

ANÁLISE DA EROSÃO A JUSANTE DE UM DESCARREGADOR EM DEGRAUS EQUIPADO COM UM TRAMPOLIM EM SALTO DE ESQUI

Analysis of the Erosion Downstream of a Converging Stepped Spillway Equipped with a Ski Jump Bucket

LUISA MACHADO ⁽¹⁾, RUI ALEIXO ⁽²⁾ e ELSA CARVALHO ⁽³⁾

⁽¹⁾ Mestre em Engenharia Civil, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, ec11179@fe.up.pt

⁽²⁾ Doutor em Ciências de Engenharia, University of Bologna,
Via del Lazzaretto 15/5, 40131 Bologna, rui.aleixo@unibo.it

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

Resumo

A dissipação de energia por jatos pode ser vantajosa do ponto de vista económico se as condições geológicas o permitirem, evitando a construção de uma bacia de dissipação em betão. No entanto, em determinadas condições, o jato poderá originar a formação de uma cavidade de erosão a jusante da estrutura, cuja evolução deverá ser monitorizada para garantir a estabilidade do próprio descarregador ou das margens do rio. Nos últimos anos são vários os autores que têm estudado a erosão provocada por jatos a jusante de descarregadores convencionais, como os descarregadores de soleira normal. No entanto, o estudo da erosão provocada por jatos a jusante de descarregadores em degraus é ainda muito limitado. A dissipação adicional provocada pelos degraus diminui a energia no trampolim, afetando as características do jato e, conseqüentemente, da erosão.

Neste trabalho apresenta-se uma análise da erosão a jusante de um descarregador convergente em degraus equipado com um trampolim em salto de esquí. As medições foram realizadas num modelo físico do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), para diferentes condições definidas por diferentes caudais e espessuras do colchão de água a jusante. Com recurso à técnica de aquisição e processamento de imagem, são apresentadas e testadas três metodologias para determinação da altura do escoamento na secção de saída do trampolim em salto de esquí, parâmetro essencial para a correta definição do jato (alcance e ângulo de incidência) e para a caracterização da cavidade de erosão.

Palavras-chave: Descarregador em degraus, dissipação de energia por jatos, trampolim em salto de esquí, fundo móvel, cavidade de erosão.

Abstract

Kinetic energy dissipation by jets can be an economic solution if the geological conditions allow it, avoiding the need for a concrete dissipation basin. However, in some conditions, the jet can generate a scouring hole downstream of the structure, whose evolution must be monitored to ensure the spillway and the river margins stability. Over the last few years, different authors have studied the erosion generated by jets downstream of conventional spillways. However, the studies on the erosion generated by jets downstream of a stepped spillway are still quite limited. The increased energy dissipation provided by the steps affects the jet characteristics and, therefore, the scouring hole.

In this paper the scour at the downstream of a convergent stepped spillway equipped with a ski jump is analysed. The measurements were made in a physical model in the Hydraulics Laboratory of the Faculty of Engineering of the University of Porto (FEUP), for different conditions defined by different flow rates and different water levels in the downstream basin. By means of imaging techniques, three methods to determine the flow height in the outlet of the ski jump are presented and discussed. This is critical to determine the jet parameters (range and incidence angle) and their effect in the scouring hole. The obtained results were compared with existing data.

Keywords: Stepped spillway, Energy dissipation by jets, ski jump bucket, loose bed, scour hole.

1. Introdução

Os descarregadores em degraus podem, em determinadas condições de escoamento, dissipar mais energia do que os tradicionais descarregadores de soleira normal. No entanto, nos casos em que esta dissipação de energia não seja suficiente, poderão ser instalados dispositivos adicionais de dissipação de energia, como bacias de dissipação por ressalto hidráulico, trampolim submerso, ou dissipação por jatos.

A dissipação de energia por meio de jatos ocorre ao longo do percurso aéreo do jato e, de uma forma mais significativa, no impacto do jato com o leito ou com o colchão de água existente a jusante do descarregador.

Este impacto pode, em função das características do jato e condições geológicas do leito do rio, originar a formação de uma cavidade de erosão a jusante do descarregador.

A caracterização da cavidade de erosão assume especial importância, uma vez que sua evolução pode levar à instabilidade das margens ou pôr em risco a estrutura do próprio descarregador.

O presente estudo pretende contribuir para a caracterização experimental da erosão do leito, resultante da ação de um jato proveniente de um descarregador em degraus equipado com um trampolim em salto de esqui. Para tal realizaram-se medições no modelo reduzido do descarregador em degraus existente no Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Os ensaios foram realizados em fundo móvel, para várias condições de escoamento, definidas por diferentes valores do caudal e alturas do colchão de água. As medições realizadas permitiram caracterizar o jato recorrendo à técnica de aquisição de imagens, validando a sua utilização.

A correta descrição do jato é essencial para posterior caracterização da cavidade de erosão, nomeadamente a profundidade máxima da escavação.

2. Dissipação de Energia por Jatos

Como mencionado anteriormente, o desenvolvimento da erosão pode comprometer a estabilidade estrutural do descarregador e das margens do rio. É, por isso, essencial conhecer as características do escoamento e as condições locais para que se possa proceder a uma análise da dissipação de energia por meio de jatos. Essa análise consiste na definição da trajetória e alcance do jato (zona de incidência do jato) e na medição das dimensões da escavação.

