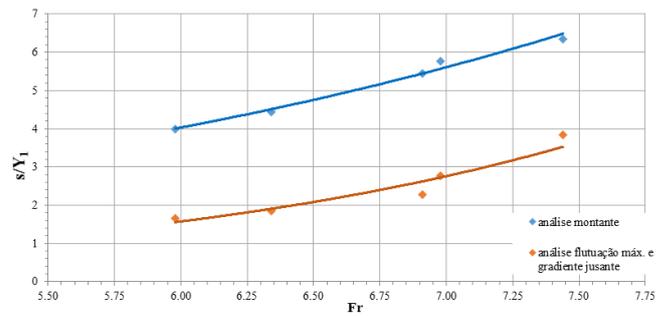


Figura 31. Altura ideal da soleira terminal em função do número de Froude (Conterato, 2014).

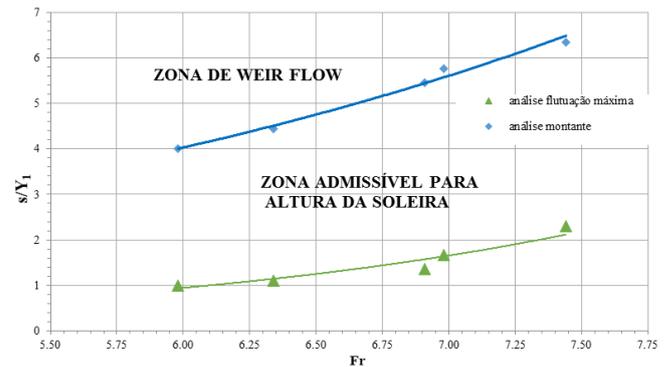


Figura 32. Altura ideal da soleira terminal em função do número de Froude.

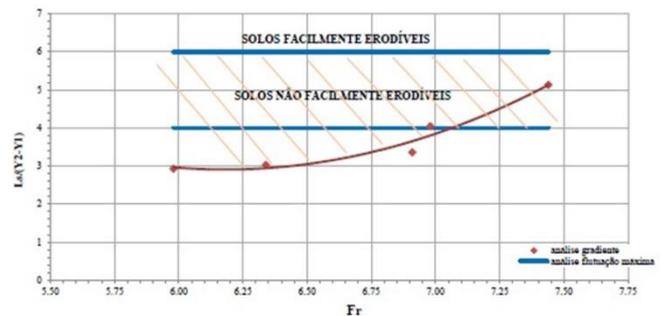


Figura 33. Posição ideal da soleira terminal em função do número de Froude (Conterato, 2014).

### 4.3. Comparação de diferentes inclinações de soleira

#### 4.3.1. Pressões médias

A Figura 34 representa a distribuição das pressões médias brutas ao longo da bacia de dissipação para um caudal de 80L/s, para a posição 1/1H.

Verifica-se que para a altura de 6 cm, a mudança de inclinação não altera de forma muito significativa a distribuição de pressões.

No entanto, no estudo realizado para as restantes condições concluiu-se que as diferenças são mais notórias para o maior caudal e quando a soleira se situa mais próxima do descarregador.

As pressões observadas a jusante da soleira para inclinação 1:1 são ligeiramente inferiores às obtidas para 1:3, o que se deve ao fato da soleira com inclinação 1:1 projetar o escoamento mais para jusante, comparativamente com a outra inclinação, criando uma zona de recirculação maior, diminuindo assim as pressões.

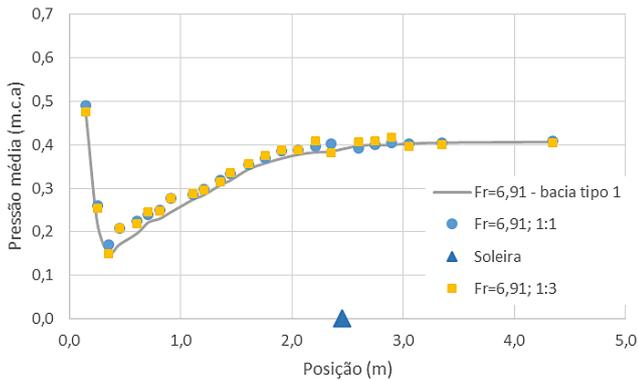


Figura 34. Comparação de pressões médias brutas para um caudal de 80L/s e posição 1/1H com diferentes inclinações.

#### 4.3.2. Flutuações de pressão

Como já foi referido anteriormente, a colocação de soleiras terminais numa bacia de dissipação tem influência nas flutuações de pressão, verificando-se uma diminuição das mesmas com o aumento da altura da soleira. Sendo a soleira considerada neste estudo a de menor altura, não era esperado que a mudança de inclinação alterasse de forma significativa os valores das flutuações, Figura 35.

