

# **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE SAÍDA DO TRAMPOLIM EM SALTO DE ESQUI NA EROSÃO A JUSANTE DE UM DESCARREGADOR EM DEGRAUS CONVERGENTE**

**SUZANA MENDES DA ROSA**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA**

---

Orientador: Professora Doutora Elsa Maria da Silva Carvalho

MARÇO DE 2019

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2018/2019**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2018/2019 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2019.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais

Nada é tão  
nosso como os  
nossos sonhos.  
*(Friedrich Nietzsche)*

*Estudo da influência do ângulo de saída do trampolim em salto de esqui na erosão a jusante de um descarregador em degraus convergente*

---

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente à Professora Doutora Elsa Maria da Silva Carvalho pela orientação prestada, pelo seu incentivo, disponibilidade e apoio que sempre demonstrou. Aqui lhe exprimo a minha gratidão.

Ao Doutor Rui Aleixo pela sua disponibilidade nos trabalhos de laboratoriais, pelo seu incentivo e igualmente pelo seu apoio na elaboração deste trabalho.

Ao Sr. Miguel Guerra pela sua preciosa ajuda no laboratório, pela sua disponibilidade paciência e principalmente pela amizade demonstrada.

À D. Esmeralda Miguel, do Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos, pelo carinho e preocupação de sempre ao longo deste último ano.

Ao Professor Francisco Piqueiro pela disponibilização da máquina fotográfica para a realização dos trabalhos experimentais.

Não poderia deixar de agradecer aos meus pais por todo o apoio económico, pela força e pelo carinho, incondicionalmente, que sempre me prestaram ao longo de toda a minha vida académica, bem como, à elaboração da presente tese a qual sem o seu apoio teria sido impossível. Obrigada por tudo essa vitória também é vossa.

As minhas queridas irmãs, pela coragem, pela força, pela amizade e principalmente por acreditarem em mim.

Um especial obrigado, aos meus companheiros de “batalha”, Valter Adrião e Manuela Silva, mais que colegas da faculdade, meu irmão e minha irmã para a vida, obrigada por tudo.

Ao Agostinho Lopes, abrigada por acreditares em mim mesmo quando já não acreditava que fosse possível.

A todos os amigos e colegas que de uma forma direta ou indireta, contribuíram, auxiliaram ou encorajaram na elaboração do presente estudo, pela paciência, atenção e força, em especial à Lenise, Melany, Lucy, Adilson, Ailton, Lissy, e muitos outros.

Enfim, quero demonstrar o meu agradecimento, a todos aqueles que, de um modo ou de outro, tornaram possível a realização da presente dissertação.

A todos o meu sincero e profundo **Muito Obrigado!**

Este trabalho foi financiado por: Projeto PTDC/ECM-HID/6387/2014 – POCI-01-0145-FEDER-016825 financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia I.P





## **RESUMO**

A erosão localizada, provocada por jatos, a jusante de descarregadores tradicionais, como os descarregadores de soleira normal, tem sido muito estudada ao longo dos anos. Destes estudos resultaram várias fórmulas empíricas e semiempíricas para a determinação das características geométricas da erosão, em particular a profundidade máxima e as dimensões em planta. Pelo contrário, são poucos os estudos sobre a erosão a jusante de descarregadores em degraus equipados com trampolins em salto de esqui. Neste caso, dependendo do valor do caudal por unidade de largura, ocorre uma dissipação adicional de energia ao longo do descarregador, provocada pelos degraus, diminuindo a energia no trampolim, afetando as características do jato e da erosão.

A presente dissertação pretende estudar a erosão a jusante de um descarregador em degraus convergente equipado com um trampolim em salto de esqui e surge na sequência do trabalho de Machado (2016). Pretende-se realizar um trabalho experimental complementar, de modo a alargar a base de dados já existente, e a investigar o efeito do ângulo de saída do trampolim nas características geométricas da cavidade de erosão que se desenvolve a jusante.

O trabalho experimental foi realizado no Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Tendo como base a técnica de aquisição de imagens, foram validados os métodos de medição utilizados por Machado (2016) para a caracterização do jato, nomeadamente para a determinação da altura do escoamento na secção de saída do trampolim em salto de esqui e da respetiva trajetória. Uma nova metodologia foi utilizada para determinação da configuração 3D da erosão originada no fundo móvel.

Com a realização dos ensaios para diversas condições de teste, foi possível analisar a influência do ângulo de saída do trampolim na configuração da erosão originada no fundo móvel. Os resultados obtidos foram comparados com os apresentados por outros autores e com as estimativas das diferentes fórmulas existentes na literatura.

**PALAVRAS-CHAVE:** Descarregador em degraus, dissipação de energia, bacia de dissipação por jatos, trampolim em salto de esqui, fundo móvel, erosão localizada.



## **ABSTRACT**

The scour caused by ski jump bucket jets has been much studied when installed on ogee type spillways. From these studies several empirical and semi empirical expressions have been proposed to evaluate the geometrical characteristics of the scour hole, in particular the maximum scour depth and the plan dimensions. However, the number of studies regarding the scour characterization downstream of stepped spillways equipped with ski jump buckets is limited.

Depending on the flow rate per width unit, the stepped spillways can provide additional energy dissipation, when compared with the ogee type spillways. Therefore, the terminal dissipation structure, e.g. ski jump bucket, has less energy to dissipate. This can affect the resulting jet and, consequently, the scour characteristics.

Following the study of Machado (2016), the present study is devoted to the analysis of the erosion downstream of a convergent stepped spillway equipped with a ski jump bucket. It is intended to extend the existing database and to investigate the effect of the ski jump bucket angle on the geometric characteristics of the scour.

The experimental work was carried out at the Hydraulics Laboratory of the Faculty of Engineering of the University of Porto. The measurement methods based on the image acquisition technique presented by Machado (2016) were also applied on this study. A new methodology was used to determine the scour 3D configuration.

With the different experimental tested conditions, it was also possible to analyse the influence of the takeoff angle of ski jump bucket. The results were compared to those presented by other authors and with the estimates obtained from the different existing formulae for similar cases.

**KEYWORDS:** Stepped spillway, energy dissipation, energy dissipation by jets, ski jump bucket, loose bed, scour hole



## **ÍNDICE GERAL**

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA E OBJETIVOS .....	1
1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	2
<b>2 DISSIPAÇÃO POR JATOS</b> .....	<b>3</b>
2.1. ESTADO DA ARTE .....	3
2.2. CONCEITOS GERAIS.....	6
2.3. ALCANCE E ÂNGULO DE INCIDÊNCIA TEÓRICOS .....	9
2.4. ALCANCE EFETIVO DOS JATOS .....	11
2.5. PREVISÃO DA EROSIÃO DO LEITO .....	13
2.5.1. GRUPO I.....	13
2.5.2. GRUPO II.....	14
2.5.3. GRUPO III.....	15
2.5.4. GRUPO IV .....	16
<b>3 INSTALAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>21</b>
3.1. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL .....	21
3.2. CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL UTILIZADO PARA O FUNDO MÓVEL .....	24
3.3. METODOLOGIA ADOTADA NA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS .....	24
3.4. EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO .....	25
3.4.1. MEDIÇÃO DE CAUDAIS .....	25
3.4.2. REGISTO DE TRAJETÓRIAS REAIS DE JATOS E MEDIÇÃO DE ALTURAS DE ÁGUA POR TÉCNICA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS.....	26
3.4.2.1. Registo de trajetórias reais de jatos .....	28
3.4.2.2. Medição do alcance do jato.....	29
3.4.2.3. Medição de alturas de água. ....	30
3.4.3. ANÁLISE DA CAVIDADE DE EROSIÃO E FOTOGRAMETRIA NA DEFINIÇÃO DO MODELO 3D DA FOSSA	31
3.4.3.1. 3DF Zephyr.....	32
3.4.3.2. MeshLab.....	34
3.4.3.3. Rotinas MATLAB .....	35
3.4.4. VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO.....	37

<b>3.5. CALIBRAÇÃO DE EQUIPAMENTOS .....</b>	<b>41</b>
3.5.1. CALIBRAÇÃO DO CAUDALÍMETRO .....	41
3.5.2. IMAGEM DE CALIBRAÇÃO DA TÉCNICA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS.....	45
3.5.3. CALIBRAÇÃO DO MODELO 3D RESULTANTE DO SFM .....	45
<b>4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE DE DADOS .....</b>	<b>47</b>
<b>4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....</b>	<b>47</b>
<b>4.2. CONDIÇÕES DE TESTE .....</b>	<b>47</b>
<b>4.3. ENSAIOS PRELIMINARES.....</b>	<b>49</b>
<b>4.4. CARACTERÍSTICAS DAS TRAJETÓRIAS DOS JATOS.....</b>	<b>50</b>
4.4.1. REGISTO DAS COORDENADAS DAS TRAJETÓRIAS DOS JATOS.....	50
4.4.2. DETERMINAÇÃO DO ALCANCE DO JATO .....	52
<b>4.5. PERFIL LONGITUDINAL DA ESCAVAÇÃO.....</b>	<b>55</b>
4.5.1. COMPARAÇÃO DOS PERFIS OBTIDOS COM A RÉGUA E COM O MODELO 3D .....	55
4.5.2. INFLUÊNCIA DO CAUDAL E DA ALTURA DO COLCHÃO DE ÁGUA A JUSANTE.....	56
4.5.3. INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE SAÍDA DO TRAMPOLIM .....	57
<b>4.6. CARACTERÍSTICAS DA FOSSA DE EROSÃO .....</b>	<b>59</b>
4.6.1. PROFUNDIDADE MÁXIMA DA ESCAVAÇÃO.....	59
<b>4.7. DIMENSÕES EM PLANTA.....</b>	<b>63</b>
<b>4.8. MEDIÇÃO DO VOLUME E CONFIGURAÇÃO 3D DA ESCAVAÇÃO .....</b>	<b>69</b>
<b>4.9. EFEITOS DE ESCALA .....</b>	<b>74</b>
<b>5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>75</b>
<b>5.1. CONCLUSÕES .....</b>	<b>75</b>
<b>5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>76</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>77</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>83</b>
<b>ANEXO A: MODELOS DE TRAMPOLIM EM SALTO ESQUI .....</b>	<b>85</b>
<b>ANEXO B: TRAJETÓRIA DO JATO .....</b>	<b>87</b>
B.1: COORDENADAS.....	87
B.2: COMPARAÇÃO DA TRAJETÓRIA OBTIDA A PARTIR DO TAI E A TRAJETÓRIA TEÓRICA. ....	94
<b>ANEXO C: PERFIS DE EROSÃO .....</b>	<b>103</b>
C.1: LEVANTAMENTO DO PERFIL LONGITUDINAL COM A RÉGUA DE PENTES.....	103
C.2: COMPARAÇÃO DOS PERFIS OBTIDOS COM A RÉGUA E COM O MODELO 3D.....	117
C.3: INFLUÊNCIA DO CAUDAL .....	120
C.4: INFLUÊNCIA DO ÂNGULO .....	122

<b>ANEXO D: CONFIGURAÇÃO 3D DA ESCAVAÇÃO NO CÁLCULO DE VOLUME .....</b>	<b>127</b>
D.1: REGIÃO DE INTERESSE .....	127
D.2: ÁREAS NOS QUAIS CALCULARA, OS VOLUMES .....	135
D.3: PERFIL 3D .....	143



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema longitudinal de um trampolim em salto de esqui (Machado <i>et al.</i> , 2019). .....	4
Figura 2.2 – Vista em planta da secção de restituição (Machado <i>et al.</i> , 2019). .....	4
Figura 2.3 – Classificação dos diferentes tipos de descarregadores por jatos: a) Salto esqui-trampolim; b) Salto esqui-orifícios; c) Lâmina Livre; d) Jatos combinados; e) Jatos cruzados - choque de jatos no ar; f) Jatos cruzados - ressalto hidráulico combinado com lâmina livre (Adaptado de Melo, 2002). .....	7
Figura 2.4 – Ressalto hidráulico num trampolim de salto de esqui: esquema (adaptado de Sinniger e Hager, 1989). .....	8
Figura 2.5 – Escoamento desafogado (Adaptado de Sinniger e Hager, 1989). .....	8
Figura 2.6 – Barragem do Alqueva, sistema de dissipação por jatos cruzados (Machado, 2016). .....	9
Figura 2.7 – Ângulos de saída de um jato em queda livre (Machado, 2016). .....	9
Figura 2.8 – Determinação do alcance teórico do jato (Martins, 1973). .....	10
Figura 2.9 – Determinação do ângulo de incidência teórico, $\alpha'$ (adaptado de Martins, 1973). .....	10
Figura 2.10 – Determinação do alcance efetivo do jato - (A) Gun'ko <i>et al</i> (1965); (B) Taraimovich (1978) (Lencastre, 2001). .....	12
Figura 2.11 – Determinação do alcance efetivo do jato (Adaptado de Whittaker e Schleiss, 1984). ....	12
Figura 3.1 – Esquema da instalação experimental utilizada (Machado, 2016). .....	21
Figura 3.2 – (a) Reservatórios de alimentação superior R1 e inferior R2. (b) Reservatório de tranquilização (R3). (c) Reservatório de recolha e bombagem (R4). .....	22
Figura 3.3 – Esquemas dos trampolins em salto esqui com $\alpha = 10^\circ$ (a) e $\alpha = 15^\circ$ (b). As medidas estão apresentadas em centímetros. ....	23
Figura 3.4 – Bacia de restituição e reservatório de bombagem, R4. ....	23
Figura 3.5 – Curva granulométrica do material granular utilizado nos ensaios experimentais (Machado, 2016). .....	24
Figura 3.6 – Caudalímetro eletromagnético, modelo MAG-XE. ....	25
Figura 3.7 – Sequência de fotografias do jato obtidas num dos ensaios experimentais realizados ( $\alpha = 20^\circ$ , $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm). .....	27
Figura 3.8 – Exemplo de uma imagem média do jato, obtida a partir das imagens representas na Figura 3.7, através do código escrito em Matlab ( $\alpha = 20^\circ$ , $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm). .....	27
Figura 3.9 - Trajetórias superior, média e inferior exportada no Matlab ( $\alpha = 20^\circ$ , $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm). .....	28
Figura 3.10 – Trajetórias superior, média e inferior obtida no Excel com os valores exportados do programa ( $\alpha = 20^\circ$ , $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm). .....	29
Figura 3.11 – Critério utilizado para a medição do alcance do jato – distância, na horizontal, entre a secção de saída do trampolim e a secção média do jato na zona de incidência. ....	29
Figura 3.12 – Exemplo de seleção do ponto no perfil de intensidade, representada pela bolinha a negrito – segundo método ( $\alpha = 20^\circ$ , $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm). .....	30

Figura 3.13 – Definição do limite de integração representada pelo quadrado a negrito – terceiro método ( $\alpha = 20^\circ$ , $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm).....	31
Figura 3.14 – Exemplos de fotos usadas na aquisição do modelo 3D. ....	32
Figura 3.15 – Nuvem de pontos dispersados.....	33
Figura 3.16 – Nuvem de pontos densos.....	33
Figura 3.17 – Malha gerada. ....	34
Figura 3.18 – Malha texturizada. ....	34
Figura 3.19 – Resultado do MeshLab onde a malha da fossa de erosão está alinhada e origem onde está localizada, no ponto central do trampolim de saída. ....	35
Figura 3.20 – Perfil extraído com Meshlab (linha contínua) e a medição de perfil feita com a régua de pente (pontos vermelhos): $\alpha = 10^\circ$ , $Q = 0,85$ L/s e $h = 5$ cm. ....	35
Figura 3.21 - Escavação 3D e a sua projeção em planta. ....	36
Figura 3.22 – Exemplo da área de interesse selecionada para o cálculo dos volumes. ....	36
Figura 3.23 – Áreas de base para o cálculo dos volumes da escavação e da barra. ....	37
Figura 3.24 – Exemplo de imagem adquirida usando a Turnigy ActionCam.....	37
Figura 3.25 – Exemplo de imagem adquirida usando a Turnigy ActionCam e a distorção corrigida. ..	38
Figura 3.26 - Visualização do escoamento em 5 tempos diferentes: a) $t = 0$ s, b) $t = 60$ s, c) $t = 120$ s, d) $t = 180$ s, e) $t = 240$ s ( $\alpha = 20^\circ$ , $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm). ....	39
Figura 3.27 – Evolução da fossa de erosão em intervalos de cada 20 s ( $\alpha = 10^\circ$ , $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm).....	40
Figura 3.28 – Evolução da frente da barra em função do tempo (em segundos).....	41
Figura 3.29 – Celeridade da barra em função do tempo (em segundos). ....	41
Figura 3.30 – Comparação entre os caudais lidos diretamente no caudalímetro e os caudais medidos cm recurso ao reservatório calibrador. ....	44
Figura 3.31 – Curva de calibração do caudalímetro. ....	44
Figura 3.32 – Exemplo de uma imagem de calibração (1px=0.11905 mm). ....	45
Figura 3.33 - Levantamento do perfil longitudinal da escavação de erosão.....	46
Figura 3.34 - Esquema com as variáveis necessárias para o cálculo das profundidades da fossa de erosão (Machado, 2016).....	46
Figura 4.1 – Perfis longitudinais de erosão obtidos para $\alpha = 20^\circ$ , $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm.....	50
Figura 4.2 – Trajetória teórica em comparação com a trajetória medida.....	51
Figura 4.3 – Representação gráfica da comparação dos alcances medidos e esperados. ....	53
Figura 4.4 – Representação gráfica da comparação dos ângulos de incidência teóricos com os medidos. ....	54
Figura 4.5 – Comparação dos perfis longitudinais obtidos com o programa Meshlab e com a régua de pentes ( $\alpha = 15^\circ$ e $Q = 0,71$ L/s).....	55

Figura 4.6 – Representação gráfica dos perfis de erosão e do jato médio para a condição $Q = 0,71$ L/s.	56
Figura 4.7 – Representação gráfica dos perfis de erosão e do jato médio para a condição $h = 3$ cm.	57
Figura 4.8 – Variação dos perfis longitudinais de erosão com o ângulo de saída do trampolim, para $Q = 0,71$ L/s e $h = 1$ cm.	58
Figura 4.9 – Variação dos perfis longitudinais de erosão com o ângulo de saída do trampolim, para $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm.	58
Figura 4.10 – Variação dos perfis longitudinais de erosão com o ângulo de saída do trampolim, para $Q = 0,71$ L/s e $h = 5$ cm.	59
Figura 4.11 – Comparação do $B_s$ estimado com experimental ( $\blacklozenge \alpha = 25^\circ$ , $\blacksquare \alpha = 20^\circ$ , $\blacktriangle \alpha = 15^\circ$ e $\bullet \alpha = 10^\circ$ ).	65
Figura 4.12 – Comparação do $L_s$ estimado com experimental ( $\blacklozenge \alpha = 25^\circ$ , $\blacksquare \alpha = 20^\circ$ , $\blacktriangle \alpha = 15^\circ$ e $\bullet \alpha = 10^\circ$ ).	66
Figura 4.13 – Comparação do $L^*$ estimado com experimental ( $\blacklozenge \alpha = 25^\circ$ , $\blacksquare \alpha = 20^\circ$ , $\blacktriangle \alpha = 15^\circ$ e $\bullet \alpha = 10^\circ$ ).	66
Figura 4.14 – Variação de $B_s/h$ em função de $Q^*$ .	67
Figura 4.15 – Variação de $L_s/h$ em função de $Q^*$ .	68
Figura 4.16 – Variação de $L^*/h$ em função de $Q^*$ .	69
Figura 4.17 – Variação de $f/h$ em função de $Q^*$ .	69
Figura 4.18 – Região selecionada para o cálculo dos volumes da escavação e da barra para $Q = 0,71$ L/s, $h = 3$ cm e três ângulos de saída do trampolim: a) $\alpha = 10^\circ$ , b) $\alpha = 15^\circ$ e c) $\alpha = 20^\circ$ .	70
Figura 4.19 – Áreas de base para o cálculo dos volumes da escavação e da barra para $Q = 0,71$ L/s, $h = 3$ cm e três ângulos de saída do trampolim: a) $\alpha = 10^\circ$ , b) $\alpha = 15^\circ$ e c) $\alpha = 20^\circ$ .	71
Figura 4.20 – Perfis 3D obtidos para $Q = 0,71$ L/s, $h = 3$ cm e três ângulos de saída do trampolim: a) $\alpha = 10^\circ$ , b) $\alpha = 15^\circ$ e c) $\alpha = 20^\circ$ .	72
Figura 4.21 – Representação gráfica dos volumes de escavação para $\alpha = 10^\circ$ e $\alpha = 15^\circ$ : a) $Q = 0,51$ L/s; b) $Q = 0,71$ L/s; c) $Q = 0,85$ L/s.	73
Figura 4.22 – Representação gráfica dos volumes da barra para $\alpha = 10^\circ$ e $\alpha = 15^\circ$ : a) $Q = 0,51$ L/s; b) $Q = 0,71$ L/s; c) $Q = 0,85$ L/s.	74



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Resumo da evolução dos estudos realizados na determinação da profundidade máxima da fossa de erosão. ....	5
Quadro 2.2 – Limites de validade da equação (2.7). ....	11
Quadro 2.3 – Parâmetros para aplicação da equação (2.9). ....	13
Quadro 2.4 – Limites de aplicação das equações. ....	19
Quadro 2.5 – Limites de aplicação da equação de Ghodsian <i>et al.</i> (2012) – expressões (2.34), (2.46) a (2.48). ....	19
Quadro 3.1 – Incertezas associadas às leituras dos equipamentos. ....	42
Quadro 3.2 – Registo dos intervalos de tempo, em segundos, para o enchimento de 20 L no reservatório. ....	42
Quadro 3.3 – Valores dos caudais relativos aos intervalos de tempo apresentados no Quadro 3.6. ...	43
Quadro 3.4 – Valores lidos diretamente no visor do medidor de caudais. ....	43
Quadro 3.5 – Valores médios e desvio padrão dos valores registados, em volt, com recurso ao software LabView 8.6. ....	44
Quadro 3.6 - Valores do parâmetro $T$ para os diferentes modelos de trampolim utilizados. ....	46
Quadro 4.1 – Condições de ensaio para $\alpha = 10^\circ$ . ....	48
Quadro 4.2 – Condições de ensaio para $\alpha = 15^\circ$ . ....	48
Quadro 4.3 – Condições de ensaio para $\alpha = 20^\circ$ . ....	49
Quadro 4.4 – Características geométricas da erosão obtidas para $\alpha = 20^\circ$ , $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm. ....	50
Quadro 4.5 – Alcances medidos e estimados para as diferentes condições de ensaio. ....	52
Quadro 4.6 – Ângulos de incidência medidos e estimados para as diferentes condições de ensaio. .	54
Quadro 4.7 – Profundidades máximas de escavação (valores em cm). ....	60
Quadro 4.8 – Estimativas da profundidade máxima de escavação para $\alpha = 10^\circ$ (medidas em cm). ...	60
Quadro 4.9 – Estimativas da profundidade máxima de escavação para $\alpha = 15^\circ$ (medidas em cm). ...	61
Quadro 4.10 – Análise estatística das diferentes estimativas das profundidades máximas de erosão para $\alpha = 10^\circ$ . ....	62
Quadro 4.11 – Análise estatística das diferentes estimativas das profundidades máximas de erosão para $\alpha = 15^\circ$ . ....	63
Quadro 4.12 – Estimativas e valores experimentais de $B_s$ para $\alpha = 10^\circ$ (valores em cm). ....	63
Quadro 4.13 – Estimativas e valores experimentais de $B_s$ para $\alpha = 15^\circ$ (valores em cm). ....	64
Quadro 4.14 – Estimativas e valores experimentais de $L_s$ para $\alpha = 10^\circ$ (valores em cm). ....	64
Quadro 4.15 – Estimativas e valores experimentais de $L_s$ para $\alpha = 15^\circ$ (valores em cm). ....	64
Quadro 4.16 – Estimativas e valores experimentais de $L^*$ para $\alpha = 10^\circ$ (valores em cm). ....	64
Quadro 4.17 – Estimativas e valores experimentais de $L^*$ para $\alpha = 10^\circ$ (valores em cm). ....	65

Quadro 4.18 – Volume da cavidade de erosão para os diferentes ângulos (em litros). .....	73
Quadro 4.19 – Volume da barra de deposição de sedimentos, para os diferentes ângulos (em litros). .....	73

## SÍMBOLOS E ACRÓNIMOS

$B$  – largura da bacia de restituição [m]

$b$  – largura do trampolim em salto esqui [m]

$B_s$  – largura da escavação de erosão [m]

$B's$  – largura da escavação e barra [m]

$d$  – dimensão característica do material do leito [m]

$D$  – profundidade máxima da escavação medida a partir da superfície livre a jusante [m]

$d_{50}$  – diâmetro de peneiração em que há passagem de 50%, em peso, da amostra de material do leito [m]

$d_{85}$  – diâmetro de peneiração em que há passagem de 85%, em peso, da amostra de material do leito [m]

$d_{90}$  – diâmetro de peneiração em que há passagem de 90%, em peso, da amostra de material do leito [m]

$F$  – distância medida, na vertical, entre a face inferior da estrutura de suporte das varetas e o ponto do perfil de erosão que se pretende medir [m]

$f$  – profundidade máxima da escavação medida a partir do nível inicial do leito [m]

$Fr$  – número de Froude

$Fr_{d90}$  – número de Froude densimétrico

$g$  – aceleração da gravidade [m/s<sup>2</sup>]

$H$  – altura de queda total [m]

$h$  – espessura do colchão de água na bacia de restituição [m]

$H_0$  – altura de queda na secção de saída do trampolim [m]

$h_0$  – altura do escoamento na secção de saída do trampolim em salto de esqui [m]

$H_1$  – desnível entre a secção de saída do trampolim em salto esqui e o colchão de água [m]

$h_m$  – altura da barra a jusante da escavação de erosão [m]

$i_0, j_0$  – dimensões em pixels na horizontal e na vertical, respetivamente [px]

$K$  – coeficiente adimensional das expressões de previsão da profundidade máxima de erosão [-]

$L$  – comprimento do ressalto hidráulico [m]

$L^*$  – distância, na horizontal, entre a secção de saída do trampolim e o ponto de profundidade máxima de erosão [m]

$L_e$  – alcance efetivo do jato [m]

$L_{medido}$  – alcance do jato medido através da técnica de aquisição de imagens [m]

$L_s$  – extensão da escavação de erosão [m]

$L_t$  – alcance teórico do jato [m]

$N$  – parâmetro de cálculo da expressão (2.11) [-]

$Q$  – caudal descarregado [ $m^3/s$ ]

$q$  – caudal por unidade de largura [ $m^2/s$ ]

$R$  – raio do trampolim [m]

$T$  – distância medida, na vertical, entre a face inferior da estrutura de suporte das varetas e o perfil inicial do leito [m]

$t$  – espessura do jato na zona de impacto com o colchão de água [m]

$U$  – velocidade do jato imediatamente antes do impacto no colchão de água (expressão 2.27) [m/s]

$U_0$  – velocidade do escoamento na secção de saída do trampolim em salto esqui [m/s]

$W_e$  – número de Weber

$x, y$  – coordenadas do jato [m]

$x, y, z$  - coeficientes adimensionais das fórmulas de previsão da profundidade máxima de erosão [-]

$x_0, y_0$  – dimensões físicas na horizontal e na vertical, respetivamente [m]

$\alpha$  – ângulo de saída do trampolim em salto de esqui [°]

$\alpha'$  – ângulo de incidência do jato com o colchão de água [°]

$\alpha'_{exp}$  – ângulo de incidência do jato com o colchão de água medido através da técnica de aquisição de imagens [°]

$\beta_x, \beta_y$  – fatores lineares de calibração horizontal e vertical, respetivamente [cm/px]

$\gamma$  – peso específico da água [ $N/m^3$ ]

$\gamma_0$  – peso específico da água tendo em consideração a emulsão de ar [ $N/m^3$ ]

$\gamma_s$  – peso específico da partícula do material do leito [ $N/m^3$ ]

$\eta$  – quociente entre a velocidade máxima instantânea, pela velocidade média, num dado ponto (expressão 2.27) [-]

$\lambda_{Fr}$  – relação de escala segundo a semelhança de Froude [-]

$\lambda_L$  – fator de escala geométrico [-]

$\rho$  – massa volúmica da água [ $kg/m^3$ ]

$\rho_s$  – massa volúmica da partícula do material do leito [ $kg/m^3$ ]

$\varphi$  – coeficiente de perda de carga [-]

CFD – Dinâmica de fluidos computacional, do inglês “Computational Fluid Dynamics”

SHRHA – Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente

SfM – Structure from motion

TAI – Técnica de aquisição de imagens

USBR – United States Bureau of Reclamation

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA E OBJETIVOS

O progresso das técnicas de construção e dos conhecimentos científicos tem permitido a construção de barragens cada vez maiores. Com o aumento de energia potencial, surge a necessidade de dissipar uma maior quantidade de energia durante a descarga dos caudais de cheia. Os descarregadores em degraus permitem dissipar parte dessa energia, mas não sendo suficiente poderá ser necessário recorrer a dissipadores de energia a jusante. Uma das soluções consiste na dissipação de energia por meio de jatos, dado à elevada quantidade de energia cinética que pode ser dissipada ao longo do percurso aéreo do jato e, principalmente, no impacto do jato com o colchão de água existente a jusante da barragem.

Neste tipo de dissipação não é, em geral, necessária a construção de uma bacia de dissipação, tornando-se esta solução mais vantajosa do ponto de vista económico. No entanto, devido à ação do jato formando-se, a jusante da estrutura hidráulica, uma cavidade de erosão no leito. O desenvolvimento da erosão pode comprometer não só a estabilidade da barragem como a estabilidade das margens e, por isso, torna-se importante proceder à sua caracterização.

A erosão provocada por jatos a jusante de descarregadores tradicionais, como os descarregadores de soleira normal, tem sido muito estudada ao longo dos anos (Martins, 1984; Heng *et al.*, 2013). Destes estudos resultaram várias fórmulas empíricas e semiempíricas para a determinação das características geométricas da erosão, em particular a profundidade máxima e as dimensões em planta. Pelo contrário, são poucos os estudos sobre a erosão a jusante de descarregadores em degraus equipados com trampolins em salto de esqui. Neste caso, dependendo do valor do caudal por unidade de largura, ocorre uma dissipação adicional de energia ao longo do descarregador, provocada pelos degraus, diminuindo a energia no trampolim, afetando as características do jato e da erosão.

A presente dissertação surge na sequência de trabalhos de Figueiredo (2010) e Machado (2016), desenvolvidos no Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, no âmbito da dissipação de energia e consequente erosão a jusante de descarregadores convergentes em degraus equipados com um trampolim em salto de esqui. Pretende-se realizar um trabalho experimental complementar, de modo a alargar a base de dados já existente, e a investigar o efeito do ângulo de saída do trampolim nas características geométricas da cavidade de erosão que se desenvolve a jusante.

Os ensaios foram realizados em fundo móvel, constituído por material granular não coerente, para diferentes valores de caudais descarregados, de espessura de colchão de água no canal de restituição e diferentes ângulos de saída do trampolim. Pretende-se definir os perfis longitudinais, a profundidade máxima e as dimensões em planta da escavação resultante e, posteriormente, comparar os resultados obtidos com os diferentes ângulos de saída do trampolim e também comparar com os resultados com os existentes na literatura da especialidade.

## **1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

O presente documento encontra-se organizado em 5 capítulos, respeitando uma lógica sequencial, descritos a seguir.

No presente capítulo fez-se um breve enquadramento do tema e dos objetivos que estão na base deste estudo.

No Capítulo 2 serão abordados os conceitos teóricos relacionados aos diferentes órgãos de dissipação de energia, com a especial atenção à dissipação de energia por jatos. É apresentada a evolução dos estudos existentes no âmbito deste tipo de dissipação, bem como uma compilação de algumas expressões empíricas e semiempíricas sugeridas por diversos autores.

O Capítulo 3 é dedicado ao ensaio experimental, nomeadamente à descrição da instalação, dos equipamentos utilizados na aquisição dos diferentes parâmetros necessários à análise dos resultados, bem como a metodologia utilizada. As técnicas de medição utilizadas são também descritas neste capítulo, bem como os processos de calibração de alguns equipamentos.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos experimentalmente, bem como as análises crítica e comparativa dos resultados obtidos com os valores previstos com os obtidos em trabalhos anteriores. A validação dos resultados e respetivas condições teve por base a repetição de um dos ensaios de Machado (2016) e consequente análise comparativa. Posteriormente é realizada uma análise da influência do ângulo de saída do trampolim nas principais características da erosão.

Por último, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões finais retiradas do estudo desenvolvido e algumas sugestões para possíveis desenvolvimentos e aperfeiçoamentos futuros.

# 2

## DISSIPACÃO POR JATOS

### 2.1. ESTADO DA ARTE

Nos aproveitamentos hidráulicos, a restituição dos caudais de cheia descarregados deve ser realizada em condições semelhantes às condições do curso de água natural. A construção do aproveitamento, em particular da barragem, origina um desnível entre as superfícies livre de água a montante e jusante e, conseqüentemente, a descarga dos caudais de cheia implica uma perda de energia de valor apreciável.

A dissipação de energia no escoamento ao longo das soleiras descarregadoras é, em geral, pequena. Os descarregadores em degraus podem, dependendo do caudal descarregado, dissipar uma maior energia em comparação com as tradicionais soleiras normais. No entanto, se esta dissipação de energia não for suficiente, poderá ser necessário recorrer a dispositivos adicionais, como as bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico, bacias de dissipação de energia por trampolim submerso (“*roller bucket*” ou concha de rolo) ou dissipação por jatos (Peterka, 1983).

A dissipação por jatos é, em geral, vantajosa do ponto de vista económico uma vez que, se as condições geológicas o permitirem, poderá não ser necessária a construção de uma bacia em betão. No entanto, o jato originará uma cavidade de erosão, cuja evolução pode pôr em risco a estabilidade do descarregador ou das margens do rio e até mesmo afetar a navegabilidade, no caso de formação de barras. O estudo e correta caracterização das variáveis que afetam a erosão provocada por jatos é, assim, essencial para minimizar os riscos associados a este tipo de dissipação, permitindo que possam ser tomadas medidas de proteção das fronteiras de escoamento ou que originem a ocorrência dessas erosões em zonas suficientemente afastadas do pé da barragem.

A cavidade de erosão provocada por jatos pode variar consoante as condições estabelecidas tais como: o tipo de dissipação de energia, o caudal descarregado, a altura de queda, o diâmetro do material do leito do rio, entre outros parâmetros. Nos últimos anos têm sido apresentados diversos estudos da erosão provocada por jatos a jusante de descarregadores tradicionais, como os descarregadores de soleira normal, dos quais surgem expressões empíricas e semiempíricas, baseadas em modelos físicos, dados de protótipos ou ambos e, mais recentemente, em modelos computacionais.

Essas expressões permitem caracterizar a fossa de erosão através do alcance efetivo do jato ( $L_e$ ), da profundidade máxima da fossa de erosão ( $f$ ), da distância entre a estrutura de descarga e a localização da profundidade máxima ( $L^*$ ), da largura máxima ( $B_s$ ) e do comprimento ( $L_s$ ) da cavidade de erosão.

As Figuras 2.1 e 2.2 mostram dois esquemas da cavidade de erosão, incluindo a representação dos parâmetros principais, em vistas longitudinais e em planta, respetivamente. Na Figura 2.2 a variável  $B_s$  inclui a largura da escavação e da barra.

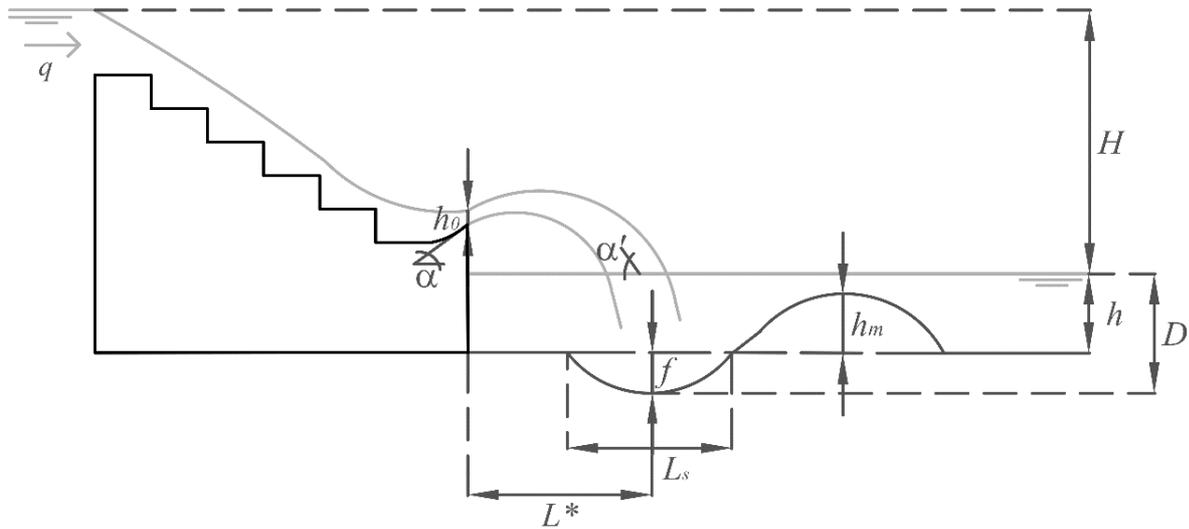


Figura 2.1 – Esquema longitudinal de um trampolim em salto de esqui (Machado *et al.*, 2019).

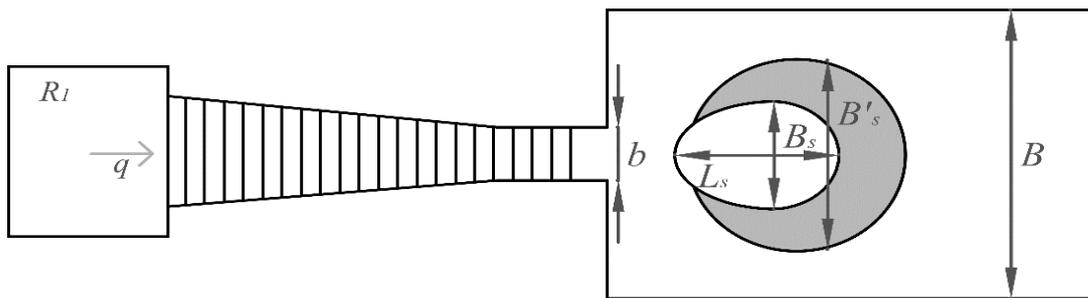


Figura 2.2 – Vista em planta da secção de restituição (Machado *et al.*, 2019).

O alcance efetivo pode ser obtido graficamente em função do número de Froude,  $Fr$ , (Gunko *et al.*, 1965; Taraimovich, 1978) ou da velocidade na secção de saída do trampolim de salto de esqui,  $U_0$  (Kamaneve, 1966; Zvorykin *et al.*, 1975).

Para calcular o valor da profundidade da cavidade de erosão são conhecidas várias expressões de diferentes autores, que podem ser agrupadas de acordo com as variáveis que consideram influenciar a erosão (Mason e Arumugam, 1985; Machado, 2016) e que se resumem no Quadro 2.1.

No primeiro grupo, incluem-se os estudos como os de Veronese (1973), Damle *et al.* (1966), Wu (1973) e Martins (1984), que consideram que a erosão é influenciada pela altura de queda ( $H$ ) e pelo caudal por unidade de largura da secção de saída do trampolim ( $q$ ). Alguns autores (Schoklitsch, 1935; Patrashev, 1937; Eggenberger e Müller, 1944; Hartung, 1959; Franke, 1960) consideram, ainda, a influência do diâmetro característico do material do leito ( $d$ ).

No Grupo II, que inclui os trabalhos de Jaeger (1939), Rubinstein (1963), Mason e Arumugam (1985), Ghodsian *et al.* (1999) e Heng *et al.* (2013), os autores incluem, para além dos parâmetros do grupo I, a altura do colchão de água a jusante ( $h$ ). O colchão de água reduz as ações dinâmicas do jato, protegendo

a área de impacto do jato (Lencastre, 1961). Bombardelli e Gioia (2006) consideram, ainda, a influência das massas volúmicas do fluido e do material do leito.

O Grupo III inclui os estudos que estudaram a influência de outros parâmetros como o ângulo de impacto do jato,  $\alpha'$  (Mikhalev, 1960; Mirskhulava *et al.*, 1967; Yildiz and Üzücek, 1994) e parâmetros geométricos do trampolim, nomeadamente o ângulo de saída,  $\alpha$  (Yildiz e Üzücek 1996, Azmathullah *et al.* 2004, Naini 2011) e o raio,  $R$  (Ghodsian *et al.* 2012). Alias *et al.* (2008) desenvolveram um estudo experimental sobre a influência do ângulo de saída do trampolim na erosão a jusante. Os autores, que apresentaram uma análise da profundidade máxima e das áreas de erosão resultantes dos perfis longitudinais, obtiveram áreas mínimas para um ângulo de saída de 45°. Alireza *et al.* (2008) obtiveram resultados semelhantes num estudo experimental sobre o impacto do ângulo de saída na cavidade de erosão.

A velocidade do jato na secção de saída do trampolim tem sido considerada, por alguns autores (Mason, 1989; Hoffmans, 1998), na determinação da zona de impacto do jato e, conseqüentemente, da profundidade máxima de erosão. Estes estudos estão incluídos no Grupo IV.

Estudos mais recentes, como o de Zhang *et al.* (2014), definiram expressões para a profundidade máxima de erosão com recurso ao Flow3D, um software de modelação numérica.

Quadro 2.1 – Resumo da evolução dos estudos realizados na determinação da profundidade máxima da fossa de erosão.

Grupo	Variáveis	Autores
I	$H, q$ e $d$	Veronese (1973), Damle et al. (1966), Wu (1973), Martins (1984), Schoklitsch (1935), Patrashev (1937), Eggenberger e Müller (1944), Hartung (1959) e Franke (1960).
II	$H, q, d$ e $h$	Jaeger (1939), Rubinstein (1963), Mason e Arumugam (1985), Ghodsian et al. (1999), Heng et al. (2013) e Bombardelli e Gioia (2006).
III	$H, q, d, h, \alpha', \alpha$ e $R$	Mikhalev (1960), Mirskhulava et al. (1967) e Yildiz, Üzücek (1994), Yildiz e Üzücek (1996), Azmathullah et al. (2004) e Naini (2011), Ghodsian et al. (2012).
IV	$H, q, d, h, U$	Mason (1989), Hoffmans (1998) e Zhang et al. (2014).

Apesar da importância do seu conhecimento, as dimensões em planta da cavidade de erosão têm sido menos estudadas que a profundidade máxima e, conseqüentemente, existem menos expressões que

permitam a sua estimativa, entre as quais se referem as de Ghodsian *et al.* (1999, 2012), Martins (1984), Azmathullah *et al.* (2004) e Naini (2011).

Ao contrário do que acontece com os descarregadores de soleira normal, o número de estudos da erosão provocada por jatos a jusante de descarregadores em degraus é ainda muito reduzido. Estes descarregadores podem, em função do valor do caudal por unidade de largura, dissipar mais energia em comparação com os tradicionais descarregadores de soleira normal (Novak *et al.* 2007). Esta dissipação adicional provocada pelos degraus diminui a energia no trampolim, afetando as características do jato e, conseqüentemente, da erosão.

Habib *et al.* (2016) realizaram um estudo experimental sobre o efeito do número dos degraus nas características da erosão provocada por ressalto hidráulico a jusante de um descarregador em degraus convergente. Em 2012, Tuna estudou a influência do ângulo do descarregador em degraus na cavidade de erosão, tendo obtido um menor valor da profundidade máxima de erosão para um ângulo de 30°.

Figueiredo *et al.* (2014), num estudo experimental, caracterizaram a erosão a jusante de um descarregador em degraus convergente equipado com um trampolim de 20°, para diferentes caudais e altura do colchão de água. Mais tarde, Machado (2016) complementou este trabalho com medições para diferentes ângulos de saída do trampolim, 25°, 30° e 45°, tendo concluído que a erosão era, em geral inferior para ângulos superiores.

## **2.2. CONCEITOS GERAIS**

Na dissipação de energia por jatos pode-se considerar a queda em lâmina livre e os trampolins conhecidos como dissipação em salto de esqui. Pode-se ainda, referir a dissipação originada pela interferência de dois jatos, denominada dissipação por jatos cruzados.

A dissipação de energia é conseguida através do atrito do jato com o ar, emulsionamento com o colchão de água a jusante e atrito com o leito do rio, no qual irá, na maioria dos casos, originar fossas de erosão ou, ainda, atrito dos jatos entre si.

O estudo da dissipação por jatos obrigará a fazer a análise da zona do impacto do jato, isto é, do alcance do jato, e a estimativa da cavidade de erosão que se espera ocorrer, para avaliar possíveis conseqüências nocivas, tais como instabilidade de margens ou da própria estrutura, que possam, eventualmente, vir a ser originadas.