Nas Figuras 1 e 2 apresentam-se dois esquemas, em corte e em planta respetivamente, com as principais variáveis envolvidas no estudo da erosão provocada por jatos: o caudal por unidade de largura (q), a queda (H), o ângulo de saída do trampolim em salto de esqui (α), o ângulo de incidência do jato (α'), a altura do escoamento na secção de saída do trampolim (h_0), a altura do colchão de água a jusante (h), a profundidade máxima de erosão (f) e a distância a que ocorre em relação ao descarregador (L^*), a largura (B_s) e o comprimento (L_s) da escavação, a altura da barra (h_m) e largura da bacia de restituição (B).

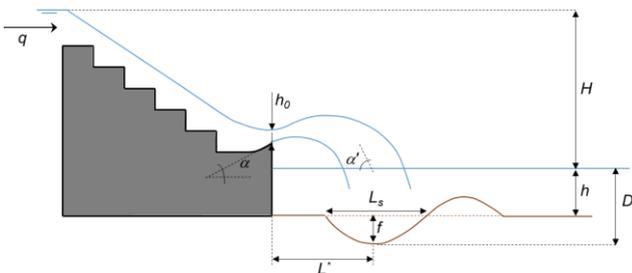


Figura 1. Esquema do perfil longitudinal do leito a jusante de um descarregador em degraus equipado com um trampolim em salto de esqui (Machado *et al.*, 2017).

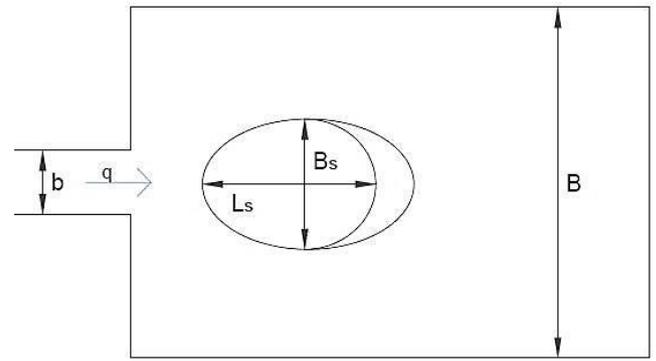


Figura 2. Esquema e dimensões em planta da escavação de erosão a jusante de um descarregador em degraus equipado com um trampolim em salto de esqui (Machado, 2016).

3. Instalação Experimental

3.1. Modelo do descarregador

O modelo do descarregador utilizado neste estudo está inserido num circuito hidráulico (Figura 3), alimentado pelo reservatório (R2) com recurso a uma bomba.

O reservatório de alimentação superior (R1) é responsável pela alimentação do reservatório inferior (R2) e por manter constante o nível de água no mesmo. A montante do descarregador em degraus está instalado um reservatório de tranquilização (R3), que permite a estabilização do escoamento.

Após a passagem pelo descarregador, o caudal é restituído na bacia existente a jusante do mesmo e posteriormente conduzido para o reservatório de bombagem (R4), onde se realiza a elevação do caudal para R1, através de uma bomba submersível.

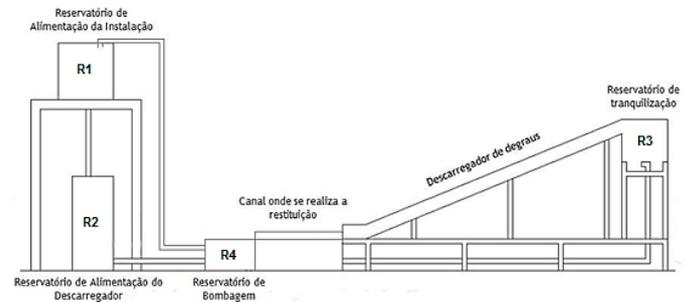


Figura 3. Esquema da instalação experimental utilizada (Machado, 2016).

O modelo reduzido do descarregador foi construído em betão, à escala geométrica 1:40, e mede, na sua totalidade, 1 m de altura e 2,6 m de comprimento. É constituído por 26 degraus com 3,75 cm de altura e 10 cm de comprimento. A largura é variável entre 15 cm, na secção inicial, e 5 cm, na secção intermédia central, a partir da qual se mantém constante até à secção final do descarregador. No presente estudo foi utilizado um modelo de trampolim em salto de esqui com um ângulo de saída de 20°.

A bacia de restituição, realizada com placas de perspex, tem 0,705 m de largura, 1,5 m de comprimento e 0,70 m de altura. O nível do colchão de água na zona de restituição é regulado por descarregador de parede delgada, instalado na secção de jusante da bacia.

No interior da bacia foi colocada uma placa de perspex, de nível ajustável, que serve de base ao fundo móvel. Este, com 0,20 m de espessura, é constituído por material granular não coerente com uma massa específica de 2650 kg/m³. Os diâmetros característicos do leito são $d_{50}=0,992$ mm, $d_{85}=1,75$ mm e $d_{90}=1,855$ mm.