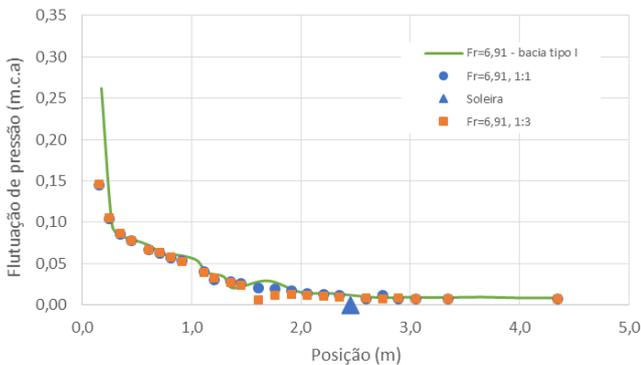


Figura 35. Distribuição longitudinal de flutuações de pressão para as soleiras de 6 cm de altura e inclinações de 1:1 e 1:3, na posição 1/1H, para um caudal de 80L/s ( $Fr=6,91$ ).

#### 4.3.3. Análise do parâmetro $\varpi$

No que respeita à relação entre a flutuação máxima adimensionalizada após a soleira e a distância adimensionalizada desde a soleira até ao ponto onde essa flutuação ocorre (parâmetro  $\varpi$ ), concluiu-se que a diminuição da altura da soleira terminal não contribuiu para a melhoria do comportamento, relativamente à soleira utilizada no estudo (10 cm).

Na Figura 36 apresentam-se os valores de  $\varpi$  em função da altura adimensionalizada para diferentes posições, para um caudal de 60L/s, para a soleira de 6 cm e diferentes inclinações.

Analisando os resultados obtidos para as diferentes condições de escoamento concluiu-se que, para a posição 1/1H, a alteração da inclinação de 1:1 para 1:3 originou um menor valor da relação entre a flutuação máxima adimensionalizada após a soleira e a distância adimensionalizada desde a soleira até ao ponto em que essa flutuação ocorre.

Para as restantes posições os resultados obtidos foram diferentes. Para a posição 2/3H, a utilização da nova inclinação levou a melhores resultados para os menores caudais. Para o maior caudal a relação registada foi superior à obtida anteriormente para a inclinação de 1:1. Relativamente à posição 1/2H, a aplicação desta nova inclinação revelou-se benéfica apenas para o caudal de 40L/s.

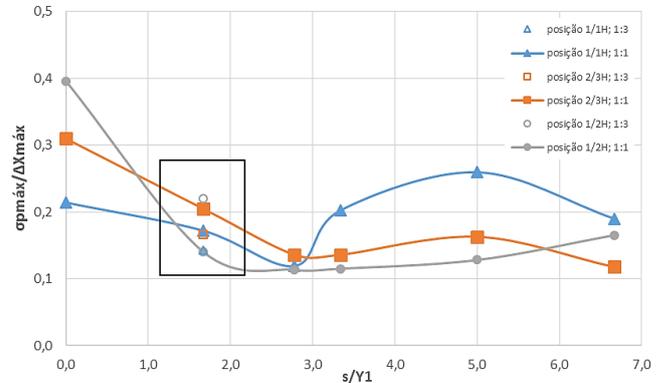


Figura 36. Resultados do parâmetro  $\varpi$  em função da altura adimensionalizada da soleira para diferentes posições, para o caudal de 60L/s ( $Fr=6,98$ ) e comparação de inclinações para a soleira de 6 cm.

Todas as restantes condições apresentaram valores dessas relações superiores. Embora a inclinação de 1:3 na soleira de 6 cm de altura tenha apresentado, para alguns caudais e posições, resultados mais favoráveis relativos aos valores dessas relações comparativamente com a soleira anteriormente testada, nenhuma destas novas relações conduziu a valores mínimos.

Esses valores foram obtidos para a soleira de 10 cm de altura e de inclinação 1:1. Tendo-se alcançado melhores valores dessas relações neste estudo com uma inclinação diferente, pressupõe-se que, eventualmente, uma alteração de inclinação na soleira de 10 cm poderá atingir valores mínimos ainda menores.

#### 4.3.4. Máximo valor de flutuação a jusante de uma soleira terminal

A Figura 37 representa a variação dos valores máximos de flutuação a jusante de uma soleira terminal para diferentes inclinações e posições para um caudal de 100 L/s (símbolos preenchidos correspondem aos resultados obtidos por Conterato (2014) e os não preenchidos ao presente estudo).