A dissipação de energia não ocorre apenas no impacto do jato com o leito, mas também no emulsionamento e atrito do jato com o ar e no impacto do jato no colchão de água existente a jusante. A perda de energia poderá ser substancialmente melhorada se se recorrer ao cruzamento de jatos (Sousa, 2011).

Os jatos produzidos durante a descarga possuem características próprias que variam consoante o tipo de descarregador, o caudal descarregado e também com as condições do escoamento na secção de saída. Lencastre (1961) propõe uma classificação para os diferentes tipos de jatos, consoante as particularidades do descarregador, posteriormente complementada por Ramos (1993). Na Figura 2.3 representam-se os diferentes tipos de jatos de acordo com a classificação destes autores.

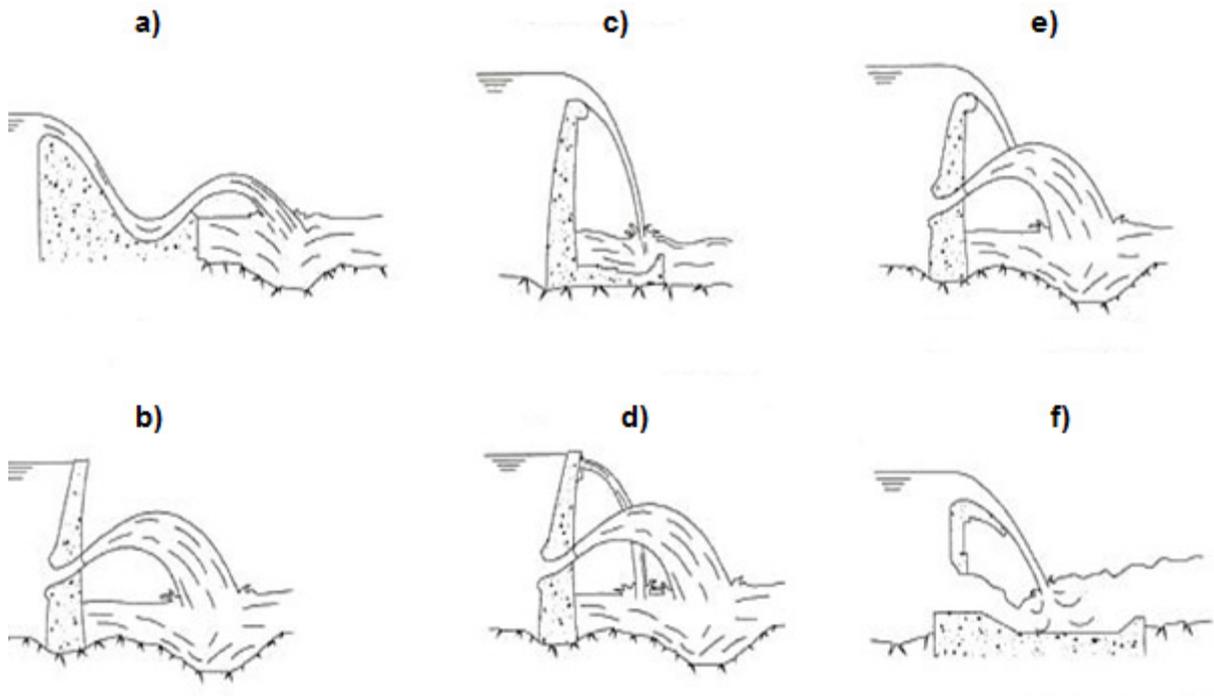


Figura 2.3 – Classificação dos diferentes tipos de descarregadores por jatos: a) Salto esqui-trampolim; b) Salto esqui-orifícios; c) Lâmina Livre; d) Jatos combinados; e) Jatos cruzados - choque de jatos no ar; f) Jatos cruzados - ressalto hidráulico combinado com lâmina livre (Adaptado de Melo, 2002).

Os jatos denominados de lâmina livre são descendentes e quase verticais, ocorrendo o seu impacto junto ao pé da barragem, onde existe uma significativa dissipação de energia cinética. Nestes casos a proteção do leito é conseguida com recurso a colchão de água. Com a desintegração do jato é possível conseguir uma maior perda de energia ao longo da sua trajetória, devido ao atrito com o ar. Para isso, são instalados blocos dispersores ou pequenos defletores na secção de saída do jato (Melo, 2002).

No caso dos trampolins em salto de esqui, o jato é projetado segundo um determinado ângulo e, neste caso, a dissipação de energia ocorre mais a jusante da estrutura, em comparação os jatos em queda livre. Este tipo de trampolim, com forma concava, é caracterizado pela existência de um defletor, responsável pela projeção do jato. A dissipação de energia é maior aquando no impacto do jato no leito do que durante a sua trajetória aérea, o que poderá originar uma escavação de erosão com maiores dimensões, a qual pode afetar a estabilidade das margens do rio, obrigando assim a um custo adicional na sua estabilização (Melo, 2002).

O escoamento num trampolim em salto de esqui poderá variar consoante o valor do caudal descarregado. Para caudais muito inferiores ao caudal de dimensionamento, o escoamento não possui energia suficiente para vencer a rampa de lançamento. Neste caso há afogamento do escoamento, com formação de ressalto hidráulico na extremidade de montante do trampolim (Figura 2.4), o que origina uma maior dissipação de energia durante o processo de turbulência, que se reflete num menor alcance do jato. Consequentemente, a zona de incidência do jato localiza-se mais próxima da fundação da barragem, podendo colocar em risco a sua estabilidade (Sinniger e Hager, 1989).

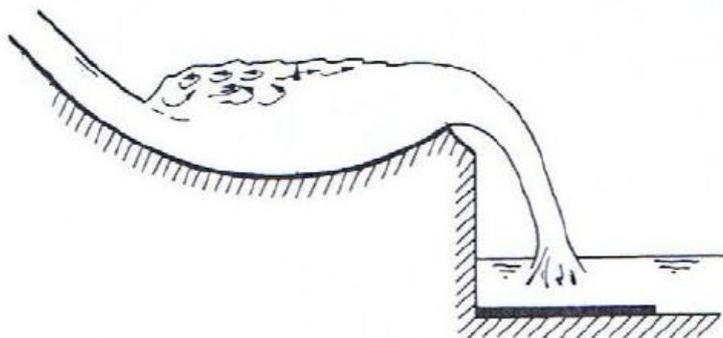


Figura 2.4 – Ressalto hidráulico num trampolim de salto de esqui: esquema (adaptado de Sinniger e Hager, 1989).

Para caudais descarregados mais elevados, já não se verifica o afogamento do escoamento e este é corretamente projetado sob a forma de jato livre (Figura 2.5). O impacto do jato ocorre assim numa zona mais afastada da estrutura hidráulica.

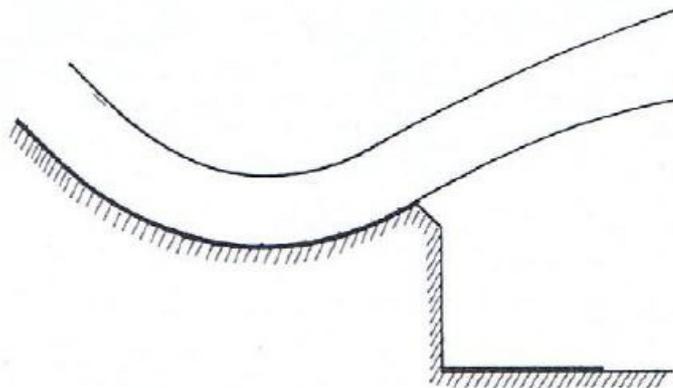


Figura 2.5 – Escoamento desafiado (Adaptado de Sinniger e Hager, 1989).

No dimensionamento do trampolim em salto de esqui é importante ter em consideração alguns fatores importantes como a velocidade limite a partir do qual não se verifica o primeiro tipo de escoamento, os valores das pressões verificadas na soleira devido à curvatura das linhas de corrente, que não devem ser excessivos, a possível ocorrência de cavitação, que quando existe uma descida repentina da pressão local, tornando-se inferior à pressão mínima em que ocorre a vaporização do líquido, bem como a geometria do trampolim na proximidade do ponto de descolamento do escoamento (Sinniger e Hager, 1989).

Nos casos em que a energia a dissipar é considerável ou quando características geológicas e morfológicas não se apresentam favoráveis, pode-se recorrer à dissipação de energia por jatos cruzados. Nestes casos, a dissipação de energia é conseguida através do cruzamento dos jatos, inicialmente ascendentes, provenientes dos orifícios de fundo ou meio fundo e dos jatos descendentes provenientes dos descarregadores de superfície, conforme exemplificado na Figura 2.6 (Melo, 2002).



Figura 2.6 – Barragem do Alqueva, sistema de dissipação por jatos cruzados (Machado, 2016).

### 2.3. ALCANCE E ÂNGULO DE INCIDÊNCIA TEÓRICOS

Considerando a origem do sistema de eixos ortogonais na secção de saída do trampolim e tendo em consideração apenas parâmetros de ordem cinemática é possível definir a trajetória do jato através da equação (2.1), cujas variáveis têm o significado apresentado na Figura 2.1.

$$y = x \tan \alpha - \frac{g \sec^2 \alpha}{2 U_0^2} x^2 \quad (2.1)$$

O alcance teórico do jato, tendo também em conta apenas considerações de ordem cinemática, pode ser obtido pela expressão:

$$L_t = H_0 \sin(2\alpha) + 2 \cos \alpha \sqrt{H_0 (H_0 \sin^2 \alpha + H_1)} \quad (2.2)$$

em que  $H_0$  é definido como:

$$H_0 = \frac{U_0^2}{2g} \quad (2.3)$$

No caso de descarregadores em trampolim ou orifício, considera-se que o valor de  $\alpha$  é dado pelo ângulo formado com a horizontal pela tangente à saída do trampolim na secção terminal. Nos jatos em queda livre, o valor de  $\alpha$  é considerado igual à média aritmética dos valores do ângulo formado pela tangente à soleira,  $\alpha_2$ , e do ângulo da superfície livre no bordo de saída,  $\alpha_1$ , conforme esquematizado na Figura 2.7.

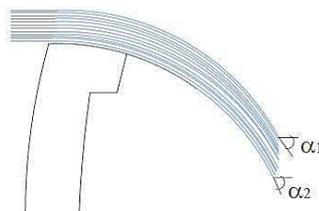


Figura 2.7 – Ângulos de saída de um jato em queda livre (Machado, 2016).

O alcance teórico pode também ser determinado com recurso ao gráfico da Figura 2.8, em função de  $H_0/H$ . Pela análise do gráfico, verifica-se que os valores máximos do alcance teórico ocorrem para  $\alpha = 45^\circ$ .

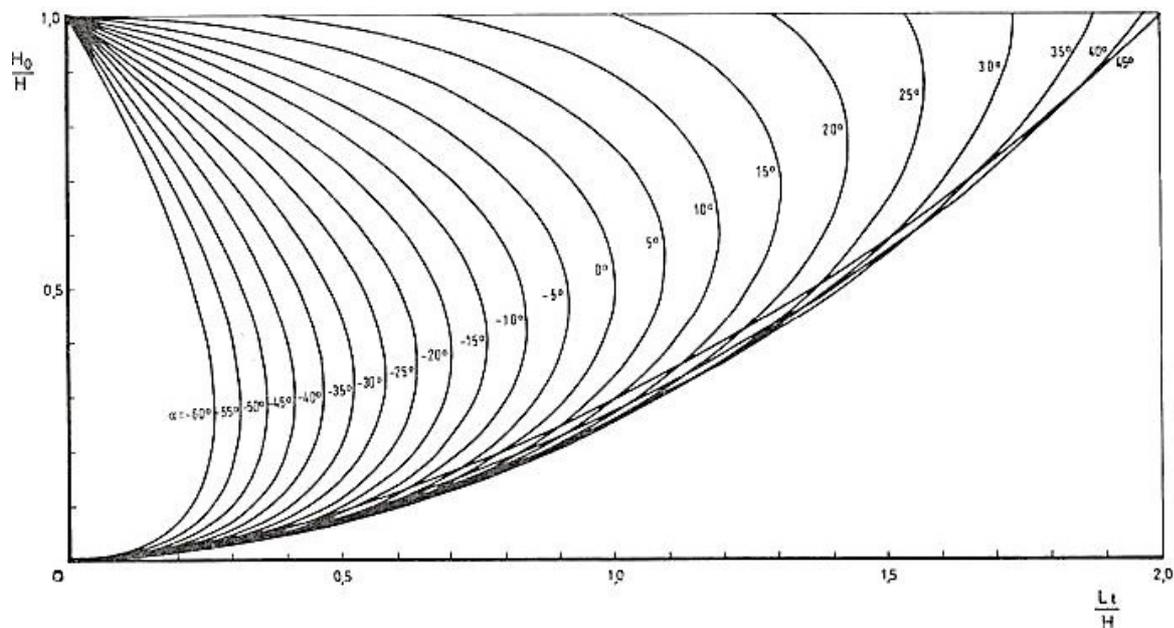


Figura 2.8 – Determinação do alcance teórico do jato (Martins, 1973).

O ângulo de incidência teórico do jato,  $\alpha'$ , que está relacionado com o alcance teórico, pode ser obtido pela expressão (2.4) ou pelo ábaco da Figura 2.9, em função do ângulo de saída do jato ( $\alpha$ ) e de  $H_0/H$ .

$$\tan \alpha' = \sec \alpha \sqrt{\sin^2 \alpha + \frac{H_1}{H_0}} \quad (2.4)$$

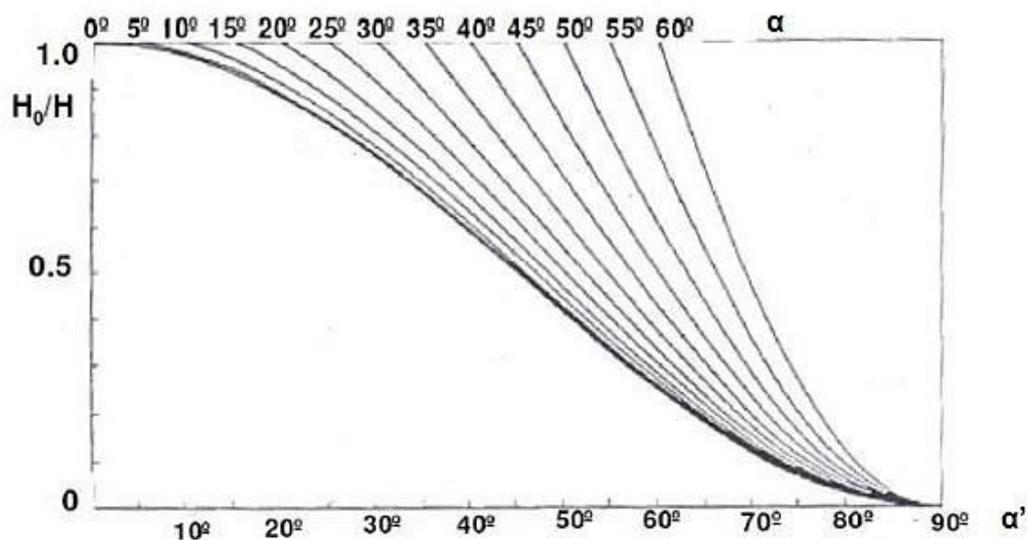


Figura 2.9 – Determinação do ângulo de incidência teórico,  $\alpha'$  (adaptado de Martins, 1973).

#### 2.4. ALCANCE EFETIVO DOS JATOS

No caso de jatos descendentes, o cálculo do alcance efetivo não tem grande significado uma vez que a equação (2.1) representa a trajetória do jato com a precisão necessária. No entanto, no caso de jatos ascendentes, o alcance efetivo do jato mostra-se mais importante, uma vez que o jato dissipa energia devido às flutuações turbulentas de velocidade, à tensão superficial, à viscosidade e ao emulsionamento com o ar, alterando assim a sua trajetória.

Nestes casos, em que a equação (2.2) não é a mais adequada para o cálculo do alcance do jato, foram propostas, por diferentes autores, fórmulas empíricas e semiempíricas, para determinar a zona de incidência do jato com a superfície livre a jusante.

Gun'ko *et al.* (1965), a partir de ensaios em laboratório e posterior validação em protótipo, apresentam uma curva (curva A da Figura 2.10) para determinação da relação entre o alcance efetivo e o alcance teórico,  $L_e/L_t$ , em função número de Froude na secção de saída do trampolim,  $Fr$ , definido pela expressão:

$$Fr = \frac{U_0}{\sqrt{g h_0}} \quad (2.5)$$

em que  $g$  é a aceleração da gravidade,  $h_0$  é a altura de água na secção de saída do trampolim e  $U_0$  representa a velocidade do escoamento na secção de saída do trampolim, determinada como:

$$U_0 = \frac{Q}{b h_0}, \quad (2.6)$$

em que,  $Q$  é o caudal descarregado e  $b$  a largura do trampolim.

Taraimovich (1978), através de observações realizadas em protótipos, também apresenta uma curva para a determinação do alcance efetivo,  $L_e$  (curva B da Figura 2.10). Este método pode ser aplicado para  $Fr^2 < 93$ . A análise do gráfico da Figura 2.10 permite concluir que o alcance efetivo é igual ao alcance teórico, para números de Froude inferiores a 30, no caso de Gun'ko *et al.* (1965), e para valores inferiores a 50, no caso de Taraimovich (1978).

Zvorykin *et al.* (1975) apresentam uma fórmula empírica não homogénea, para o cálculo do alcance efetivo máximo, ou seja, a distância entre a extremidade do trampolim e a extremidade de jusante da zona de impacto do jato, válida para escoamentos bidimensionais:

$$L_e = 0,59 \times (1,53)^{\log q} H'_0 \operatorname{sen} (2\alpha) + 1,3 H + 1,6 \quad (2.7)$$

Os intervalos de validade da expressão (2.7) são apresentados no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Limites de validade da equação (2.7).

$q$ (m <sup>2</sup> /s)	$H_0$ (m)	$H_1$ (m)	$\alpha$ (°)
11-29,4	35,7-92,5	4-28	12-35

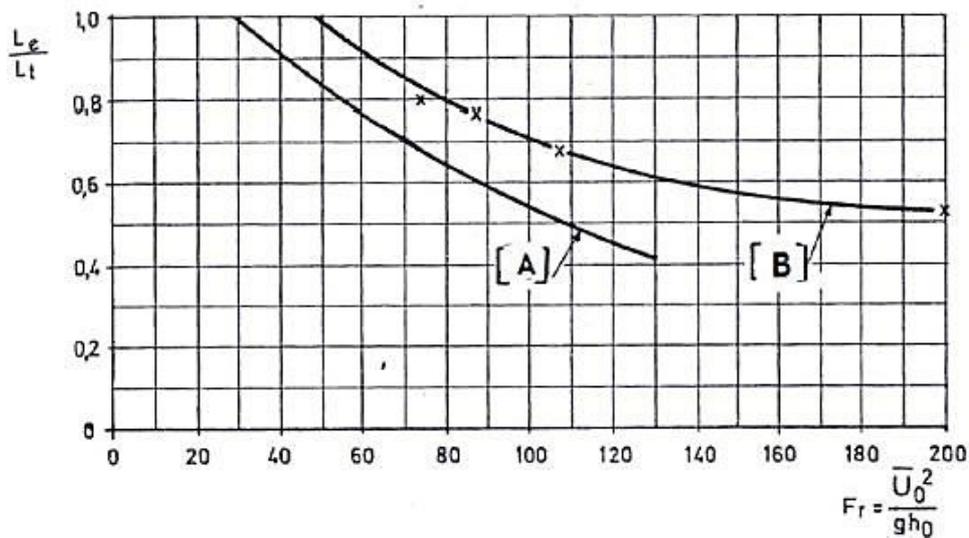


Figura 2.10 – Determinação do alcance efetivo do jato - (A) Gun'ko *et al* (1965); (B) Taraimovich (1978) (Lencastre, 2001).

Kamaneve (1966), apresenta uma curva que permite determinar o valor do alcance efetivo do jato (Figura 2.11), através do alcance teórico. Esta curva resulta de ensaios experimentais e é válida apenas para os casos em que o ângulo de saída do jato é nulo, ou seja, para jatos horizontais. O autor apresenta ainda os limites de validade para o número de Froude,  $Fr^2$ , e para o coeficiente de perda de carga,  $\phi$ , também expostos na Figura 2.11. O coeficiente de perdas de carga pode ser determinado através da expressão:

$$\phi = \frac{U_0}{\sqrt{2 g H_0}} \tag{2.8}$$

em que  $U_0$  é a velocidade do jato na secção de saída,  $g$  é aceleração da gravidade e  $H_0$  a altura de queda na secção de saída do trampolim.

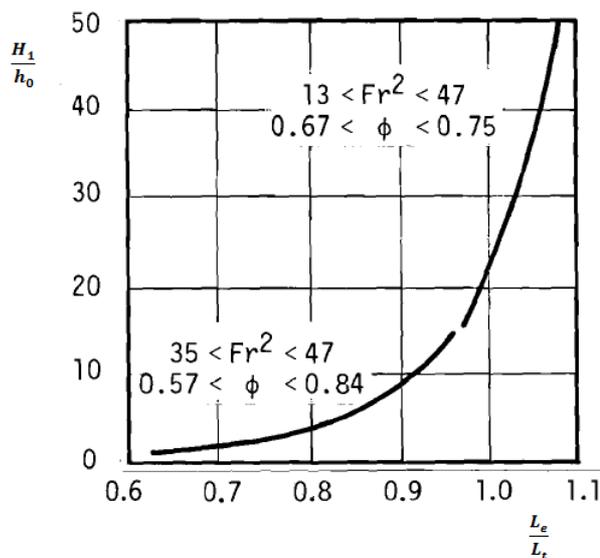


Figura 2.11 – Determinação do alcance efetivo do jato (Adaptado de Whittaker e Schleiss, 1984).

## 2.5. PREVISÃO DA EROSIÃO DO LEITO

Como referido na Secção 2.1, a dissipação de energia devido ao impacto do jato no leito traduz-se na formação de uma escavação, cujo processo erosivo depende de fatores de natureza hidrológica e hidráulica, das características morfológicas e também das características geológicas do maciço rochoso.

A correta caracterização da erosão do leito e o controlo contínuo das dimensões da erosão durante a fase de exploração são essenciais para o bom funcionamento do aproveitamento. Devido à complexidade das diferentes condições, é difícil prever com rigor a erosão do solo na zona de impacto, pelo que o recurso a estudos em modelos físicos torna-se indispensável em projetos de dimensões apreciáveis.

Nas subsecções seguintes apresentam-se, de acordo com os grupos apresentados no Quadro 2.1, as fórmulas propostas por diferentes autores para determinação da profundidade máxima de erosão.

### 2.5.1. GRUPO I

No primeiro grupo estão inseridos os autores (Veronese, 1937; Damle, 1966; Wu, 1973; Martins, 1984) que consideram a influência do caudal de descarga por unidade de largura ( $q$ ) e da altura de queda ( $H$ ). Alguns autores consideram também a dimensão característica do material do leito (Schoklitsch, 1935; Patrashev, 1937; Eggenburger e Müller, 1944; Hartung, 1959; Franke, 1960). De uma forma generalizada, é utilizada a equação:

$$f = K \frac{q^x H^y}{d^z} \quad (2.9)$$

em que  $K$ ,  $x$ ,  $y$  e  $z$  são constantes definidas por cada autor e apresentadas no Quadro 2.3, juntamente com a informação relativa ao diâmetro característico do material do leito, quando aplicável. As restantes variáveis têm o significado apresentado na Figura 2.17.

Quadro 2.3 – Parâmetros para aplicação da equação (2.9).

Autor	$K$	$x$	$y$	$z$	$d$ (m)
Schoklitsch (1935)	0,521	0,57	0,20	0,32	$d_{90}$
Patrashev (1937)	3,877	0,50	0,25	0,25	$d_{90}$ (mm)
Veronese (A) (1937)	0,202	0,54	0,225	0,42	$d_{50}$
Veronese (B) (1937)	1,90	0,54	0,225	0	-
Eggenburger (1944)	1,44	0,60	0,50	0,40	$d_{90}$
Hartung (1959)	1,40	0,61	0,36	0,32	$d_{85}$
Franke (1960)	1,13	0,67	0,50	0,50	$d_{90}$
Damle (A) (1966)	0,652	0,50	0,50	0	-
Chian Min Wu (1973)	1,18	0,51	0,235	0	-
Martins (B) (1984)	1,50	0,60	0,10	0	-

## 2.5.2. GRUPO II

O segundo grupo caracteriza-se pela consideração da espessura do colchão de água a jusante da estrutura hidráulica,  $h$ , para além das variáveis consideradas no grupo I. Alguns dos autores consideram também a influência da aceleração da gravidade,  $g$ , na determinação da profundidade máxima da escavação medida a partir da superfície livre a jusante,  $D$ .

a) Jaeger (1939)

Jaeger (1939), um dos primeiros autores a ter em consideração a espessura do colchão de água, reavaliou o estudo de Veronese, deduzindo assim a seguinte expressão:

$$D = 0,6 q^{0,5} H^{0,25} \left(\frac{h}{d}\right)^{0,333} \quad (2.10)$$

b) Rubinstein (1963)

$$D = h + 0,19 \left(\frac{H+h}{d_{90}}\right)^{0,75} \frac{q^{1,2}}{H^{0,47} h^{0,33}} \quad (2.11)$$

c) Mason e Arumugam (1985)

$$D = K \frac{q^x H^y h^{1,5}}{g^{0,30} d_m^{0,10}} \quad (2.12)$$

em que as variáveis  $K$ ,  $x$ ,  $y$  e  $d_m$  são definidas, respetivamente, como:

$$K = 6,42 - 3,10H^{0,10} \quad (2.13)$$

$$x = 0,60 + \frac{H}{300} \quad (2.14)$$

$$y = 0,15 + \frac{H}{200} \quad (2.15)$$

$$d_m = 0,25 \text{ m} \quad (2.16)$$

d) Ghodsian *et al.* (1999)

$$D = 0,75 \left(\frac{q}{\sqrt{g h^3}}\right)^{0,524} \left(\frac{d_{50}}{h}\right)^{0,366} \left(\frac{H}{h}\right)^{0,255} \quad (2.17)$$

e) Heng, Tingsanchali e Suetsugi (2013)

$$D = 7,4834 \frac{q^{1,4632}}{g^{0,7326} h^{1,1973}} \quad (2.18)$$

f) Bombardelli e Gioia (2006)

Bombardelli e Gioia (2006) introduziram a densidade da água e do material do leito.

$$D = K \frac{q^{0,67} H^{0,67} h^{0,15}}{g^{0,33} d^{0,33}} \left(\frac{\rho}{\rho_s - \rho}\right) \quad (2.19)$$

### 2.5.3. GRUPO III

No terceiro grupo são incluídas equações mais complexas, que incluem um maior número de variáveis, como o ângulo de incidência, o ângulo de saída ou até mesmo ao raio do trampolim em salto de esqui.

a) Mikhalev (1960)

$$D = \frac{1,804 q \sin \alpha'}{1 - 0,215 \cot \alpha'} \left( \frac{1}{d_{90}^{0,33} h^{0,5}} - \frac{1,126}{H} \right) \quad (2.20)$$

b) Mirskhulava (1967b)

Mirskhulava (1967b) autor considerou a influência do tipo de leito e da sua coesão na previsão da profundidade da escavação, para além da ação das flutuações de velocidade em jatos turbulentos. A primeira equação desenvolvida pelo autor é definida como:

$$D = \frac{q \sin \alpha'}{1 - 0,175 \cot \alpha'} \left( \frac{0,97}{\sqrt{d_{90}}} - \frac{1,35}{\sqrt{H}} \right) + 0,25 h \quad (2.21)$$

c) Yildiz e Üzücek (1994)

A equação proposta por Yildiz e Üzücek (1994) surgiu da adaptação para jatos em salto de esqui da equação desenvolvida por Veronese, apenas aplicada a jatos em queda livre. A equação foi desenvolvida a partir dos resultados do estudo de Veronese e tendo em consideração o ângulo de incidência do jato.

$$D = 1,9 q^{0,54} H^{0,225} \sin \alpha' \quad (2.30)$$

d) Yildiz e Üzücek (1996)

Dois anos mais tarde Yildiz e Üzücek realizaram um novo estudo, do qual concluíram que a constante de proporcionalidade tomava o valor de 1,5 em vez de 1,9 e na qual consideraram a influência do ângulo de saída do jato, em vez do ângulo de incidência.

$$D = 1,5 q^{0,54} H^{0,225} \sin \alpha \quad (2.31)$$

e) Azmathullah *et al.* (2004)

O estudo levado a cabo por Azmathullah *et al.* (2004) caracteriza-se pela análise de alguns parâmetros adicionais a jusante de um descarregador em trampolim, nomeadamente do número de Froude e das diversas relações entre o diâmetro característico, a espessura do colchão de água a jusante, altura da queda, raio do trampolim e também o ângulo de saída do trampolim (em radianos).

$$\frac{D}{h} = 6,914 \left( \frac{q}{\sqrt{gh^3}} \right)^{0,694} \left( \frac{d_{50}}{h} \right)^{0,196} \left( \frac{H}{h} \right)^{0,0815} \left( \frac{R}{h} \right)^{-0,233} \alpha^{0,196} \quad (2.32)$$

f) Naini (2011)

As equações desenvolvidas por Naini (2011) são semelhantes às anteriormente apresentadas por Azmathullah *et al.* (2004). As variáveis intervenientes mantêm-se, com exceção do raio do trampolim, mudando apenas a constante e os diferentes expoentes.

$$\frac{D}{h} = 3,278 \left( \frac{q}{\sqrt{gh^3}} \right)^{0,702} \left( \frac{d_{50}}{h} \right)^{0,011} \left( \frac{H}{h} \right)^{0,135} \left( \frac{R}{h} \right)^{0,02} \alpha^{0,01}, \quad (2.33)$$

em que R é o raio hidráulico.

g) Ghodsian *et al.* (2012)

Ghodsian *et al.* (2012) realizaram um novo estudo, onde analisaram a erosão num leito com material sedimentar não uniforme. Na equação desenvolvida, as características da escavação dependem do número de Froude densimétrico,  $Fr_{d90}$ , que, por sua vez, considera o efeito da graduação do material do leito. Os autores concluem também que as dimensões da cavidade de erosão são influenciadas pelas características da bacia onde se dá a restituição e pelo raio do trampolim em salto de esqui.

$$\frac{D}{h} = 0,54 (Fr_{d90})^{0,42} \left( \frac{H}{R} \right)^{-0,96} \left( \frac{B}{b} \right)^{0,68} \left( \frac{h}{H} \right)^{-1,27}, \quad (2.34)$$

em que o número de Froude densimétrico é definido como:

$$Fr_{d90} = \frac{U_0}{\sqrt{g d_{90} \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)}} \quad (2.35)$$

#### 2.5.4. GRUPO IV

No grupo IV inserem-se as equações que consideram a influência da velocidade do jato na determinação da profundidade da erosão.

a) Mason (1989)

Mason (1989) introduz o efeito do ar como parâmetro adicional na previsão da profundidade da escavação. A percentagem de ar existente na água aquando do impacto é expressa, segundo Ervine (1976), em função da altura de queda, da velocidade mínima requerida para que o ar se entranhe na água, da velocidade do jato e da espessura do jato na zona de impacto.

$$\beta = 0,13 \left( 1 - \frac{U_e}{U} \right) \left( \frac{H}{t} \right)^{0,446}, \quad (2.36)$$

em que  $U_e$  é a velocidade mínima do jato para que o ar se entranhe na água e toma o valor de:

$$U_e = 1,1 \text{ m/s}. \quad (2.37)$$

Mason propôs então uma alteração à equação deduzida por si e por Arumugam, introduzindo o parâmetro  $\beta$ , que representa a quantidade de ar presente na água, e ajustando os diferentes expoentes.

$$D = 3,39 \frac{q^{0,60} (1 + \beta)^{0,30} h^{0,16}}{g^{0,30} d_m^{0,06}} \quad (2.38)$$

$$d_m = 0,25 \text{ m} \quad (2.39)$$

b) Hoffmans (1998)

$$D = c_{2v} \sqrt{\frac{q U \sin \alpha'}{g}} \quad (2.40)$$

$$d_{90} < 0,0125 \text{ m} \rightarrow c_{2v} = \frac{20}{(D_{90}^*)^{1/3}} \quad (2.41)$$

$$d_{90} \geq 0,0125 \text{ m} \rightarrow c_{2v} = 2,9 \quad (2.42)$$

c) Zhang *et al.* (2014)

Mais recentemente, Zhang *et al.* (2014) desenvolveram uma equação com base num modelo numérico, de Mecânica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD na sigla inglesa). A técnica CFD considera as condições hidráulicas e morfológicas mais complexas, o que justifica a diferença entre o recurso aos tradicionais estudos experimentais em modelos físicos e o método levado a cabo no estudo destes autores. No entanto, nos modelos numéricos existem erros associados à necessidade de proceder a aproximações de alguns parâmetros (Zhang *et al.*, 2014).

A relação entre a velocidade máxima na simulação numérica e a profundidade máxima da escavação é exposta na seguinte equação:

$$D = 0,179 U^{1,29} P^{1,8} \quad (2.43)$$

O parâmetro  $P$  representa a resistência à erosão oferecida pelo leito que, no caso em questão, toma o valor de 1,8.

Para além da profundidade máxima, alguns autores desenvolveram expressões para caracterizar as dimensões em planta da fossa de erosão,  $B_s$  e  $L_s$ , assim como a posição da fossa máxima no perfil longitudinal,  $L^*$ . Apresentam-se a seguir algumas das expressões existentes:

a) Ghodsian *et al.* (1999)

$$\frac{B_s}{h} = 2,83 \left( \frac{q}{\sqrt{g} h^3} \right)^{0,225} \left( \frac{d_{50}}{h} \right)^{-0,188} \left( \frac{H}{h} \right)^{0,62} \quad (2.44)$$

$$\frac{L^*}{h} = 2,5 \left( \frac{q}{\sqrt{g} h^3} \right)^{0,122} \left( \frac{d_{50}}{h} \right)^{0,127} \left( \frac{H}{h} \right)^{0,581} \quad (2.45)$$

b) Ghodsian *et al.* (2012)

$$\frac{B_s}{h} = 8,44 (Fr_{d90})^{0,25} \left( \frac{H_c}{R} \right)^{-0,77} \left( \frac{B}{b} \right)^{0,10} \left( \frac{h}{H_c} \right)^{-1,01} \quad (2.46)$$

$$\frac{L_s}{h} = 2,22 (Fr_{d90})^{0,27} \left( \frac{H_c}{R} \right)^{-0,54} \left( \frac{B}{b} \right)^{0,38} \left( \frac{h}{H_c} \right)^{-1,13} \quad (2.47)$$

$$\frac{h_m}{h} = 0,69 (Fr_{d90})^{0,2} \left( \frac{H_c}{R} \right)^{-0,7} \left( \frac{B}{b} \right)^{0,45} \left( \frac{h}{H_c} \right)^{-0,76} \quad (2.48)$$

c) Martins (1984)

$$B_s = 1,6 \sqrt[4]{D^3(D-h)} \quad (2.49)$$

$$L_s = (0,8 + 2 \cos \alpha) \sqrt[4]{D^3(D-h)} \quad (2.50)$$

Estas expressões só são válidas nas seguintes condições:

$$\frac{L_s}{D-h} = 2 - 6 \quad (2.51)$$

$$\frac{D}{D-h} = 1,5 - 5 \quad (2.52)$$

$$\frac{B_s}{D-h} = 2 - 5 \quad (2.53)$$

$$\alpha = 40^\circ - 70^\circ \quad (2.54)$$

d) Azmathullah *et al.* (2004)

$$\frac{L^*}{h} = 9,85 \left( \frac{q}{\sqrt{gh^3}} \right)^{0,42} \left( \frac{d_{50}}{h} \right)^{0,037} \left( \frac{H}{h} \right)^{0,28} \left( \frac{R}{h} \right)^{0,043} \alpha^{0,3466} \quad (2.55)$$

$$\frac{B_s}{h} = 5,42 \left( \frac{q}{\sqrt{gh^3}} \right)^{-0,015} \left( \frac{d_{50}}{h} \right)^{0,242} \left( \frac{H}{h} \right)^{0,55107} \left( \frac{R}{h} \right)^{0,1396} \alpha^{-0,16} \quad (2.56)$$

e) Naini (2011)

$$\frac{L^*}{h} = 2,599 \left( \frac{q}{\sqrt{gh^3}} \right)^{0,273} \left( \frac{d_{50}}{h} \right)^{0,01} \left( \frac{H}{h} \right)^{0,523} \left( \frac{R}{h} \right)^{0,034} \alpha^{-0,962} \quad (2.57)$$

$$\frac{L_s}{h} = 11,761 \left( \frac{q}{\sqrt{gh^3}} \right)^{0,656} \left( \frac{d_{50}}{h} \right)^{0,02} \left( \frac{H}{h} \right)^{0,2} \left( \frac{R}{h} \right)^{0,011} \alpha^{0,01} \quad (2.58)$$

$$\frac{B_s}{h} = 169,385 \left( \frac{q}{\sqrt{gh^3}} \right)^{0,01} \left( \frac{d_{50}}{h} \right)^{0,891} \left( \frac{H}{h} \right)^{0,01} \left( \frac{R}{h} \right)^{0,096} \alpha^{1,675} \quad (2.59)$$

A definição dos limites de validade de cada equação é essencial para que numa posterior análise, se possa concluir acerca da conformidade, ou não, entre os valores obtidos através das expressões listadas e os resultados obtidos no modelo físico.

Apesar de não ter sido possível definir os limites para todos os autores, apresenta-se no Quadro 2.4 um resumo das condições de validade das expressões, aplicadas em modelo ou protótipo, dependendo do autor.

Quadro 2.4 – Limites de aplicação das equações.

Autor	Expressão	Aplicação	$d$ (mm)	$h$ (m)	$H$ (m)	$q$ (m <sup>2</sup> /s)	$\alpha$ (rad)	R (m)
Schoklitsch (1935)	(2.9)	Modelo	0,5-15	-	0,06-0,32	0,009-0,07	-	-
Veronese (1937)	(2.9)	Protótipo	-	-	12-99,27	12,10-275	-	-
Hartung (1959)	(2.9)	Modelo	2,4-9,7	-	0,01-0,14	0,006-0,037	-	-
Damle (1966)	(2.9)	Modelo e Protótipo	-	1,5-4,3	27,3-50,5	7,7-22,1	-	-
Mason & Arumugam (1985)	(2.12)	Modelo e protótipo	1-41	0,03-42	0,33-109	0,009-220	0,4-1,5	-
Ghodsian (1999)	(2.17), (2.44) e (2.45)	Modelo	2,9-15,6	0,05-0,25	0,263-0,506	0,01-0,04	-	-
Heng <i>et al.</i> (2013)	(2.18)	Modelo	-	0,179-0,536	-	-	-	-
Mikhalev (1960)	(2.20)	Modelo e Protótipo	2-40	-	-	-	-	-
Azmathullah <i>et al.</i> (2004)	(2.32), (2.55) e (2.56)	Modelo	2-8	0,028-6-0,265	0,279-1,796	0,0089-0,204	0,174-0,78	0,1-0,6096
Naini (2011)	(2.33), (2.57) a (2.59)	Modelo	0,2-6	0,06-0,265	1,129-1,404	0,0196-0,0758	0,451	0,1
Mason (1989)	(2.38)	Modelo	5-10	-	0,33-2	0,02-0,07	-	-

Ghodsian *et al.* (2012) apresentam os limites de aplicação de uma forma distinta, como se pode visualizar no Quadro 2.5.

Quadro 2.5 – Limites de aplicação da equação de Ghodsian *et al.* (2012) – expressões (2.34), (2.46) a (2.48).

	$Fr_{90}$	$h/H$	$H/R$	$B/b$
Modelo	2,77-7,68	0,344-0,45	0,0013-0,0053	8,33
Protótipo	0,35-1,95	0,31-1,286	0,59-8,44	1-1,33



# 3

## INSTALAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 3.1. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Os ensaios experimentais foram realizados no modelo reduzido de um descarregador em degraus convergente, equipado com um trampolim em salto de esqui, existente no Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (SHRHA) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

A instalação, que funciona em circuito fechado (Figura 3.1), é composta por dois reservatórios de alimentação, R1 e R2 (Figura 3.2a), a partir dos quais a água é bombeada para um conjunto de tubagens que permitem a alimentação do reservatório de tranquilização, R3 (Figura 3.2b) situado a montante do descarregador em degraus. O caudal é, posteriormente, escoado pelo descarregador em degraus até à bacia de restituição e ao reservatório de recolha de jusante, R4 (Figura 3.2c), a partir do qual é realizada a bombagem por meio de uma bomba submersível para os reservatórios de alimentação R1 e R2.

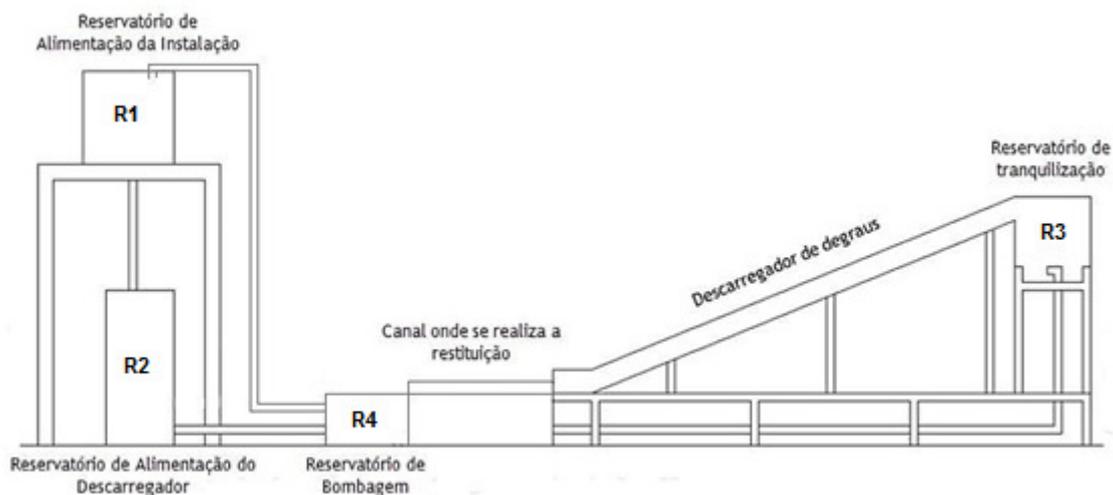


Figura 3.1 – Esquema da instalação experimental utilizada (Machado, 2016).

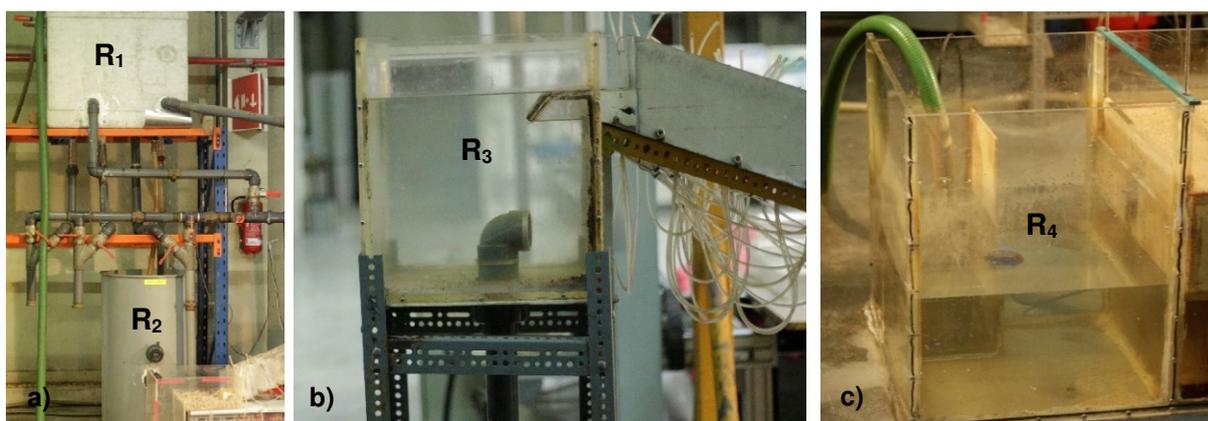


Figura 3.2 – (a) Reservatórios de alimentação superior R1 e inferior R2. (b) Reservatório de tranquilização (R3). (c) Reservatório de recolha e bombagem (R4).

O modelo do descarregador de cheia, construído à escala 1:40, é composto por vinte e seis degraus, com 3,75 cm de altura e 10 cm de comprimento cada, totalizando numa altura total de cerca de 1 m e num comprimento total de 2,60 m. O descarregador é do tipo convergente cuja largura se reduz de 15 cm na secção inicial até 5 cm na secção intermédia, sendo mantida constante a partir daí até à secção de jusante.

Para o presente estudo foram preparados modelos de trampolim em salto de esqui com ângulos de saída de 10° e 15°. Estes modelos foram realizados em betão, para aplicação na extremidade de jusante do descarregador. Para efeitos de comparação e verificação das condições de ensaio, também foram realizados ensaios com o trampolim de saída com 20°, utilizada por Machado (2016), e cujo esquema se apresenta no Anexo A. Os modelos com 10° e 15° foram concebidos e construídos no âmbito do presente estudo, de acordo com os esquemas apresentados na Figura 3.3.