3.2. Condições de teste

As condições de teste foram definidas após a realização de alguns ensaios preliminares. Para as características da bacia de restituição apresentadas, verificou-se que o caudal máximo escoado, sem que houvesse realimentação da cavidade de erosão com os sedimentos já erodidos, seria $Q = 0,85$ L/s. A realimentação ocorre por causa existência de correntes de recirculação, induzidas pelo escoamento junto às paredes da bacia de restituição. Estas correntes são responsáveis por transportar o material já erodido novamente para montante. Deste modo, o desenvolvimento da erosão fica comprometido, não correspondendo à correta evolução das dimensões da escavação.

Na Figuras 4 e 5, cujos limites, superior e inferior, coincidem com as paredes laterais bacia de restituição, é possível observar as configurações da cavidade de erosão e respetiva barra, respetivamente sem e com realimentação.



Figura 4. Cavidade de erosão sem realimentação, obtida para $\alpha=20^\circ$, $Q=0,71$ L/s e $h=3$ cm (Machado, 2016).

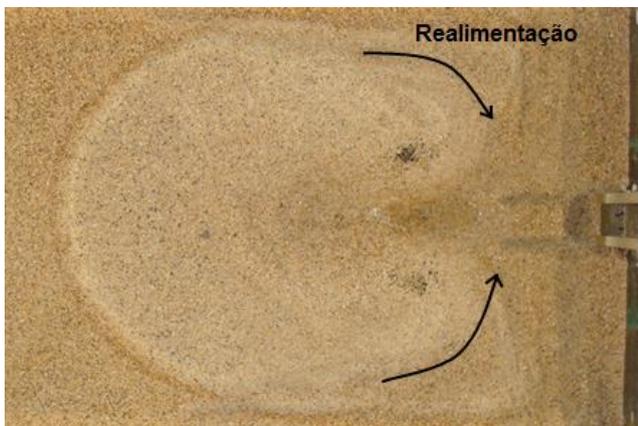


Figura 5. Cavidade de erosão com realimentação obtida para $\alpha=20^\circ$, $Q=0,99$ L/s e $h=3$ cm (Machado, 2016).

Os ensaios preliminares permitiram, ainda, definir a duração de cada ensaio, tendo sido fixada em duas horas, por forma a garantir, em todas as condições de ensaio, a estabilização da escavação e da barra formada a jusante.

No Quadro 1 apresentam-se as diferentes condições de ensaio consideradas no presente estudo, para um ângulo de saída do trampolim, $\alpha=20^\circ$, caracterizadas por diferentes valores do caudal, Q , e da altura do colchão de água a jusante, h .

Quadro 1. Condições de ensaio consideradas no presente estudo, para um ângulo de saída do trampolim $\alpha=20^\circ$.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---------|------|---|------|---|---|------|---|---|---|
| Q (L/s) | 0.51 | | 0.71 | | | 0.85 | | | |
| h (cm) | 1 | 3 | 5 | 1 | 3 | 5 | 1 | 3 | 5 |

4. Técnicas de Medição

4.1. Configuração da escavação

Os perfis longitudinais do leito foram medidos através de uma régua em perspex, na qual foram introduzidas 66 varetas, espaçadas de 2 cm. As varetas tinham a possibilidade de serem ajustadas consoante a configuração do leito, permitindo deste modo definir facilmente o perfil longitudinal. No final de cada ensaio, a régua era apoiada no topo do trampolim e numa barra fixada nas paredes da bacia, na zona de jusante, a uma distância fixa do nível de referência do leito, isto é, até ao nível do leito antes do ensaio ser realizado (T). Medindo a distância da face inferior da régua até ao fundo da cavidade de erosão (F), foi possível determinar a profundidade da escavação de erosão, $z = F - T$, conforme esquematizado na Figura 6.

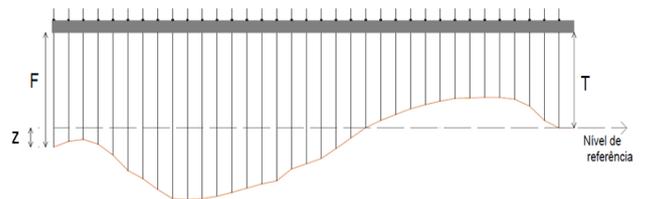


Figura 6. Esquema com as variáveis necessárias para o cálculo das profundidades da cavidade de erosão (Machado, 2016).

4.2. Caracterização do jato

A medição da trajetória dos jatos e da altura de água na secção de saída do trampolim em salto de esqui foi realizada através da técnica de aquisição de imagens, apresentada por Aleixo e Proença (2007), que consiste na captura de imagens por meio de uma máquina fotográfica digital (Canos EOS 500D, com 16 Mpixéis de resolução e uma lente 18-55 mm) e posterior processamento com recurso a ferramentas como o GIMP (programa freeware para processamento de imagens) e o Matlab.

No decorrer dos ensaios foi possível observar que o jato apresentava uma configuração bastante oscilante ao longo do tempo, como se pode confirmar pela observação das fotografias da Figura 7. Por este motivo, a utilização de apenas uma imagem revelou-se insuficiente para a correta determinação da altura do escoamento na secção de saída do trampolim em salto de esqui e da trajetória do jato. Assim sendo, desenvolveu-se um código em Matlab com o intuito de somar as diversas imagens do jato obtidas ao longo de cada ensaio, sendo o resultado uma imagem composta que representa o jato médio (Figura 8).