Analisados os resultados referentes às variações máximas de pressão, as conclusões são semelhantes às obtidas para o parâmetro  $\varpi$ :

- A utilização de uma inclinação menor é mais favorável para a posição mais distante do descarregador (1/1H);
- Quando a soleira terminal se aproxima do descarregador, a utilização de uma inclinação menor deixa de ser tão vantajosa;
- A soleira terminal é fundamental para reduzir as variações de flutuação de pressão.

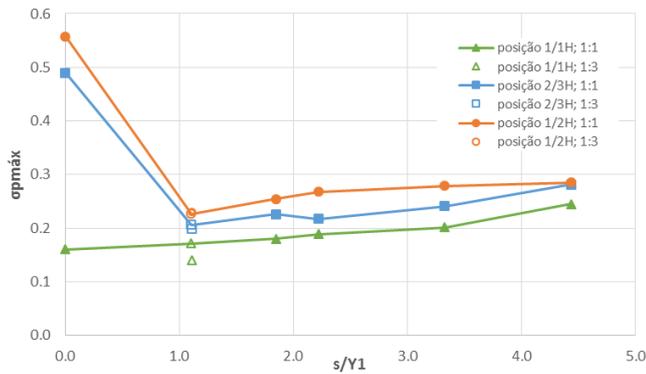


Figura 37. Resultados dos valores máximos de flutuação a jusante de uma soleira terminal para diferentes inclinações e posições para um caudal de 100L/s ( $Fr=6,34$ ).

## 5. Conclusões

As principais conclusões que se puderam retirar deste estudo foram:

- a) Relativamente à altura da soleira:
  - A altura da soleira utilizada deve ser escolhida em função do número de Froude na entrada da bacia de dissipação;
  - É sempre aconselhável a inclusão de uma soleira terminal nas bacias de dissipação;
  - No que respeita ao parâmetro  $\omega$ , a altura utilizada corroborou o estudo desenvolvido anteriormente por Conterato (2014), que indica como inclinação ideal 1:1 e altura do degrau em função do número de Froude.
  - No que respeita à máxima flutuação da pressão, a altura utilizada veio apresentar melhores resultados que as soleiras utilizadas por Conterato (2014).
- b) Relativamente à posição da soleira:
  - Não se obtiveram melhores resultados com a soleira deste estudo, o que vem a confirmar o estudo feito por Conterato (2014). Portanto recomenda-se a adopção dos comprimentos da bacia conforme apresentados na Figura 33.
- c) Relativamente à inclinação:
  - A utilização de uma inclinação menor traz melhores resultados para posições mais distantes do descarregador (1/1H), embora pouco significativos.
  - Nas posições mais próximas do descarregador (2/3H e 1/2H) a diminuição da inclinação para 1:3 só se revelou vantajosa para escoamentos com maiores números de Froude (menores caudais), sendo mais prudente utilizar a inclinação 1:1 para  $L < 6,0 (Y_2 - Y_1)$ .

## Referências

- Antunes, M. J. (2011). *Descarregadores de cheia em canal, em betão, não convencionais*, FEUP, Porto.
- Conterato, E. (2014). *Determinação de critérios de dimensionamento de soleira terminal em bacia de dissipação a jusante de vertedouro em degraus*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Dai Prá, M. (2004). *Características do Escoamento Sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Elevatorski, A. E. (1959). *Hydraulic Energy Dissipators*, McGraw-Hill: New York.
- Marques, M. G. (1995). *Nouvelle Approche Pour Le Dimensionnement des Dissipateurs à Auge*, Faculté des Sciences et de Génie Université Laval, Québec.
- Marques, M. G., Drapeau, J. e Verrette, J. L. (1997). *Flutuação de pressão em um ressalto hidráulico*, ". XVII Congresso Latino-Americano de Hidráulica, Guayaquil, Equador.
- Rajaratnam, N. (1990). "Skimming Flow in Stepped Spillways." *Journal of Hydraulic Engineering*, 10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:4(587), 587-591..
- Sanagiotto, D. (2003). *Características do Escoamento sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:0,75H*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Sorensen, R. M. (1985). *Stepped spillways hydraulic model investigation*, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, v. 111, n. 12, p. 1461-1472.
- Tozzi, M. J. (1959). *Caracterização/Comportamento de Escoamentos em Vertedouros com Paramento em Degraus*, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- U.S. Bureau of Reclamation (1987). *Design of Small Dams*, *Water Resources Technical Publication*.
- Vischer, D. L. e Hager, W. H. (1998). *Dam Hydraulics*, West Sussex, England. ISBN: 0-471-97289-4.