A zona de restituição a jusante do descarregador (Figura 3.4) foi simulada numa bacia construída com placas de Perspex de 0,705 cm de largura, 1,5 m de comprimento e 0,70 m de altura, equipada a jusante com uma placa amovível de parede delgada, também de perspex. Esta placa permite regular a altura do colchão de água, amentando ou diminuindo o grau de amortecimento do impacto do jato no leito, e simulando, desta forma, o efeito designado por contra-embalse existente no protótipo.

No interior da bacia foi instalada uma placa de Perspex, sobre a qual foi colocado um material granular não coerente para obter um fundo móvel.

Para a caracterização dos fenómenos ocorrentes no presente estudo optou-se por utilizar o modelo de semelhança de Froude, definido pelo quociente entre as forças de inércia e as forças de gravidade, de acordo com a equação:

$$Fr = \frac{U_0}{\sqrt{g h_0}} \quad (3.1)$$

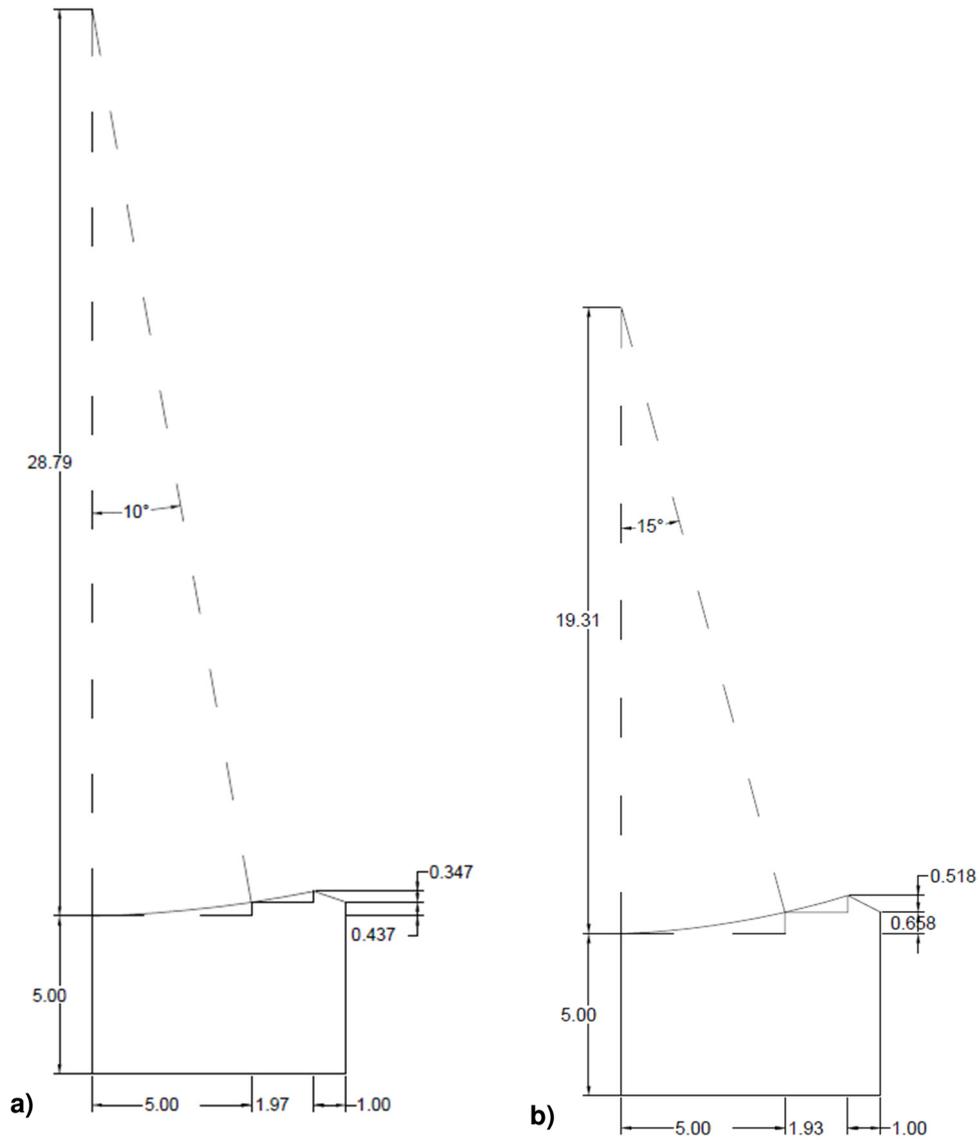


Figura 3.3 – Esquemas dos trampolins em salto esqui com  $\alpha = 10^\circ$  (a) e  $\alpha = 15^\circ$  (b). As medidas estão apresentadas em centímetros.

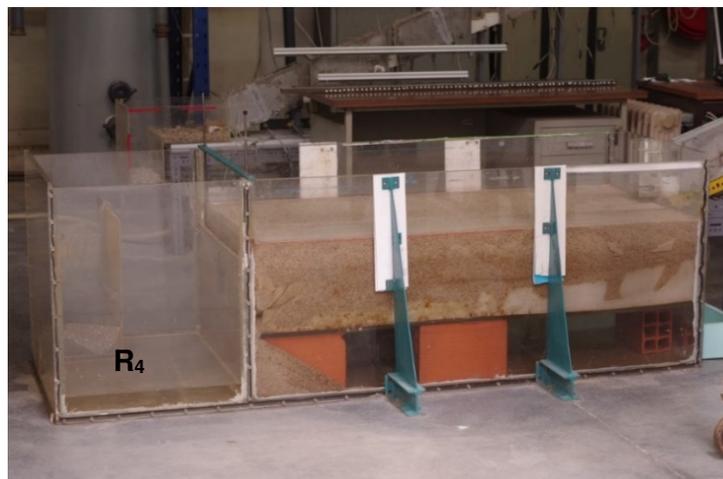


Figura 3.4 – Bacia de restituição e reservatório de bombagem, R4.

### 3.2. CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL UTILIZADO PARA O FUNDO MÓVEL

O fundo móvel foi realizado com um material do tipo granular, de espessura 0,20 m e de uma massa volúmica de  $2650 \text{ kg/m}^3$ , cuja curva granulométrica é representada na Figura 3.5. As dimensões características do material granular utilizado são  $d_{50} = 0,992 \text{ mm}$ ,  $d_{85} = 1,75 \text{ mm}$  e  $d_{90} = 1,855 \text{ mm}$  e foi obtido um coeficiente de dispersão  $\sigma_g = 1,68$ .

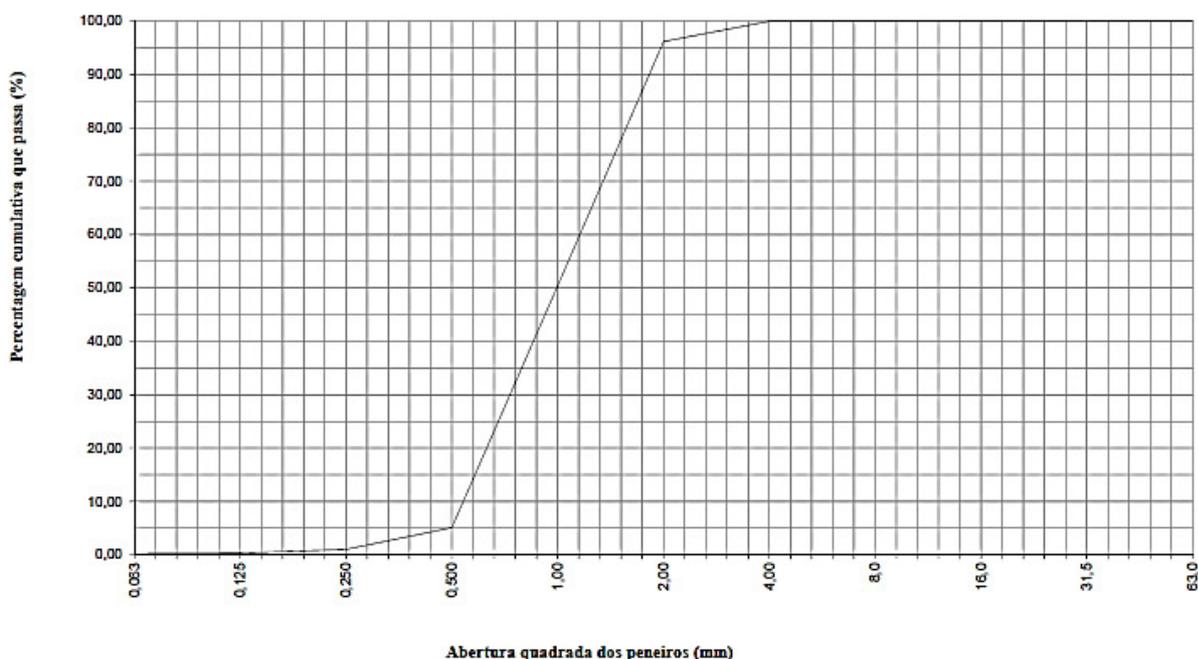


Figura 3.5 – Curva granulométrica do material granular utilizado nos ensaios experimentais (Machado, 2016).

### 3.3. METODOLOGIA ADOTADA NA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Na realização dos ensaios referentes ao presente estudo, foram adotados alguns procedimentos, para obter as diferentes condições a serem ensaiadas. Nomeadamente:

- Acerto da válvula para diferentes caudais, 0,51, 0,71 e 0,85 L/s;
- Ajuste da comporta a jusante da bacia de restituição para as alturas de 1, 3 e 5 cm, definindo deste modo a altura do colchão de água pretendido;
- Adaptação da peça que simula o trampolim de saída no salto de esqui, para os diferentes ângulos de saída,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  e  $20^\circ$ ;
- Ajuste e nivelamento do tripé, que dá suporte à máquina fotográfica, à uma distância de 1,20 m da bacia de restituição e à uma altura de 0,70 m do pavimento, aproximadamente. A posição do tripé foi mantida para todos ensaios.

A seguinte metodologia foi utilizada para garantir não só a repetibilidade do estudo experimental, mas também a aquisição de uma base de dados experimental consistente:

- Movimentação, compactação e nivelamento do material do leito, com o auxílio de um nível, assegurando assim as mesmas condições iniciais relativas ao leito;

- Enchimento da bacia de dissipação para obter um colchão de água com a altura da comporta previamente definida;
- Captação das imagens da trajetória do jato, ao longo do ensaio, com um espaçamento de 12 minutos entre cada fotografia;
- Realização de vídeos da trajetória do jato, vista de planta, em alguns instantes ao longo do ensaio, de forma a observar a evolução da barra,
- Fim do ensaio passados 2 horas, interrompendo o circuito fechado;
- Captação de várias imagens, em torno da cavidade de erosão resultante, com objetivo de se obter um modelo 3D da fossa, de acordo com os métodos utilizados e descritos mais à frente na secção 3.4.3;
- Determinação do perfil longitudinal da cavidade de erosão, utilizando uma régua de pente, e comparação com o modelo 3D obtido.

É importante realçar que o modo como o leito é nivelado tem influência no desenvolvimento da erosão ao longo do ensaio, podendo um incorreto nivelamento do leito resultar numa configuração assimétrica da escavação.

### **3.4. EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO**

#### **3.4.1. MEDIÇÃO DE CAUDAIS**

Para medir os caudais necessários à realização dos ensaios nas diferentes condições, recorreu-se a um caudalímetro eletromagnético (Figura 3.6), da marca Fisher&Porter, modelo MAG-XE, instalado na tubagem entre o reservatório de alimentação R1 e o reservatório de tranquilização R3.



Figura 3.6 – Caudalímetro eletromagnético, modelo MAG-XE.

Com este aparelho de medição é possível fazer a leitura direta de valores instantâneos dos caudais escoados no seu próprio visor, e através de um sistema de aquisição de dados, constituído por uma placa National Instruments NI USB-6009, conectada a um computador Intel® Pentium® CPU 3.00GHz. O registo dos dados medidos é realizado através do software LabView 8.6 e exportados para um ficheiro Excel.

O sistema de aquisição auxilia num maior controlo dos caudais durante o ensaio, uma vez que é muito difícil manter o valor do caudal constante. As oscilações dos caudais escoados dependem de diversos fatores que são difíceis de controlar, nomeadamente o nível do reservatório de alimentação inferior (R2),

e do reservatório de bombagem (R4) uma vez que a bombagem não ocorre de forma constante, bem como erros associados ao próprio caudalímetro, entre outros.

No presente estudo fizeram-se, para cada ensaio, 12 aquisições compostas por 1000 amostras cada. Para cada aquisição dos sinais do caudalímetro, é exportado um ficheiro em Excel, que serviu na obtenção da média,  $\bar{x}$ , e do desvio padrão,  $\sigma$ , de cada aquisição. A média das 1000 amostras é, por sua vez, convertida em caudal usando a curva de calibração, conforme descrito mais à frente. E por fim pode-se obter a média dos caudais e os respetivos intervalos, superior e inferior ( $\bar{x} \pm \sigma$ ), das doze aquisições referente a cada ensaio experimental realizado, permitindo assim reduzir a incerteza dos resultados.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} x_i}{N} \quad (3.3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (3.4)$$

em que  $N$  é o número de amostras e  $x_i$  é o valor da variável na amostra  $i$ .

#### 3.4.2. REGISTO DE TRAJETÓRIAS REAIS DE JATOS E MEDIÇÃO DE ALTURAS DE ÁGUA POR TÉCNICA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS

Nos ensaios realizados no presente estudo verificou-se, como era de se esperar, que o jato à saída do trampolim tem um formato bastante irregular e com uma emulsão de ar, o que dificulta a delimitação da trajetória do jato, como se pode verificar nas fotografias da Figura 3.7.

Utilizou-se um código em Matlab, desenvolvido anteriormente (Machado, 2016), que permite obter uma imagem média do jato, através da sobreposição de  $N$  imagens, capturadas ao longo de cada ensaio. Na Figura 3.8 apresenta-se, como exemplo, a imagem que traduz o jato médio obtido a partir das doze imagens da Figura 3.7.

Uma vez calculada a imagem média, passou-se ao tratamento da mesma, à semelhança de Machado (2016). Este método tem por base a técnica de aquisição de imagens, designada por TAI, desenvolvida por Aleixo e Proença (2007), e permitiu a determinação da trajetória do jato e da altura da água acima do trampolim de saída,  $h_0$ .

Algumas precauções e medidas tomadas, antes de dar início ao ensaio, foram muito importantes na aplicação da TAI. Começando pelas alterações nas definições da própria máquina, como aumento da velocidade de obturação, que permitiu uma melhor definição do jato, o uso do temporizador (*time lapser*), que fez com que a captação das imagens fossem feitas de forma automatizada, para que o aparelho ficasse o mais imóvel possível, a alteração para o foco manual, para que a imagem do jato ficasse mais nítida possível, facilitando a aplicação do método. Para garantir uma boa iluminação do local utilizaram dois projetores, posicionados um em cada margem do leito de erosão, um à saída do trampolim e outro a seguir ao reservatório de bombagem, de frente um do outro.

É de se referir ainda que, no caso em estudo, foram utilizadas duas máquinas fotográficas diferentes, a Pentax K3 com 24 Mpixels de resolução numa primeira fase e posteriormente uma Canon EOS 7D Mark II com 20.2 Mpixels de resolução, ambas munidas de uma lente de 50 mm.



Figura 3.7 – Sequência de fotografias do jato obtidas num dos ensaios experimentais realizados ( $\alpha = 20^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 3$  cm).



Figura 3.8 – Exemplo de uma imagem média do jato, obtida a partir das imagens representas na Figura 3.7, através do código escrito em Matlab ( $\alpha = 20^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 3$  cm).

### 3.4.2.1. Registo de trajetórias reais de jatos

No tratamento da imagem média utilizaram-se ferramentas desenvolvidas em Matlab, que permitem definir as coordenadas da trajetória do jato (Figura 3.9) e o GIMP (programa freeware para processamento de imagens), utilizado para determinar o fator de conversão de pixéis para unidades físicas, isto é, em metros e na determinação do alcance do jato. Estas ferramentas, de fácil aplicação, são disponibilizadas na plataforma da universidade, dispensando a mobilização de grandes recursos.

Utilizando o código desenvolvido em Matlab e a imagem média obtida anteriormente e com base nos mesmos procedimentos já utilizados em Machado (2016), obtém-se um ficheiro em Excel com as coordenadas da trajetória média, com as devidas conversões em unidades físicas (Figura 3.10). Para não haver distorção da escala, ambos os elementos deverão estar posicionados no mesmo plano e em foco.

A calibração das imagens foi realizada por intermédio das dimensões conhecidas de alguns elementos da instalação, presentes na imagem. Assumindo que  $x_0$  e  $y_0$  representam as dimensões físicas conhecidas (horizontal e vertical), que  $i_0$  e  $j_0$  correspondem às dimensões em pixéis (horizontal e vertical) e que a distorção da lente é nula, é possível definir os fatores lineares de calibração, horizontal,  $\beta_x$ , e vertical,  $\beta_y$ .

$$\beta_x = \frac{x_0}{i_0} \quad (3.5)$$

$$\beta_y = \frac{y_0}{j_0} \quad (3.6)$$

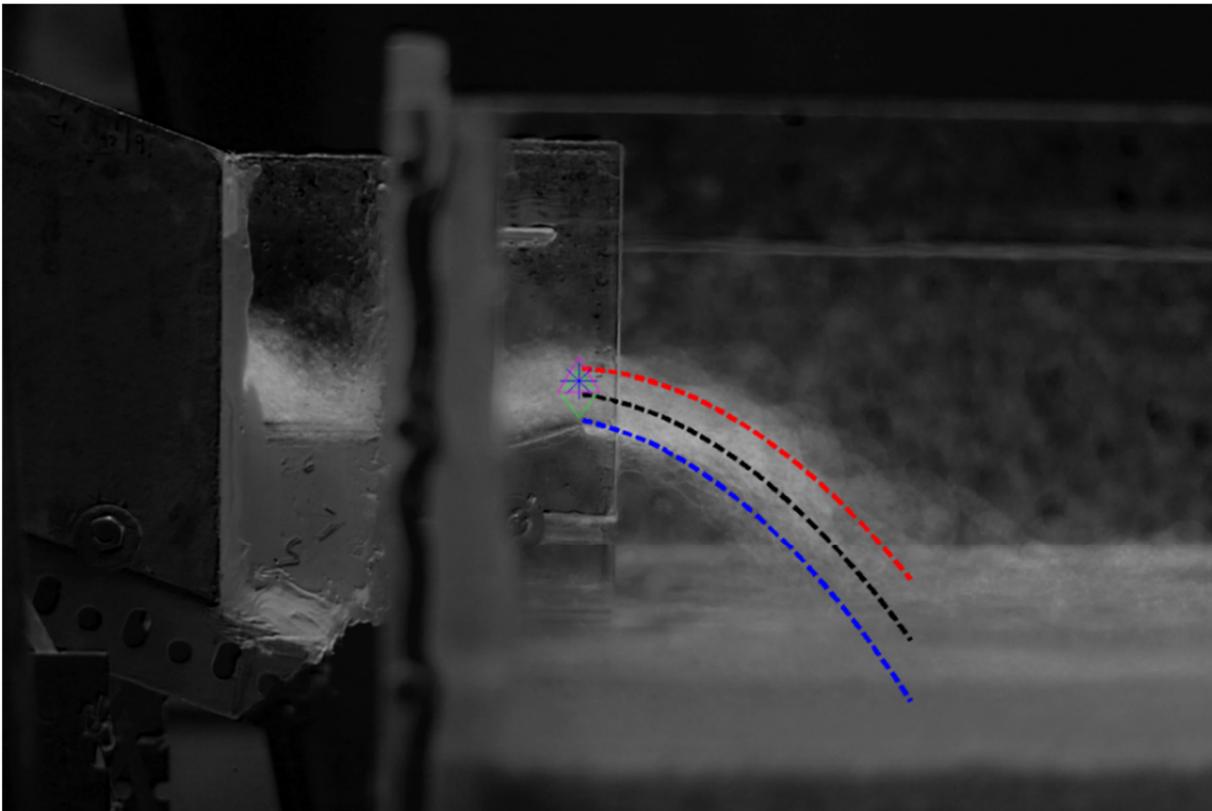


Figura 3.9 - Trajetórias superior, média e inferior exportada no Matlab ( $\alpha = 20^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 3$  cm).

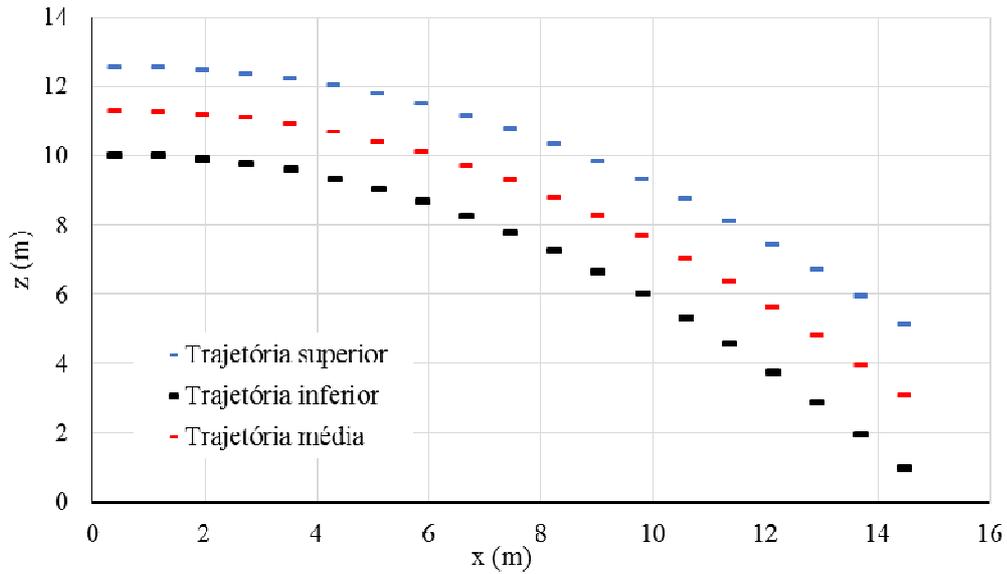


Figura 3.10 – Trajetórias superior, média e inferior obtida no Excel com os valores exportados do programa ( $\alpha = 20^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 3$  cm).

#### 3.4.2.2. Medição do alcance do jato

A determinação do alcance do jato também teve como base a imagem média obtida a partir do código escrito em Matlab e o GIMP, permitindo medir diretamente na imagem a distância entre a secção de saída do trampolim e a trajetória média do jato na interseção com o colchão de água, tal como em Machado (2016), como mostra a Figura 3.11.

Com o valor do alcance do jato medido fez-se uma análise comparativa com os valores calculados através das expressões (2.1) e (2.2).

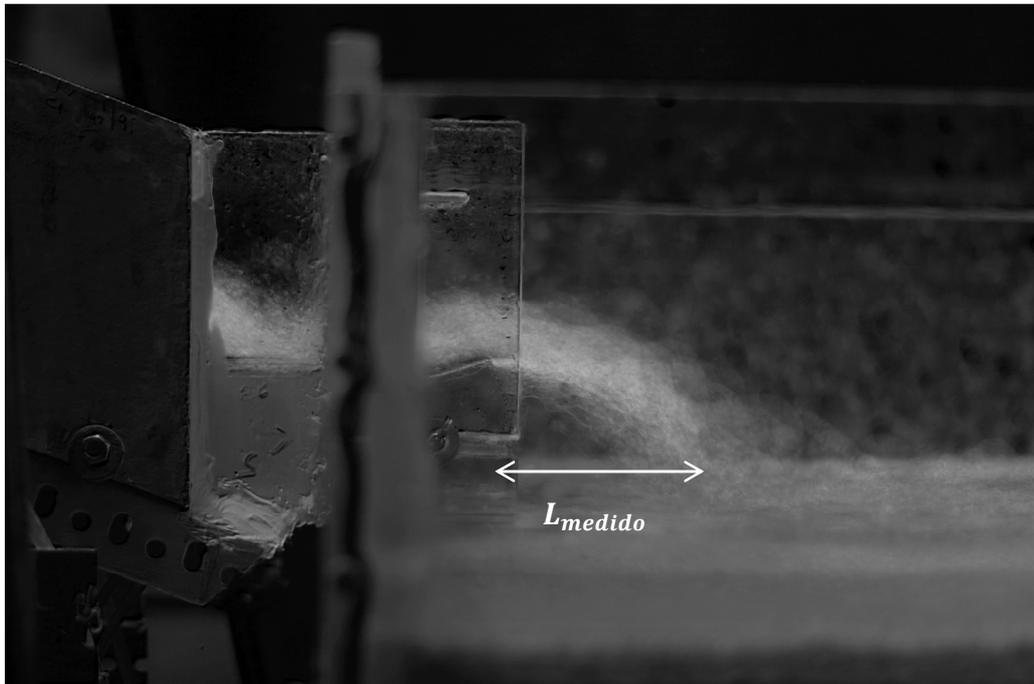


Figura 3.11 – Critério utilizado para a medição do alcance do jato – distância, na horizontal, entre a secção de saída do trampolim e a secção média do jato na zona de incidência.

### 3.4.2.3. Medição de alturas de água.

O valor da altura de água na secção de saída do trampolim em salto de esqui,  $h_0$ , permite calcular, a partir do valor do caudal, a velocidade média do escoamento na referida secção,  $U_0$ , necessária para o cálculo do alcance do jato.

No estudo realizado por Machado (2016), foram utilizados 3 métodos distintos para a medição de  $h_0$ . O primeiro método baseia-se na média das envolventes da trajetória do jato, o segundo método consiste na seleção de um ponto no perfil de intensidade luminosa, e por fim no terceiro método obtém-se o valor do  $h_0$  a partir do cálculo do integral do perfil de intensidade luminosa.

No presente estudo optou-se por eliminar o primeiro método, com base nos resultados obtidos por Machado (2016), uma vez que originou piores resultados, mantendo-se, para validação, os restantes dois métodos na análise preliminar dos resultados obtidos, conforme apresentado no Capítulo 4.

A metodologia utilizada no segundo método consiste na seleção do ponto a partir do qual a intensidade luminosa começa a decrescer mais acentuadamente (Figura 3.12). 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 apresentando, por isso, um critério de seleção universal. Na Figura 3.12 apresenta-se um exemplo da aplicação deste método para uma condição de escoamento estudada.

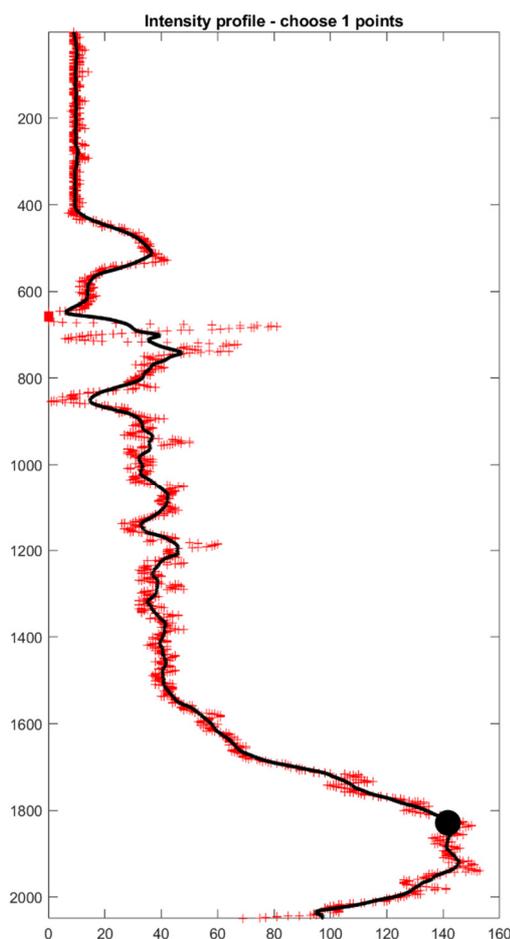


Figura 3.12 – Exemplo de seleção do ponto no perfil de intensidade, representada pela bolinha a negrito – segundo método ( $\alpha = 20^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 3$  cm).

O terceiro método por sua vez apoia-se apenas no cálculo do integral, por forma a determinar o ponto em que a área se iguala à metade da área total do perfil de intensidade, obtendo-se assim o ponto médio do jato. Para tal, torna-se necessário definir o limite de integração no referido perfil, que corresponde ao ponto de altura de água máxima na imagem, representado na Figura 3.13.

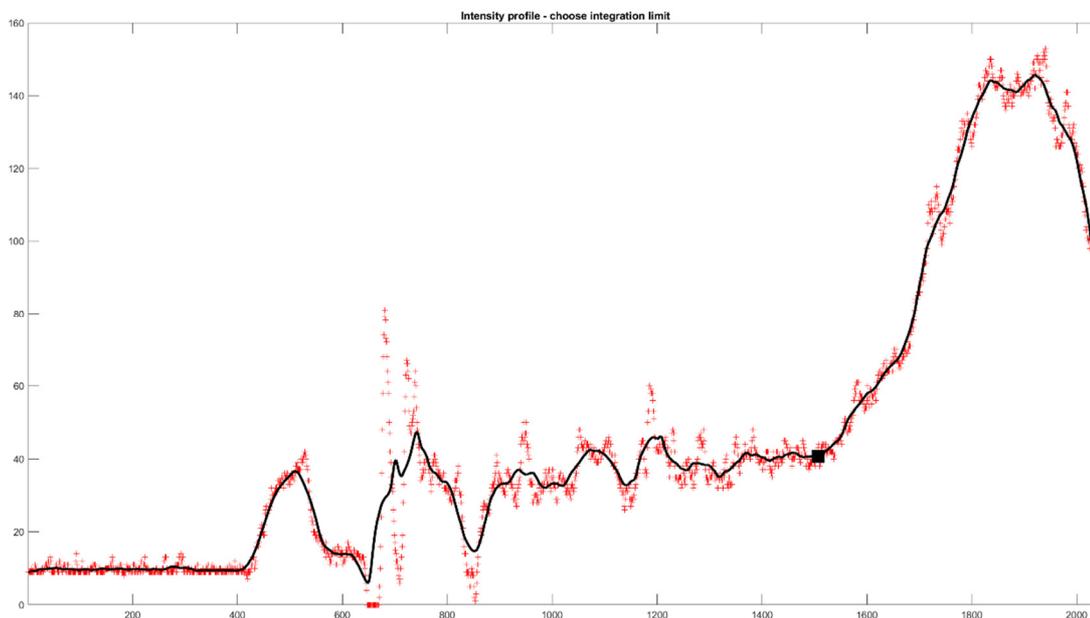


Figura 3.13 – Definição do limite de integração representada pelo quadrado a negro – terceiro método ( $\alpha = 20^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 3$  cm).

### 3.4.3. ANÁLISE DA CAVIDADE DE EROSIÃO E FOTOGRAMETRIA NA DEFINIÇÃO DO MODELO 3D DA FOSSA

Na análise da cavidade de erosão foi utilizado o método *Structure from motion* (SfM). Este método ótico permite estimar estruturas tridimensionais a partir de um conjunto de imagens bidimensionais de um determinado sujeito. O SfM é frequentemente usado em diferentes campos como aplicativos de visão computacional e em fotogrametria, para obter informações 3D sobre pontos de referência geográficos.

Ao contrário de outros métodos tradicionais de fotogrametria, a abordagem do SfM dispensa o conhecimento da posição e localização da máquina fotográfica utilizada. A posição da máquina fotográfica e a geometria do objeto pretendido são reconstruídas simultaneamente através da identificação automática de pontos comuns correspondentes em várias imagens. Pontos comuns esses, que são rastreados de imagem para imagem, permitindo estimar iniciais de posições da máquina fotográfica e as coordenadas de objetos são refinadas de forma iterativa usando um algoritmo de minimização de mínimos quadrados não lineares.

Consequentemente, as nuvens de pontos tridimensionais são geradas num sistema de coordenadas de "espaço de imagem" relativo, que deve estar alinhado com um sistema de coordenadas do "mundo real" do espaço de objetos.

No presente estudo, a aplicação do SfM é feita para a determinação da geometria da cavidade de erosão gerada pelo jato. Este método é aplicado em três etapas através de três softwares distintos:

- 3DF Zephyr: que processa as imagens da fossa e gera o modelo 3D pretendido;
- MeshLab: referencia o modelo 3D obtido para um referencial de Oxyz e exporta a malha
- Rotinas escritas em MATLAB: para pós-processamento e visualização.

### 3.4.3.1. 3DF Zephyr

O 3DF Zephyr é um software comercial de fotogrametria. Neste estudo foi utilizada a versão de demonstração, cuja principal limitação diz respeito ao número de imagens de entrada (50) e às operações que podem ser feitas com o modelo 3D obtido (por exemplo, dimensões de medição).

Para a cavidade de erosão em estudo verificou-se que 50 imagens eram suficientes uma vez que, de acordo com alguns testes preliminares foram necessárias no mínimo 4 imagens para obter uma reconstrução do modelo 3D da fossa de erosão. No caso em estudo foram usadas entre 10 a 20 fotografias da fossa de erosão.

É importante mencionar que as coordenadas das imagens são definidas pelo software 3DF Zephyr, e requerem uma calibração, ou seja, a conversão de unidades de imagem para unidades físicas.

Na Figura 3.14 são apresentados alguns exemplos das várias imagens adquiridas ao fim de cada ensaio, ao redor da cavidade erodida. As imagens devem capturar o máximo de detalhes possíveis da forma que se pretende gerar, para que a reprodução da imagem 3D seja o mais próximo possível da forma real.

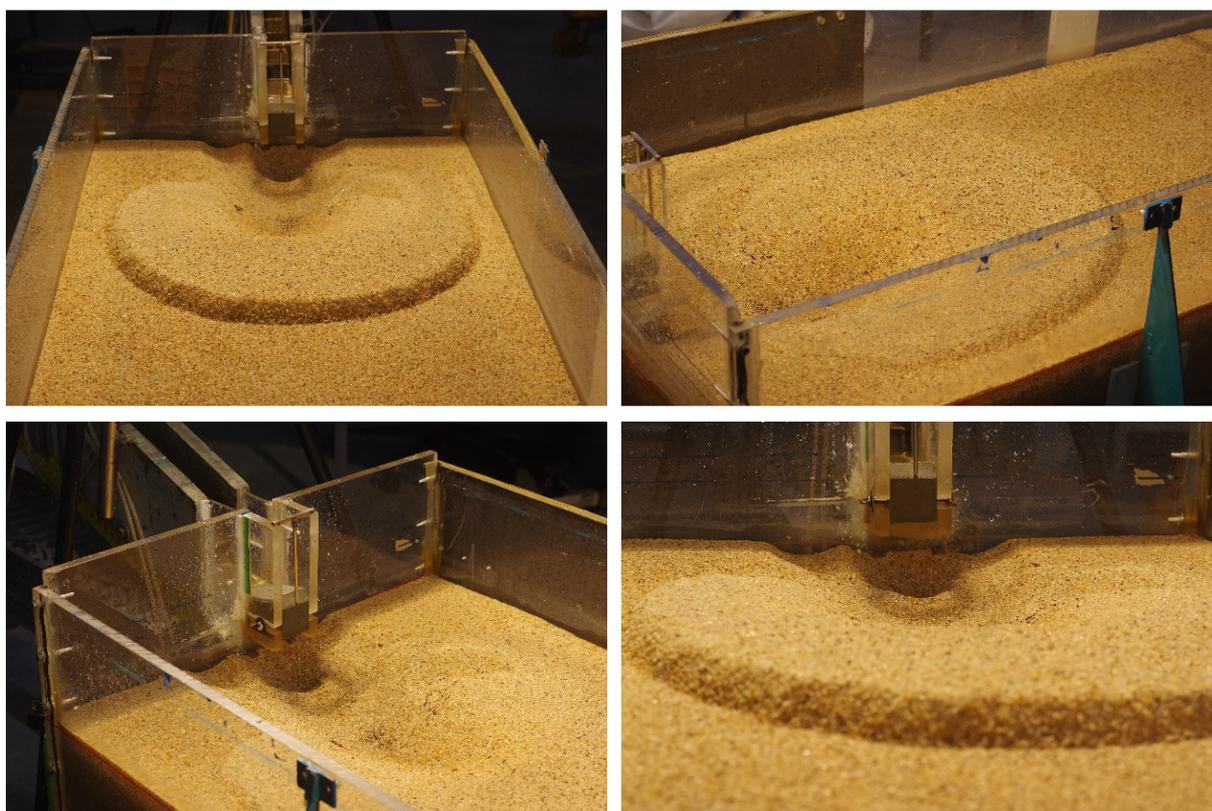


Figura 3.14 – Exemplos de fotos usadas na aquisição do modelo 3D.

De seguida são apresentados os modelos gerados pelo programa Zephyr nas diferentes fases de processamento, até a obtenção do modelo 3D pretendida. Numa primeira fase o programa importa as imagens seleccionadas e gera uma nuvem de pontos dispersos (Figura 3.15), depois gera uma nuvem densa de pontos, fornecendo mais informações da forma que se pretende obter (Figura 3.16). Posteriormente é extraída uma malha que une os pontos obtidos anteriormente (Figura 3.17) e por fim é

apresentado o modelo 3D com uma malha texturizada tornando-a mais próxima da realidade (Figura 3.18).

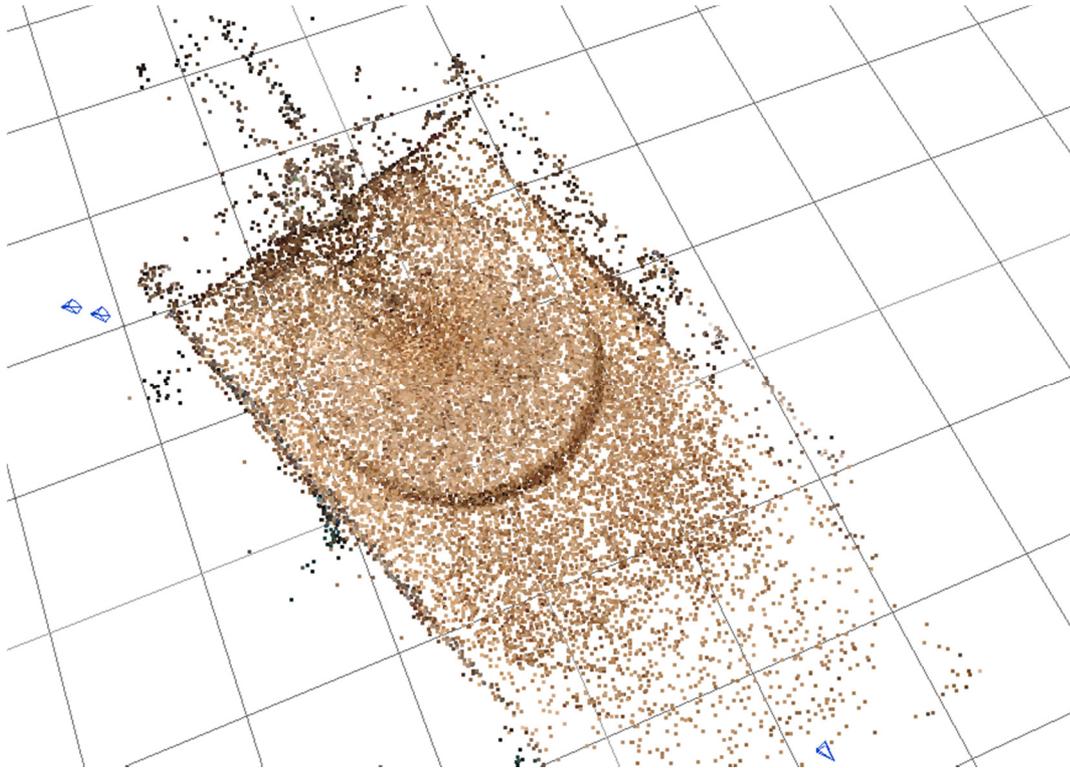


Figura 3.15 – Nuvem de pontos dispersados.



Figura 3.16 – Nuvem de pontos densos.



Figura 3.17 – Malha gerada.



Figura 3.18 – Malha texturizada.

#### 3.4.3.2. MeshLab

O Meshlab é um software disponível em [www.meshlab.net](http://www.meshlab.net), distribuído gratuitamente e é usado aqui para superar as limitações da versão de avaliação do 3DF Zephyr. O Meshlab é um software editor de malha que permite pós-processar uma malha de pontos obtida com o 3DF Zephyr. É possível executar

operações diferentes em uma malha, neste caso, as operações de interesse são o alinhamento, a seleção de secções particulares (por exemplo, a linha central) e a exportação.

O Meshlab importa a malha exportada do 3DF Zephyr no formato ply. A Figura 3.19 representa a malha importada. É então necessário alinhar a malha com o referencial  $Oxyz$ . A origem do referencial selecionada coincide com o ponto central do trampolim de saída em salto de esqui. Os perfis selecionados podem ser exportados como ficheiros ASCII para o Matlab, a fim de se converter em unidades físicas.

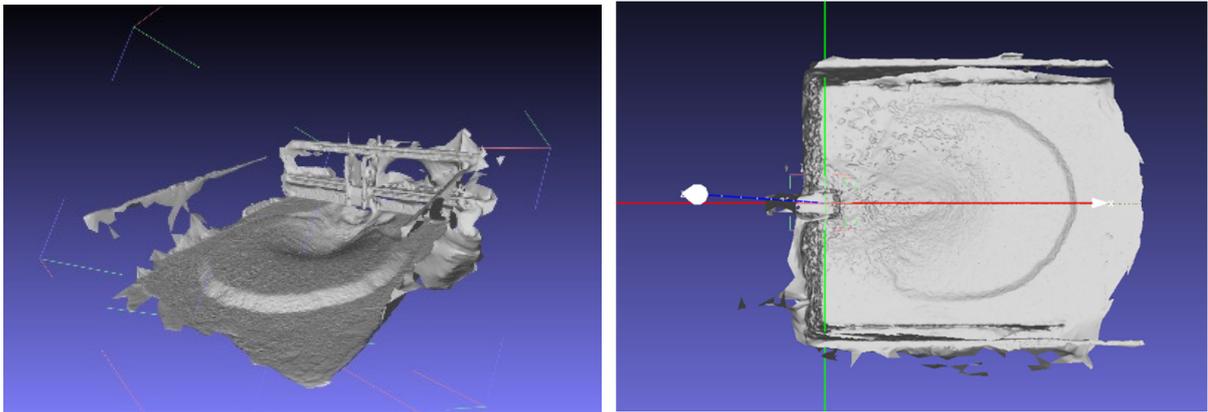


Figura 3.19 – Resultado do MeshLab onde a malha da fossa de erosão está alinhada e origem onde está localizada, no ponto central do trampolim de saída.

#### 3.4.3.3. Rotinas MATLAB

Vários códigos em Matlab foram utilizados para realizar diferentes operações nos perfis exportados, com o objetivo de obter a conversão em unidades físicas, a visualização tridimensional e, por fim, a determinação dos volumes de sedimentos erodidos e depositados. A Figura 3.20 representa um exemplo de comparação do perfil obtido a partir do Meshlab, para  $y = 0$  (linha central), com o perfil medido através da régua de pente na instalação experimental (descrição da metodologia na Subsecção 3.6.3) enquanto a Figura 3.21 ilustra a escavação 3D e a sua projecção em planta.

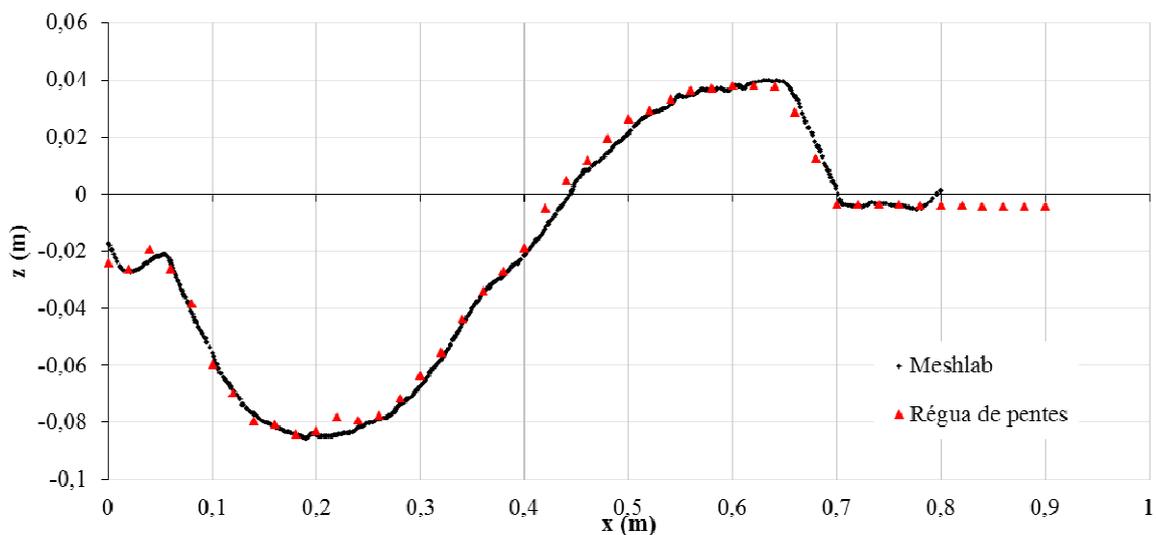


Figura 3.20 – Perfil extraído com Meshlab (linha contínua) e a medição de perfil feita com a régua de pente (pontos vermelhos):  $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 5$  cm.