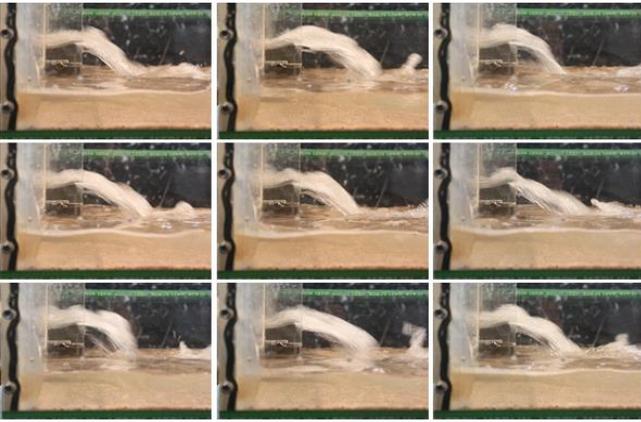


Figura 7. Imagens do jato obtidas durante o ensaio definido por $Q = 0.71 \text{ L/s}$ e $h = 3 \text{ cm}$ (Machado, 2016).

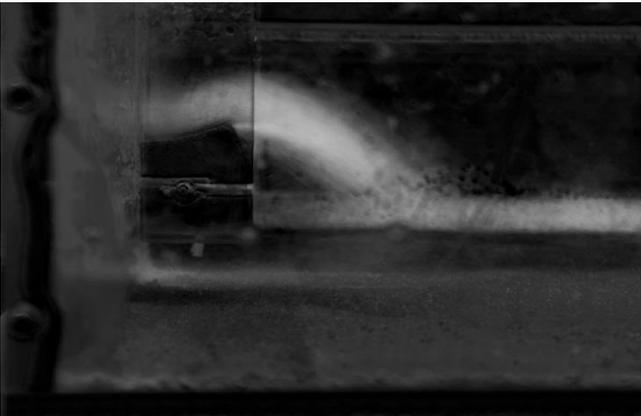


Figura 8. Imagem média do jato obtida após o processamento para $Q=0.71 \text{ L/s}$ e $h=3 \text{ cm}$ (Machado, 2016).

Tendo como base a imagem do jato médio obtida após o processamento (Figura 8), à qual está associado um eixo de coordenadas, é necessário selecionar, inicialmente, o ponto de origem do jato e, de seguida, selecionar n pontos que definam as envolventes superior e inferior do jato.

Através do código escrito em Matlab, efetua-se uma interpolação das coordenadas das trajetórias, correspondentes às duas envolventes, obtendo assim a trajetória média do jato, conforme representado na Figura 9.

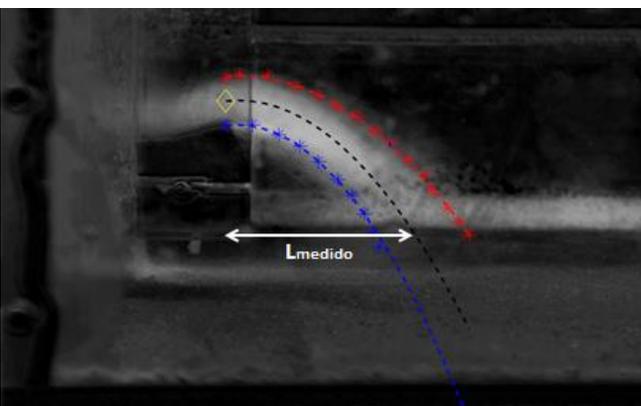


Figura 9. Trajetórias (superior, média e inferior) e alcance do jato para $Q=0.71 \text{ L/s}$ e $h=3 \text{ cm}$ (Machado, 2016).

Os valores das coordenadas obtidas pelo programa para as três trajetórias, duas envolventes e a média, são exportadas num ficheiro de dados que pode posteriormente ser analisado numa ferramenta de cálculo como o Excel.

A medição do alcance do jato foi realizada com recurso ao programa GIMP. O critério utilizado na medição deste parâmetro consiste na medição direta na imagem da distância, segundo a direção horizontal, entre a secção de saída do trampolim e a secção média do jato na zona de incidência do jato com o colchão de água existente (Figura 9).

4.3. Altura do escoamento na secção de saída do trampolim em salto de esquí, h_0

A observação dos diferentes ensaios experimentais permitiu verificar que, para além da oscilação do jato, a ocorrência de emulsão de ar na secção de saída do trampolim dificultava a definição da altura do escoamento nessa secção. Dada a dificuldade em definir o limite superior da lâmina de água, procurou-se, através de um código escrito em Matlab, explorar três metodologias distintas que permitissem estabelecer esse limite.

1. Medição de h_0 através da média das envolventes da trajetória;
2. Medição de h_0 através da seleção de um ponto no perfil de intensidade luminosa;
3. Medição de h_0 através do cálculo do integral do perfil de intensidade luminosa.