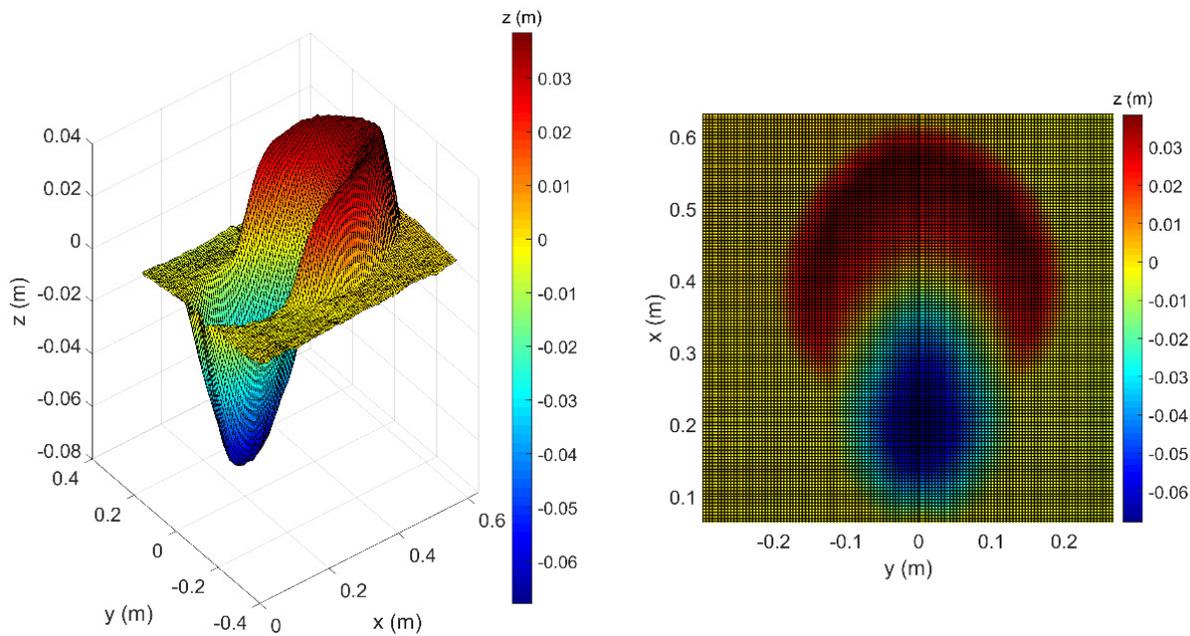


Figura 3.21 - Escavação 3D e a sua projeção em planta.

A Figura 3.22 mostra um exemplo da área de interesse selecionada, a partir da qual se calculam os volumes da escavação e da barra aplicando o método dos trapézios. Para simplificar o processo, o cálculo dos volumes erodidos e depositados é feito em duas etapas. Na primeira etapa considera-se apenas a região onde a cota do leito é negativa, isto é, onde o material foi escavado, impondo a restante zona de interesse a zero (Figura 3.23a). A grelha representada indica a divisão em áreas para cálculo do volume a partir do conhecimento da cota (indicada pela cor). De maneira semelhante o cálculo do volume da barra realiza-se usando o mesmo método, mas selecionando apenas a região cuja cota é superior a zero como indicado na Figura 3.23b). O método dos trapézios é igualmente usado para o cálculo do volume de material depositado usando o mesmo procedimento descrito anteriormente.

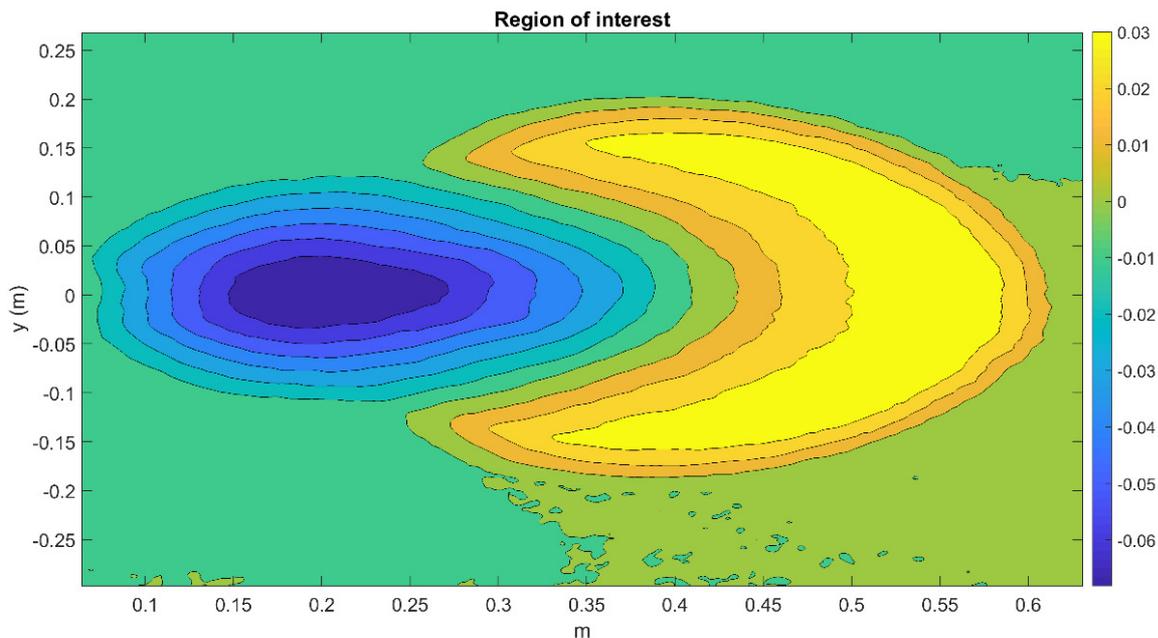


Figura 3.22 – Exemplo da área de interesse selecionada para o cálculo dos volumes.

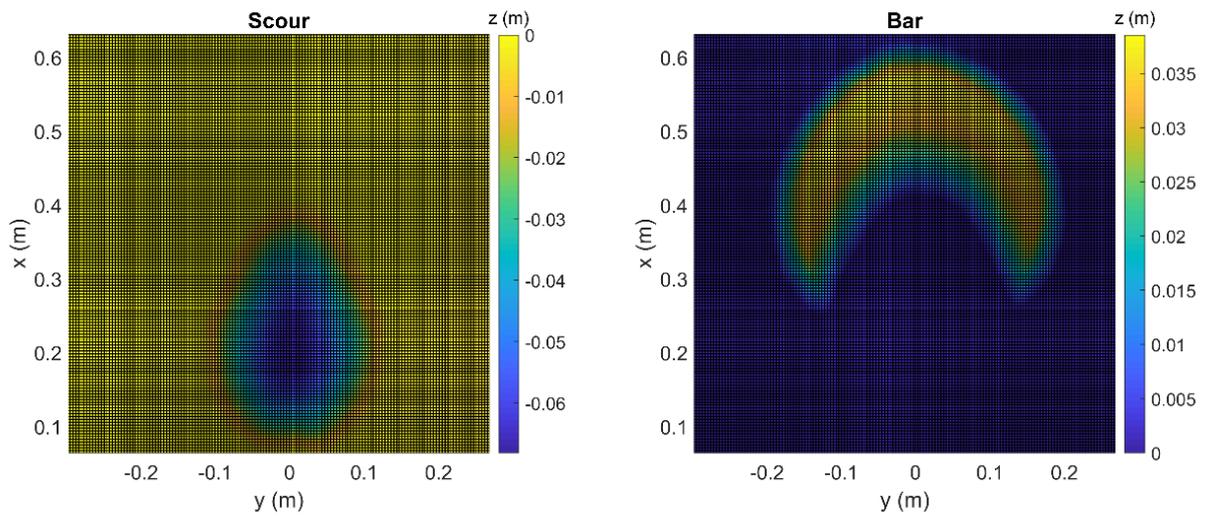


Figura 3.23 – Áreas de base para o cálculo dos volumes da escavação e da barra.

#### 3.4.4. VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO

Para verificar o correto alinhamento da cavidade de erosão, foram realizadas experiências de visualização do escoamento. Foram assim colocadas partículas esféricas de esferovite no reservatório de tranquilização, R3, a montante do descarregador.

As imagens foram adquiridas a uma frequência de 60 imagens por segundo com uma *Turnigy ActionCam*, uma câmara de ação, colocada acima da bacia de dissipação. Devido a sua lente grande angular, as imagens adquiridas são fortemente distorcidas, como se pode observar na Figura 3.24.



Figura 3.24 – Exemplo de imagem adquirida usando a Turnigy ActionCam.

A distorção foi corrigida por meio de um programa escrito em Matlab e os resultados podem ser vistos na Figura 3.25. A distorção foi corrigida, mas a imagem ainda precisa ser rodada para que a bacia de

dissipação seja alinhada com as bordas da imagem. Como essa etapa não é crítica para a análise, ela não foi executada aqui.



Figura 3.25 – Exemplo de imagem adquirida usando a Turnigy ActionCam e a distorção corrigida.

Para processar as imagens para visualização, é aplicado o seguinte procedimento:

- Em determinados instantes selecionados, um conjunto de onze imagens são selecionadas;
- A mediana desse conjunto de imagens é determinada e usada para fins de visualização. A mediana é usada, pois é menos sensível a valores extremos do que a média.

Na Figura 3.26 mostra-se a visualização do escoamento para diferentes instantes. Como se pode verificar, a distribuição de traçadores é bastante simétrica, indicando que o escoamento é bem distribuído. Na visualização constatou-se que existem duas zonas de recirculação junto aos cantos da bacia junto ao descarregador, o que faz com que as partículas permaneçam mais tempo nesta zona.

As mesmas experiências de visualização, quando realizadas sem os traçadores, permitem igualmente analisar a evolução da cavidade de erosão no tempo, como ilustrado na Figura 3.27 para a condição definida por  $\alpha = 20^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 3$  cm.

Como exemplo, é possível, a partir destas imagens, identificar a extremidade da barra e seguir a sua evolução temporal, como ilustrado na Figura 3.28. A partir desta figura é possível calcular a celeridade de propagação da barra,  $c$ , sabendo que  $c = \Delta x / \Delta t$ . O resultado é ilustrado na Figura 3.29. Estas figuras exemplificativas do que pode ser feito usando a visualização do escoamento. A não-disponibilidade da câmara de ação durante a campanha de medição impediu que se fizesse um estudo mais aprofundado da evolução da barra de erosão. Também foi possível calcular a posição da frente da barra em função do tempo e a celeridade da barra representadas nas Figuras 3.29 e 3.30, respetivamente.

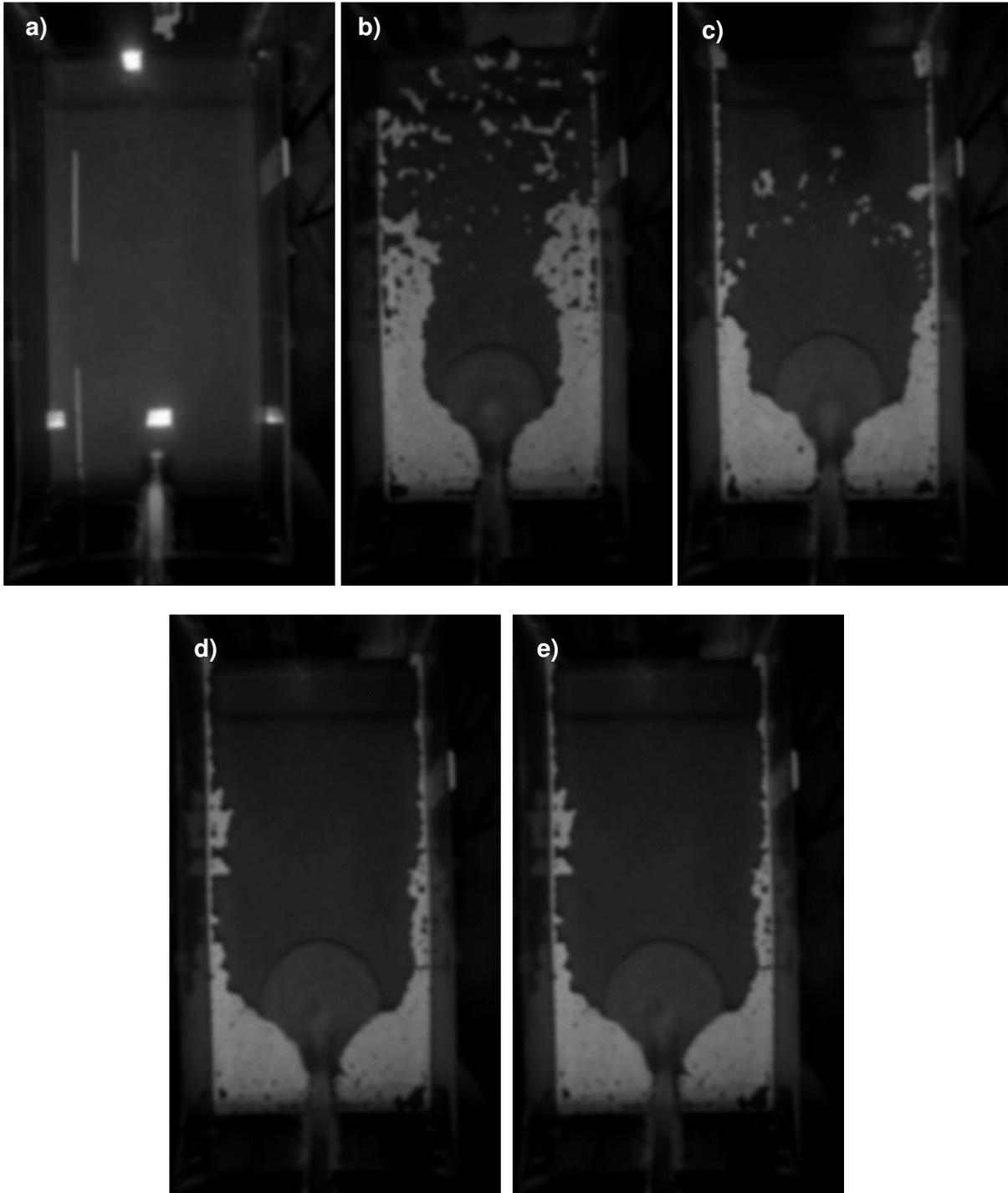


Figura 3.26 - Visualização do escoamento em 5 tempos diferentes: a)  $t = 0$  s, b)  $t = 60$  s, c)  $t = 120$  s, d)  $t = 180$  s, e)  $t = 240$  s ( $\alpha = 20^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 3$  cm).

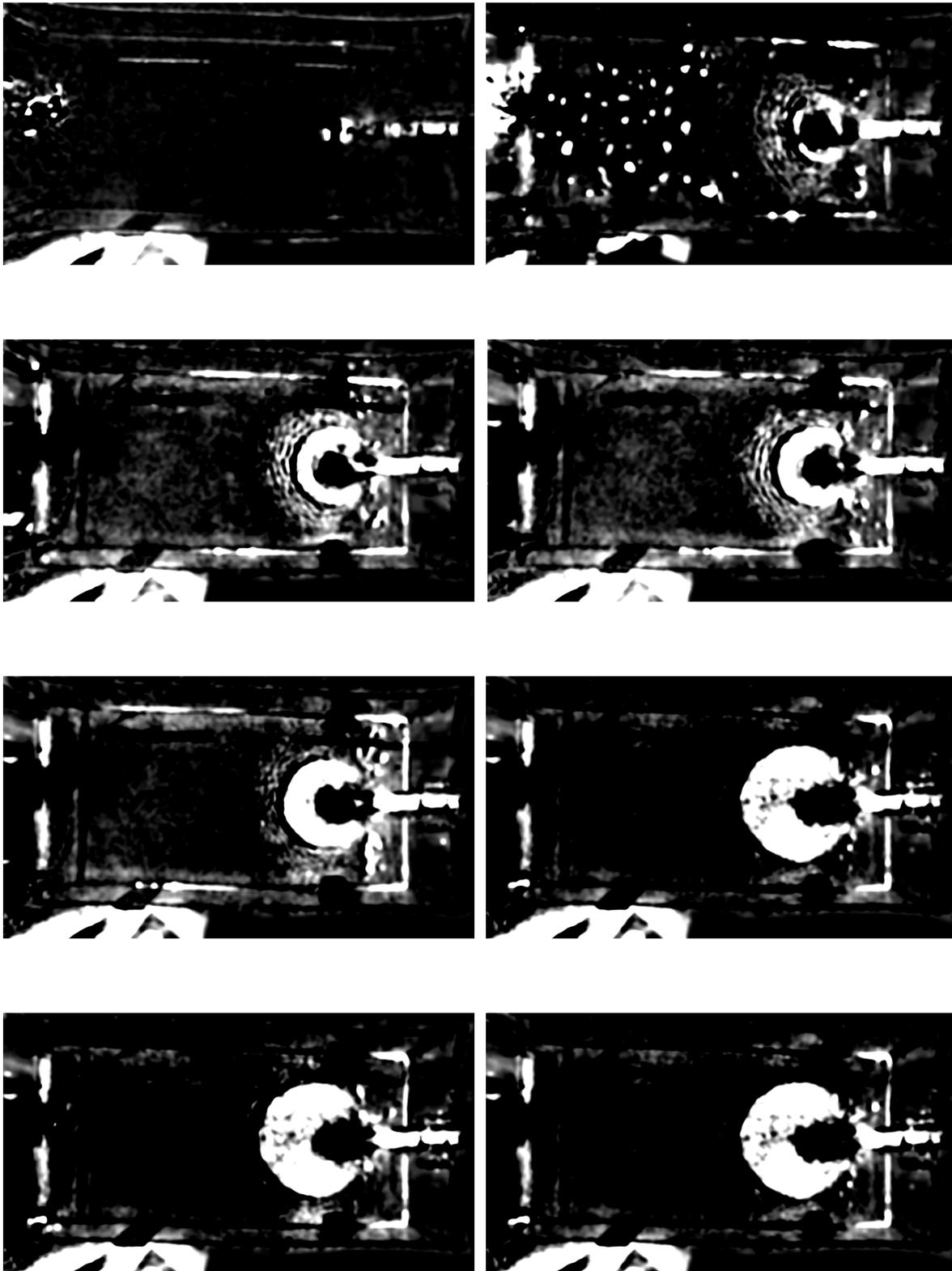


Figura 3.27 – Evolução da fossa de erosão em intervalos de cada 20 s ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 3$  cm).

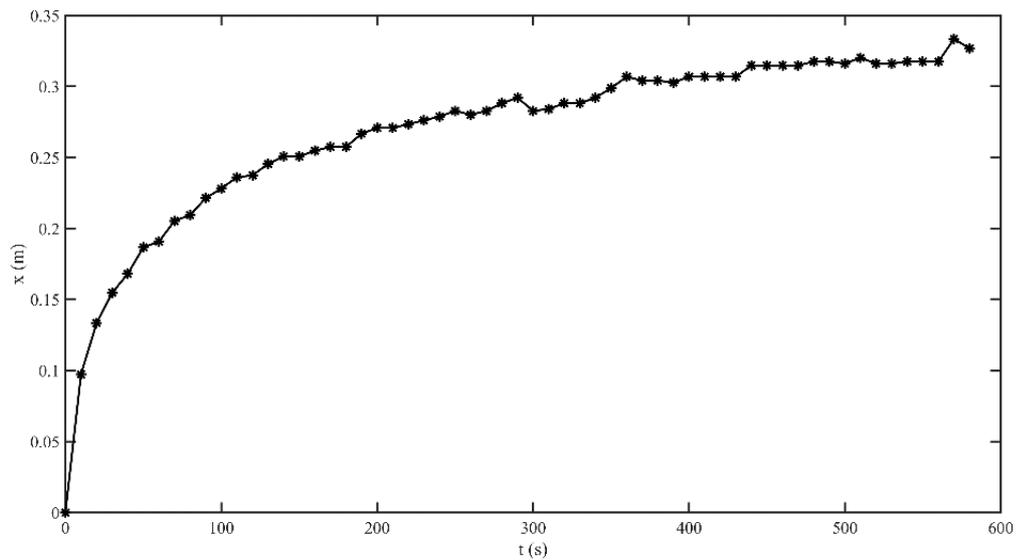


Figura 3.28 – Evolução da frente da barra em função do tempo (em segundos).

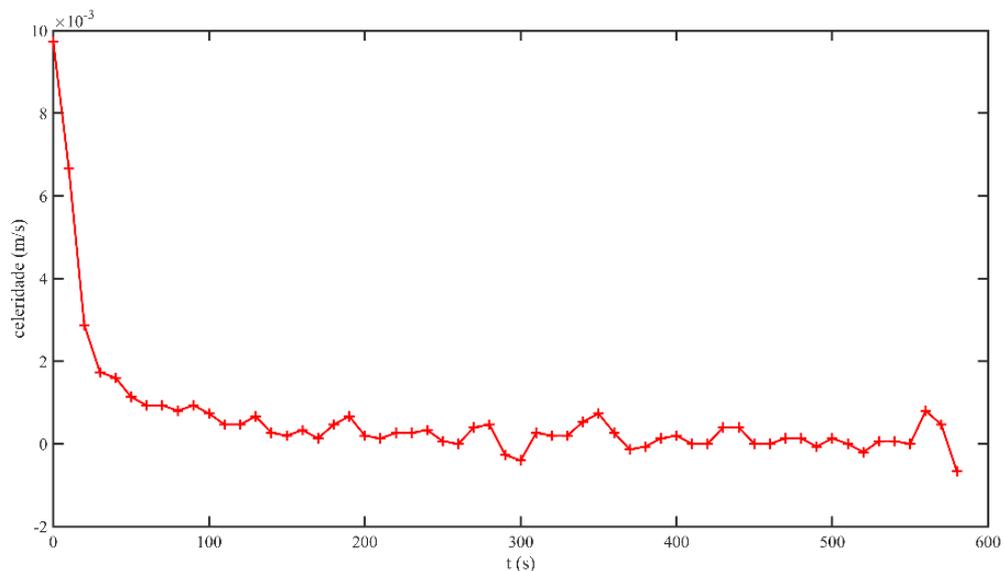


Figura 3.29 – Celeridade da barra em função do tempo (em segundos).

### 3.5. CALIBRAÇÃO DE EQUIPAMENTOS

Para que haja o correto funcionamento de todos os equipamentos que intervêm nos trabalhos experimentais, foram feitas as calibrações necessárias. Foi necessário efetuar as seguintes calibrações:

- Calibração do caudalímetro;
- Calibração da técnica de aquisição de imagem (TAI);
- Calibração do modelo 3D obtido do programa *Structure from Motion* (SfM).

#### 3.5.1. CALIBRAÇÃO DO CAUDALÍMETRO

Como já foi referido, para a medição dos caudais, foi utilizado um caudalímetro eletromagnético cuja corrente de saída é proporcional ao caudal. Para tal efeito, é necessária uma curva de calibração obtida através de medição realizada com um reservatório calibrador, constituído por duas caixas idênticas,

munidas de tubos piezométricos cotados, na parte externa de cada caixa. Com o auxílio de um cronómetro, é possível medir o volume de água em função do tempo, ou seja, o caudal.

Para a calibração foram adotados os seguintes procedimentos:

- a) Regular a válvula para o caudal de 0,2 L/s, valor escolhido para este caso em específico, com o auxílio do visor do caudalímetro. É de extrema importância certificar que o reservatório de alimentação, R1, mantenha um nível mais ou menos constante, ou seja, que o caudal que entra no reservatório R1 seja aproximadamente igual ao que a bomba eleva para o reservatório calibrador. Caso isso seja garantido, o ponto de funcionamento da bomba não se altera;
- b) De seguida procede-se ao enchimento do reservatório calibrador, antes mesmo de se começar a cronometragem, até um volume inicial de 20 L, volume a partir do qual a leitura do valor no tubo piezométrico é mais facilitada, pois as oscilações iniciais são amenizadas;
- c) Cronometragem do tempo necessário para encher mais 20 L;
- d) Repetir o passo anterior mais quatro vezes;
- e) Ativar o sistema de aquisição de dados para o registo contínuo do sinal proveniente do medidor de caudais. Em cada medição procedeu-se à realização de vários registos, cada um constituído pela recolha de 1000 amostras num intervalo de 25 s.
- f) Leitura direta no visor do caudalímetro de 15 valores, para efeitos de comparação com os valores obtidos através do reservatório calibrador.
- g) Repetir o mesmo procedimento para os seguintes caudais: 0,4 , 0,6 , 0,8 e 1,0 L/s.
- h) Tratamento dos dados obtidos recorrendo ao Microsoft Excel.

No Quadro 3.1 encontram-se as incertezas de leitura dos equipamentos.

Quadro 3.1 – Incertezas associadas às leituras dos equipamentos.

<b>Equipamento</b>	<b>Menor divisão de escala</b>	<b>Resolução</b>
Reservatório calibrador	0,5 L	$\pm 0,25$ L
Cronómetro	0,01 s	$\pm 0,01$ s
Visor caudalímetro	0,0001 L/s	$\pm 0,0001$ L/s

No Quadro 3.2 são apresentados os valores dos intervalos de tempo registados para cada uma das medições de cada um dos caudais. A partir dos volumes, neste caso 20 L, e dos tempos, foi possível calcular os valores dos caudais apresentados no Quadro 3.3.

Quadro 3.2 – Registo dos intervalos de tempo, em segundos, para o enchimento de 20 L no reservatório.

<b>Leitura</b>	<b>Q =0,20 L/s</b>	<b>Q =0,40 L/s</b>	<b>Q =0,60 L/s</b>	<b>Q =0,80 L/s</b>	<b>Q =1,00 L/s</b>
1	113,05	49,4	33,99	24,54	18,88
2	115,67	52,77	33,22	24,57	18,97
3	115,48	52,3	34,17	25,11	18,92
4	114,92	50,51	34,6	24,31	19,04

Quadro 3.3 – Valores dos caudais relativos aos intervalos de tempo apresentados no Quadro 3.6.

Leitura	Q =0,20 L/s	Q =0,4 L/s	Q =0,6 L/s	Q =0,8 L/s	Q =1,0 L/s
1	0,1769	0,4049	0,5884	0,8150	1,0593
2	0,1729	0,3790	0,6020	0,8140	1,0543
3	0,1732	0,3824	0,5853	0,7965	1,0571
4	0,1740	0,3960	0,5780	0,8227	1,0504
<b>Valor médio (L/s)</b>	<b>0,1736</b>	<b>0,3892</b>	<b>0,5869</b>	<b>0,8145</b>	<b>1,0557</b>

Os valores dos caudais obtidos por leitura direta no visor do caudalímetro são apresentados no Quadro 3.4. A comparação dos caudais lidos diretamente no caudalímetro com os valores dos caudais determinados experimentalmente com recurso ao reservatório calibrador é apresentada graficamente na Figura 3.30. A análise da figura permite comprovar a semelhança entre os valores, o que traduz num bom funcionamento do caudalímetro.

A curva de calibração do medidor de caudais, representada na Figura 3.31, foi determinada com base nos valores dos caudais apresentados no Quadro 3.3. e dos valores registados a partir do sistema de aquisição de dados, apresentados no Quadro 3.5. A curva de calibração possui um coeficiente de correlação bastante elevado, o que traduz a boa qualidade da mesma. A semelhança encontrada entre a curva de calibração obtida e as de estudos realizados anteriormente (Sousa, 2012; Antunes, 2012; Machado, 2016) confirma a fiabilidade da mesma.

Quadro 3.4 – Valores lidos diretamente no visor do medidor de caudais.

Leitura	Q = 0,20 L/s	Q = 0,4 L/s	Q = 0,6 L/s	Q = 0,8 L/s	Q = 1,0 L/s
1	0,1841	0,3925	0,6041	0,8126	1,058
2	0,1852	0,3884	0,5999	0,8129	1,05
3	0,1811	0,3895	0,5995	0,8105	1,056
4	0,1781	0,3893	0,5969	0,8072	1,049
5	0,1821	0,3894	0,6034	0,8107	1,044
6	0,1814	0,3901	0,6042	0,8179	1,031
7	0,1801	0,3888	0,6028	0,8184	1,028
8	0,1851	0,3874	0,6005	0,8137	1,015
9	0,1821	0,3861	0,6017	0,8099	1,021
10	0,1836	0,3867	0,6018	0,8024	1,024
11	0,1802	0,3889	0,6001	0,8103	1,037
12	0,1793	0,3907	0,596	0,8138	1,042
13	0,1791	0,3911	0,595	0,8137	1,049
14	0,1783	0,3908	0,5951	0,8099	1,051
15	0,1813	0,3894	0,5988	0,8068	1,048
<b>Valor médio (L/s)</b>	<b>0,1813</b>	<b>0,3894</b>	<b>0,6001</b>	<b>0,8107</b>	<b>1,044</b>
<b><math>\sigma</math> (L/s)</b>	<b>0,00231</b>	<b>0,00169</b>	<b>0,00312</b>	<b>0,00412</b>	<b>0,01342</b>

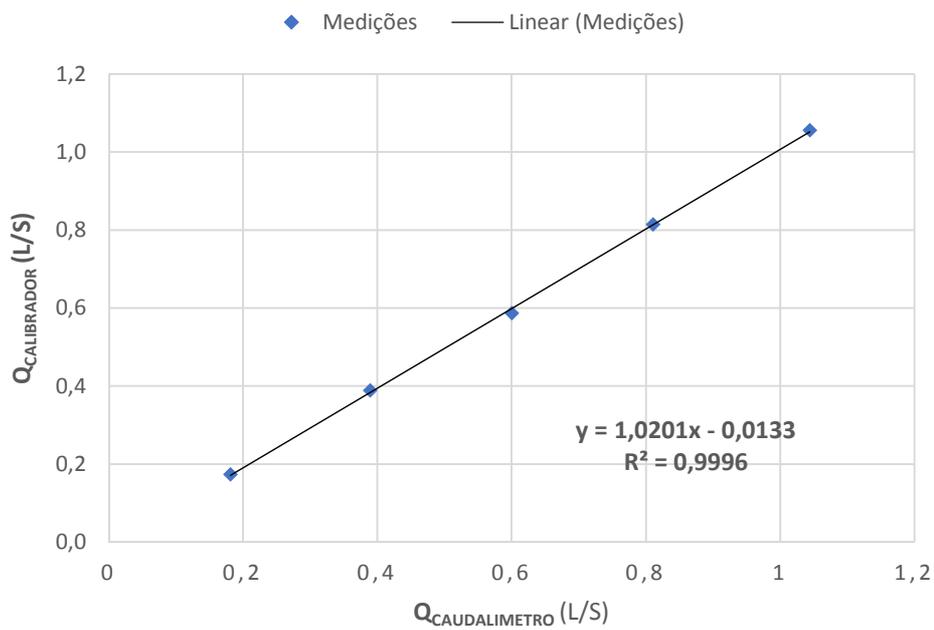


Figura 3.30 – Comparação entre os caudais lidos diretamente no caudalímetro e os caudais medidos cm recurso ao reservatório calibrador.

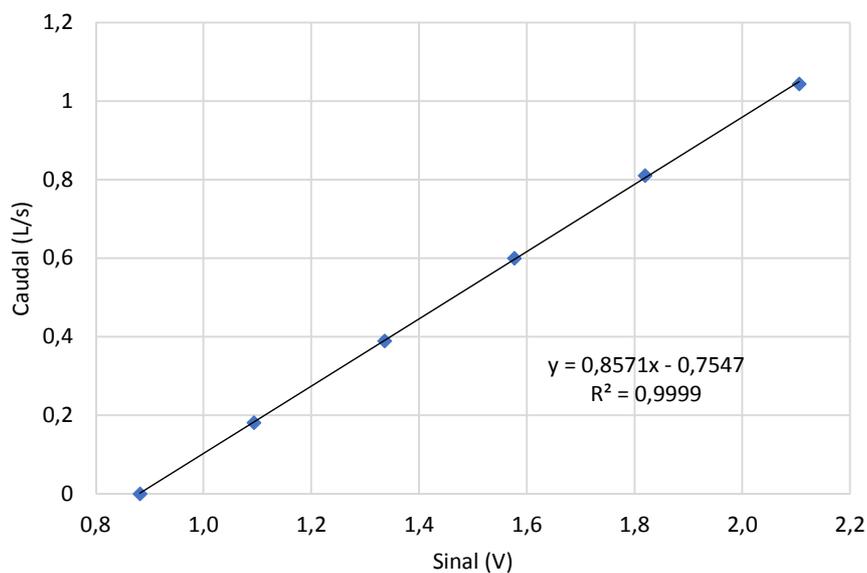


Figura 3.31 – Curva de calibração do caudalímetro.

Quadro 3.5 – Valores médios e desvio padrão dos valores registados, em volt, com recurso ao software LabView 8.6.

	$Q = 0,20 \text{ L/s}$	$Q = 0,4 \text{ L/s}$	$Q = 0,6 \text{ L/s}$	$Q = 0,8 \text{ L/s}$	$Q = 1,0 \text{ L/s}$
Valor médio (V)	1,093614	1,335822	1,5770745	1,819602	2,105472
$\sigma$ (V)	0,00276	0,00256	0,00265	0,00304	0,00333

### 3.5.2. IMAGEM DE CALIBRAÇÃO DA TÉCNICA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS

Como já foi referido anteriormente, na aplicação da TAI, é necessário recorrer a uma imagem de calibração, para que a técnica seja aplicada corretamente.

No presente estudo tomou-se como referência a dimensão marcada na própria placa de perspex na vertical na parte superior do trampolim de saída, foram marcados 4 pontos com intervalos de 1 cm, como mostra a Figura 3.32. Considerou-se que o fator de calibração vertical é igual ao fator de calibração horizontal em cada imagem, o mesmo já não acontece de imagem para imagem. Não foi possível definir um único fator de calibração para todos os ensaios, devido à mudança da câmara fotográfica e ao posicionamento do tripé, que idealmente deveria ser fixa. Para que não houvesse acumulação de erros associados resolveu-se usar um fator de calibração para cada conjunto de imagens, respetivos a um mesmo ensaio.

Na Figura 3.32 apresenta-se, também, um exemplo da imagem de calibração para uma condição. A cada fator de conversão obtido, referente a um determinado ensaio, multiplicou se pela dimensão física, em píxeis, permitindo obter o valor das variáveis a medir na imagem.

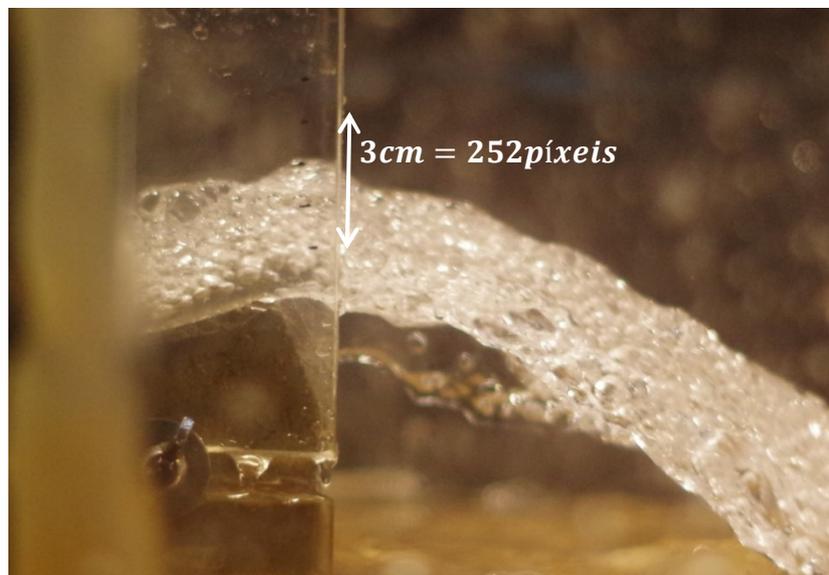


Figura 3.32 – Exemplo de uma imagem de calibração (1px=0.11905 mm).

### 3.5.3. CALIBRAÇÃO DO MODELO 3D RESULTANTE DO SFM

Para a calibração do modelo 3D foi necessário recorrer à técnica de medição do perfil longitudinal da escavação utilizada na dissertação de Machado (2016). Esta consiste em medir, ao fim de cada ensaio, a profundidade máxima da fossa de erosão e a altura da barra, utilizando uma régua de pvc com cerca de 66 varetas de alumínio, ajustáveis, espaçadas de 2 cm, que permite delimitar o perfil em cada posição escolhida. Esta régua é apoiada no topo do trampolim de saída e numa barra fixada nas paredes da bacia, do mesmo material que a régua, na zona de jusante representada, como se pode visualizar na Figura 3.33.

A profundidade da fossa,  $f$ , resulta da diferença entre a distância do topo do trampolim de saída, onde a régua vai estar apoiada, até ao leito, na posição inicial,  $T$ , para diferentes ângulos a serem estudadas, e a distância da face inferior da régua até ao fundo da fossa de erosão,  $F$ , medida no término de cada ensaio (Figura 3.34).

$$f = F - T \quad (3.7)$$



Figura 3.33 - Levantamento do perfil longitudinal da escavação de erosão.

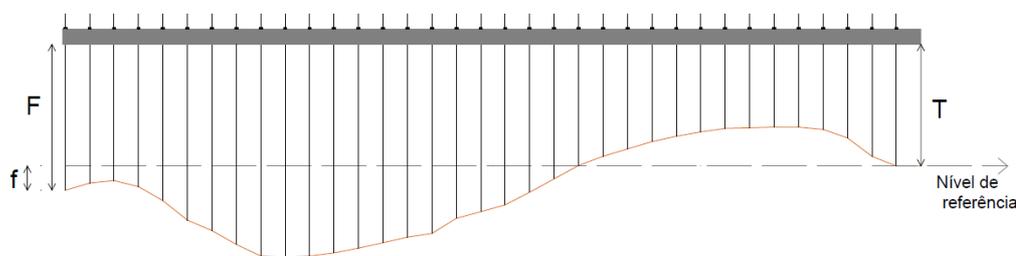


Figura 3.34 - Esquema com as variáveis necessárias para o cálculo das profundidades da fossa de erosão (Machado, 2016).

De forma a fixar o leito sempre à mesma cota, e dado que a altura do modelo do trampolim varia consoante o ângulo de saída, houve a necessidade de ajustar o valor do parâmetro  $T$  para cada modelo. Os valores adotados estão apresentados no Quadro 3.6.

Quadro 3.6 - Valores do parâmetro  $T$  para os diferentes modelos de trampolim utilizados.

$\alpha$ (°)	$T$ (cm)
10	9,3
15	9,7
20	10

No presente estudo fez-se o processo completo nos primeiros ensaios, isto é, fez-se a medição dos perfis longitudinais em toda a extensão da fossa e da barra. Posteriormente, de forma a simplificar os demais ensaios, e uma vez validados os resultados do SfM, fez-se apenas o perfil no eixo principal da bacia de restituição.

Outra forma de calibrar o modelo 3D tem por base o conhecimento das dimensões físicas do modelo físico, por exemplo, a largura da bacia de dissipação, o que permitiu igualmente converter os resultados em unidades físicas.

# 4

## RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE DE DADOS

### 4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste presente capítulo são apresentados os resultados obtidos através da análise dos dados recolhidos dos ensaios experimentais. Foram realizadas análises críticas dos dados de forma a caracterizar a cavidade de erosão e perceber os diferentes fatores que e os seus respetivos impactos na mesma.

Os ensaios foram realizados para diferentes condições, definidas pela variação do caudal de escoamento, do ângulo do trampolim de saída e da espessura do colchão de água. Para cada condição obtiveram-se dados importantes para a realização das análises, nomeadamente a altura de água do escoamento na secção de saída do trampolim em salto de esqui, as coordenadas da trajetória do jato, o alcance do jato, assim como as dimensões da cavidade de erosão e o seu volume.

Também foram realizadas análises comparativas entre os resultados adquiridos no presente estudo, e os obtidos por Machado (2016), realizadas na mesma instalação experimental.

### 4.2. CONDIÇÕES DE TESTE

As medições experimentais foram realizadas para diferentes condições definidas por três profundidades de colchão (1, 3 e 5 cm), três ângulos do trampolim de saída (10°, 15° e 20°) e três caudais (0,51, 0,71 e 0,85 L/s). Com estes valores foi possível complementar os resultados obtidos por Figueiredo (2010) e Machado (2016). As condições de ensaio encontram-se resumidas nos Quadros 4.1 a 4.3, para os três ângulos de saída do trampolim considerados (10°, 15° e 20°). Para cada condição são apresentados os seguintes parâmetros: a altura do escoamento na secção de saída do trampolim ( $h_0$ ), a altura de queda na secção de saída do trampolim ( $H_0$ ), o desnível entre a secção de saída do trampolim e o colchão de água ( $H_1$ ), a velocidade na secção de saída do trampolim ( $U_0$ ), o número de Froude ( $Fr_0^2$ ), o número de Reynolds (Re), o número de Weber (We), definido pela expressão:

$$We = \frac{U_0^2 h_0}{72.89 \times 10^{-3}} \quad (4.1)$$

Para além dos parâmetros referidos anteriormente, apresentam-se ainda os valores de um parâmetro adimensional ( $Q^*$ ), que será utilizado na representação gráfica dos resultados obtidos e é definido como:

$$Q^* = \frac{Q}{b \times h \times U_0} \quad (4.2)$$

Quadro 4.1 – Condições de ensaio para  $\alpha = 10^\circ$ .

$\alpha$ (°)	Q (L/s)	0,51			0,71			0,85		
	h (cm)	1	3	5	1	3	5	1	3	5
10	$h_0$ (cm)	1,77			1,88			2,03		
	$H_0$ (cm)	1,68			2,90			3,59		
	$U_0$ (m/s)	0,57			0,75			0,84		
	$H_1$ (cm)	8,3	6,3	4,3	8,3	6,3	4,3	8,3	6,3	4,3
	$Fr_0^2$ (-)	1,90			3,08			3,55		
	$Re$ (-)	$2,39 \times 10^4$			$3,24 \times 10^4$			$3,76 \times 10^4$		
	$Q^*$ (-)	1,77	0,59	0,35	1,88	0,63	0,38	2,03	0,68	0,41
	$We$ (-)	80,46			146,96			195,75		

Quadro 4.2 – Condições de ensaio para  $\alpha = 15^\circ$ .

$\alpha$ (°)	Q (L/s)	0,51			0,71			0,85		
	h (cm)	1	3	5	1	3	5	1	3	5
15	$h_0$ (cm)	1,80			1,87			2,03		
	$H_0$ (cm)	1,63			2,95			3,58		
	$H_1$ (cm)	8,7	6,7	4,7	8,7	6,7	4,7	8,7	6,7	4,7
	$U_0$ (m/s)	0,57			0,76			0,84		
	$Fr_0^2$ (-)	1,81			3,17			3,54		
	$Re$ (-)	$2,37 \times 10^4$			$3,25 \times 10^4$			$3,75 \times 10^4$		
	$Q^*$ (-)	1,80	0,60	0,36	1,87	0,62	0,37	2,03	0,68	0,41
	$We$ (-)	79,15			148,29			195,60		

Quadro 4.3 – Condições de ensaio para  $\alpha = 20^\circ$ .

$\alpha$ ( $^\circ$ )	<b>Q (L/s)</b>	<b>0,71</b>
	<b>h (cm)</b>	<b>3</b>
20	$h_0$ (cm)	1,86
	$H_0$ (cm)	2,97
	$H_1$ (cm)	7,00
	$U_0$ (m/s)	0,76
	$Fr_0^2$ (-)	3,20
	$Re$ (-)	$3,26 \times 10^4$
	$Q^*$ (-)	0,62
	$We$ (-)	148,79

De referir que, para cada condição definida por um caudal e um ângulo do trampolim de saída, considerou-se a altura de água na secção média de saída do trampolim igual à média dos valores obtidos nos ensaios realizados para diferentes alturas do colchão de água a jusante.

### 4.3. ENSAIOS PRELIMINARES

Com o objetivo de averiguar a repetibilidade e validade dos resultados obtidos durante este estudo, foram realizados dois ensaios preliminares para uma das condições de ensaio de Machado (2016), definida por  $\alpha = 20^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 3$  cm e cujas características se apresentam no Quadro 4.3. Os resultados obtidos permitiram a determinação dos perfis longitudinais de erosão e a comparação com o perfil obtido por Machado (2016), como apresentado no gráfico da Figura 4.1.