A primeira metodologia (1) consiste na determinação de h_0 através da trajetória média do jato obtida com recurso ao código desenvolvido em Matlab (Figura 9). O valor da altura do escoamento corresponde assim ao valor da ordenada na secção de saída do trampolim em salto esquí, ou seja, com abscissa zero. Os outros dois métodos estudados baseiam-se no perfil de intensidade luminosa na secção de saída do trampolim em salto de esquí. A intensidade luminosa está relacionada com a presença do jato na medida em que, quanto maior a intensidade, maior a sobreposição de água nesse ponto. Deste modo, o critério de medição utilizado na segunda metodologia (2) consiste na seleção do ponto a partir do qual a intensidade luminosa começa a decrescer mais acentuadamente (Figura 10).

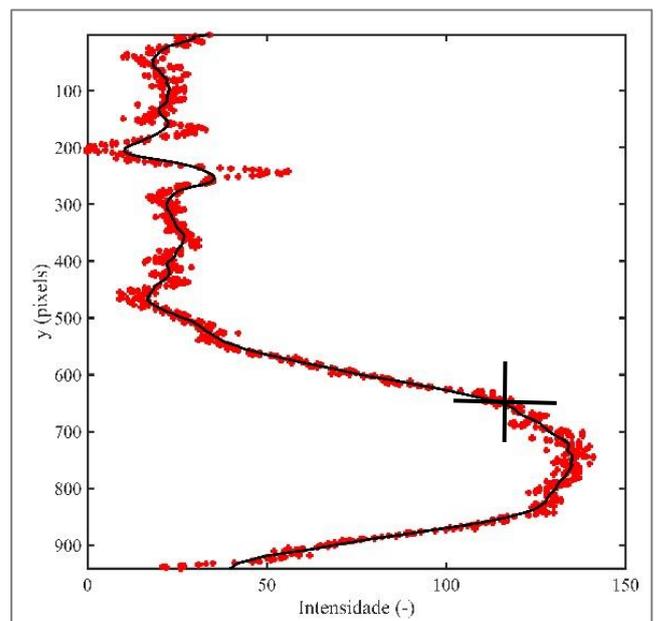


Figura 10. Determinação da altura do escoamento na secção de saída do trampolim pela metodologia (2) – Exemplificação da seleção do ponto no perfil de intensidade luminosa para $Q=0.71 \text{ L/s}$ e $h=3 \text{ cm}$.

Presume-se que é nesse ponto que se localiza o limite da lâmina de água, uma vez que é a partir daí que a sobreposição de água começa a diminuir. No entanto, esta é uma técnica ainda em desenvolvimento, não representando, por isso, um critério de seleção definitivo.

Na Figura 11 representa-se, no perfil longitudinal do jato, o ponto selecionado através da metodologia (2) para determinação da altura do escoamento na secção de saída do trampolim.

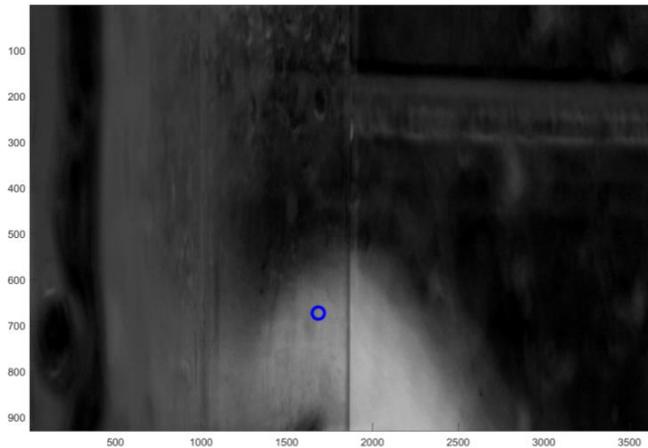


Figura 11. Localização do ponto selecionado através do procedimento apresentado na Figura 10 para metodologia (2) (Machado, 2016).

Por sua vez, a terceira metodologia (3) baseia-se no cálculo do integral, de forma a determinar o ponto em que a área se iguala à metade da área total do perfil de intensidade de, obtendo-se assim o ponto médio do jato. Para tal, torna-se necessário definir o limite de integração do referido perfil, que corresponde ao ponto de altura de água máximo na imagem, de acordo com o ilustrado na Figura 12.

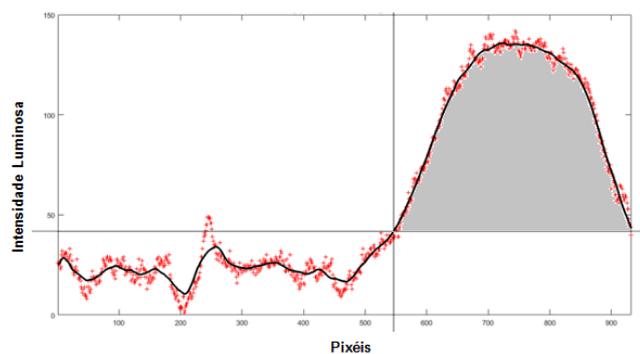


Figura 12. Determinação da altura do escoamento na secção de saída do trampolim pela metodologia (3) - Exemplificação da definição do limite de integração para Q=0.71 L/s e h=3 cm (Machado, 2016).