Da análise dos resultados é possível concluir que os perfis de erosão obtidos para os dois ensaios realizados são muito semelhantes, permitindo assim assegurar a repetibilidade dos ensaios. No entanto, detetaram-se algumas diferenças em relação ao perfil de erosão de Machado (2016), que se parecem traduzir numa translação, para jusante, deste em relação aos dos ensaios realizados. De notar que as trajetórias dos jatos dos ensaios são também diferentes da de Machado (2016). Estas diferenças podem ser justificadas pela dificuldade em garantir o mesmo caudal nos dois estudos.

Para além da comparação dos perfis de erosão longitudinais, também foram comparados os valores das principais características geométricas da cavidade de erosão. No Quadro 4.4 apresentam-se os valores médios dos dois ensaios realizados, bem como os valores obtidos por Machado (2016). As diferenças percentuais obtidas entre os resultados dos dois estudos são, em geral, inferiores a 3%, com exceção dos valores da profundidade máxima de erosão ( $f$ ) e da correspondente distância em relação ao trampolim ( $L^*$ ), para os quais se obtiveram diferenças de 9 e 22%, respetivamente. De referir que, no caso da largura da escavação, as diferenças são muito acentuadas uma vez que o valor de Machado (2016) inclui a largura da barra ( $B'_s$ ), enquanto no presente estudo se mediu apenas a largura da escavação ( $B_s$ ), conforme esquematizado na Figura 2.10.

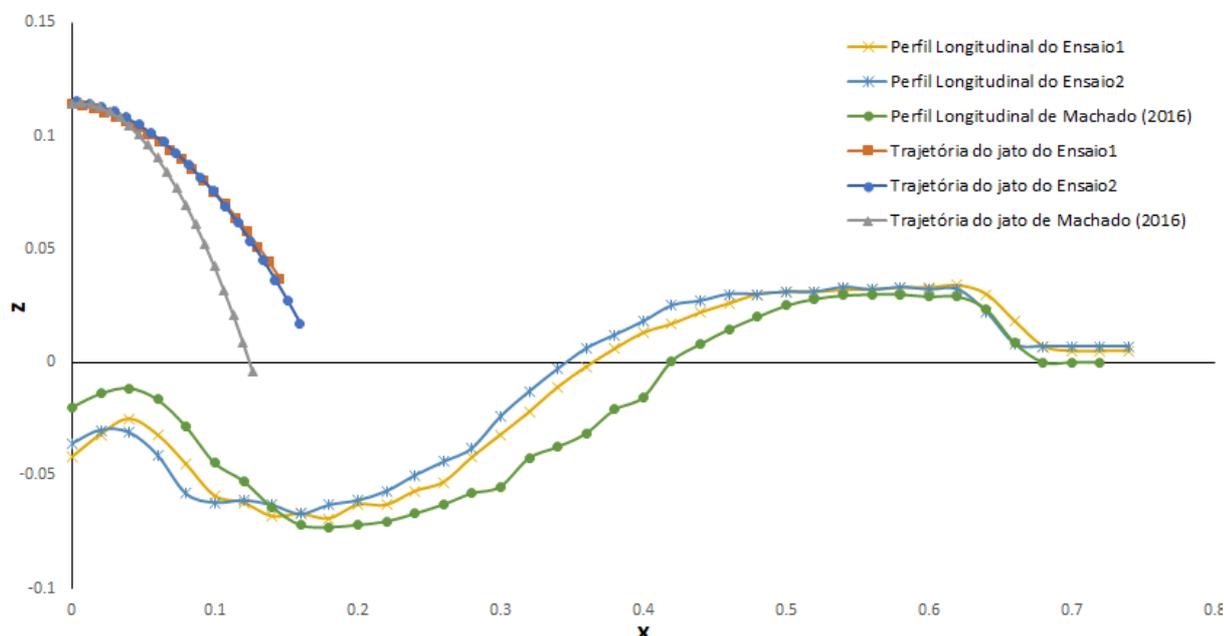


Figura 4.1 – Perfis longitudinais de erosão obtidos para  $\alpha = 20^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 3$  cm.

Quadro 4.4 – Características geométricas da erosão obtidas para  $\alpha = 20^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 3$  cm.

	Machado (2016)	Média dos ensaios 1 e 2
$h_0$ (cm)	1,91	1,86
$L_{medido}$ (cm)	10,62	10,6
$\alpha'_{medido}$ ( $^\circ$ )	54,77	56,55
$f_{medido}$ (cm)	7,30	6,65
$B_s$ (cm)	49	27,35
$L_s$ (cm)	42	41,23
$L^*$ (cm)	18	22

#### 4.4. CARACTERÍSTICAS DAS TRAJETÓRIAS DOS JATOS

##### 4.4.1. REGISTO DAS COORDENADAS DAS TRAJETÓRIAS DOS JATOS

As coordenadas das trajetórias dos diferentes jatos foram obtidas a partir do método TAI e de um código em Matlab, conforme descrito em 3.5.2.1. As trajetórias médias dos jatos, obtidas através das envolventes, foram comparadas com as obtidas pela expressão (2.1). Os valores das variáveis necessárias à aplicação da expressão (2.1) são apresentadas nos Quadros 4.1 e 4.2.

Na figura 4.2 apresenta-se, como exemplo, o gráfico comparativo dos dois jatos para  $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 3$  cm. A análise do gráfico permitiu concluir que a trajetória medida apresenta uma boa aproximação da trajetória teórica, em relação ao alcance do jato. Devido à espessura do jato é normal que o início das trajetórias apresentadas na figura abaixo não sejam exatamente no mesmo ponto. Como já foi referido na Subsecção 2.2.2. a expressão da trajetória apresentada, apenas considera parâmetros de ordem cinemáticos, enquanto a medida considera, para além desses parâmetros a espessura e dispersão do jato. Fatores que fizeram com que se considerasse a trajetória medida para a caracterização do jato.

Em algumas das condições em estudo, as duas trajetórias não são tão próximas como no exemplo apresentado, como se pode verificar no anexo B, uma vez que a trajetória medida em Matlab depende dos pontos escolhidos para a delimitação da envolvente da trajetória. Deste modo pôde concluir-se que talvez a envolvente da trajetória do jato não tenha sido delimitada corretamente, propondo que em trabalhos futuros haja um aperfeiçoamento desta técnica.

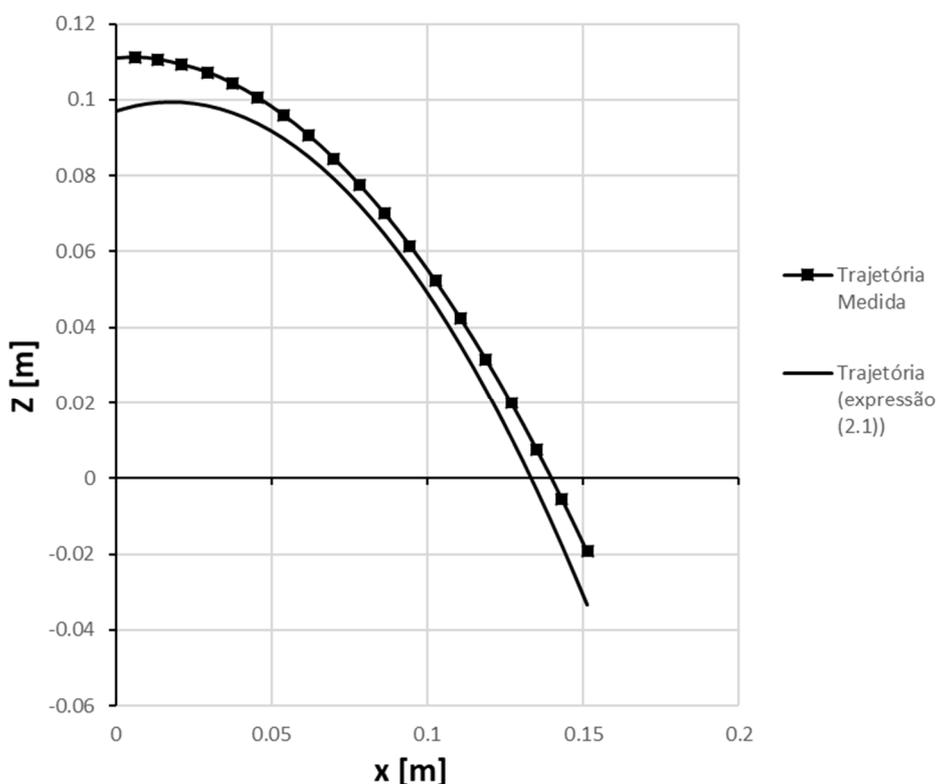


Figura 4.2 – Trajetória teórica em comparação com a trajetória medida.

A medição da altura de água na secção de saída do trampolim foi também realizada também com o recurso à TAI. Tal como referido no Capítulo 3, foram aplicados dois métodos, baseados no perfil da intensidade luminosa e no integral da área do perfil de intensidade luminosa, e descritos em 3.5.2.3. A aplicação dos dois métodos permitiu validar os resultados obtidos por Machado (2016). De facto, apesar dos dois métodos terem originado resultados muito semelhantes, verificou-se que os resultados obtidos pelo método baseado no perfil de intensidade luminosa se aproximavam mais dos resultados esperados a partir das fórmulas existentes. Por este motivo, optou-se por apresentar apenas os resultados deste método (Quadros 4.1 a 4.3).

#### 4.4.2. DETERMINAÇÃO DO ALCANCE DO JATO

A expressão (2.2) permite determinar estimar o alcance do jato. No entanto, dado à possibilidade de haver alterações na trajetória devido aos fenómenos ocorrentes durante a propagação do jato, torna-se necessário proceder à sua correção. Para o efeito, utilizaram-se as correções expostas no capítulo 2, sugeridas por Gun'ko *et al.* (1965) e Taraimovich (1978), que no nosso caso não introduz nenhuma alteração ao valor do alcance teórico uma vez que o número de Froude máximo obtido foi de 3,55 e, de acordo com estes autores, só há redução do alcance teórico para números de Froude superiores a 30 e 50, respetivamente.

Os valores experimentais dos alcances do jato ( $L_{exp}$ ), medidos através da TAI, conforme descrito em 3.5.2.2., são apresentados no Quadro 4.5, em conjunto com os alcances efetivos estimados ( $L_e$ ). A comparação gráfica é apresentada na Figura 4.4. Da análise dos resultados conclui-se que, com exceção de algumas condições, as diferenças percentuais relativas são, em geral, inferiores a 9%, o que se traduz na qualidade do ajuste linear apresentado na Figura 4.4.

De referir que os valores das estimativas dos alcances efetivos são dependentes do valor da altura de escoamento na secção de saída do trampolim e, consequentemente, da dificuldade de definir corretamente a lamina de água na imagem média do jato.

Quadro 4.5 – Alcances medidos e estimados para as diferentes condições de ensaio.

$\alpha$ (°)	Q (L/s)	0,51			0,71			0,85		
	h (cm)	1	3	5	1	3	5	1	3	5
10	$L_e$ (cm)	7,96	7,02	5,91	10,71	9,47	8,02	12,05	10,68	9,06
	$L_{exp}$ (cm)	7,90	7,45	5,64	11,23	9,18	6,75	11,99	11,45	8,83
	$\frac{L_{exp}-L_e}{L_e}$ (%)	0,76	6,07	4,60	4,90	3,05	15,85	0,51	7,27	2,59
15	$L_e$ (cm)	8,14	7,25	6,22	11,38	10,20	8,82	12,73	11,43	9,92
	$L_{exp}$ (cm)	7,98	7,39	6,79	11,50	10,13	9,18	14,02	11,78	11,06
	$\frac{L_{exp}-L_e}{L_e}$ (%)	1,88	1,93	9,01	1,06	0,63	4,02	10,18	3,11	11,43

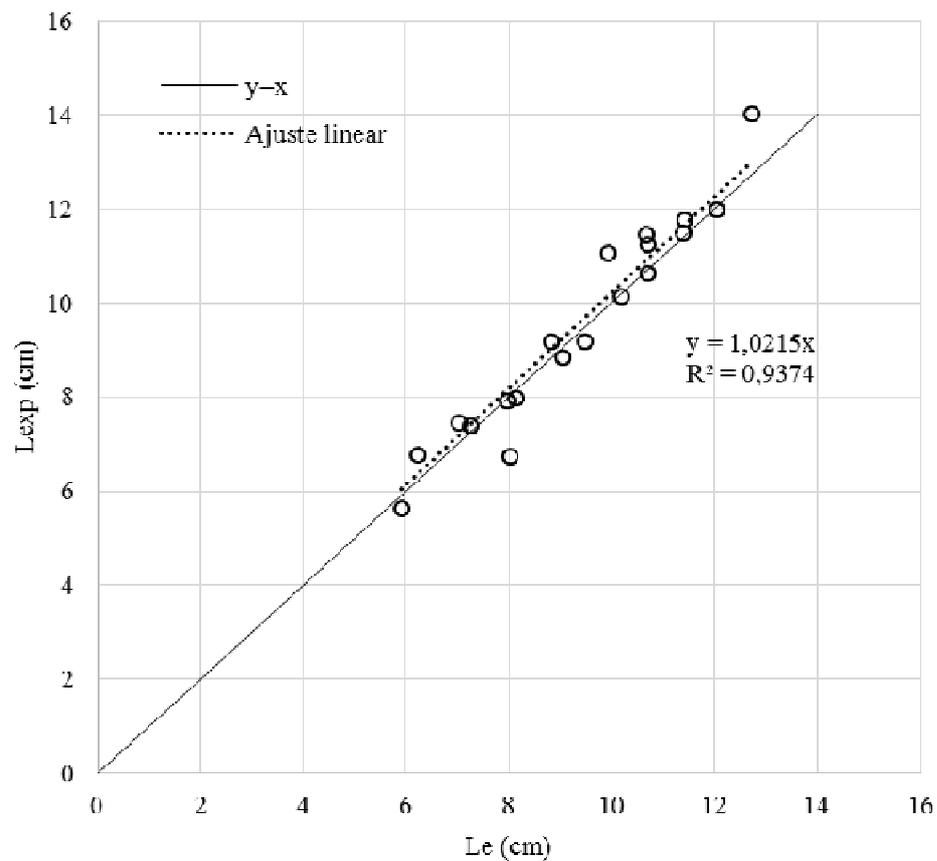


Figura 4.3 – Representação gráfica da comparação dos alcances medidos e esperados.

Paralelamente à medição do alcance do jato, procedeu-se à medição do ângulo de incidência na zona de impacto do jato com o colchão de água ( $\alpha'_{exp}$ ), utilizando a mesma técnica de medição. Os valores obtidos foram posteriormente utilizados para a aplicação de diversas expressões de previsão da profundidade máxima de escavação, apresentadas no Capítulo 2.

Com recurso à expressão (2.4) e tendo em consideração os valores apresentados nos Quadros 4.1 e 4.2, foi possível determinar as estimativas previstas para o ângulo de incidência do jato,  $\alpha'_i$ .

Os valores obtidos, experimentais e esperados, são apresentados no Quadro 4.6 e comparados graficamente na Figura 4.5. Verifica-se uma menor dispersão dos valores obtidos em comparação com o alcance do jato. As diferenças percentuais relativas entre os valores medidos e os esperados são, neste caso, inferiores a 5%, tendo-se obtido um valor médio das mesmas de 1.7%.

Quadro 4.6 – Ângulos de incidência medidos e estimados para as diferentes condições de ensaio.

$\alpha$ (°)	Q (L/s)	0,51			0,71			0,85		
	h (cm)	1	3	5	1	3	5	1	3	5
10	$\alpha'$ (°)	66,14	63,10	58,50	59,92	56,43	51,32	57,24	53,60	48,37
	$\alpha'_{exp}$ (°)	66,17	61,11	59,21	57,78	57,24	51,05	56,62	52,52	48,67
	$\frac{\alpha'_{exp} - \alpha'}{\alpha'}$	0,05	3,16	1,21	3,57	1,43	0,51	1,08	2,02	0,62
15	$\alpha'$ (°)	67,43	64,70	60,65	60,90	57,71	53,13	58,55	55,23	50,55
	$\alpha'_{exp}$ (°)	66,44	61,85	59,24	59,88	58,41	53,75	58,11	56,25	49,49
	$\frac{\alpha'_{exp} - \alpha'}{\alpha'}$	1,47	4,41	2,31	1,69	1,21	1,18	0,74	1,84	2,10

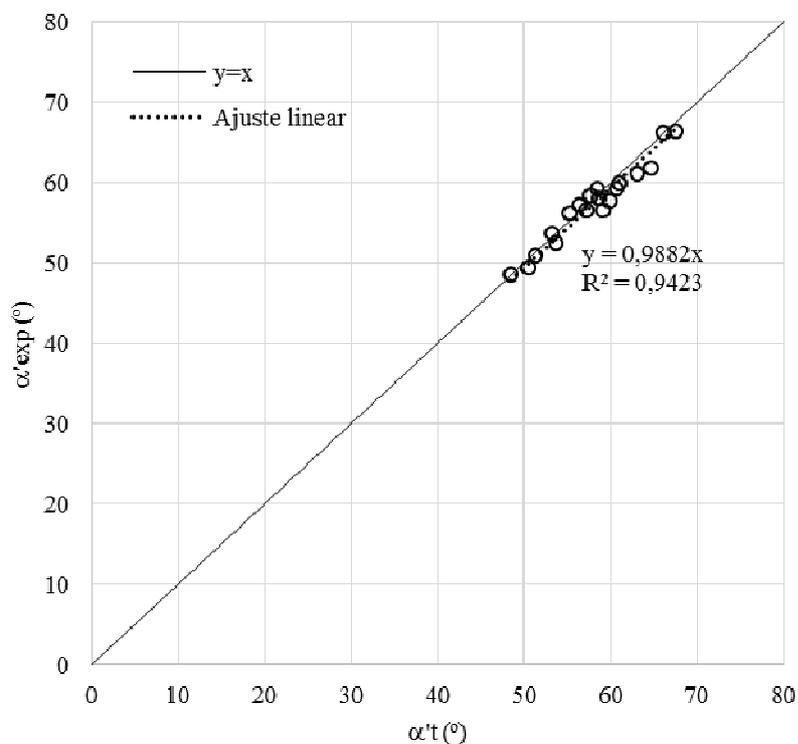


Figura 4.4 – Representação gráfica da comparação dos ângulos de incidência teóricos com os medidos.

## 4.5. PERFIL LONGITUDINAL DA ESCAVAÇÃO

### 4.5.1. COMPARAÇÃO DOS PERFIS OBTIDOS COM A RÉGUA E COM O MODELO 3D

No trabalho de Machado (2016) os perfis longitudinais de erosão foram obtidos com recurso a uma régua com varetas de alumínio ajustáveis. Apesar de ser um método de fácil aplicação, este era também moroso, razão pela qual foram medidos apenas os perfis centrais na generalidade das condições.

No presente trabalho, recorreu-se ao procedimento descrito na Subsecção 3.5.3. Desta forma, tornou-se possível determinar, de uma forma rápida e simples, todos os perfis de erosão necessários, assim como a configuração 3D da erosão.

Para validar a nova metodologia apresentada, foram medidos os perfis centrais de todas as condições com a régua. Estes foram, posteriormente, comparados com os perfis obtidos a partir do modelo 3D. Na Figura 4.5 apresenta-se, como exemplo, a comparação dos perfis longitudinais de erosão obtidos pelas duas metodologias referidas, para  $\alpha = 15^\circ$  e  $Q = 0,71$  L/s. Pela análise da figura verifica-se que os perfis medidos pelos dois métodos, para as 3 alturas do colchão de água, são coincidentes. Resultados semelhantes foram também obtidos para as restantes condições definidas com diferentes caudais e ângulos de saída do trampolim, cujos gráficos se apresentam em anexo B.

Face aos resultados obtidos e dadas as vantagens da utilização da nova metodologia, optou-se por considerar nas secções seguintes apenas os perfis obtidos pelo modelo 3D.

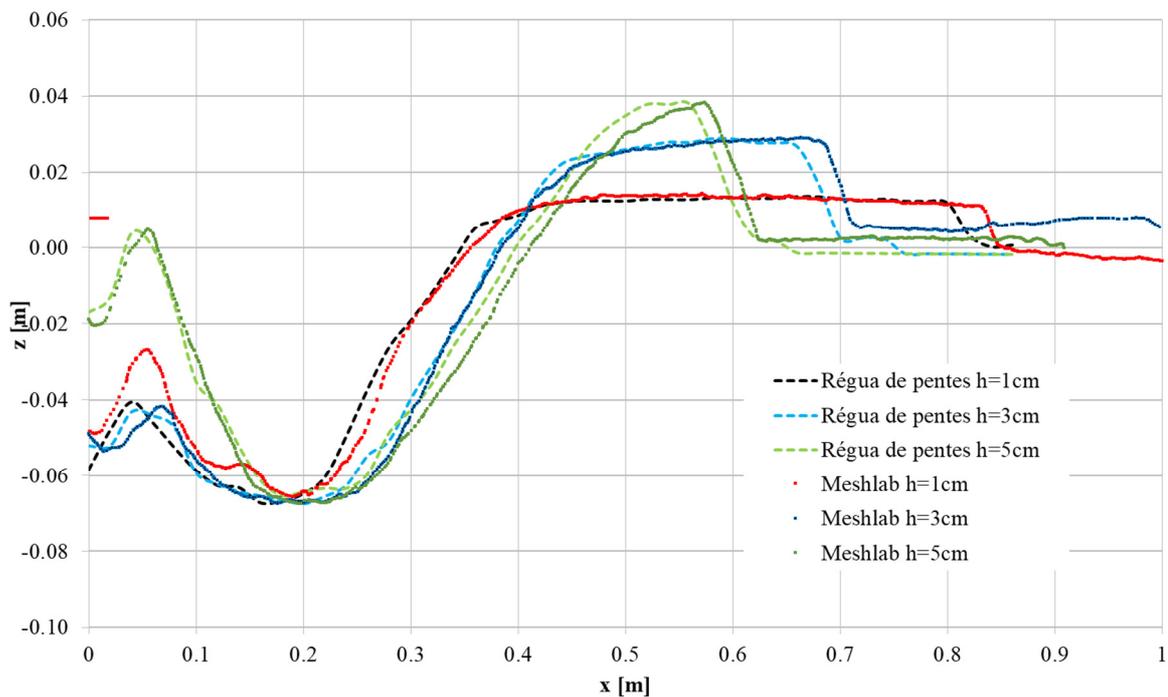


Figura 4.5 – Comparação dos perfis longitudinais obtidos com o programa Meshlab e com a régua de pentes ( $\alpha = 15^\circ$  e  $Q = 0,71$  L/s).

#### 4.5.2. INFLUÊNCIA DO CAUDAL E DA ALTURA DO COLCHÃO DE ÁGUA A JUSANTE

A análise dos diferentes perfis longitudinais de erosão, determinados para todas as condições de ensaio testadas, permitiu, de uma forma geral, confirmar que o colchão de água atenua a erosão.

Tal como esperado, para maiores alturas do escoamento a jusante as escavações obtidas são menores, conforme exemplificado na Figura 4.6, para todas as condições de ensaio testadas com  $Q = 0,71$  L/s, dois ângulos de saída do trampolim ( $10^\circ$  e  $15^\circ$ ) e três alturas do colchão de água a jusante (1, 3 e 5 cm). Os gráficos correspondentes aos restantes caudais (0,51 e 0,85 L/s) são apresentados em anexo C.

Por outro lado, pela análise geral dos perfis longitudinais de erosão obtidos, verificou-se também que a erosão é mais acentuada para os caudais mais elevados. Para além do aumento da profundidade máxima de erosão, regista-se também um aumento do comprimento da escavação, o que conduz a barra mais para jusante.

A variação dos perfis de erosão com o caudal é exemplificada na Figura 4.7, para todas as condições de ensaio definidas com  $h = 3$  cm, dois ângulos de saída do trampolim ( $10^\circ$  e  $15^\circ$ ) e três caudais (0,51, 0,71 e 0,85 L/s). Os gráficos correspondentes às restantes alturas do colchão de água a jusante (1 e 5 cm) são apresentados em anexo C.

Figueiredo (2010) e Machado (2016) apresentaram resultados semelhantes para ângulos de saída do trampolim superiores ( $20^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $45^\circ$ ).

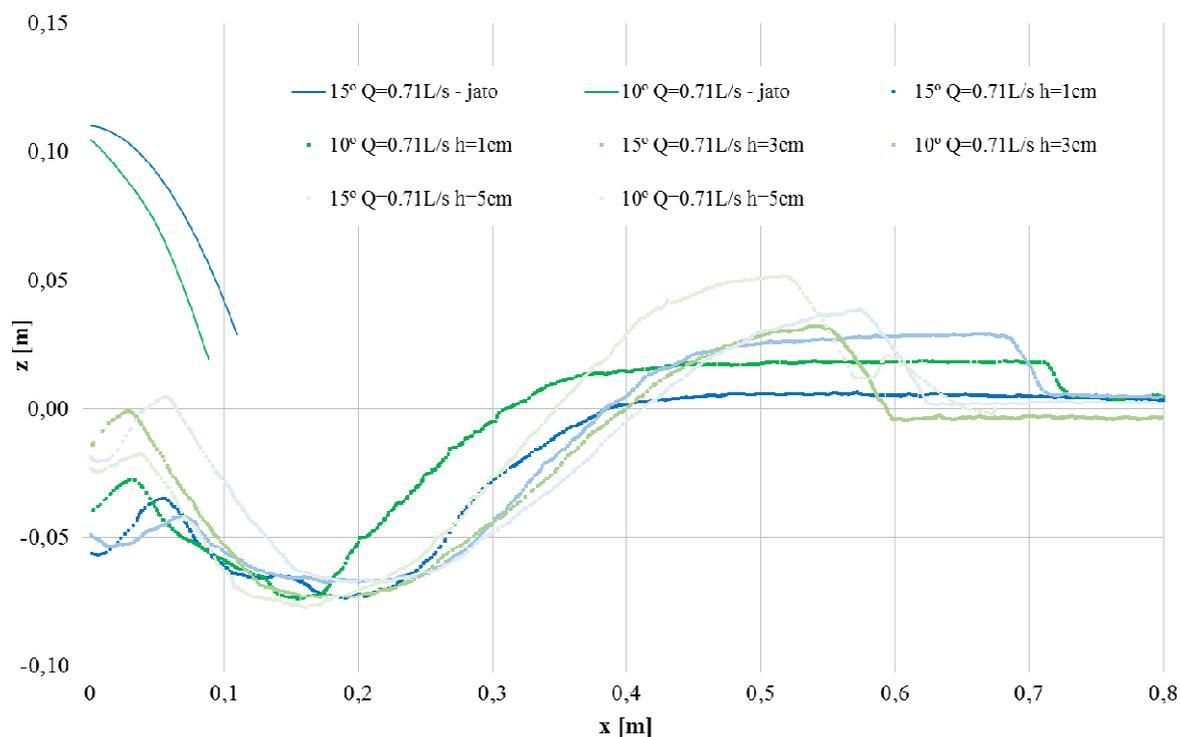


Figura 4.6 – Representação gráfica dos perfis de erosão e do jato médio para a condição  $Q = 0,71$  L/s.

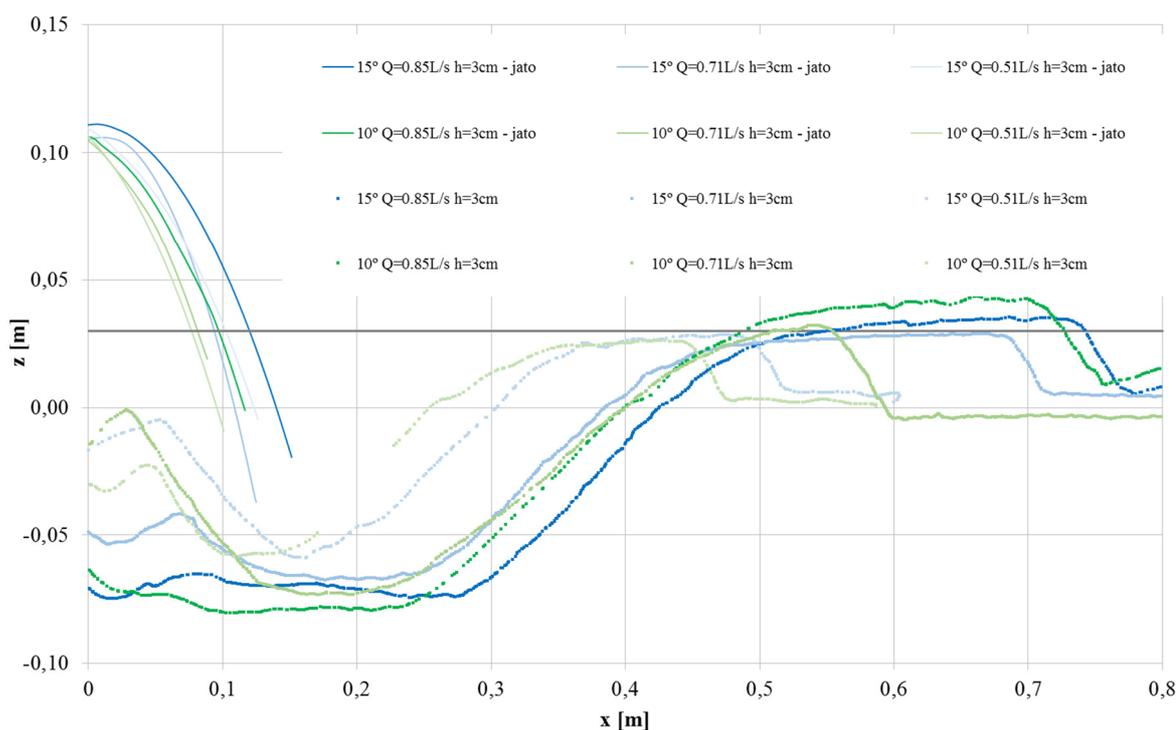


Figura 4.7 – Representação gráfica dos perfis de erosão e do jato médio para a condição  $h = 3$  cm.

#### 4.5.3. INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE SAÍDA DO TRAMPOLIM

O principal objetivo deste estudo consiste na análise da influência do ângulo de saída do trampolim nas características da erosão provocada à jusante, complementando o trabalho realizado por Machado (2016). Para isso, foram representados e comparados os perfis longitudinais de erosão medidos para os diferentes ângulos, para diferentes caudais e alturas do colchão de água a jusante. De modo a permitir uma análise mais abrangente, são representados também os perfis obtidos por Machado (2016), para os ângulos de 20°, 25° (apenas para  $Q = 0,71$  e  $0,85$  L/s), 30° e 45° (apenas para  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 5$  cm). Nas Figuras 4.8 a 4.10 apresenta-se, como exemplo, a variação dos perfis longitudinais de erosão com o ângulo de saída do trampolim, para um caudal de  $0,71$  L/s e três alturas do colchão de água, respetivamente. Os gráficos obtidos para os restantes caudais são apresentados no anexo C.

A análise dos resultados obtidos permitiu concluir que, de uma forma geral, a erosão é mais acentuada para um ângulo de saída do trampolim de 20°. Para os restantes ângulos considerados a escavação é menor, com exceção do ângulo de 15°. Neste caso, os perfis de erosão aproximam-se bastante dos obtidos para 20°, sendo, em alguns casos, praticamente coincidentes. Para 10° com  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 5$  cm, obteve-se perfil atípico em que a altura da barra excede a altura do colchão de água a jusante. Dada a limitação de tempo não foi possível repetir os ensaios, pelo que estes resultados terão de ser confirmados numa fase posterior.

De acordo com Machado (2016), para os ângulos de 30° e 45° e para um caudal de  $0,71$  L/s o escoamento no trampolim era diferente devido à ocorrência de ressalto hidráulico. Por este motivo, parte da energia era dissipada no trampolim e a energia do jato era menor. Consequentemente, a velocidade na secção de saída do trampolim e o alcance do jato também são menores e a erosão é menor, mas a cavidade ocorre mais perto do descarregador, o que não é desejável.

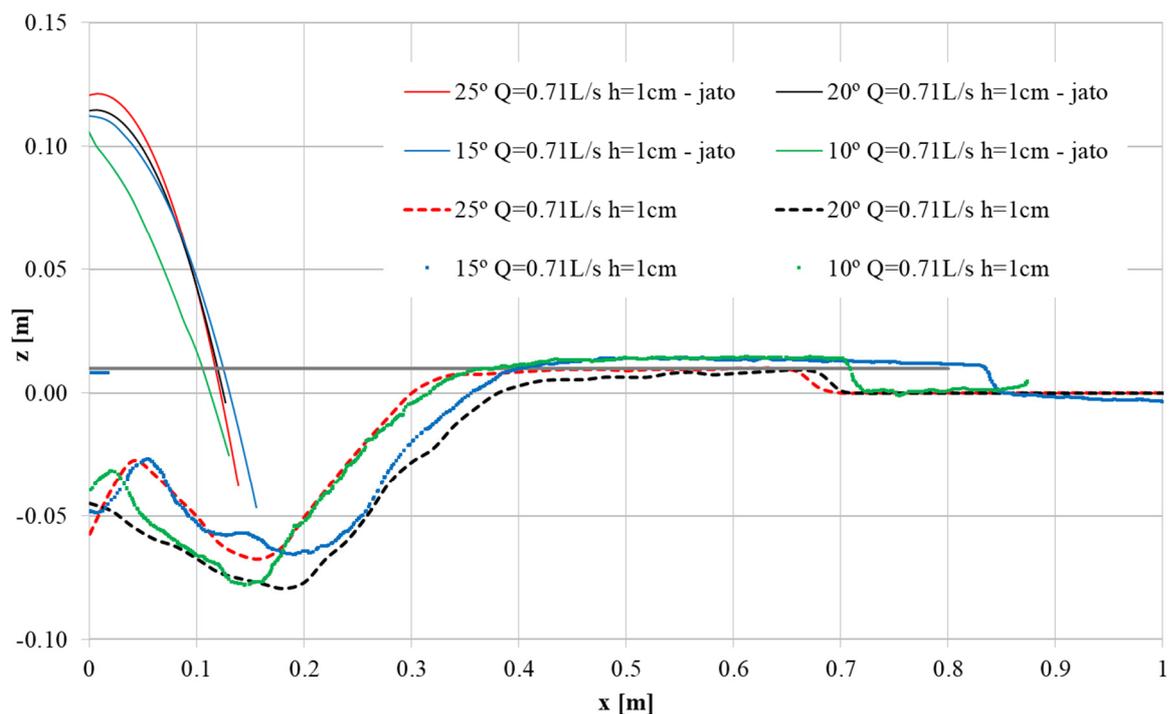


Figura 4.8 – Variação dos perfis longitudinais de erosão com o ângulo de saída do trampolim, para  $Q = 0,71 \text{ L/s}$  e  $h = 1 \text{ cm}$ .

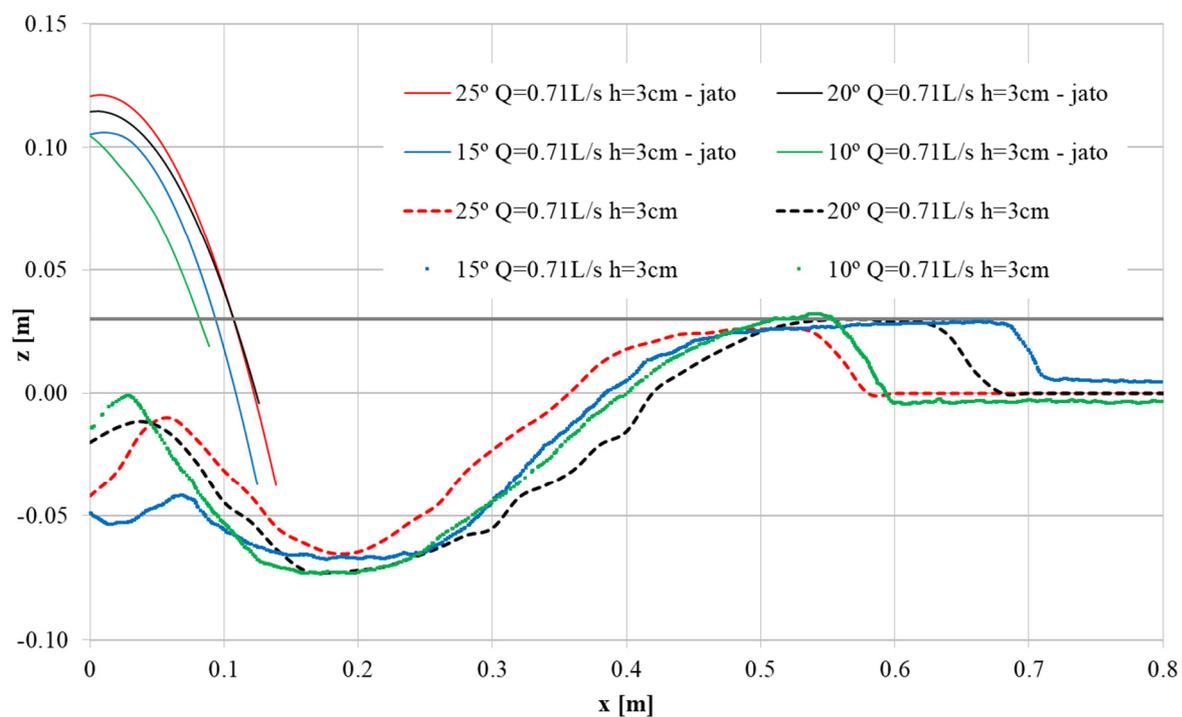


Figura 4.9 – Variação dos perfis longitudinais de erosão com o ângulo de saída do trampolim, para  $Q = 0,71 \text{ L/s}$  e  $h = 3 \text{ cm}$ .

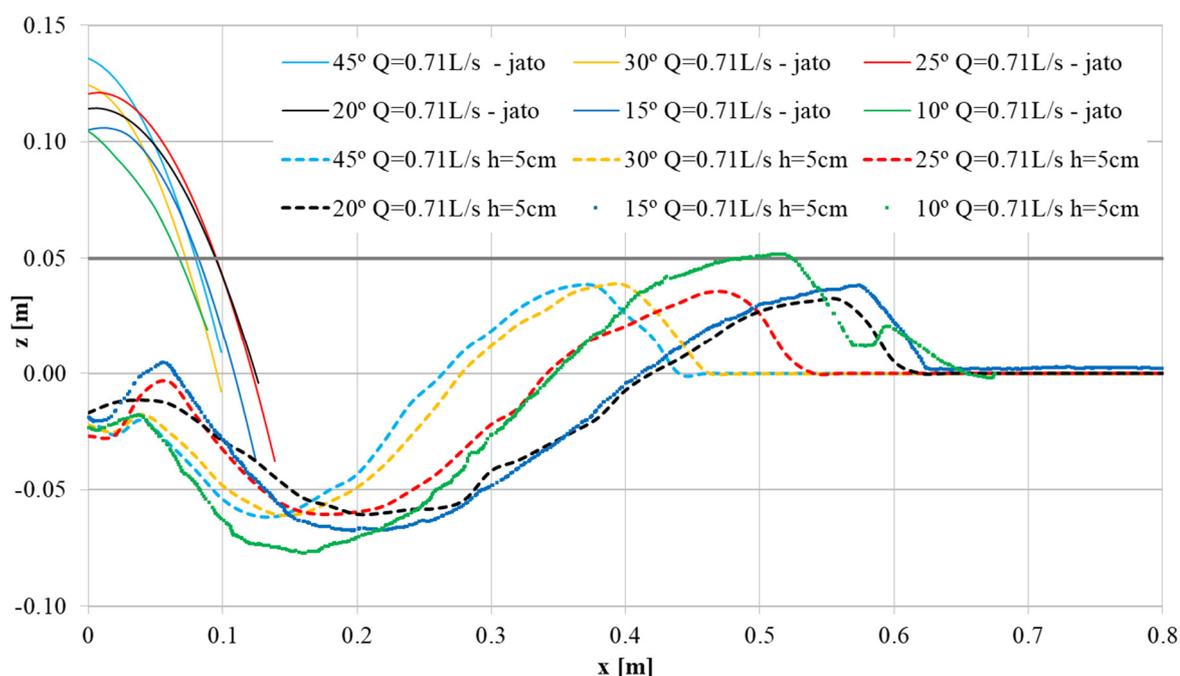


Figura 4.10 – Variação dos perfis longitudinais de erosão com o ângulo de saída do trampolim, para  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 5$  cm.

#### 4.6. CARACTERÍSTICAS DA FOSSA DE EROSIÃO

Nesta secção apresentam-se os valores experimentais das principais dimensões da cavidade de erosão e a sua análise no que se refere à influência do ângulo de saída do trampolim, assim como a comparação com as estimativas obtidas pelas fórmulas empíricas propostas por diferentes autores.

A análise dos resultados dos estudos de Figueiredo (2010), Machado (2016) e Machado *et al.* (2017), obtidos na mesma instalação experimental, permitiu realizar uma seleção das fórmulas cujas estimativas mais se aproximaram dos resultados experimentais dos referidos autores. Assim sendo, são apresentadas nas subsecções seguintes apenas as expressões que se consideram mais relevantes para o presente estudo.

##### 4.6.1. PROFUNDIDADE MÁXIMA DA ESCAVAÇÃO

No Quadro 4.7 são apresentados valores da profundidade máxima de escavação, medidos com recurso ao método SfM, descrito na Subsecção 3.5.3, para os ângulos de saída de 10° e 15°, bem como os valores obtidos por Machado (2016) para os ângulos de 20° e 25°.

Tal como referido na análise dos perfis longitudinais de erosão, verifica-se que a profundidade máxima da escavação é, em geral, superior para 20°. No entanto os valores obtidos para 15° são muito próximos e, em algumas condições, são mesmo superiores.

Os valores das estimativas da profundidade máxima de erosão obtidas por diferentes expressões são apresentados nos Quadros 4.8 e 4.9, respetivamente para 10° e 15°. A aplicação das expressões empíricas e semiempíricas propostas pelos diferentes autores, tem por base o conhecimento de diferentes variáveis, definidas no Capítulo 2.

Quadro 4.7 – Profundidades máximas de escavação (valores em cm).

Q (L/s)	h (cm)	10°	15°	20° (Machado, 2016)	25° (Machado, 2016)
0,51	1	5,62	6,26	7,00	-
	3	5,70	6,46	5,85	-
	5	5,10	5,62	4,40	-
0,71	1	7,39	7,08	7,95	6,75
	3	7,07	6,76	7,30	6,50
	5	7,81	6,79	6,05	6,05
0,85	1	8,66	7,48	9,35	7,35
	3	8,04	7,45	8,20	7,10
	5	8,44	8,53	7,05	6,90

Quadro 4.8 – Estimativas da profundidade máxima de escavação para  $\alpha = 10^\circ$  (medidas em cm).

Autor	Q = 0,51 L/s			Q = 0,71 L/s			Q = 0,85 L/s		
	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm
Schoklitsch (1935)	18,02	17,23	16,27	22,26	21,41	20,38	24,97	24,06	23,00
Patrashev (1937)	18,86	17,84	16,59	22,90	21,80	20,51	25,44	24,29	22,96
Damle <i>et al.</i> (1966)	2,08	1,86	1,61	2,60	2,36	2,08	2,93	2,67	2,39
Wu (1973)	6,62	6,28	5,87	8,06	7,69	7,26	8,96	8,58	8,13
Martins (1984)	7,61	7,44	7,23	9,38	9,20	8,98	10,52	10,32	10,09
Taraimovich (1978)	1,65	1,56	1,45	2,12	2,02	1,90	2,42	2,32	2,19
Raudkivi <i>et al.</i> (1985)	8,02	7,59	7,06	9,74	9,27	8,72	10,82	10,33	9,76
Mason & Arumugam (1985)	5,20	6,01	6,32	6,41	7,43	7,84	7,18	8,33	8,81
Mirskhulava <i>et al.</i> (1967)	17,70	15,29	12,88	24,21	22,07	18,75	29,11	26,15	22,98
Mirskhulava <i>et al.</i> (1967)	25,09	22,02	18,84	24,02	21,64	18,03	23,87	20,96	17,80
Yildiz & Üzücek (1994)	7,70	4,92	2,28	8,87	6,39	3,22	9,88	6,92	3,93
Naini (2011)	10,50	8,01	6,89	13,45	10,30	8,91	15,38	11,80	10,23

Quadro 4.9 – Estimativas da profundidade máxima de escavação para  $\alpha = 15^\circ$  (medidas em cm).