Com o intuito de selecionar a metodologia que melhor define a altura do escoamento na secção de saída do trampolim, mediu-se, em cada uma das metodologias, o valor de h_0 para várias condições de teste definidas por diferentes caudais, Q , e $h=3$ cm.

Com os valores de h_0 medidos, determinaram-se os respetivos alcances esperados através da expressão [1], cujos valores foram posteriormente comparados com valores experimentais obtidos para o alcance dos jatos.

$$L_t = H_0 \sin(2\alpha) + 2 \cos \alpha \sqrt{H_0(H_0 (\sin \alpha)^2 + H_1)} \quad [1]$$

em que α representa o ângulo de saída do trampolim em salto de esqui, H_1 o desnível entre a secção de saída do trampolim em salto esqui e o colchão de água e H_0 a queda na secção de saída do trampolim em salto de esqui, definida pela expressão:

$$H_0 = \frac{U_0^2}{2g} \quad [2]$$

e U_0 representa a velocidade do escoamento na secção de saída do trampolim em salto de esqui e g a aceleração da gravidade.

Os valores de h_0 , obtidos a partir das três metodologias (h_{01} , h_{02} e h_{03}) para três condições de ensaio, são apresentados no Quadro 2. Os correspondentes valores dos alcances esperados, calculados pela expressão [1], encontram-se no Quadro 3, assim como os valores medidos conforme explicado anteriormente.

Quadro 2. Valores de h_0 (em cm) obtidos pelas três metodologias, para diferentes caudais e $h=3$ cm.

| | Q=0.51 L/s | Q=0.71 L/s | Q=0.85 L/s |
|----------|------------|------------|------------|
| MÉTODO 1 | 1.321 | 1.384 | 1.264 |
| MÉTODO 2 | 1.632 | 1.861 | 2.061 |
| MÉTODO 3 | 1.556 | 1.492 | 1.545 |

Quadro 3. Valores de L_t (em cm) medidos e esperados obtidos pelas três metodologias, para diferentes caudais e $h=3$ cm.

| | Q=0.51 L/s | Q=0.71 L/s | Q=0.85 L/s |
|----------|------------|------------|------------|
| MEDIDO | 8.796 | 10.620 | 11.872 |
| MÉTODO 1 | 11.071 | 15.610 | 22.332 |
| MÉTODO 2 | 8.586 | 10.773 | 11.843 |
| MÉTODO 3 | 9.086 | 14.180 | 17.077 |

Na Figura 13 apresenta-se a análise comparativa entre os alcances medidos e os alcances esperados, obtidos pelas três metodologias, para as diferentes condições. Como se pode observar no gráfico da figura, os valores esperados obtidos a partir da metodologia (2) são praticamente coincidentes com os valores medidos.

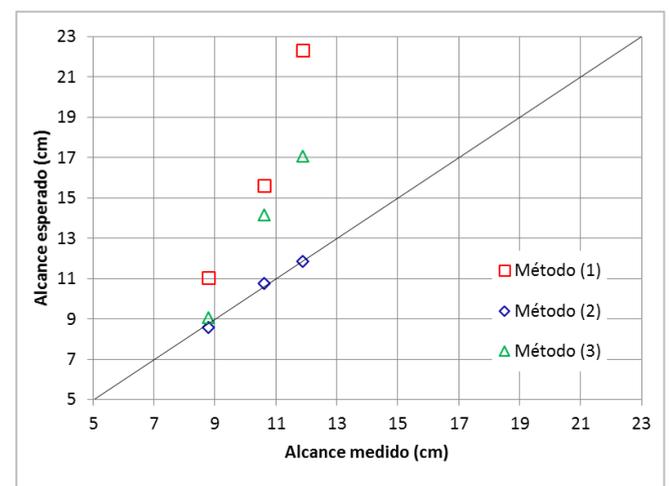


Figura 13. Relação entre o alcance esperado e o alcance medido para os diferentes métodos de determinação de h_0 (Machado, 2016).

Para as restantes metodologias as diferenças obtidas entre os valores medidos e esperados ultrapassam, de uma forma geral, os 25%, verificando-se um aumento da diferença com o valor do alcance.

Tendo por base os resultados apresentados, optou-se por utilizar a metodologia (2) para a determinação da altura do escoamento na secção de saída do trampolim nas restantes condições estudadas.

5. Resultados Experimentais

5.1. Trajetória do jato

A medição da trajetória real do jato foi realizada com recurso à Técnica de Aquisição de Imagem (TAI) e, posteriormente, a um código escrito em Matlab. Paralelamente, procedeu-se ao cálculo das coordenadas da trajetória do jato, x e y , através da expressão [3].

$$y = x \tan \alpha - \frac{g(\sec \alpha)^2}{2U_0^2} x^2 \quad [3]$$

Na Figura 14 encontra-se uma representação gráfica da trajetória real, determinada pela metodologia (2), e da trajetória do jato obtida pela expressão [3], para a condição 5, definida por $Q=0.71$ L/s e $h=3$ cm.