Autor	Q = 0,51 L/s			Q = 0,71 L/s			Q = 0,85 L/s		
	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm
Schoklitsch (1935)	18,14	17,38	16,45	22,44	21,61	20,63	25,13	24,25	23,23
Patrashev (1937)	19,02	18,03	16,83	23,13	22,07	20,82	25,64	24,53	23,24
Damle <i>et al.</i> (1966)	2,12	1,90	1,66	2,65	2,41	2,15	2,98	2,73	2,45
Wu (1973)	6,68	6,35	5,95	8,13	7,78	7,37	9,02	8,66	8,23
Martins (1984)	7,63	7,47	7,27	9,42	9,25	9,03	10,55	10,37	10,14
Taraimovich (1978)	1,66	1,58	1,47	2,14	2,04	1,92	2,44	2,34	2,22
Raudkivi <i>et al.</i> (1985)	8,09	7,67	7,16	9,84	9,39	8,86	10,91	10,43	9,88
Mason & Arumugam (1985)	5,22	6,04	6,35	6,44	7,46	7,89	7,20	8,36	8,85
Mirskhulava <i>et al.</i> (1967)	17,80	15,46	13,04	24,63	22,39	19,43	29,49	27,06	23,35
Mirskhulava <i>et al.</i> (1967)	25,29	22,34	19,16	24,47	22,00	18,76	24,23	21,75	18,17
Yildiz & Uzucek (1994)	7,79	5,05	2,38	9,18	6,61	3,64	10,15	7,49	4,14
Naini (2011)	10,50	8,02	6,91	13,47	10,32	8,94	15,39	11,81	10,26

A análise comparativa entre os valores da profundidade máxima obtidos experimentalmente e as estimativas dos diferentes autores foi realizada com base em 3 parâmetros estatísticos, também utilizados por Heng *et al.* (2013), definidos pelas expressões (4.5), (4.6) e (4.7).

$$NSE = 1 - \frac{\sum(f_{exp} - f_{est})^2}{\sum(f_{exp} - \bar{f}_{exp})^2} \quad (4.5)$$

em que NSE (eficiência de Nash-Sutcliffe) é um indicador que mede a qualidade do ajuste (de acordo com Mariasi *et al.* (2007), citado por Heng *et al.* (2013), o ajuste é considerado satisfatório para valores de NSE superiores a 0,5),  $f_{exp}$  é o valor experimental,  $f_{est}$  a estimativa e  $\bar{f}_{exp}$  a média dos valores experimentais.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (f_{exp} - f_{est})^2} \quad (4.6)$$

em que RMSE (erro quadrático médio) é o desvio padrão e  $n$  o número de ensaios.

$$MAPE = 100 \times \frac{1}{n} \sum \left| \frac{f_{exp} - f_{est}}{f_{est}} \right| \quad (4.7)$$

em que MAPE (erro médio absoluto percentual) é erro percentual médio absoluto.

Pela análise dos resultados obtidos, apresentados nos Quadros 4.10 e 4.11, verifica-se que para as estimativas de Schoklitsch (1935), Patrashev (1937) e Mirskhulava *et al.* (1967) os valores de MAPE são superiores a 100%. De acordo com este parâmetro estatístico, as melhores estimativas correspondem às de Wu (1973) e Mason e Arumugam (1985), cujos valores de MAPE são inferiores a 20% para  $\alpha = 10^\circ$  e inferiores a 10% para  $\alpha = 15^\circ$ . Para estes autores obtiveram-se valores do desvio padrão (RMSE) inferiores a 1cm para os dois ângulos de saída do trampolim considerados.

No que se refere ao indicador NSE, para  $\alpha = 10^\circ$  verifica-se que as duas estimativas com menores valores de MAPE e RMSE são os que correspondem a valores de NSE superiores a 0,5 (Wu, 1973; Mason e Arumugam, 1985). Para  $\alpha = 15^\circ$  nenhuma das estimativas apresenta valores de NSE superiores a 0,5.

Em suma, conclui-se que os melhores ajustes aos resultados experimentais correspondem às expressões de Wu (1973) e Mason e Arumugam (1985), que apresentam menores valores do erro quadrático médio (RMSE) e do erro médio absoluto percentual (MAPE) e valor da eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) superior a 0,5. Estes resultados são semelhantes aos apresentados por Machado *et al.* (2017) para um ângulo de saída de  $20^\circ$ .

Heng *et al.* (2013) no seu estudo de erosão a jusante de um descarregador com trampolim em salto de esqui obtiveram o melhor ajuste com o método de Mirskhulava (1967), que no presente estudo e no de Machado *et al.* (2017) apresenta valores do erro médio absoluto percentual (MAPE) superiores a 200%. O segundo melhor ajuste foi obtido com a expressão de Taraimovich (1978), que no presente estudo apresenta um valor de MAPE da ordem dos 70%. De referir que a diferença encontrada nos dois estudos para o ajuste de Taraimovich (1978) pode estar relacionada com a dissipação adicional de energia no descarregador em degraus do presente estudo, diminuindo a energia do jato e, conseqüentemente, a erosão resultante.

Quadro 4.10 – Análise estatística das diferentes estimativas das profundidades máximas de erosão para  $\alpha = 10^\circ$ .

<b>Autor</b>	<b>NSE</b>	<b>RMSE (cm)</b>	<b>MAPE (%)</b>
Schoklitsch (1935)	-121,43	13,86	207,04
Patrashev (1937)	-128,43	14,25	213,21
Damle <i>et al.</i> (1966)	-14,37	4,91	62,43
Wu (1973)	0,74	0,63	18,746
Martins (1984)	-1,30	1,90	38,61
Taraimovich (1978)	-16,48	5,24	66,62
Raudkivi <i>et al.</i> (1985)	-1,53	1,99	39,61
Mason & Arumugam (1985)	0,63	0,76	19,94
Mirskhulava <i>et al.</i> (1967)	-132,25	14,46	205,08
Mirskhulava <i>et al.</i> (1967)	-134,45	14,57	223,17
Yildiz & Uzucek (1994)	-3,30	2,60	28,75
Naini (2011)	-9,11	3,98	60,86

Quadro 4.11 – Análise estatística das diferentes estimativas das profundidades máximas de erosão para  $\alpha = 15^\circ$ .

<b>Autor</b>	<b>NSE</b>	<b>RMSE (cm)</b>	<b>MAPE (%)</b>
Schoklitsch (1935)	-347,34	14,27	202,23
Patrashev (1937)	-368,83	14,70	208,96
Damle <i>et al.</i> (1966)	-35,84	4,64	66,45
Wu (1973)	-0,20	0,84	9,90
Martins (1984)	-7,03	2,17	29,60
Taraimovich (1978)	-41,69	5,00	71,63
Raudkivi <i>et al.</i> (1985)	-8,07	2,30	31,41
Mason & Arumugam (1985)	0,09	0,73	10,01
Mirskhulava <i>et al.</i> (1967)	-391,76	15,15	205,10
Mirskhulava <i>et al.</i> (1967)	-388,55	15,09	217,82
Yildiz & Uzucek (1994)	-9,44	2,47	30,19
Naini (2011)	-30,13	4,27	52,35

#### 4.7. DIMENSÕES EM PLANTA

A análise das dimensões em planta da escavação é de extrema importância, uma vez que a evolução da erosão pode comprometer a estabilidade das margens. Na secção 2.3.4 apresentam-se algumas expressões, desenvolvidas por Azmathullah *et al.* (2004), Naini (2011), Ghodsian *et al.* (2012) e Ghodsian *et al.* (1999), que permitem prever a largura da escavação,  $B_s$ , o seu comprimento,  $L_s$ , e ainda a distância, na horizontal, entre a secção de saída do trampolim e o ponto onde se verifica a maior profundidade de erosão,  $L^*$ .

Nos Quadros 4.12 a 4.17 apresentam-se as estimativas obtidas pelas expressões dos diferentes autores e os correspondentes valores experimentais para os ângulos de saída de  $10^\circ$  e  $15^\circ$ . Estes resultados encontram-se comparados graficamente nas Figuras 4.11 a 4.13. Nas mesmas figuras são incluídos os resultados obtidos por Machado (2016).

Quadro 4.12 – Estimativas e valores experimentais de  $B_s$  para  $\alpha = 10^\circ$  (valores em cm).

<b>Autor</b>	<b>Q = 0,51 L/s</b>			<b>Q = 0,71 L/s</b>			<b>Q = 0,85 L/s</b>		
	<b>h=1 cm</b>	<b>h=3 cm</b>	<b>h=5 cm</b>	<b>h=1 cm</b>	<b>h=3 cm</b>	<b>h=5 cm</b>	<b>h=1 cm</b>	<b>h=3 cm</b>	<b>h=5 cm</b>
Azmathullah <i>et al.</i> (2004)	22,87	22,31	19,93	24,24	24,01	21,96	24,98	24,91	23,03
Naini (2011)	1,66	1,63	1,62	1,67	1,64	1,63	1,67	1,65	1,63
Ghodsian <i>et al.</i> (2012)	27,08	26,79	26,65	29,80	29,47	29,32	31,64	31,29	31,13
Ghodsian <i>et al.</i> (1999)	23,74	26,62	25,04	27,46	31,31	30,26	29,67	34,10	33,35
<b>Experimental</b>	<b>29,73</b>	<b>30,23</b>	<b>21,38</b>	<b>33,16</b>	<b>26,11</b>	<b>29,35</b>	<b>39,51</b>	<b>30,61</b>	<b>30,72</b>

Quadro 4.13 – Estimativas e valores experimentais de  $B_s$  para  $\alpha = 15^\circ$  (valores em cm).

Autor	Q = 0,51 L/s			Q = 0,71 L/s			Q = 0,85 L/s		
	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm
Azmathullah <i>et al.</i> (2004)	20,65	20,25	18,22	21,96	21,85	20,13	22,55	22,56	20,97
Naini (2011)	3,15	3,10	3,08	3,17	3,12	3,09	3,17	3,13	3,10
Ghodsian <i>et al.</i> (2012)	27,18	26,88	26,75	29,74	29,42	29,27	31,64	31,30	31,14
Ghodsian <i>et al.</i> (1999)	24,24	27,33	25,93	28,14	32,26	31,42	30,28	34,94	34,37
<b>Experimental</b>	<b>36,31</b>	<b>27,40</b>	<b>20,25</b>	<b>39,37</b>	<b>34,63</b>	<b>24,91</b>	<b>43,37</b>	<b>35,44</b>	<b>28,83</b>

Quadro 4.14 – Estimativas e valores experimentais de  $L_s$  para  $\alpha = 10^\circ$  (valores em cm).

Autor	Q=0,51L/s			Q=0,71L/s			Q=0,85L/s		
	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm	H=1 cm	h=3 cm	h=5 cm
Naini (2011)	39,36	29,72	25,14	50,04	37,99	32,41	56,99	43,37	37,14
Ghodsian <i>et al.</i> (2012)	35,01	30,35	28,40	38,49	33,36	31,22	40,66	35,25	32,98
<b>Experimental</b>	<b>20,60</b>	<b>20,47</b>	<b>21,17</b>	<b>27,56</b>	<b>33,92</b>	<b>24,10</b>	<b>34,22</b>	<b>33,67</b>	<b>36,66</b>

Quadro 4.15 – Estimativas e valores experimentais de  $L_s$  para  $\alpha = 15^\circ$  (valores em cm).

Autor	Q=0,51L/s			Q=0,71L/s			Q=0,85L/s		
	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm
Naini (2011)	39,62	29,97	25,41	50,42	38,34	32,80	57,34	43,70	37,50
Ghodsian <i>et al.</i> (2012)	35,06	30,39	28,44	38,45	33,34	31,19	40,66	35,25	32,98
<b>Experimental</b>	<b>22,76</b>	<b>24,38</b>	<b>23,29</b>	<b>33,88</b>	<b>31,81</b>	<b>34,55</b>	<b>34,78</b>	<b>33,85</b>	<b>41,30</b>

Quadro 4.16 – Estimativas e valores experimentais de  $L^*$  para  $\alpha = 10^\circ$  (valores em cm).

Autor	Q = 0,51 L/s			Q = 0,71 L/s			Q = 0,85 L/s		
	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm
Azmathullah <i>et al.</i> (2004)	32,68	31,03	28,77	38,78	37,10	34,82	42,53	40,83	38,53
Naini (2011)	13,09	11,95	10,40	15,22	14,09	12,54	16,49	15,37	13,82
Ghodsian <i>et al.</i> (1999)	8,20	8,11	7,26	9,12	9,17	8,41	9,66	9,78	9,07
<b>Experimental</b>	<b>11,07</b>	<b>11,12</b>	<b>13,24</b>	<b>15,58</b>	<b>20,43</b>	<b>18,11</b>	<b>18,78</b>	<b>10,55</b>	<b>1,90</b>

Quadro 4.17 – Estimativas e valores experimentais de  $L^*$  para  $\alpha = 10^\circ$  (valores em cm).

Autor	Q = 0,51 L/s			Q = 0,71 L/s			Q = 0,85 L/s		
	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm
Azmathullah <i>et al.</i> (2004)	32,43	30,87	28,73	38,54	36,97	34,82	42,19	40,58	38,39
Naini (2011)	13,15	12,06	10,57	15,33	14,25	12,78	16,55	15,48	13,99
Ghodsian <i>et al.</i> (1999)	8,36	8,32	7,50	9,34	9,43	8,72	9,84	10,00	9,33
<b>Experimental</b>	<b>13,78</b>	<b>16,19</b>	<b>14,10</b>	<b>19,17</b>	<b>21,17</b>	<b>19,61</b>	<b>20,78</b>	<b>23,85</b>	<b>22,10</b>

A análise da Figura 4.11 permite concluir que, de uma forma geral, a melhores estimativas para os valores experimentais da largura da escavação obtidos para  $10^\circ$  e  $15^\circ$  correspondem às expressões de Ghodsian *et al.* (1999) e Ghodsian *et al.* (2012). A expressão de Azmathullah *et al.* (2004) sobrevaloriza os valores enquanto as estimativas de Naini (2011) são muito inferiores aos resultados experimentais obtidos. De referir que para  $20^\circ$  e  $25^\circ$ , as estimativas dão sempre valores inferiores porque os valores experimentais incluem a largura da barra. No entanto Machado *et al.* (2019) sugerem uma boa aproximação entre as estimativas de Ghodsian *et al.* (1999) e os valores da largura da escavação medidos para as condições em que foram construídos nos moldes de gesso da cavidade de erosão. No que se refere ao comprimento da escavação (Figura 4.12), a dispersão de resultados verificada para as estimativas de Naini (2011) é independente do ângulo de saída do trampolim.

A análise da Figura 4.13 permite confirmar que, apesar da dispersão de valores observada, as estimativas de Naini (2011) são as que mais se aproximam dos resultados experimentais obtidos para os ângulos de saída de  $10^\circ$  e  $15^\circ$ . No entanto, para  $20^\circ$  e  $25^\circ$ , as estimativas são em geral superiores aos valores experimentais, exceto para Ghodsian *et al.* (1999).

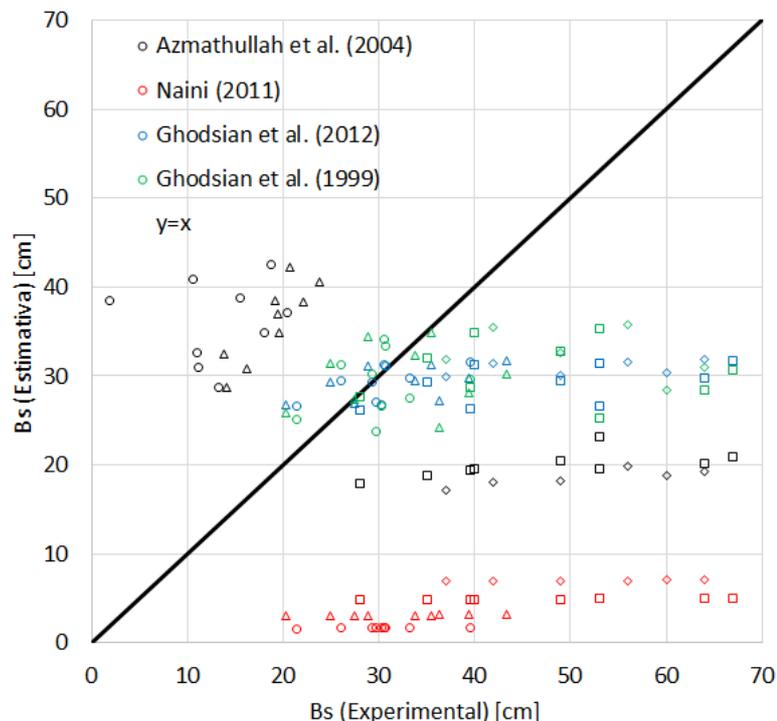


Figura 4.11 – Comparação do  $B_s$  estimado com experimental (◆  $\alpha = 25^\circ$ , ■  $\alpha = 20^\circ$ , ▲  $\alpha = 15^\circ$  e ●  $\alpha = 10^\circ$ ).

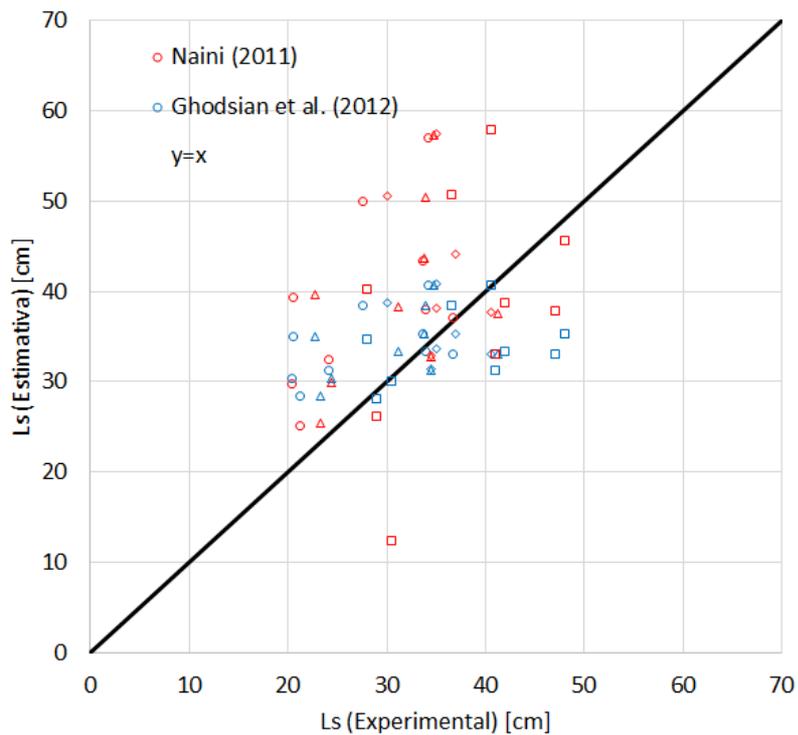


Figura 4.12 – Comparação do  $L_s$  estimado com experimental ( $\blacklozenge \alpha = 25^\circ$ ,  $\blacksquare \alpha = 20^\circ$ ,  $\blacktriangle \alpha = 15^\circ$  e  $\bullet \alpha = 10^\circ$ ).

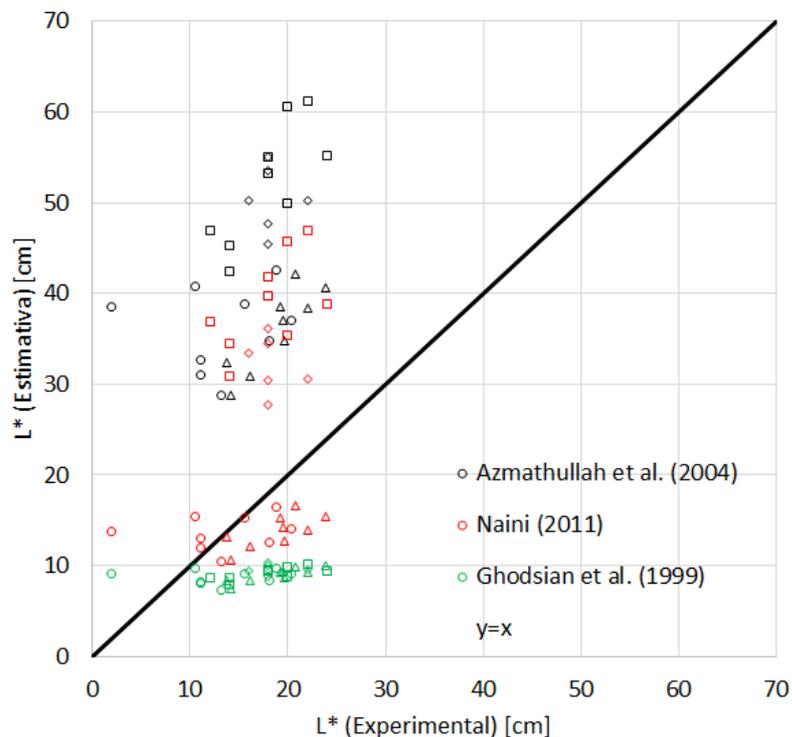


Figura 4.13 – Comparação do  $L^*$  estimado com experimental ( $\blacklozenge \alpha = 25^\circ$ ,  $\blacksquare \alpha = 20^\circ$ ,  $\blacktriangle \alpha = 15^\circ$  e  $\bullet \alpha = 10^\circ$ ).

A análise das Figuras 4.11 a 4.13 não permitiu concluir sobre a influência do ângulo de saída do trampolim nas características geométricas da escavação. Por esse motivo, optou-se por representar

graficamente, nas Figuras 4.14 a 4.16, as diferentes variáveis,  $B_s$ ,  $L_s$  e  $L^*$ , adimensionalizadas com a altura do colchão de água a jusante, em função do parâmetro adimensional  $Q^*$ , definido na secção 4.2.

A análise do gráfico da Figura 4.14, permitiu concluir que as larguras máximas da escavação são menores para  $\alpha = 10^\circ$ . Neste caso não é possível realizar uma análise mais detalhada dadas as diferenças consideradas nos valores obtidos no presente estudo e por Machado (2016).

Em relação ao comprimento da escavação (Figura 4.15) é notório que os valores são maiores para um ângulo do trampolim de  $20^\circ$ . Estes resultados seriam já esperados após a análise dos perfis longitudinais de erosão, uma vez que estes têm por base a determinação do comprimento da escavação. Também se pode verificar que os resultados obtidos para  $15^\circ$  são bastante próximos aos de  $25^\circ$ .

Pela Figura 4.16 conclui-se que as profundidades máximas ocorrem a maiores distâncias do descarregador para os ângulos de  $20^\circ$  e  $15^\circ$ . Para os ângulos de  $25^\circ$  e  $10^\circ$  os valores são menores, o que significa que a erosão pode ocorrer mais próxima do descarregador. Estes resultados devem ser analisados com maior detalhe uma vez que a proximidade da erosão poderá pôr em causa a segurança da estrutura.

Para completar a análise realizada em função do parâmetro adimensional  $Q^*$ , apresenta-se na Figura 4.17 a variação da profundidade máxima de erosão adimensionalizada com a altura do colchão de água a jusante. Neste caso, é notório que as maiores profundidades ocorrem para  $\alpha = 20^\circ$  enquanto as menores ocorrem para  $\alpha = 25^\circ$ . Para  $\alpha = 10^\circ$  e  $\alpha = 15^\circ$  obteve-se valores intermédios e relativamente próximos uns dos outros, com valores ligeiramente superiores para  $\alpha = 10^\circ$ .

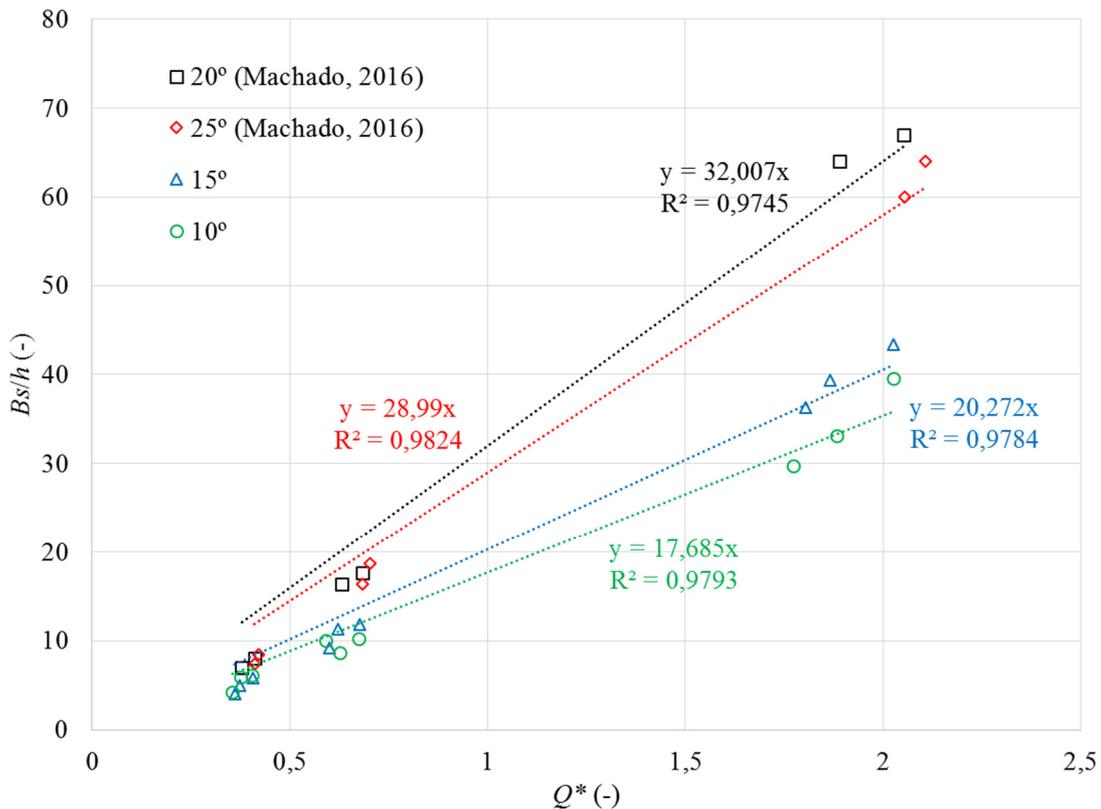


Figura 4.14 – Variação de  $B_s/h$  em função de  $Q^*$ .

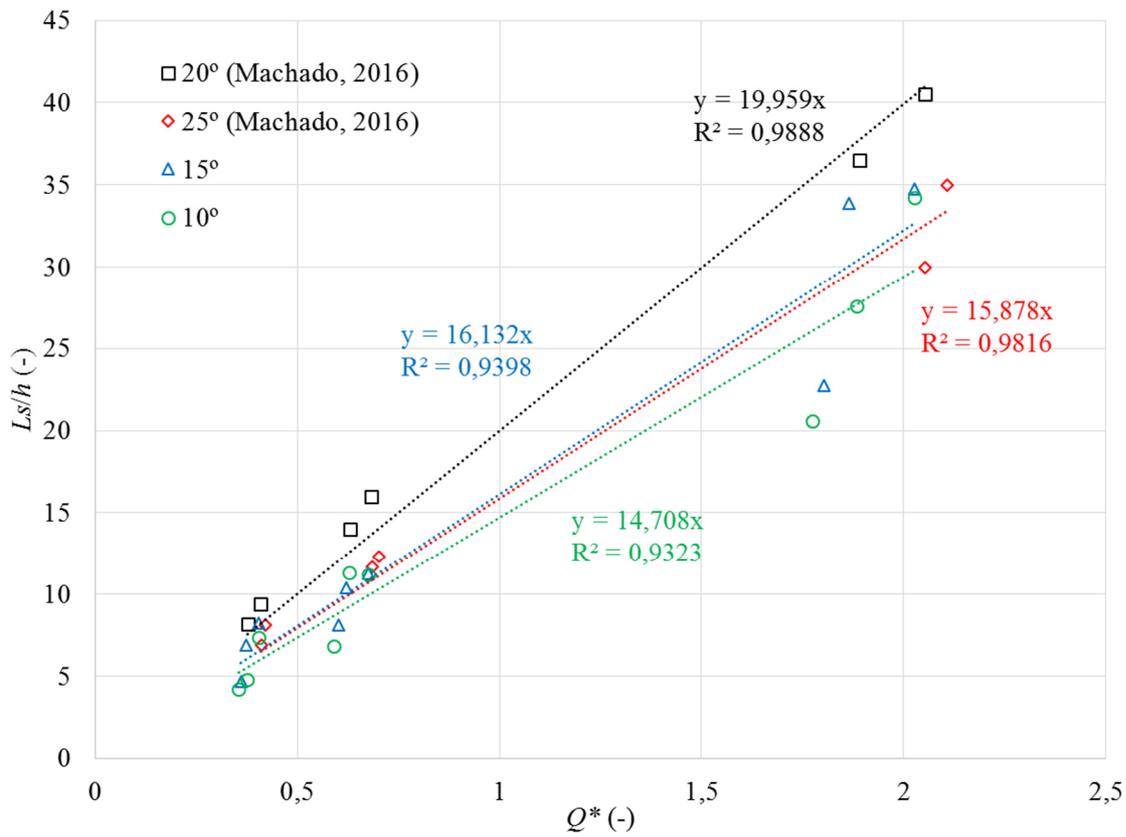


Figura 4.15 – Variação de  $L_s/h$  em função de  $Q^*$ .

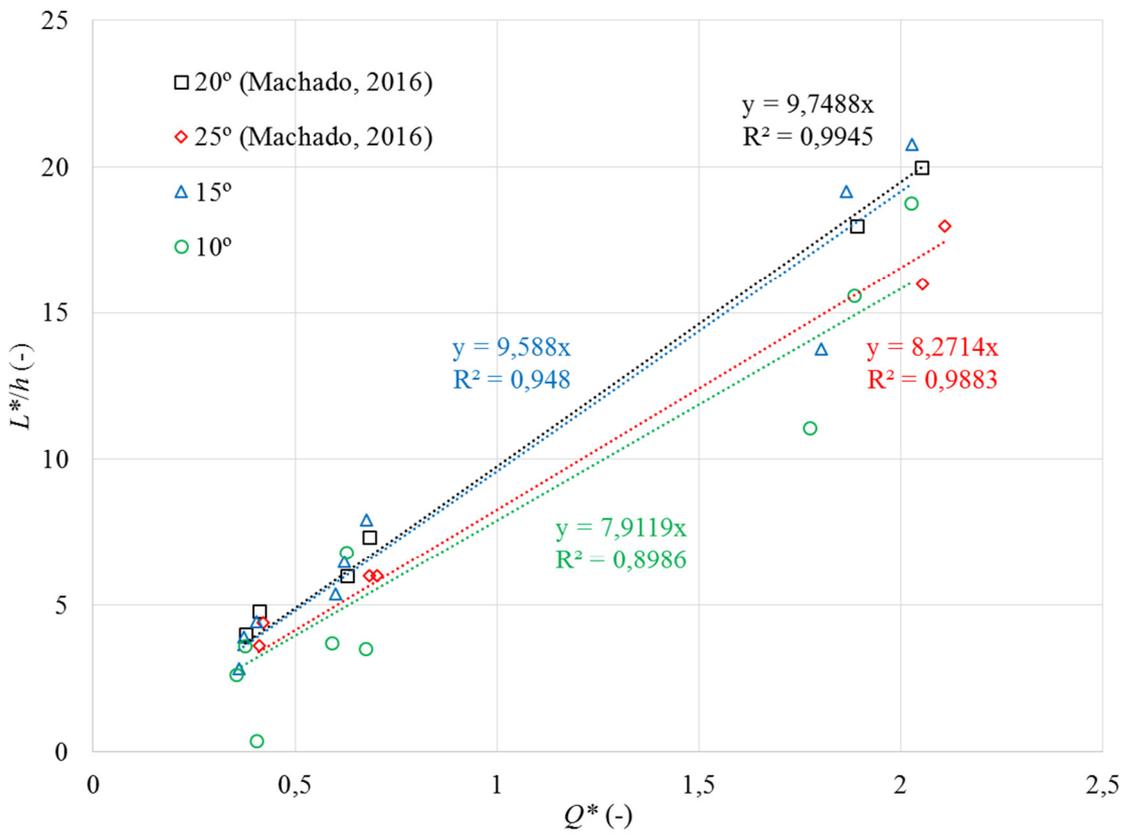


Figura 4.16 – Variação de  $L^*/h$  em função de  $Q^*$ .

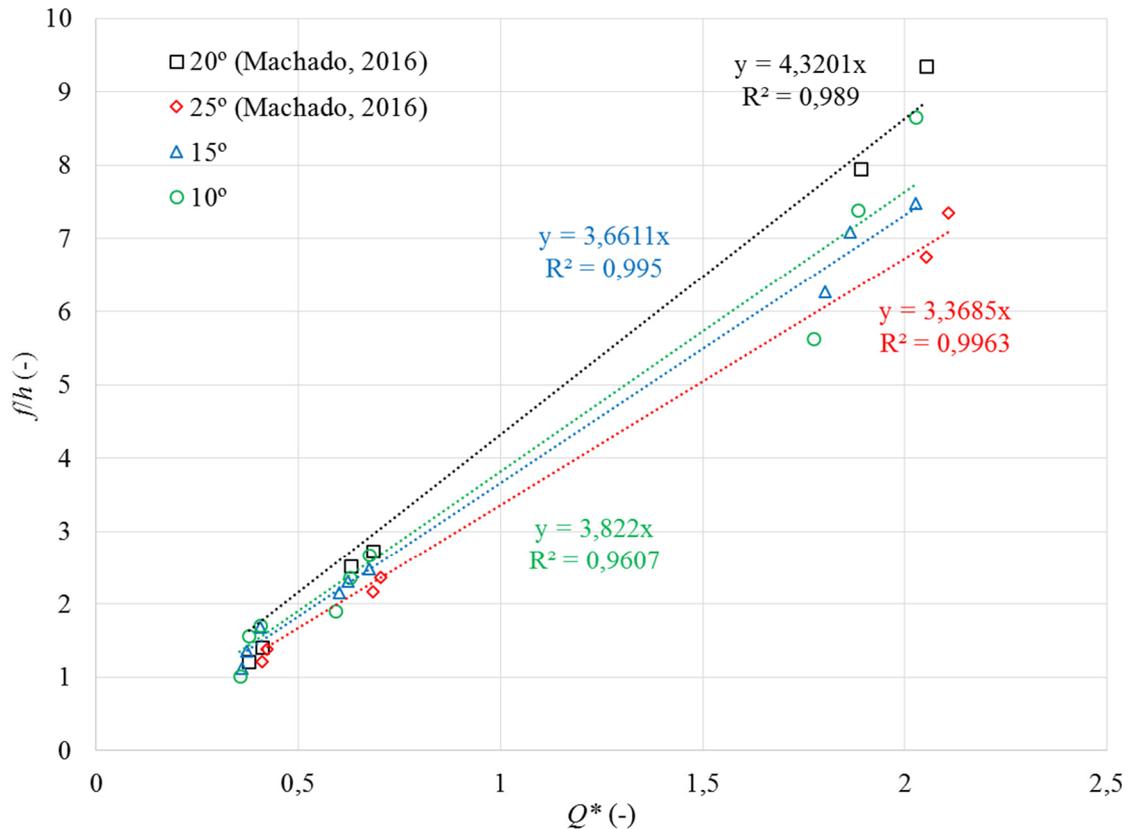


Figura 4.17 – Variação de  $f/h$  em função de  $Q^*$ .

#### 4.8. MEDIÇÃO DO VOLUME E CONFIGURAÇÃO 3D DA ESCAVAÇÃO

Como já foi referido na Subsecção 3.5.3, procedeu-se à medição do volume e configuração 3D da cavidade de erosão através do processamento de imagens no programa 3DF Zephyr, do Meshlab para referenciar o referencial Oxyz e por fim o tratamento usando rotinas desenvolvidas em Matlab. No final do processo são exportadas informações importantes para a análise da cavidade que, juntamente com as informações retiradas dos perfis longitudinais, obtém-se as medições dos volumes. Na Figura 4.18, são apresentadas as áreas de interesse para o cálculo dos volumes acima referidos para a condição:  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 3$  cm para os três ângulos em estudo.

As respetivas imagens, para as quais se calculam os volumes da escavação e da barra, estão representadas na Figura 4.19 para a condição  $Q = 0,71$  L/s,  $h = 3$  cm, para  $\alpha = 10^\circ$ ,  $\alpha = 15^\circ$  e  $\alpha = 20^\circ$ . Os gráficos obtidos para as restantes condições estão apresentadas no anexo D.

Por fim, os perfis 3D gerados pelo Matlab encontram-se representados na Figura 4.20.

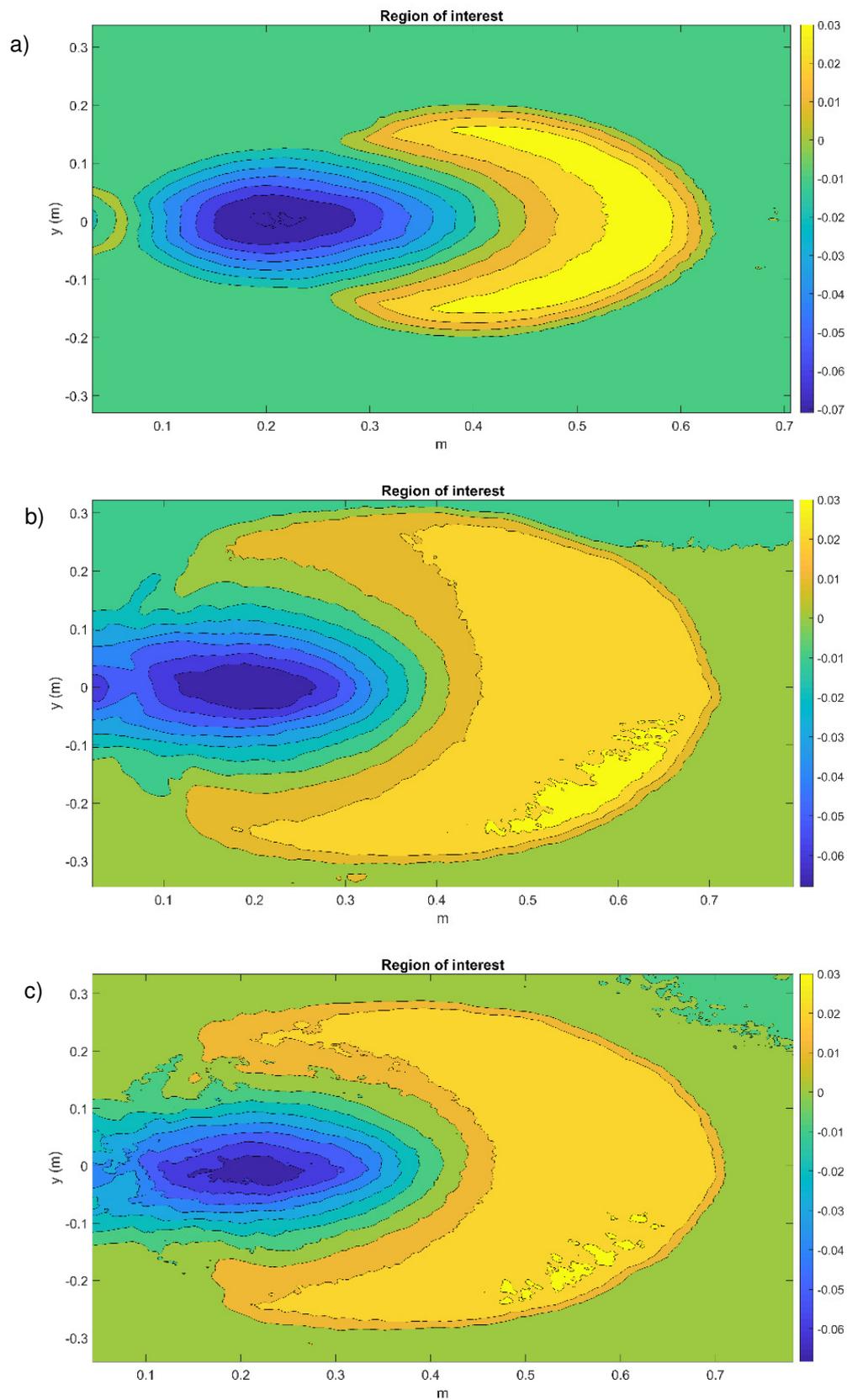


Figura 4.18 – Região selecionada para o cálculo dos volumes da escavação e da barra para  $Q = 0,71$  L/s,  $h = 3$  cm e três ângulos de saída do trampolim: a)  $\alpha = 10^\circ$ , b)  $\alpha = 15^\circ$  e c)  $\alpha = 20^\circ$ .

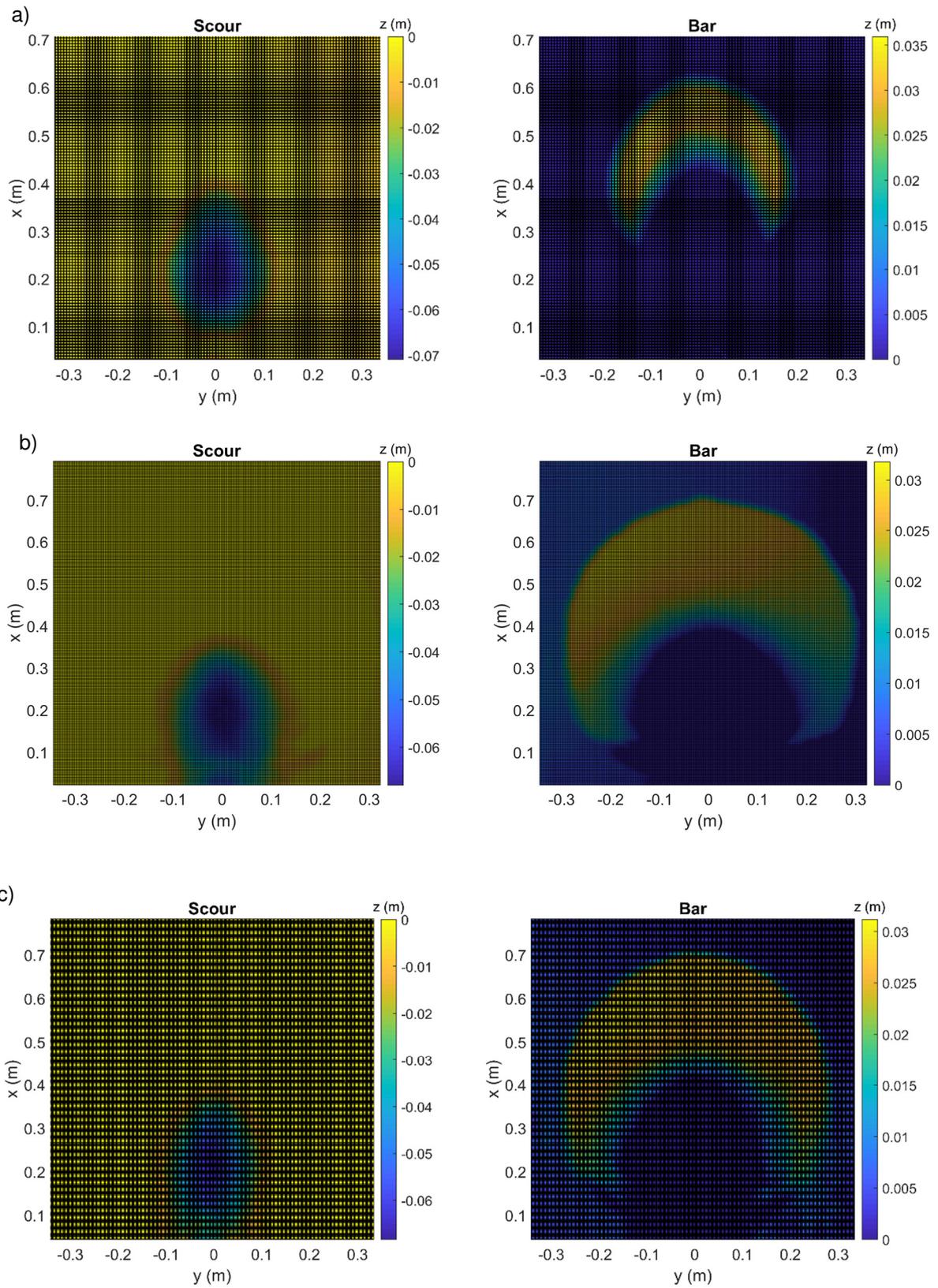


Figura 4.19 – Áreas de base para o cálculo dos volumes da escavação e da barra para  $Q = 0,71$  L/s,  $h = 3$  cm e três ângulos de saída do trampolim: a)  $\alpha = 10^\circ$ , b)  $\alpha = 15^\circ$  e c)  $\alpha = 20^\circ$ .

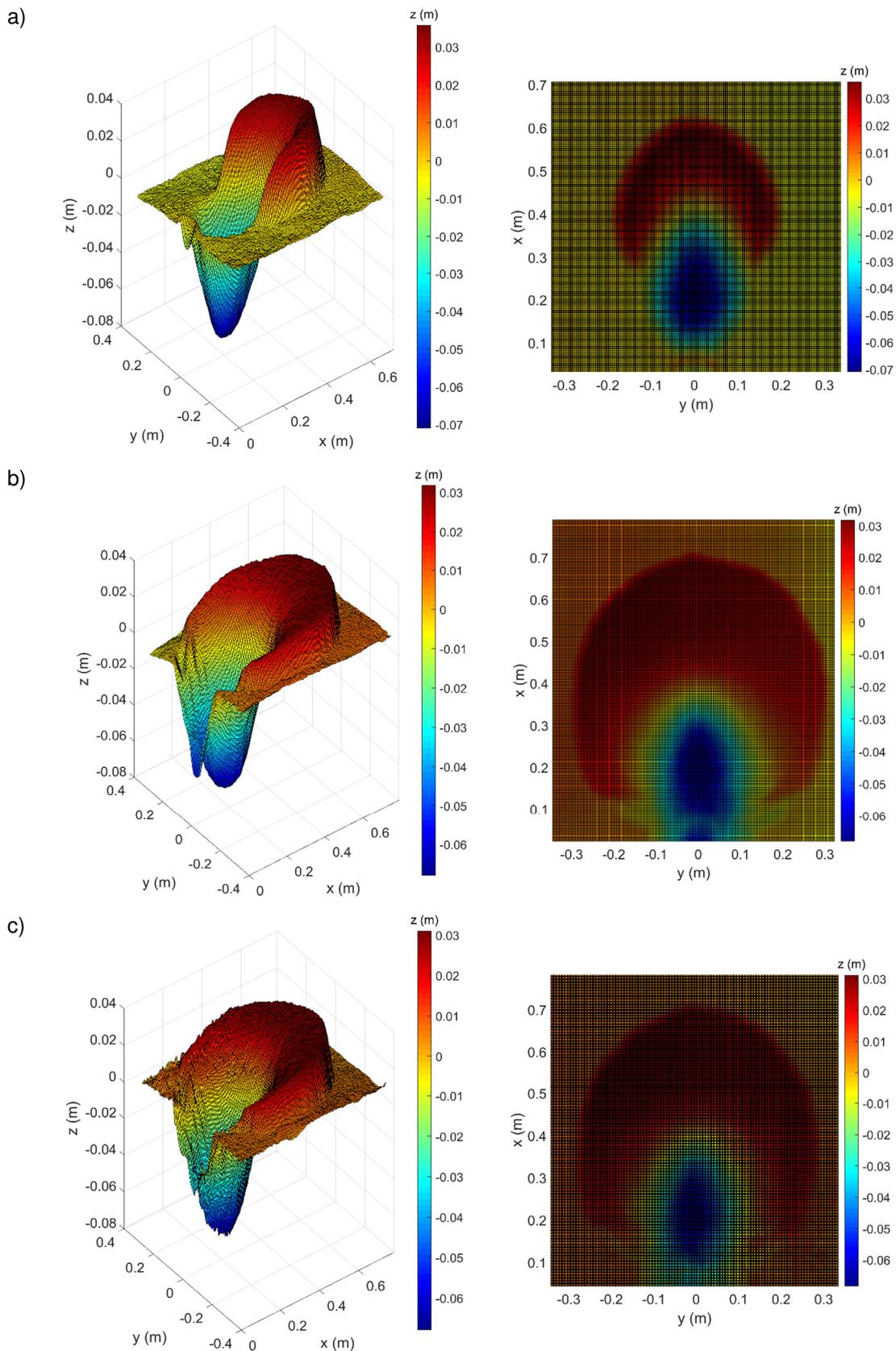


Figura 4.20 – Perfis 3D obtidos para  $Q = 0,71$  L/s,  $h = 3$  cm e três ângulos de saída do trampolim: a)  $\alpha = 10^\circ$ , b)  $\alpha = 15^\circ$  e c)  $\alpha = 20^\circ$ .

O código em Matlab permite calcular o volume da escavação, parcelando a área de interesse da Figura 4.18 em pequenas áreas, a partir das quais se calcula o volume. O volume total resulta do somatório dessas pequenas parcelas, discriminados em volumes que estão abaixo do nível do leito inicial como sendo a escavação, e os que estiverem a cima como barra (Figura 4.19).

Os valores dos volumes da cavidade e da barra associados a cada condição de ensaio são apresentados, respetivamente, nos Quadros 4.18 e 4.19 e nas Figuras 4.21 e 4.22.

Quadro 4.18 – Volume da cavidade de erosão para os diferentes ângulos (em litros).

$\alpha(^{\circ})$	Q=0,51L/s			Q=0,71L/s			Q=0,85L/s		
	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm
10	1,215	1,295	1,100	2,430	3,503	2,436	3,890	4,154	4,044
15	2,911	1,665	1,374	3,001	3,954	2,347	3,268	3,256	3,704
20	-			2,312			-		

Quadro 4.19 – Volume da barra de deposição de sedimentos, para os diferentes ângulos (em litros).

$\alpha(^{\circ})$	Q=0,51L/s			Q=0,71L/s			Q=0,85L/s		
	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm	h=1 cm	h=3 cm	h=5 cm
10	3,003	3,327	2,511	5,144	1,914	4,364	8,008	7,969	4,624
15	0,679	1,782	0,797	5,436	4,392	2,154	7,941	6,922	3,540
20	-			5,267			-		

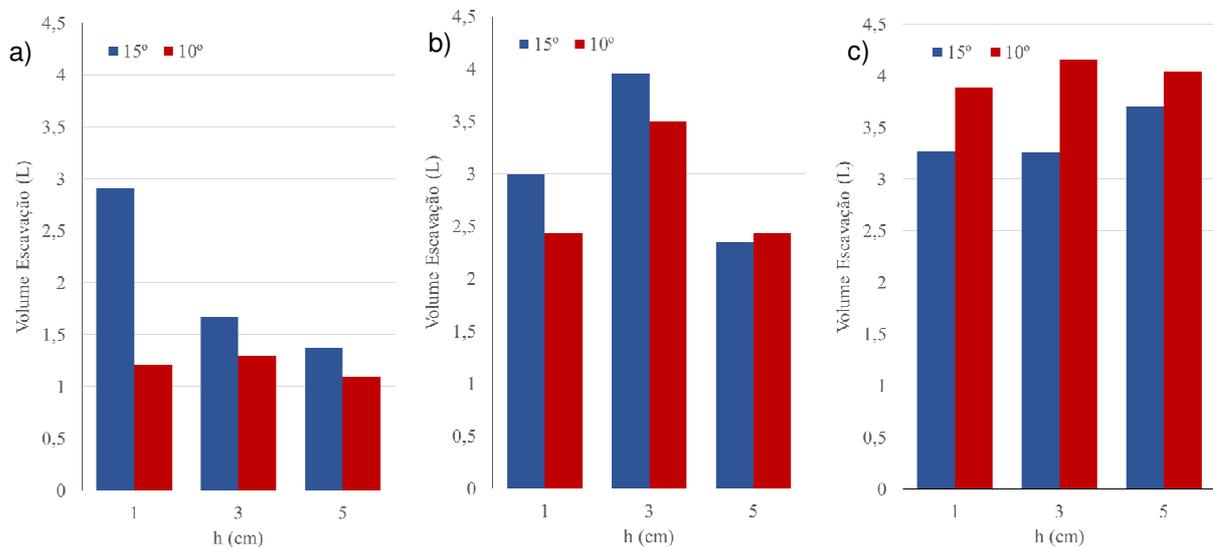


Figura 4.21 – Representação gráfica dos volumes de escavação para  $\alpha = 10^{\circ}$  e  $\alpha = 15^{\circ}$ : a)  $Q = 0,51$  L/s; b)  $Q = 0,71$  L/s; c)  $Q = 0,85$  L/s.

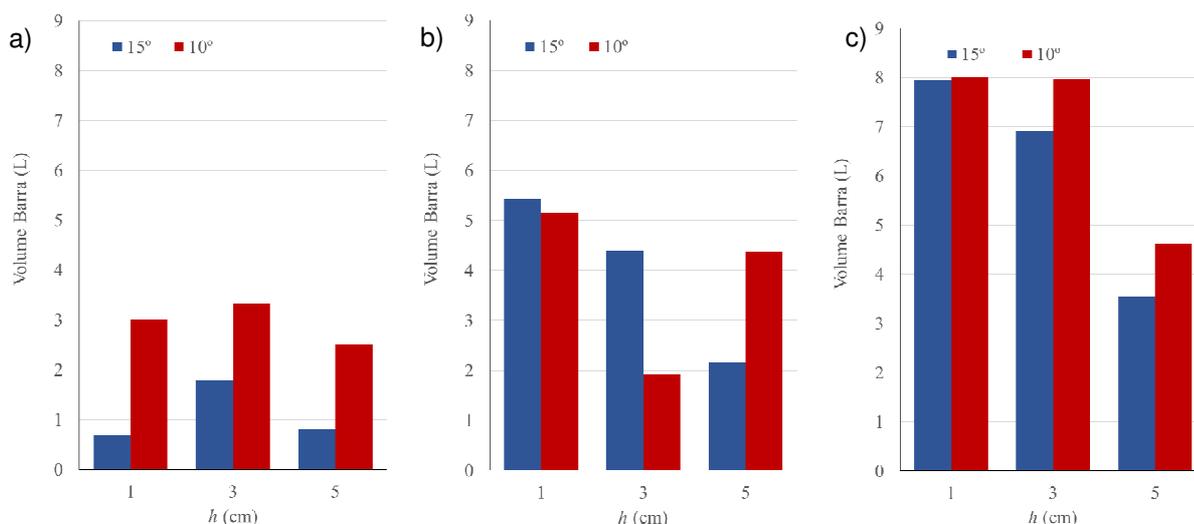


Figura 4.22 – Representação gráfica dos volumes da barra para  $\alpha = 10^\circ$  e  $\alpha = 15^\circ$ : a)  $Q = 0,51$  L/s; b)  $Q = 0,71$  L/s; c)  $Q = 0,85$  L/s.

Pela análise das Figuras 4.21 e 4.22, verifica-se que, em geral, os volumes de escavação e da barra aumentam com o aumento do caudal. Os valores dos volumes obtidos para os dois ângulos de saída do trampolim não apresentam diferenças significativas, observando-se que em algumas condições os dois volumes são superiores para  $\alpha = 10^\circ$ , enquanto para outras são superiores  $\alpha = 15^\circ$ . Para uma análise mais detalhada da influência do ângulo do trampolim de saída nos volumes de escavação e da barra serão necessárias medições para outros ângulos.

#### 4.9. EFEITOS DE ESCALA

Os modelos físicos são essenciais nos projetos de aproveitamentos hidráulicos, pois permitem representar a sua geometria, com algum rigor, e simular os fenómenos mais complexos que têm origem no protótipo. No entanto, nem sempre é conseguida uma semelhança completa, podendo dar origem à existência de efeitos de escala, resultado da incorreta simulação dos fenómenos físicos no modelo. Os efeitos de escala assumem maior importância quando os modelos são construídos a menor escala, como é o caso do presente estudo.

Tal como na maior parte dos estudos com modelos de descarregadores realizados em laboratório, neste trabalho foi considerado o critério de semelhança de Froude, no qual as forças de pressão e de gravidade assumem uma elevada importância (Forças inércia/Forças gravíticas). De modo a evitar efeitos de escala significativos têm sido propostos diferentes critérios baseados na altura dos degraus do descarregador ou nos números de Reynolds e Weber.

Neste estudo, a altura dos degraus utilizada encontra-se acima dos limites definidos por Chanson *et al.* (2002) e BacaRa (referido em Chanson, 2009) e números de Weber são todos superiores a 100 (Tabelas 4.1 a 4.3), tal como recomendado por Boes e Hager (2003). No entanto, os números de Reynolds obtidos (Tabelas 4.1 a 4.3) são da ordem de grandeza de  $10^4$ , menores que o valor de  $10^5$  recomendado (Frizell, 2006; Chanson *et al.* 2002).

Por outro lado, o facto de os jatos seguirem uma trajetória parabólica é, de acordo com a interpretação de Heller *et al.* (2006), um bom indicador de que os efeitos de escala podem ser desprezados.

No que se refere aos sedimentos, o diâmetro médio utilizado está acima do valor limite para evitar a coesão dos sedimentos do leito (Heller, 2011).

# 5

## CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 5.1. CONCLUSÕES

O presente trabalho de dissertação teve como objetivo analisar o impacto do ângulo do trampolim em salto esquí na erosão a jusante de um descarregador de degressos.

O estudo realizado permitiu caracterizar o jato e a cavidade de erosão consequente do mesmo, considerando as diferentes condições de ensaio, definidas por diversos caudais, ângulos de saída do trampolim em salto esquí e espessura do colchão de água a jusante do descarregador em degressos convergente. Os resultados obtidos a partir do estudo experimental foram comparados com os resultantes da aplicação das expressões propostas por diversos autores e com os resultados obtidos no estudo de Machado (2016) para o ângulo de saída do trampolim de 20°.

Na caracterização do jato, nomeadamente a definição das coordenadas da trajetória e do seu alcance, foi possível validar os resultados obtidos com recurso à técnica de aquisição de imagens (TAI). Foi aplicado o método proposto e adotado por Machado (2016) para determinação da altura do escoamento na secção de saída do trampolim, tendo-se obtido resultados satisfatórios. No entanto, confirma-se a dificuldade associada à definição do limite da lâmina de água na imagem média, resultante da oscilação do jato e da emulsão de ar. Quanto ao alcance do jato obtida experimentalmente, verificou-se uma aproximação satisfatória com os valores esperados.

Na análise dos perfis longitudinais da escavação e no cálculo de volumes foi proposta uma nova metodologia de processamento de imagens em 3D com base nos programas Zephyr, Meshlab e Matlab. Esta técnica demonstrou ser mais eficaz não só na caracterização da cavidade de erosão como no cálculo do volume da cavidade e da barra. No entanto, os resultados obtidos para 10° e 15° não permitiram obter uma lei de variação com o ângulo de saída do trampolim. Esta técnica deve ser desenvolvida e aplicada em trabalhos futuros, quer para os mesmos ângulos, permitindo a confirmação dos resultados obtidos, quer para ângulos diferentes, de modo a analisar a influência do ângulo.

Fez-se uma análise comparativa entre os resultados da profundidade máxima obtidos experimentalmente e as estimativas dos diferentes autores, com base em 3 parâmetros estatísticos, verificou-se que as melhores estimativas correspondem às de Wu (1973) e Mason e Arumugam (1985), que apresentaram valores do erro percentual médio absoluto (MAPE) inferiores a 20%, valores de desvio padrão (RMSE) inferiores a 1 cm para  $\alpha = 10^\circ$  e  $\alpha = 15^\circ$  e um indicador de qualidade do ajuste (NSE) superiores a 0,5, valor considerado satisfatório.

A análise dos resultados obtidos permitiu concluir que, de uma forma geral, a erosão é mais acentuada para um ângulo de saída do trampolim de 20°. Para o ângulo de 15° os perfis de erosão aproximam-se bastante dos obtidos para 20°, sendo, em alguns casos, praticamente coincidentes.

Também se realizou uma análise da visualização do escoamento, que permitiu observar a evolução da cavidade de erosão, calcular a posição de frente da barra e a celeridade do mesmo em função do tempo. Esta análise foi realizada apenas para uma condição, uma vez que devido à delimitação do tempo de estudo não foi possível analisar para todas as condições. Por este motivo, esta metodologia deverá ser desenvolvida em trabalhos futuros.

## **5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Em suma, esse trabalho permitiu a validação das técnicas propostas e a consolidação dos resultados obtidos em trabalhos anteriores, a proposta de novas metodologias e o alargamento da base de dados existente, testando novas condições. Para trabalhos futuros, e de maneira a ultrapassar as dificuldades encontradas ao longo do presente estudo, faz-se as seguintes sugestões para desenvolvimentos futuros:

- Explorar e consolidar o método utilizado para a medição na análise dos perfis longitudinais da escavação e no cálculo de volumes;
- Desenvolver a metodologia proposta para a análise da evolução da erosão ao longo do tempo.
- Analisar os resultados obtidos da posição de frente e a celeridade da barra utilizando a técnica de visualização apresentada;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aleixo, R. e Proença, M.F. (2007). *Medição da trajetória de um jato livre usando aquisição de imagens*. 2<sup>as</sup> Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP, Outubro.
- Alias, N.A., Mohamed, T.A., Ghazali, A.H. e Noor, M.J.M.M. (2008). *Impact of takeoff angle of bucket type energy dissipater on scour hole*. American Journal of Applied sciences, 5(2), 117-121.
- Alireza, P., Mahmood, S.B. e Habib, M.J.S. (2008). *Impact of lip angle of flip bucket energy dissipater on scour hole*. J. Krobe and I. Sakellaris, ed. 3rd IASME/ WSEAS Int. Conf. on Water Resources, Hydraulics & Hydrology, 23-25 February 2008 Cambridge. WSEAS Press, 126-130
- Almeida, D. (2014). *Determinação de critérios de dimensionamento de soleiras terminais numa bacia de dissipação a jusante de um descarregador em degraus*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Antunes, M. J. (2012). *Descarregadores de cheia e canal, em betão, não convencionais*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Azmathullah, H.M., Deo, M.C., Bhajantri, M.R. e Deolalikar, P.B., 2004. *Scour at the base of flip-bucket spillways*. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 10(2), 121-129.
- Bisaz, E. e Tschopp, J. (1972). *Profundidad de Erosion al Pie de un Vertedero para la Aplicacion de Correccion de Arroyos en Quebradas Empinados*. 5th Latin American Congress of the International Association for Hydraulic Research, Lima, Perú.
- Boes, R.M. e Hager, W.H. (2003). *Two-phase flow characteristics of stepped spillways*. Journal of Hydraulic Engineering, 129(9), 661-670.
- Bollaert, E. e Schleiss, A. (2003). *Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets Part I: A state-of-the-art review*. Journal of Hydraulic Research, 451-464.
- Bombardelli, F.A. e Gioia, G., 2006. *Scouring of granular beds by jet-driven axisymmetric turbulent cauldrons*. Physics of Fluids, 18(8), 088101.
- Carvalho, E. (2015). *Aproveitamentos Hidráulicos e Obras Fluviais: Apontamentos teóricos e práticos da cadeira de 5º ano da opção de Hidráulica e Recursos Hídricos do curso de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*.
- Chanson, H., Yasuda Y. e Ohtsu, I. (2002). *Flow resistance in skimming flows and its modelling*. Canadian Journal of Civil Engineering, 29(6), 809–819
- Chanson, H., Aoki, S. e Hoque, A. (2003). *Physical modelling and similitude of air bubble entrainment at vertical circular plunging jets*. Chemical Engineering Science, Vol. 59, 747-758.
- Chanson, H. (2009). *Turbulent air–water flows in hydraulic structures: dynamic similarity and scale effects*. Environmental Fluid Mechanics, 9(2), 125-142.
- Chee, S. e Kung, T. (1974). *Piletas de derrubio autodormadas*. 6º Congresso Latino-Americano da AIRH, Bogotá, Colombia.
- Chee, S.P. e Padivar, P.V. (1969). *Erosion at the base of flip buckets*. Engineering Journal, Vol.52, 22-24, Canadá.
- Damle, P.M., Venkatraman, C.P. e Desai S.C. (1966). *Evaluation of scour below ski-jump buckets of spillways*. CWPRS Golden Jubilee Symposia, Poona, Vol. 1, 154-163.

- Doddiah, D. *et al.* (1953). *Scour from jets*. 5th Congress of the International Association for Hydraulic Research, 161-169, Minneapolis.
- Eggenberger, W. e Müller, R. (1944). *Experimentelle und theoretische untersuchungen über das Kolkproblem*, Mitteilungen aus der Versuchsanstalt für Wasserbau 5, Zürich: Leemann
- Ervine, D.A. (1976). *The entrainment of air in water*. Water Power & Dam Construction, December, 27-30.
- Ferreira, F. (2011). *Profundidade de erosão a jusante de dissipador salto de esqui*. Trabalho de Diplomação, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Figueiredo, N. (2010). *Dissipação de energia a jusante de um descarregador não convencional*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Figueiredo, N., Carvalho, E. e Taveira Pinto, F. (2014). *Scour Analysis Downstream a Converging stepped Spillway Equipped with a Ski Jump Bucket*. 3rd IAHR Europe Congress. Porto, Portugal.
- Franke, P.G. (1960). *L'affouillement: mécanisme et formes*. Oesterreichische Wasserwirtschaft (Tradução n.º. 681 da Electricité de France).
- Frizell, K.H. (2006). *Research State-of-the-art and Needs for Hydraulic Design of Stepped Spillways*. U.S. Bureau of Reclamation, Technical Service Center.
- Ghodsian, M., Faradonbeh, A.A. e Abbasi, A.A. (1999). *Scour downstream of free overfall spillway*. 28th IAHR World Congress, 22-27 August, Graz, Austria
- Ghodsian, M., Mehraein, M. e Ranjbar, H.R. (2012). *Local scour due to free fall jets in non-uniform sediment*. Scientia Iranica, 19(6), 1437-1444.
- Gunko, F.G., Burkov, A.F., Isachenko, N.B., Rubinstein, G.L., Soloviova, A.G. e Yuditsky, G.A. (1965). *Research on the hydraulic regime and local scour of river bed below spillways of high-head dams*. 11th IAHR Congress, Leningrad, 1(50), 1-14.
- Habib, A.A., Fahmy, M.R. e Taha, N.M. (2016). *Scour characteristics downstream converging spillways*. The Egyptian International Journal of Engineering Sciences and Technology, 19(1), 258-266.
- Hager, W.H. e Schleiss, A.J. (2009). *Constructions Hydrauliques. Ecoulement stationnaires*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Lausanne.
- Hartung, W. (1959). *Die Kolkbildung hinter Überstromten Wehren im Hinblick auf eine beweglich Sturzbettgestaltung*. Die Wasser wirtschaft, 49 (1), 309-313
- Heller, V., Hager, W.H. e Minor, H.-E. (2006). *Closure to 'Ski jump hydraulics'*. Journal of Hydraulic Engineering, 132(10), 1115-1117.
- Heller, V. (2011). *Scale effects in physical hydraulic engineering models*. Journal of Hydraulic Research, 49(3), 293-306.
- Heng, S., Tingsanchali, T. e Suetsugi, T. (2013). *Prediction formulas of maximum scour depth and impact location of a local scour hole below a chute spillway with a flip bucket*. C.A. Brebbia, eds. River Basin Management VI. WIT Press, 12, 251-262
- Hoffmans, G.J.C.M. (1998). *Jet scour in equilibrium phase*. Journal of Hydraulic Engineering, 124(4), 430-437.

- Jaeger, C. (1939). *Über die Ähnlichkeit bei flussbaulichen Modellversuchen*. Wasserwirtschaft und Wassertechnik. 34(23/27) (em Alemão)
- Kamaneve, I.A. (1966). *Alcance de jactos livres provenientes de descarregadores*. Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo, nº3 (Tradução nº487 do LNEC).
- Kawakami, I. A. (1973). *A study of the computation of horizontal distance of jet issued from ski-jump spillway*, Japanese Society of Civil Engineering Journal, Vol. 219, nº11, 37-44.
- Lencastre, A. (1961). *Descarregadores de Lâmina Livre. Bases para o seu dimensionamento*. Dissertação apresentada a concurso para investigador do LNEC, Memória nº174, LNEC.
- Lencastre, A. (1983). *Relato da sessão sobre descarregadores com grande concentração de energia*. Anais do Simpósio Internacional sobre Arranjos Gerais de Barragens em Vales Estreitos, Vol. II, 136-176, Rio de Janeiro.
- Lencastre, A. (2001). *Memórias técnicas: Hidráulica de Estruturas*. LNEC, Lisboa.
- Machado, L. I. (1980). *Fórmulas para calcular o limite de erosão em leitos rochosos ou granulares*. XIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Rio de Janeiro.
- 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.
- Sá Machado, L., Lima, M.M.C.L., Aleixo, R. e Carvalho, E. (2019). *Effect of the ski jump bucket angle on the scour hole downstream of a converging stepped spillway*. International Journal of River Basin Management (aceite para publicação).
- Martins, R. (1973). *Acção erosiva de jactos livres a jusante de estruturas hidráulicas*. Memória nº424 do LNEC, Lisboa.
- Martins, R. (1984). *Cálculo da profundidade de escavações provocadas por jactos oriundos de descarregadores com trampolim*. Memória nº634. LNEC
- Mason P.J. e Arumugam K. (1985). *Free jet scour below dams and flip buckets*. Journal of Hydraulic Engineering. 111(2): 220-235.
- Mason, P.J. (1989). *Effects of air entrainment on plunge pool scour*. Journal of Hydraulic Engineering, 115(3), 385-399.
- Melo, J. F. (2002). *Acções hidrodinâmicas em soleiras de bacias de dissipação de energias por jactos*. Dissertação de Doutoramento, LNEC.
- Mikhalev, M.A. (1960). *Determination of the Depth of Scour in Erodible Foundations by a Falling Jet*. Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo, 9
- Mirskhulava, T.E. (1967). *Alguns problemas da erosão local nos leitos dos rios*. Moskva (Trad. n.º 443 do LNEC).
- Mirskhulava, T.E., Dolidze, I.V. e Magomedova, A.V. (1967). *Mechanism and computation of local and general scour in non-cohesive, cohesive soils and rock beds*. 12th IAHR Congress, Fort Collins, 3, 169-176

- Naini, S. (2011). *Evaluation of RBF, GR and FFBP neural networks for prediction of geometrical dimensions of scour hole below ski-jump spillway*. International Conference on Environmental and Computer Science, Singapore, 19, 89-93
- Noori, R. e Hooshyaripor, F. (2014). *Effective Prediction of scour downstream of ski-jump buckets using artificial neural networks*. Water Resources, vol 41, nº 1, 8-18
- Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C. e Narayanan, R. (2007). *Hydraulic Structures*. E & FN SPON.
- Patrashev, A.N. (1937). *Détermination de la profondeur maximale de l'érosion du sol par une nappe tombante*. Izvestiya VNIIG. 21.
- Peterka, A. J. (1983). *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*. United States Bureau of Reclamation, Denver, CO.
- Pinheiro, A. N. (2006). *Obras de dissipação de energia*. Instituto Superior Técnico, Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambientais, Lisboa.
- Ramos, C. M. (1978). *Macroturbulência dos Escoamentos Cruzados em Estruturas de Dissipação de Energia*. Tese apresentada a concurso para especialista do LNEC, LNEC.
- Ramos, C. M. (1993) - *Estruturas de Dissipação de Energia por Jactos. Critérios de dimensionamento e fossas de erosão*. Curso sobre "Organos de Dissipación de Energia Hidráulica", CEDEX, Madrid.
- Raudkivi, A. J., Fredsoe, J. e Winkler, B.R. (1985). *Curso Latinoamericano de Mecánica Fluvial*. Laboratorio de Hidráulica Aplicada, INCYTH.
- Rubinstein, G.L. (1963). *Laboratory investigation of local erosion on channel beds below high overflow dams*. Transactions of Coordination Conferences on Hydraulic Engineering. Vol. VII. Conference on Hydraulics of High Head Water Discharge Structures. Gosenergoizdat M.L.
- Schoklitsch, A. (1935). *Prevention of scour and energy dissipation*. Denver. (Traduzido pelo Bureau of Reclamation, Denver, do texto original em alemão "Kolkbauwehr und Staurationberlandung", Berlin, Julius Springer, 17-183).
- Sinniger, R. e Hager, J. (1989). *Constructions Hydrauliques ecoulements stationnaires*. Presses Polytechniques Romandes, Lausanne.
- Sofrelec (1980). *Kandadji Dam, Niger, 3rd Phase Design Report*. Society Frangaise d'Etudes et de Realisation d'Equipement Electriques, February, Paris, France.
- Sousa, P. (2011). *Estudo da dissipação de energia por ressalto hidráulico a jusante de descarregadores não convencionais*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Taraimovich, I.I. (1978). *Deformations of channels below high-head spillways on rock foundations*. Hydrotechnical Construction, 9.
- Tuna, M.C. (2012). *Effect of offtake channel base angle of stepped spillway on scour hole*. Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil engineering, 36(2), 239-251.
- Veronese, A. (1937). *Erosioni di fondo a valle di uno scarico*. *Annali dei Lavori Pubblici*, 75(9), 717-726.
- Vischer, D.L e Hager, W.H., 1998. *Dam Hydraulics*. John Wiley & Sons.
- Whittaker, J. e Schleiss, A. (1984). *Scour related to energy dissipators for high head structures*. *Mitteilungen der Versuchsanstalt fur Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, nº73, Zurich

Wu, C.M. (1973). *Scour at downstream end of dams in Taiwan*. International Symposium on River Mechanics, Bangkok, I (A-13), 1-6

Yildiz, D. e Üzücek, E. (1994). *Prediction of scour depth from free falling flip bucket jets*. International Water Power and Dam Construction, 46(11), 50-56

Yildiz, D. e Üzücek, E. (1996). *Scour depth prediction from free falling flip bucket jets*. Teknik Dergi, 7(4), 1255-1273.

Zhang, S., Pang, B. e Wang, G. (2014). *A new formula based on computational fluid dynamics for estimating maximum depth of scour by jets from overflow dams*. Journal of Hydroinformatics, 16(5), 1210-1226.

Zvorykin, K.A., Kouznetsov, N.V. e Akhmedov, T.K. (1975). *Scour of Rock bed by a jet spilling from a deflecting bucket of an overflow dam*. 16th IAHR Congress, São Paulo, 2, 418-422

[1] <http://portugalfotografiaaerea.blogspot.pt/2013/10/barragem-de-bemposta.html>. 04-04-2016

[2] <https://www.usgs.gov/products/multimedia-gallery/images>. 04-04-2016

[3] <http://www.videos.engenhariacivil.com/wp-content/uploads/barragem-santa-luzia.jpg>. 17-03-2016

[4] <http://static.panoramio.com/photos/original/1518385.jpg>. 17-03-2016

[5] [http://www.edia.pt/folder/imprensa/ficheiro/IMG\\_1675.jpg](http://www.edia.pt/folder/imprensa/ficheiro/IMG_1675.jpg). 4-04-2016



## **ANEXOS**



ANEXO A: MODELOS DE TRAMPOLIM EM SALTO ESQUI

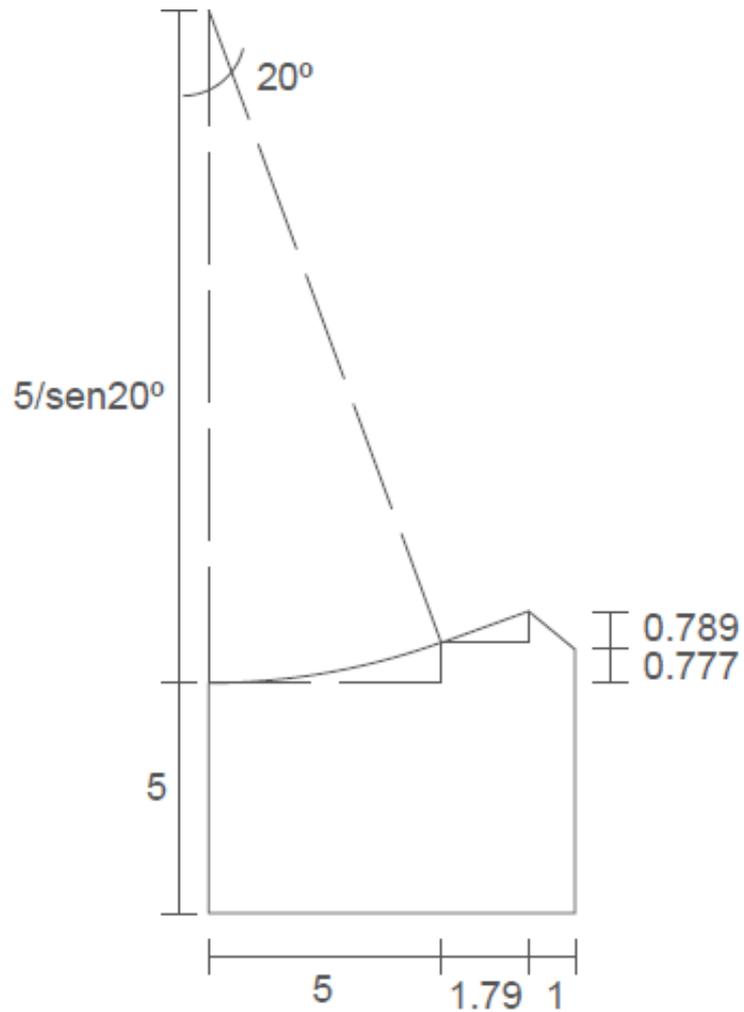


Figura A.1 - Esquema do trampolim em salto esqui com  $\alpha = 20^\circ$  (medidas em centímetros).



## ANEXO B: TRAJETÓRIA DO JATO

### B.1: COORDENADAS

Quadro B.1 - Coordenadas da trajetória do jato para  $\alpha = 10^\circ$  e  $Q = 0,51$  L/s.

h=1 cm		h=3 cm		h=5 cm	
x (m)	z (m)	x (m)	z (m)	x (m)	z (m)
-0,00309	0,10919	-0,00527	0,10086	-0,00155	0,104505
0,002561	0,106482	-0,00080	0,10077	0,001796	0,103551
0,007846	0,103053	0,00367	0,10019	0,005143	0,102298
0,012359	0,100079	0,00814	0,09914	0,00849	0,100746
0,017766	0,096777	0,01262	0,09761	0,011837	0,098895
0,023173	0,092847	0,01709	0,09560	0,015185	0,096736
0,02858	0,088288	0,02156	0,09311	0,018532	0,094296
0,033987	0,08228	0,02603	0,09014	0,021879	0,091547
0,039394	0,075582	0,03051	0,08669	0,025226	0,0885
0,044801	0,068197	0,03498	0,08276	0,028573	0,085155
0,050209	0,060126	0,03945	0,07835	0,032002	0,08151
0,055616	0,051368	0,04392	0,07346	0,035512	0,077566
0,061023	0,041924	0,04840	0,06809	0,039023	0,073323
0,06643	0,031793	0,05287	0,06224	0,042533	0,068781
0,071837	0,020976	0,05734	0,05591	0,046043	0,06394
0,077244	0,009471	0,06181	0,04910	0,049554	0,0588
0,082651	-0,00272	0,06629	0,04181	0,053064	0,053362
0,088058	-0,0156	0,07076	0,03405	0,056575	0,047624
0,093465	-0,02916	0,07523	0,02580	0,060085	0,041587
0,098872	-0,04341	0,07970	0,01707	0,063595	0,035252

Quadro B.2 - Coordenadas da trajetória do jato para  $\alpha = 10^\circ$  e  $Q = 0,71$  L/s.

<b>h=1 cm</b>		<b>h=3 cm</b>		<b>h=5 cm</b>	
<b>x (m)</b>	<b>z (m)</b>	<b>x (m)</b>	<b>z (m)</b>	<b>x (m)</b>	<b>z (m)</b>
-0,00082	0,105582	-0,00340	0,10725	-0,00303	0,10787
0,005624	0,100209	0,00269	0,10535	0,00236	0,10630
0,0122	0,09655	0,00878	0,10298	0,00775	0,10443
0,019121	0,092592	0,01487	0,10011	0,01314	0,10226
0,026043	0,088233	0,02096	0,09677	0,01853	0,09979
0,032965	0,083474	0,02706	0,09294	0,02392	0,09702
0,039886	0,07818	0,03315	0,08863	0,02931	0,09395
0,046808	0,071896	0,03924	0,08383	0,03469	0,09057
0,05373	0,065329	0,04533	0,07855	0,04008	0,08690
0,060652	0,058478	0,05143	0,07279	0,04547	0,08293
0,067573	0,051344	0,05752	0,06655	0,05086	0,07865
0,074495	0,043925	0,06361	0,05982	0,05625	0,07408
0,081417	0,036224	0,06970	0,05261	0,06164	0,06920
0,088339	0,028238	0,07580	0,04492	0,06703	0,06402
0,09526	0,021558	0,08189	0,03674	0,07242	0,05854
0,102182	0,013843	0,08798	0,02808	0,07781	0,05277
0,109104	0,004676	0,09407	0,01894	0,08320	0,04669
0,116025	-0,00489	0,10016	0,00931	0,08858	0,04031
0,122947	-0,01486	0,10626	-0,00080	0,09397	0,03363
0,129869	-0,02523	0,11235	-0,01139	0,09936	0,02664

Quadro B.3 - Coordenadas da trajetória do jato para  $\alpha = 10^\circ$  e  $Q = 0,85$  L/s.

h=1 cm		h=3 cm		h=5 cm	
x (m)	z (m)	x (m)	z (m)	x (m)	z (m)
-0,00078	0,108997	-0,00232	0,106616	-0,01649	0,10542
0,006831	0,104194	0,003944	0,105569	-0,00946	0,10568
0,014444	0,099415	0,010042	0,102824	-0,00242	0,10525
0,022057	0,096351	0,015652	0,100471	0,00462	0,10413
0,02967	0,092866	0,022157	0,097694	0,01166	0,10232
0,037282	0,088959	0,028662	0,094389	0,01869	0,09983
0,044895	0,084632	0,035166	0,090557	0,02573	0,09665
0,052508	0,079317	0,041508	0,086198	0,03277	0,09278
0,060121	0,073317	0,047769	0,081312	0,03980	0,08823
0,067734	0,066929	0,05403	0,075898	0,04684	0,08299
0,075347	0,060151	0,060291	0,069957	0,05388	0,07706
0,082959	0,052985	0,066552	0,063489	0,06092	0,07045
0,090572	0,045431	0,072813	0,057382	0,06795	0,06315
0,098185	0,038412	0,079073	0,051039	0,07499	0,05516
0,105798	0,032252	0,085334	0,044368	0,08203	0,04648
0,113411	0,025987	0,091595	0,03737	0,08906	0,03712
0,121024	0,018188	0,097856	0,028882	0,09610	0,02707
0,128636	0,009227	0,104117	0,019457	0,10314	0,01634
0,136249	-0,00015	0,110378	0,009495	0,11018	0,00492
0,143862	-0,00996	0,116638	-0,001	0,11721	-0,00719

Quadro B.4 - Coordenadas da trajetória do jato para  $\alpha = 15^\circ$  e  $Q = 0,51$  L/s.

h=1 cm		h=3 cm		h=5 cm	
x (m)	z (m)	x (m)	z (m)	x (m)	z (m)
-0,00155	0,103149	-0,00077	0,109512	-0,00076	0,109411
0,004776	0,10467	0,005912	0,107387	0,004218	0,1095
0,011878	0,105167	0,012593	0,104789	0,009079	0,10851
0,018981	0,104442	0,019274	0,10172	0,01402	0,106964
0,026083	0,103089	0,025955	0,09835	0,019161	0,105377
0,033104	0,100514	0,032637	0,094834	0,024143	0,103336
0,03988	0,096915	0,039318	0,090848	0,029124	0,10084
0,046656	0,092291	0,045999	0,086391	0,034105	0,09789
0,053432	0,086644	0,05268	0,081464	0,039086	0,094485
0,060207	0,079972	0,059361	0,076067	0,044067	0,090626
0,066983	0,072276	0,066043	0,070198	0,049048	0,086313
0,073759	0,063557	0,072724	0,06386	0,05403	0,081546
0,080535	0,054325	0,079405	0,057051	0,059011	0,076324
0,087311	0,044461	0,086086	0,049771	0,063992	0,070648
0,094087	0,033734	0,092767	0,042021	0,068973	0,064518
0,100863	0,022143	0,099449	0,033728	0,073954	0,057933
0,107639	0,009688	0,10613	0,024911	0,078935	0,050894
0,114415	-0,00363	0,112811	0,015624	0,083917	0,043401
0,121191	-0,01781	0,119492	0,005868	0,088898	0,035453
0,127966	-0,03286	0,126173	-0,00436	0,093879	0,027051

Quadro B.5 - Coordenadas da trajetória do jato para  $\alpha = 15^\circ$  e  $Q = 0,71$  L/s.

h=1 cm		h=3 cm		h=5 cm	
x (m)	z (m)	x (m)	z (m)	x (m)	z (m)
-0,001251251	0,112224	-0,00237	0,104781	-0,00061	0,110135
0,007013593	0,111763	0,004953	0,105677	0,005450	0,109315
0,015245509	0,110687	0,011687	0,105931	0,011542	0,108070
0,023181076	0,108515	0,017475	0,105574	0,017313	0,106401
0,031248354	0,104916	0,024188	0,104502	0,023084	0,104307
0,039529661	0,100851	0,030901	0,102243	0,028855	0,101789
0,047810969	0,096014	0,037614	0,098589	0,034626	0,098846
0,056092276	0,090393	0,044327	0,093965	0,040397	0,097281
0,064373584	0,08399	0,05104	0,08837	0,046168	0,095548
0,072654892	0,076804	0,057753	0,081806	0,051939	0,092079
0,080936199	0,068836	0,064466	0,074271	0,057710	0,087969
0,089217507	0,059581	0,071178	0,065767	0,063481	0,083451
0,097498815	0,049407	0,077891	0,056292	0,069252	0,078524
0,105780122	0,038343	0,084604	0,045847	0,075023	0,073190
0,11406143	0,026388	0,091317	0,034432	0,080794	0,067447
0,122342737	0,013543	0,09803	0,022046	0,086565	0,061297
0,130624045	-0,00019	0,104743	0,008691	0,092336	0,054738
0,138905353	-0,01482	0,111456	-0,00564	0,098107	0,047771
0,14718666	-0,03033	0,118169	-0,02093	0,103878	0,040396
0,155467968	-0,04674	0,124882	-0,0372	0,109649	0,032613

Quadro B.6 - Coordenadas da trajetória do jato para  $\alpha = 15^\circ$  e  $Q = 0,85$  L/s.

h=1 cm		h=3 cm		h=5 cm	
x (m)	z (m)	x (m)	z (m)	x (m)	z (m)
-0,00156	0,112016	-0,00077	0,110826	-0,00077	0,106307
0,008127	0,110269	0,006423	0,111154	0,00613	0,106871
0,017818	0,108216	0,013619	0,110603	0,013027	0,107092
0,027509	0,105523	0,021303	0,109174	0,019923	0,106765
0,0372	0,102191	0,029434	0,107239	0,02682	0,105892
0,046891	0,09822	0,037565	0,104264	0,033717	0,104471
0,056582	0,093609	0,045696	0,100493	0,040613	0,102503
0,066273	0,08836	0,053827	0,095943	0,04751	0,099987
0,075964	0,082471	0,061958	0,090616	0,054406	0,096925
0,085655	0,075792	0,070089	0,084512	0,061303	0,093315
0,095346	0,068248	0,07822	0,077629	0,068199	0,089084
0,105037	0,060033	0,086351	0,069969	0,075096	0,08431
0,114728	0,051146	0,094482	0,061531	0,081992	0,079002
0,124419	0,041729	0,102612	0,052316	0,088889	0,07316
0,134109	0,032114	0,110743	0,042323	0,095786	0,066782
0,1438	0,021897	0,118874	0,031553	0,102682	0,059871
0,153491	0,010881	0,127005	0,020004	0,109579	0,052424
0,163182	-0,00085	0,135136	0,007678	0,116475	0,044687
0,172873	-0,01322	0,143267	-0,00543	0,123372	0,0362
0,182564	-0,02623	0,151398	-0,01931	0,130268	0,027118

Quadro B.7 - Coordenadas da trajetória do jato para  $\alpha = 20^\circ$  e  $Q = 0,71$  L/s.

<b>h=3 cm</b>	
<b>x (m)</b>	<b>y (m)</b>
-0,00242	0,10965
0,00468	0,11253
0,01178	0,11426
0,01889	0,11484
0,02599	0,11426
0,03309	0,11253
0,04019	0,10964
0,04729	0,10560
0,05439	0,10041
0,06149	0,09405
0,06859	0,08655
0,07569	0,07789
0,08279	0,06807
0,08989	0,05711
0,09700	0,04498
0,10410	0,03170
0,11120	0,01727
0,11830	0,00168
0,12540	-0,01506
0,13250	-0,03296

B.2: COMPARAÇÃO DA TRAJETÓRIA OBTIDA A PARTIR DO TAI E A TRAJETÓRIA TEÓRICA.

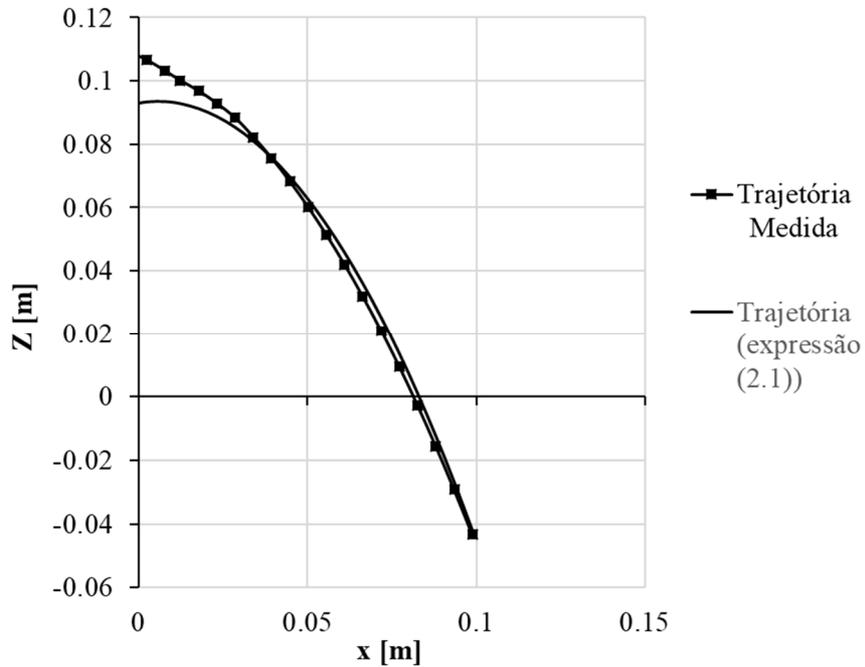


Figura B.1 - Trajetória teórica em comparação com a trajetória medida:  $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 1$  cm.