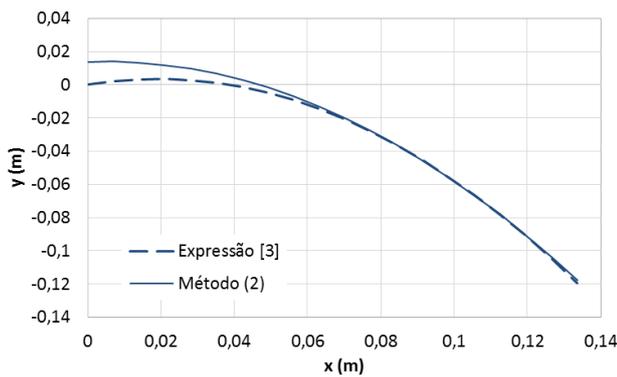


Figura 14. Representação gráfica das trajetórias dos jatos para a condição de teste definida por $Q=0.71$ L/s e $h=3$ cm (Machado, 2016).

Como se pode observar no que se refere ao alcance do jato, a trajetória medida aproxima-se da trajetória esperada. No entanto, é importante realçar que a expressão [3] se baseia apenas em aspetos cinemáticos, não considerando, por isso, a espessura e dispersão do jato. A diferença verificada na zona inicial está relacionada com o facto de o jato ser espesso e o ponto inicial não ser o mesmo (na trajetória medida o ponto inicial coincide com o ponto médio da lâmina de água). Assim sendo, assumiu-se que a trajetória medida através do código desenvolvido em Matlab é suficientemente precisa para caracterizar o jato, pois além de se aproximar da trajetória teórica tem a vantagem de considerar os fenómenos ocorrentes durante o ensaio, tais como a dispersão do jato e o emulsionamento de ar na secção de saída do trampolim em salto de esqui.

5.2. Alcance do jato

A análise do alcance do jato é semelhante à apresentada anteriormente para a trajetória do jato, comparando-se o valor obtido experimentalmente pela TAI e o valor obtido pela aplicação da expressão [1].

Na Figura 15 encontra-se uma representação gráfica da comparação realizada para as nove condições de teste consideradas (Quadro 1). Da análise da figura, é possível verificar que as diferenças registadas não são muito significativas, refletindo-se numa discrepância máxima de 10% entre os valores do alcance medido com recurso à TAI e os obtidos pela aplicação da expressão, o que valida a fiabilidade dos métodos aplicados.

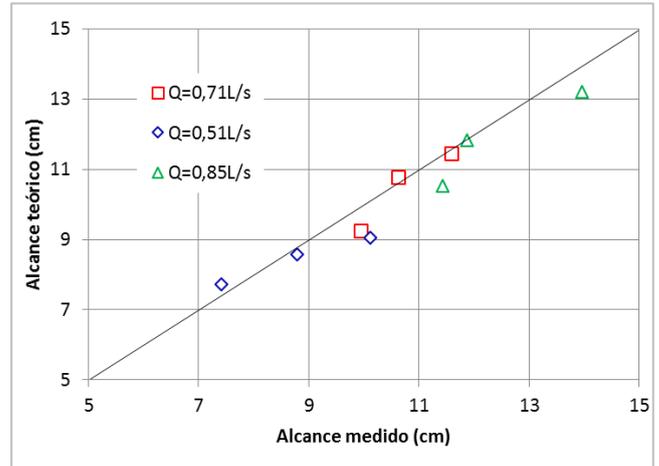


Figura 15. Representação gráfica da comparação dos alcances esperados com os medidos através da TAI - metodologia (2) (Machado, 2016).

5.3. Ângulo de incidência do jato

O ângulo de incidência do jato pode ser determinado pela expressão [4], em função do ângulo de saída do trampolim e das alturas H_1 e H_0 .

$$\tan \alpha' = \sec \alpha \sqrt{\sin^2 \alpha + \frac{H_1}{H_0}} \quad [4]$$

Os valores teóricos obtidos pela expressão [4] foram comparados com os valores medidos no jato médio definido pela TAI, tal como ilustrado no gráfico da Figura 16. Os resultados obtidos permitiram constatar que as diferenças registadas não são muito significativas, refletindo-se numa discrepância máxima de 5%, validando, uma vez mais, a fiabilidade do método selecionado para medição da altura do escoamento na secção de saída do trampolim.

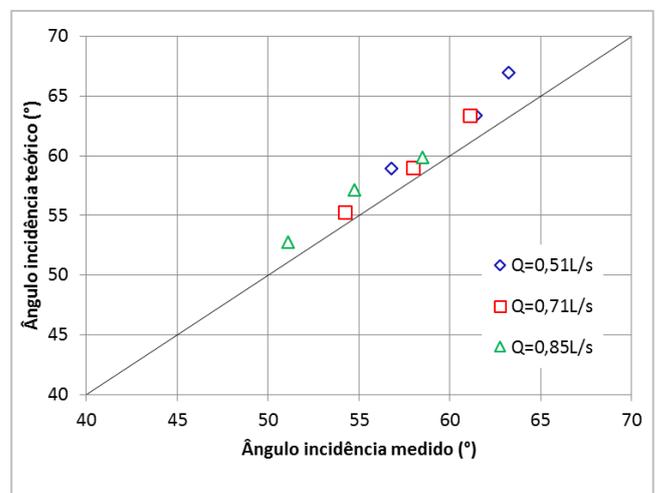


Figura 16. Representação gráfica da comparação dos ângulos de incidência teóricos com os medidos através da TAI - metodologia (2) (Machado, 2016).

5.4. Perfil longitudinal do leito

Na Figura 17 estão representados os perfis longitudinais do leito medidos para as nove condições de ensaio consideradas no presente trabalho.

Como era esperado, a profundidade máxima de escavação aumenta com o caudal e diminui com o aumento da altura do colchão de água a jusante, dado o efeito amortecedor que este possui.

Note-se que a atenuação das flutuações turbulentas no leito devido à ação do jato, é tanto maior, quanto maior for a espessura do colchão de água. Conseqüentemente, a altura da barra formada a jusante da escavação diminui com o decréscimo da espessura do colchão de água, sendo os sedimentos transportados para jusante, originando assim uma barra mais extensa.

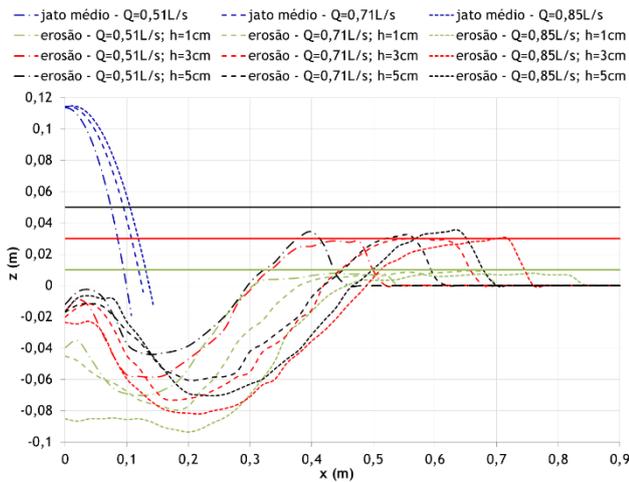


Figura 17. Representação gráfica dos perfis longitudinais do leito e jato médio para as nove condições de ensaio.

Os perfis longitudinais do leito obtidos para as nove condições de ensaio foram adimensionalizados com a profundidade máxima de erosão (f).

Verifica-se que os perfis longitudinais do leito adimensionais colapsam para o mesmo nível do colchão de água a jusante, conforme ilustrado na Figura 18.

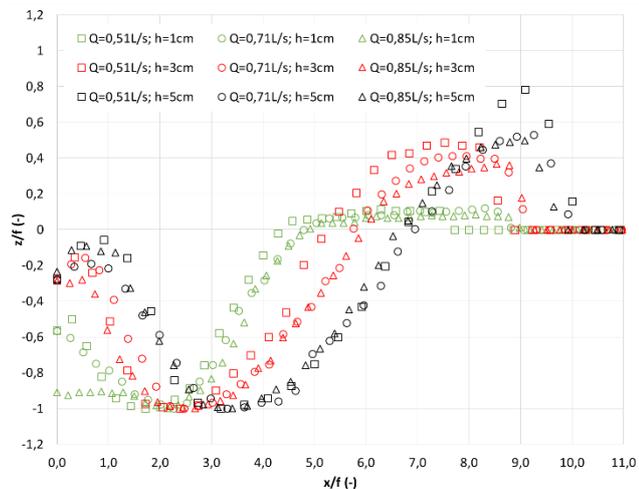


Figura 18. Representação gráfica dos perfis longitudinais do leito adimensionalizados para as nove condições de ensaio.

6. Conclusões

Este trabalho permitiu desenvolver e utilizar um conjunto de ferramentas e de métodos para analisar a erosão causada por um jato, recorrendo às técnicas de análise e processamento de imagem.

Foram analisadas três metodologias para a determinação da altura do escoamento na secção de saída do trampolim, com base na análise e processamento de imagens do jato.

A comparação dos resultados obtidos com os resultados das fórmulas existentes na literatura permitiu validar a aplicação de uma das metodologias propostas (Método 2), para a qual se obtiveram diferenças máximas de 10% no alcance e de 5% no ângulo de incidência do jato.

Esta metodologia requer ainda algum desenvolvimento, tendo em vista a definição de critérios mais quantitativos para a sua aplicação.

O estudo da influência da espessura do colchão de água e do caudal nas principais características da erosão permitiu confirmar, tal como esperado, que esta aumenta com o caudal e diminui com a espessura do colchão de água a jusante.

Finalmente, verificou-se que utilizando a profundidade máxima como parâmetro de adimensionalização, os perfis longitudinais de erosão colapsavam para um mesmo nível do colchão de água.

Referências

Aleixo, R., Proença, M.F. (2007). *Medição da trajetória de um jato livre usando aquisição de imagens*. 2^{as} Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP, Outubro.

Machado, L (2016). *Análise da erosão a jusante de um descarregador em degraus equipado com um trampolim em salto de esqui*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Machado, L., Lemos Lima, M. M., Aleixo, R. e Carvalho, E. (2017). *Estudo experimental da erosão a jusante de um descarregador em degraus equipado com um trampolim em salto de esqui*. Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa. FEUP. Porto.