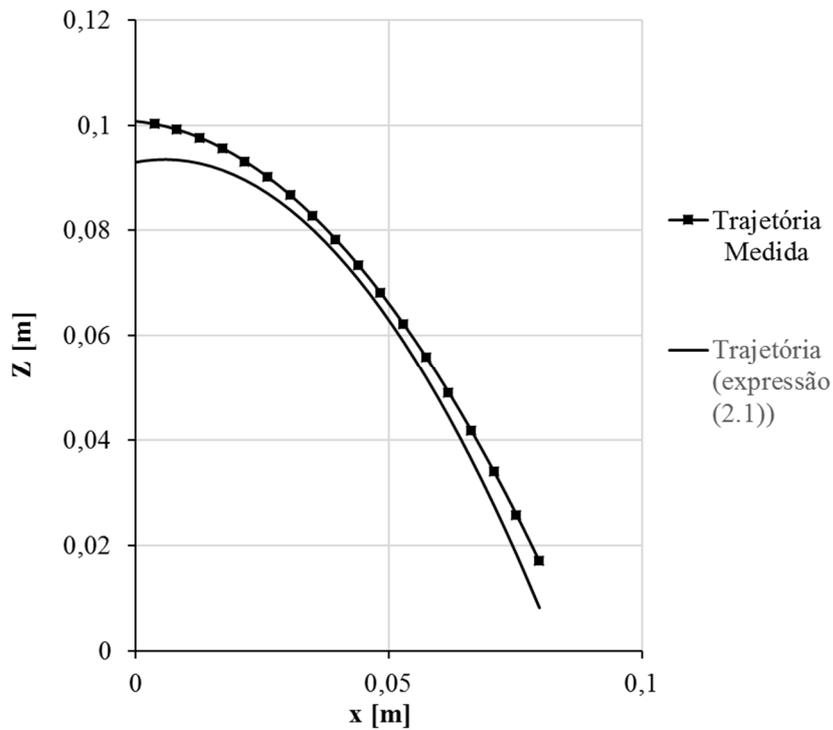


Figura B.2 - Trajetória teórica em comparação com a trajetória medida:  $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 3$  cm.

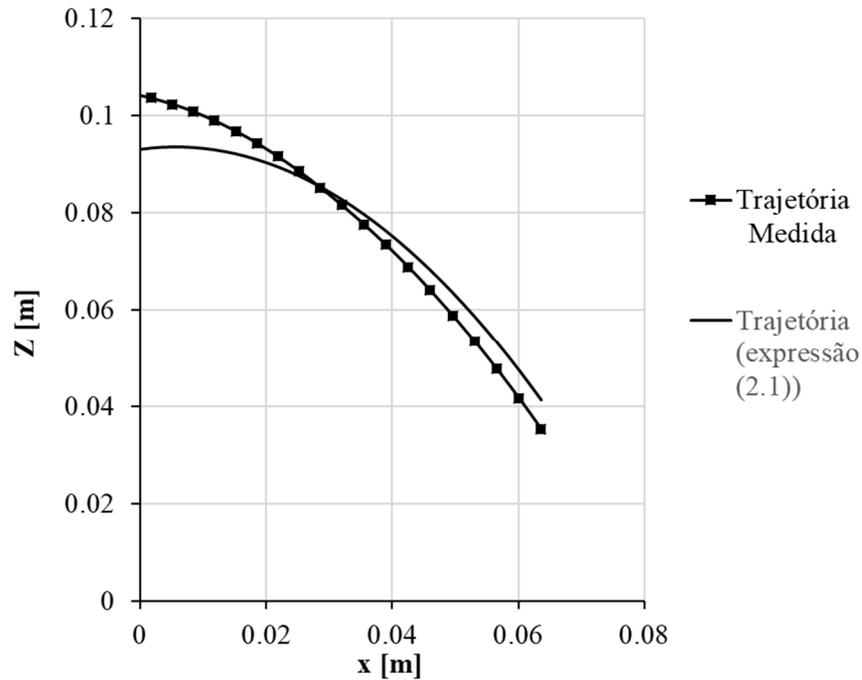


Figura B.3 - Trajetória teórica em comparação com a trajetória medida:  $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 5$  cm.

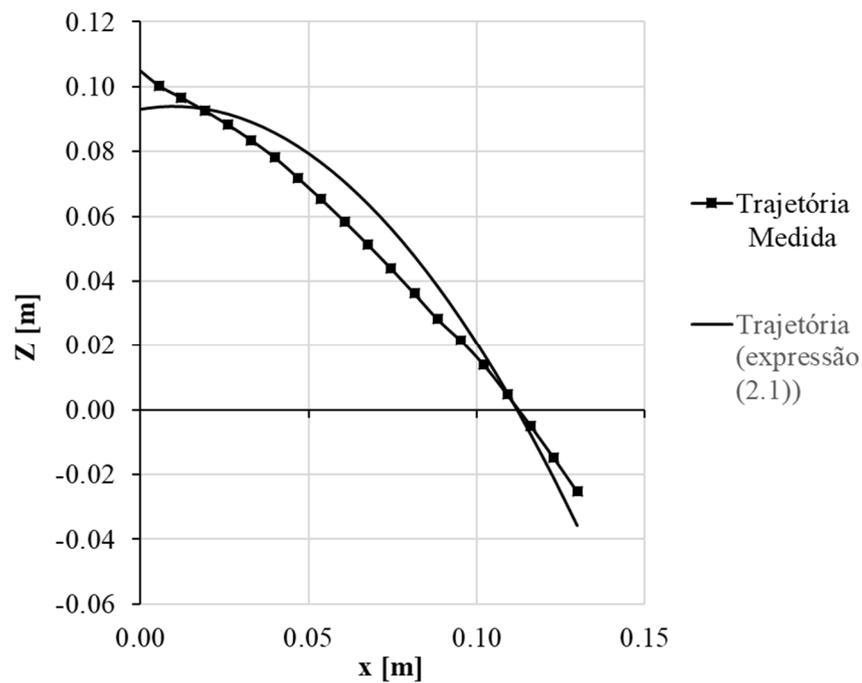


Figura B.4 - Trajetória teórica em comparação com a trajetória medida:  $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 1$  cm.

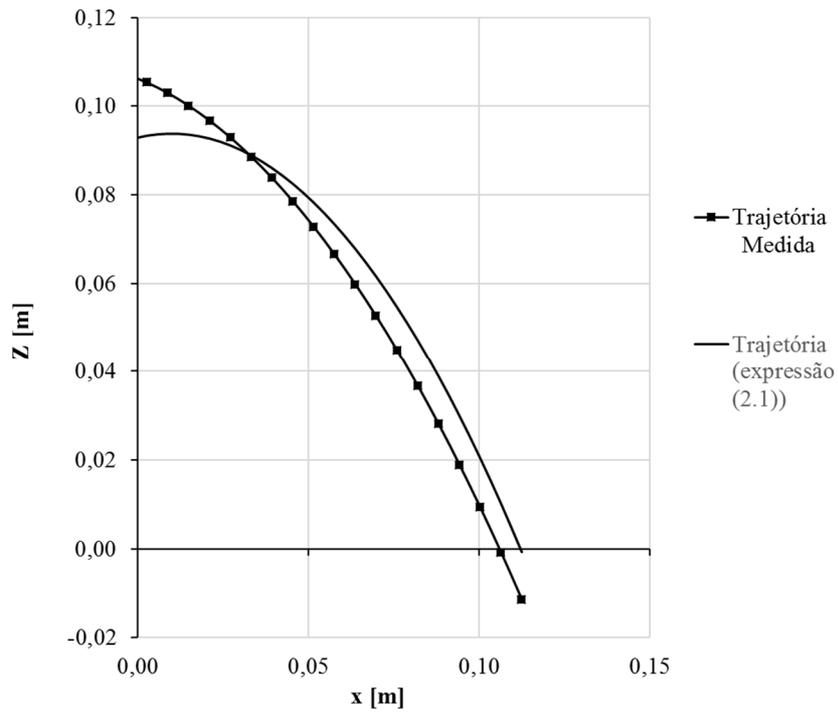


Figura B.5 - Trajetória teórica em comparação com a trajetória medida:  $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 3$  cm.

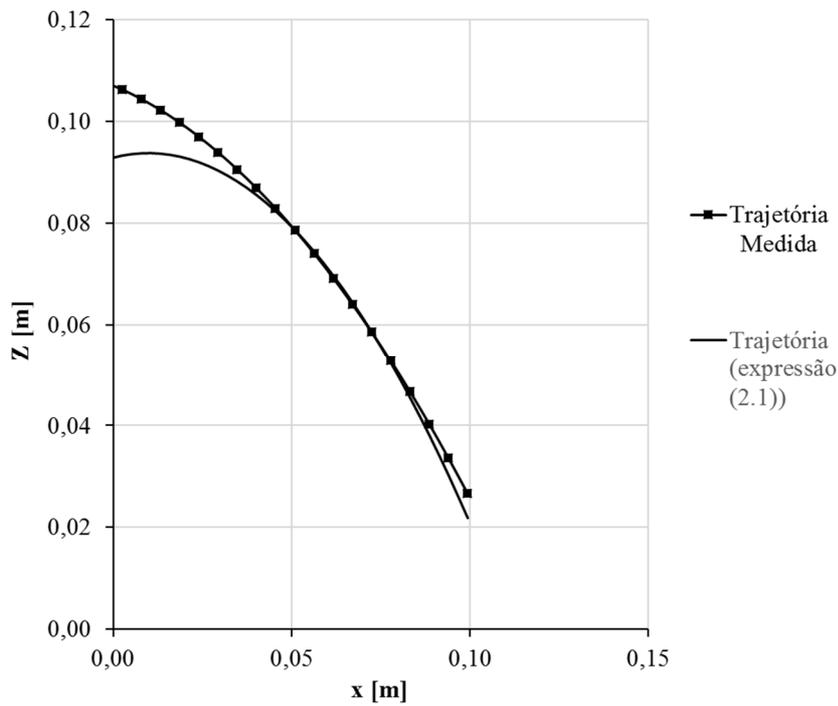


Figura B.6 - Trajetória teórica em comparação com a trajetória medida:  $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 5$  cm.

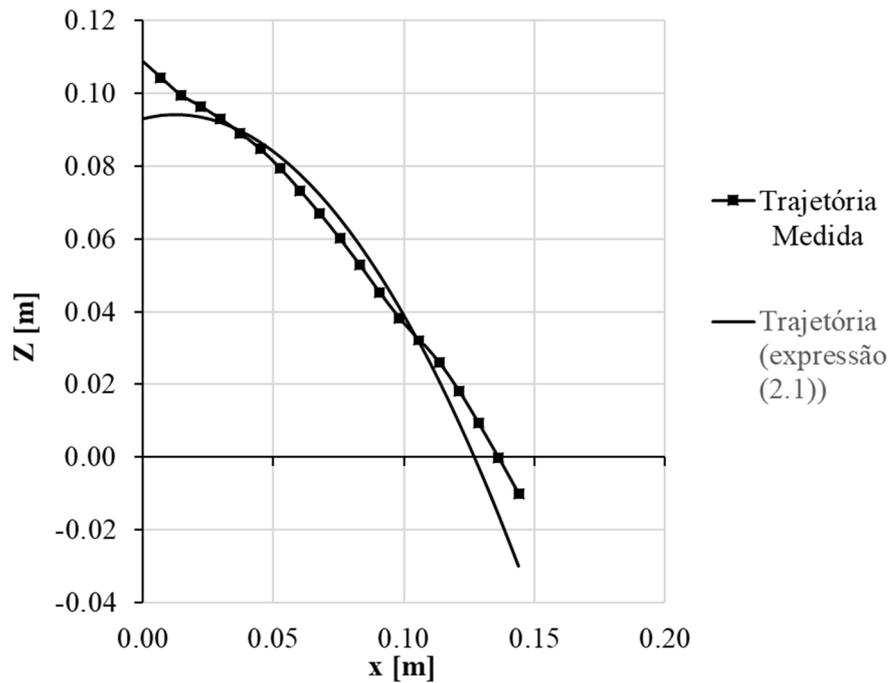


Figura B.7 - Trajetória teórica em comparação com a trajetória medida:  $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 1$  cm.

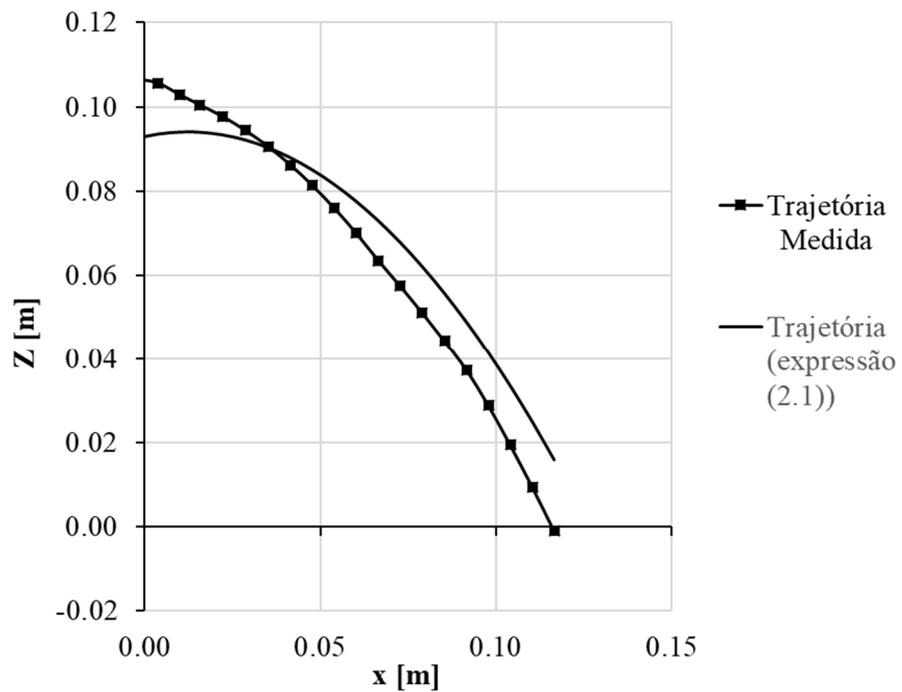


Figura B.8 - Trajetória teórica em comparação com a trajetória medida:  $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 3$  cm.

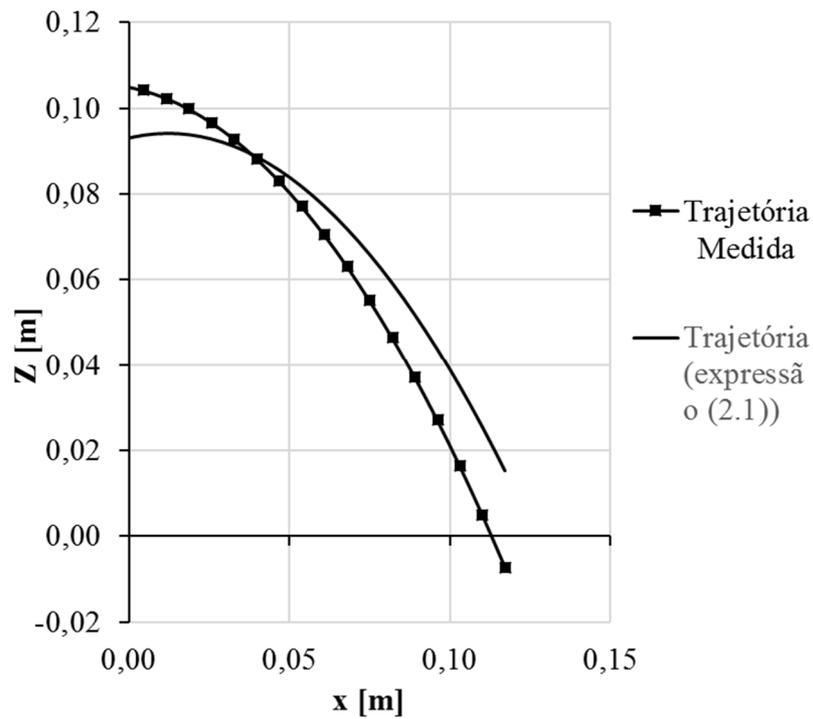


Figura B.9 - Trajetória teórica em comparação com a trajetória medida:  $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 5$  cm.

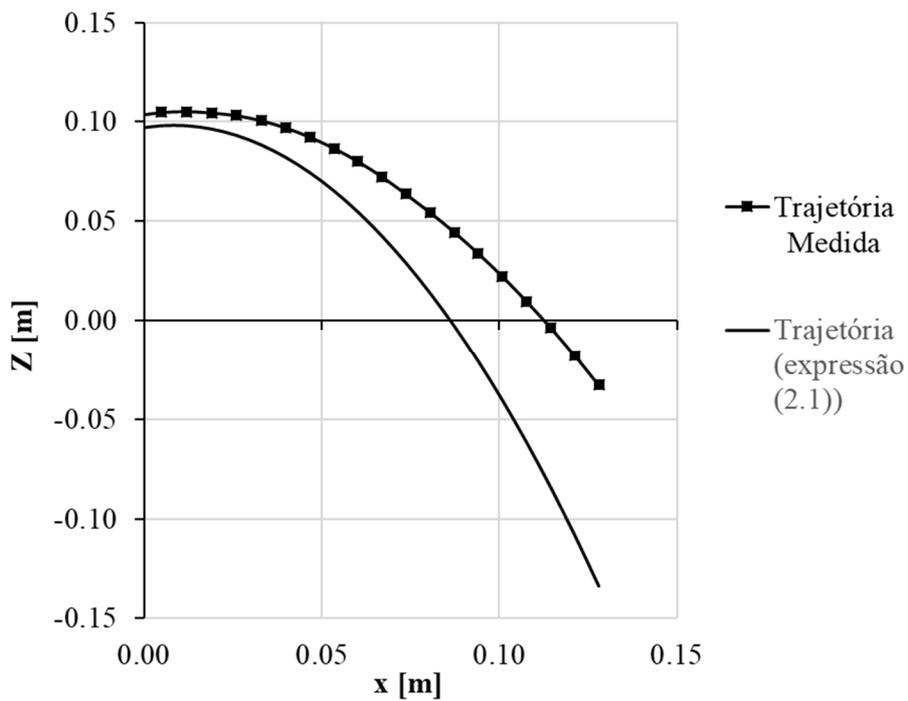


Figura B.10 - Trajetória teórica em comparação com a trajetória medida:  $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 1$  cm.

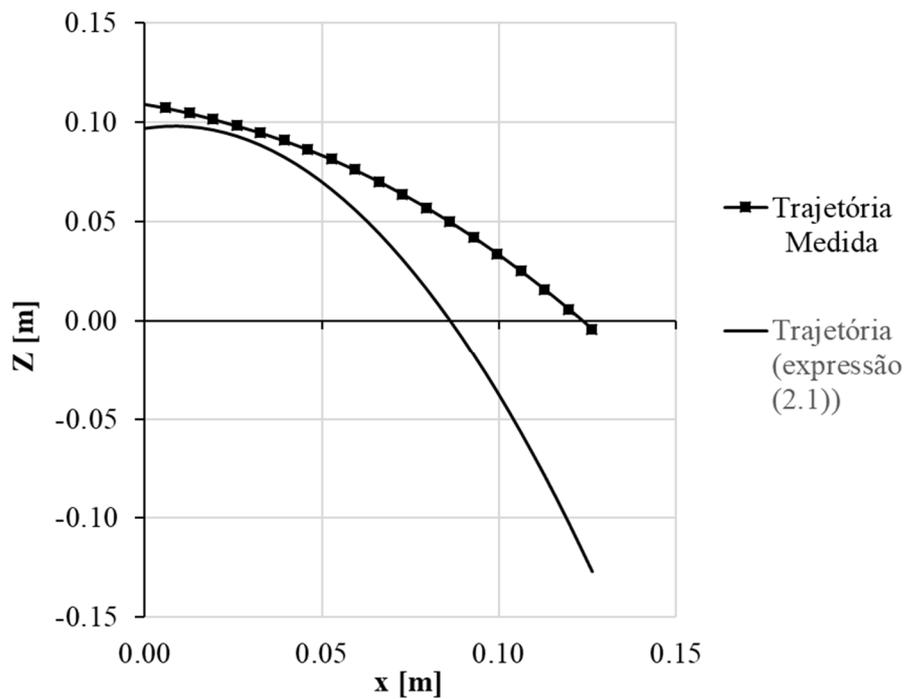


Figura B.11 - Trajetória teórica em comparação com a trajetória medida:  $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 3$  cm.

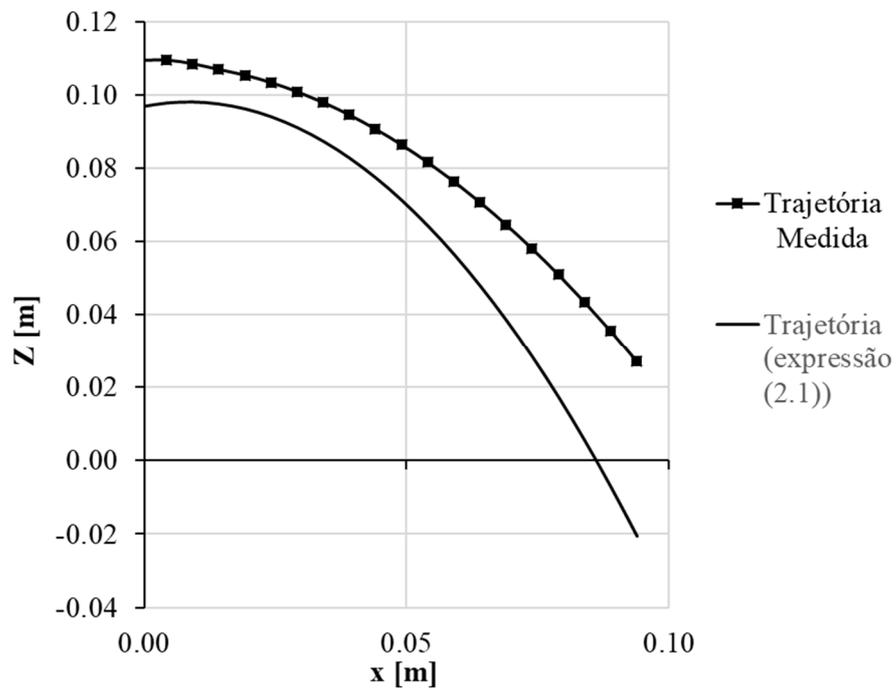


Figura B.12 - Trajetória teórica em comparação com a trajetória medida:  $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 5$  cm.

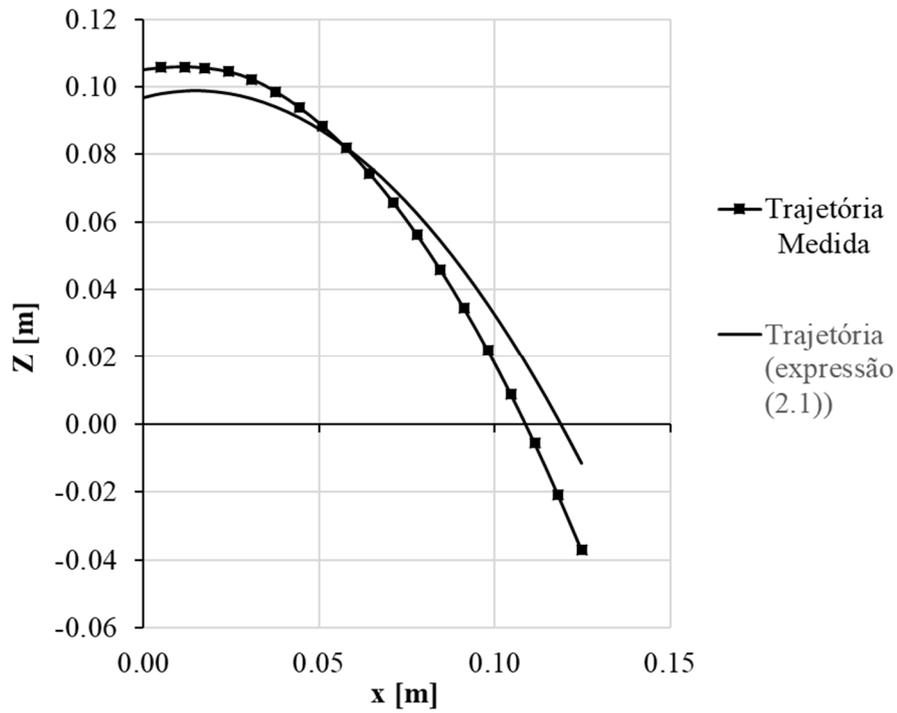


Figura B.13 - Trajetória teórica em comparação com a trajetória medida:  $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 1$  cm.

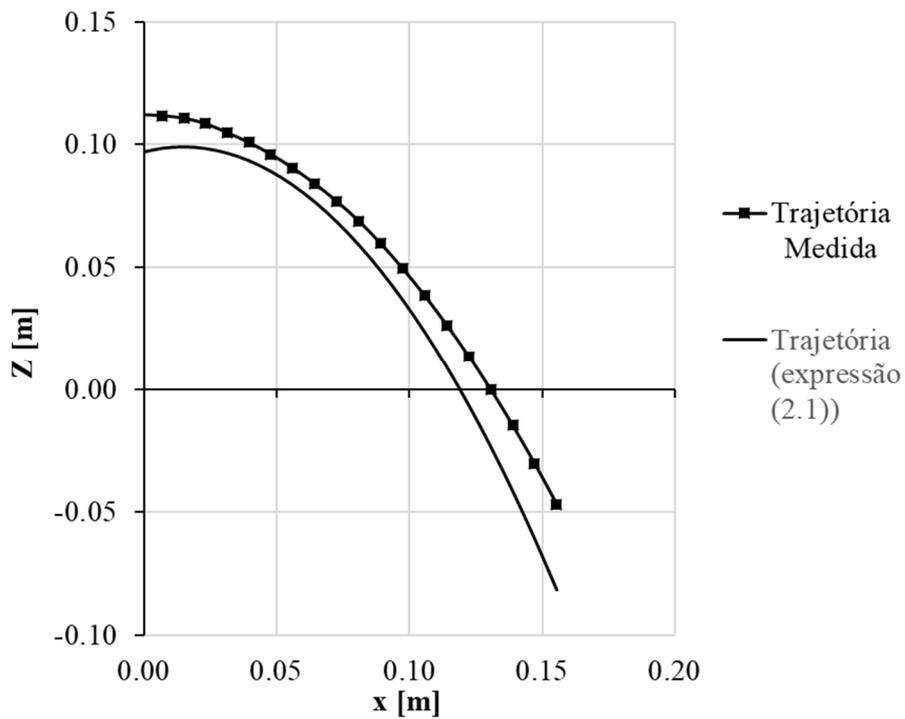


Figura B.14 - Trajetória teórica em comparação com a trajetória medida:  $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 3$  cm.

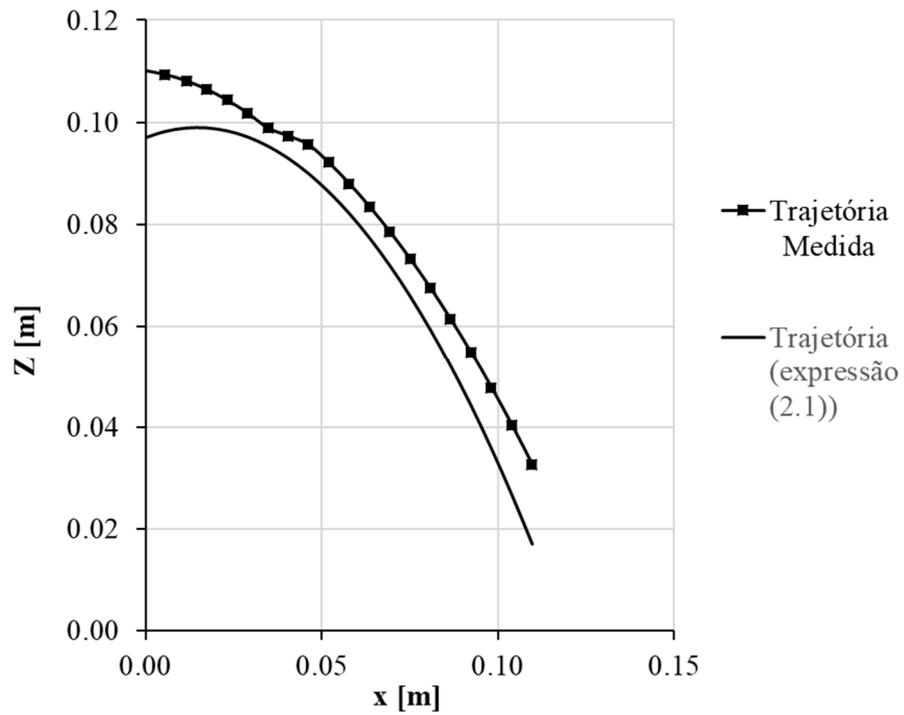


Figura B.15 - Trajetória teórica em comparação com a trajetória medida:  $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 5$  cm.

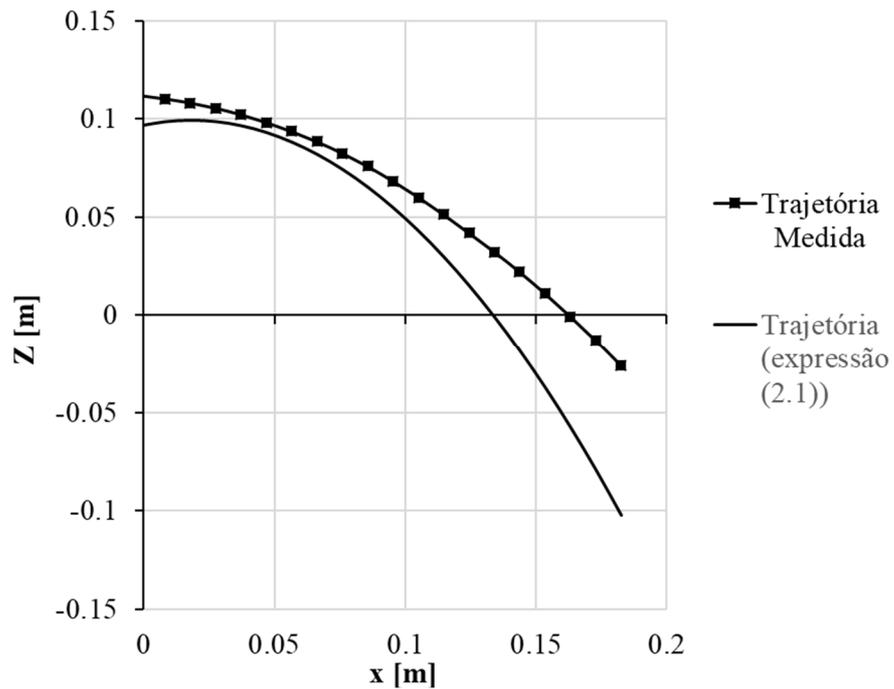


Figura B.16 - Trajetória teórica em comparação com a trajetória medida:  $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 1$  cm.

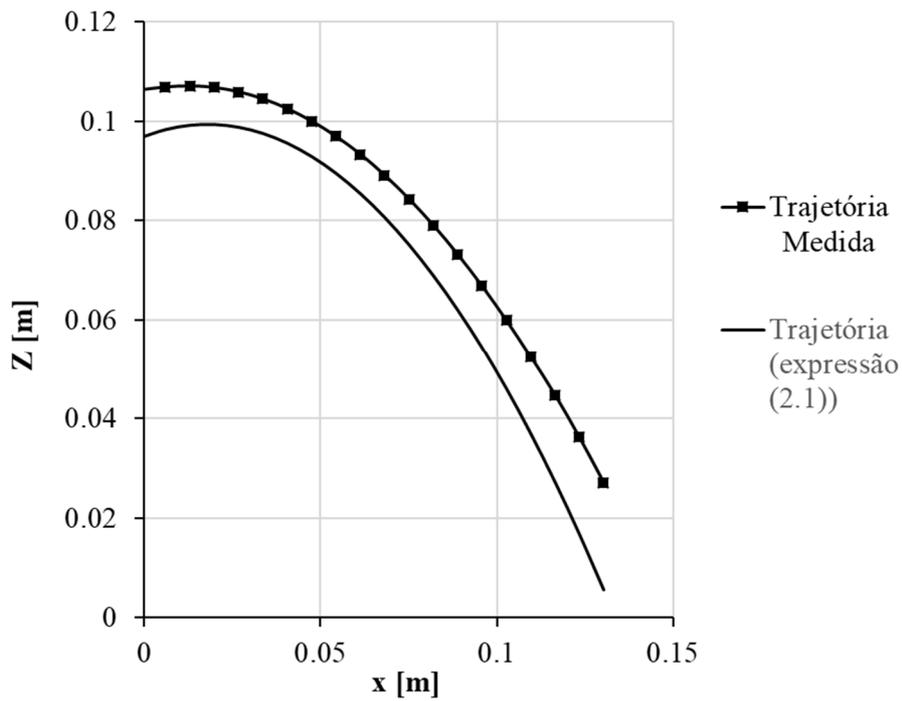


Figura B.17 - Trajetória teórica em comparação com a trajetória medida:  $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 5$  cm.

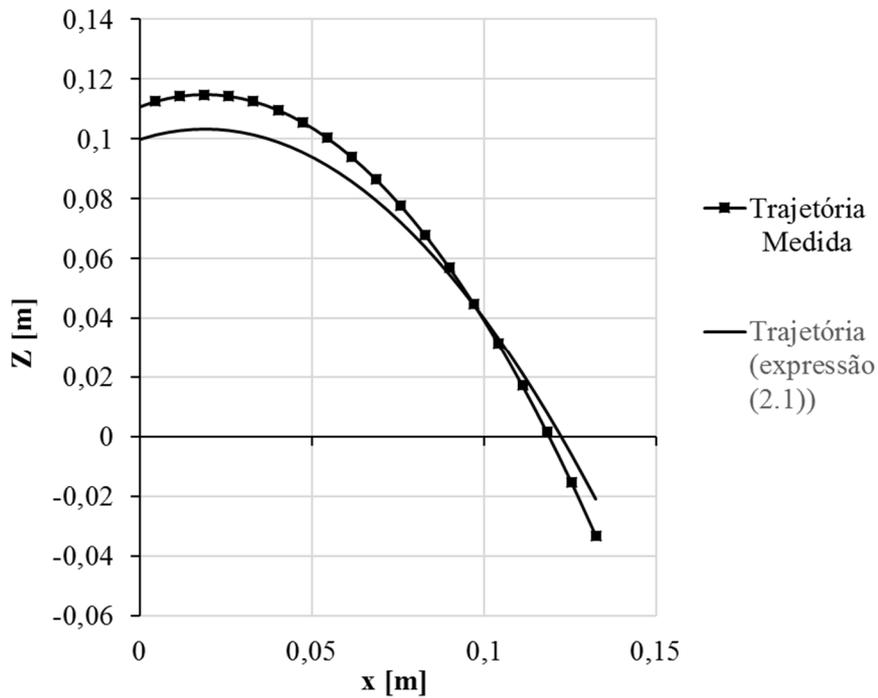


Figura B.18 - Trajetória teórica em comparação com a trajetória medida:  $\alpha = 20^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 3$  cm.

## ANEXO C: PERFIS DE EROÇÃO

### C.1: LEVANTAMENTO DO PERFIL LONGITUDINAL COM A RÉGUA DE PENTES

Quadro C.1 – Valores de  $f$  para  $\alpha = 10^\circ$  e  $Q = 0,51$  L/s (medidas em m).

x (m)	h = 1 cm	h = 3 cm	h = 5 cm
0	-0,04	-0,035	-0,03
0,02	-0,026	-0,021	-0,031
0,04	-0,018	-0,012	-0,012
0,06	-0,025	-0,017	-0,007
0,08	-0,041	-0,03	-0,022
0,1	-0,046	-0,039	-0,037
0,12	-0,056	-0,055	-0,051
0,14	-0,058	-0,063	-0,052
0,16	-0,057	-0,063	-0,051
0,18	-0,05	-0,059	-0,049
0,2	-0,036	-0,054	-0,045
0,22	-0,023	-0,047	-0,04
0,24	-0,012	-0,041	-0,033
0,26	-0,005	-0,024	-0,026
0,28	0,005	-0,011	-0,007
0,3	0,007	-0,001	0,005
0,32	0,007	0,011	0,012
0,34	0,009	0,015	0,022
0,36	0,008	0,019	0,028
0,38	0,009	0,021	0,034
0,4	0,01	0,022	0,034
0,42	0,01	0,024	0,029

0,44	0,01	0,025	0,008
0,46	0,01	0,025	0,007
0,48	0,011	0,024	0,005
0,5	0,01	0,011	0,003
0,52	0,011	0,003	0,002
0,54	0,011	0,003	0,002
0,56	0,01	0,003	0,002
0,58	0,004	0,003	0,002

Quadro C.2 – Valores de  $f$  para  $\alpha = 10^\circ$  e  $Q = 0,71$  L/s (medidas em m).

<b>x (m)</b>	<b>h = 1 cm</b>	<b>h = 3 cm</b>	<b>h = 5 cm</b>
0	-0,03	-0,037	-0,018
0,02	-0,026	-0,032	-0,015
0,04	-0,038	-0,031	-0,015
0,06	-0,048	-0,046	-0,018
0,08	-0,054	-0,057	-0,042
0,1	-0,059	-0,067	-0,054
0,12	-0,066	-0,07	-0,068
0,14	-0,07	-0,071	-0,072
0,16	-0,069	-0,072	-0,075
0,18	-0,063	-0,073	-0,07
0,2	-0,047	-0,064	-0,066
0,22	-0,036	-0,051	-0,063
0,24	-0,027	-0,041	-0,055
0,26	-0,015	-0,029	-0,045
0,28	-0,002	-0,013	-0,032
0,3	0,003	-0,004	-0,024
0,32	0,007	0,004	-0,01
0,34	0,013	0,01	-0,002
0,36	0,014	0,014	0,008
0,38	0,014	0,02	0,016
0,4	0,016	0,026	0,03
0,42	0,018	0,029	0,032
0,44	0,019	0,029	0,038
0,46	0,019	0,029	0,041
0,48	0,018	0,031	0,04
0,5	0,018	0,031	0,041

0,52	0,018	0,031	0,038
0,54	0,018	0,032	0,023
0,56	0,018	0,031	0,007
0,58	0,018	0,032	0,007
0,6	0,018	0,025	0,007
0,62	0,018	0,007	0,007
0,64	0,018	0,002	0,007
0,66	0,018	0,002	0,007
0,68	0,018	0,002	0,007
0,7	0,015	0,002	0,007
0,72	0,004	0,002	0,007

Quadro C.3 – Valores de  $f$  para  $\alpha = 10^\circ$  e  $Q = 0,85$  L/s (medidas em m).

<b>x (m)</b>	<b><math>h = 1</math> cm</b>	<b><math>h = 3</math> cm</b>	<b><math>h = 5</math> cm</b>
0	-0,067	-0,065	-0,024
0,02	-0,06	-0,072	-0,026
0,04	-0,062	-0,076	-0,019
0,06	-0,066	-0,073	-0,026
0,08	-0,07	-0,077	-0,038
0,1	-0,074	-0,079	-0,059
0,12	-0,08	-0,078	-0,069
0,14	-0,079	-0,078	-0,079
0,16	-0,084	-0,079	-0,08
0,18	-0,086	-0,08	-0,083
0,2	-0,086	-0,081	-0,082
0,22	-0,082	-0,079	-0,077
0,24	-0,068	-0,076	-0,078
0,26	-0,051	-0,072	-0,076
0,28	-0,042	-0,063	-0,07
0,3	-0,032	-0,053	-0,062
0,32	-0,018	-0,043	-0,054
0,34	-0,008	-0,03	-0,042
0,36	-0,005	-0,018	-0,032
0,38	0,003	-0,008	-0,025
0,4	0,008	0,001	-0,017
0,42	0,013	0,011	-0,003
0,44	0,016	0,019	0,007
0,46	0,017	0,024	0,014
0,48	0,018	0,03	0,022
0,5	0,018	0,032	0,029

0,52	0,019	0,034	0,032
0,54	0,019	0,034	0,036
0,56	0,019	0,034	0,039
0,58	0,019	0,034	0,04
0,6	0,019	0,034	0,041
0,62	0,019	0,034	0,041
0,64	0,019	0,034	0,041
0,66	0,019	0,034	0,032
0,68	0,019	0,034	0,016
0,7	0,018	0,031	0
0,72	0,018	0,016	0
0,74	0,018	0,003	0
0,76	0,018	0,002	0
0,78	0,017	0,002	0
0,8	0,017	0,002	0
0,82	0,016	0,002	0
0,84	0,006	0,002	0
0,86	0,002	0,002	0
0,88	0,001	0,002	0
0,9	0,002	0,002	0

Quadro C.4 – Valores de  $f$  para  $\alpha = 15^\circ$  e  $Q = 0,51$  L/s (medidas em m).

<b>x (m)</b>	<b>h = 1 cm</b>	<b>h = 3 cm</b>	<b>h = 5 cm</b>
0	-0,04	-0,035	-0,03
0,02	-0,026	-0,021	-0,031
0,04	-0,018	-0,012	-0,012
0,06	-0,025	-0,017	-0,007
0,08	-0,041	-0,03	-0,022
0,1	-0,046	-0,039	-0,037
0,12	-0,056	-0,055	-0,051
0,14	-0,058	-0,063	-0,052
0,16	-0,057	-0,063	-0,051
0,18	-0,05	-0,059	-0,049
0,2	-0,036	-0,054	-0,045
0,22	-0,023	-0,047	-0,04
0,24	-0,012	-0,041	-0,033
0,26	-0,005	-0,024	-0,026
0,28	0,005	-0,011	-0,007
0,3	0,007	-0,001	0,005
0,32	0,007	0,011	0,012
0,34	0,009	0,015	0,022
0,36	0,008	0,019	0,028
0,38	0,009	0,021	0,034
0,4	0,01	0,022	0,034
0,42	0,01	0,024	0,029
0,44	0,01	0,025	0,008
0,46	0,01	0,025	0,007
0,48	0,011	0,024	0,005
0,5	0,01	0,011	0,003

0,52	0,011	0,003	0,002
0,54	0,011	0,003	0,002
0,56	0,01	-0,014	0
0,58	0,004	0	0
0,6	0,004	0	0

Quadro C.5 – Valores de  $f$  para  $\alpha = 15^\circ$  e  $Q = 0,71$  L/s (medidas em m).

<b>x (m)</b>	<b>h = 1 cm</b>	<b>h = 3 cm</b>	<b>h = 5 cm</b>
0	-0,0585	-0,052	-0,017
0,02	-0,048	-0,052	-0,013
0,04	-0,0405	-0,043	0,004
0,06	-0,046	-0,044	0
0,08	-0,0525	-0,047	-0,015
0,1	-0,0585	-0,059	-0,035
0,12	-0,0625	-0,062	-0,041
0,14	-0,063	-0,064	-0,052
0,16	-0,067	-0,065	-0,061
0,18	-0,0665	-0,066	-0,065
0,2	-0,0645	-0,067	-0,064
0,22	-0,06	-0,065	-0,063
0,24	-0,049	-0,062	-0,063
0,26	-0,0365	-0,054	-0,059
0,28	-0,0255	-0,05	-0,048
0,3	-0,0185	-0,039	-0,042
0,32	-0,011	-0,03	-0,035
0,34	-0,0025	-0,021	-0,025
0,36	0,006	-0,011	-0,017
0,38	0,008	0,001	-0,008
0,4	0,0095	0,008	0,002
0,42	0,012	0,017	0,009
0,44	0,013	0,023	0,017
0,46	0,0135	0,025	0,026
0,48	0,0135	0,026	0,032
0,5	0,0135	0,027	0,036

0,52	0,014	0,028	0,039
0,54	0,014	0,029	0,039
0,56	0,014	0,029	0,039
0,58	0,0145	0,03	0,028
0,6	0,0145	0,03	0,013
0,62	0,0145	0,029	0,004
0,64	0,0145	0,029	0,003
0,66	0,015	0,028	
0,68	0,015	0,018	
0,7	0,0145	0,004	
0,72	0,014	0,004	
0,74	0,0145	0,004	
0,76	0,014		
0,78	0,014		
0,8	0,0135		
0,82	0,005		
0,84	0,002		

Quadro C.6 – Valores de  $f$  para  $\alpha = 15^\circ$  e  $Q = 0,85$  L/s (medidas em m).

<b>x (m)</b>	<b>h = 1 cm</b>	<b>h = 3 cm</b>	<b>h = 5 cm</b>
0	-0,071	-0,073	-0,024
0,02	-0,066	-0,07	-0,014
0,04	-0,051	-0,067	0,003
0,06	-0,045	-0,067	0,002
0,08	-0,054	-0,065	-0,015
0,1	-0,059	-0,069	-0,026
0,12	-0,068	-0,069	-0,039
0,14	-0,075	-0,068	-0,05
0,16	-0,075	-0,068	-0,059
0,18	-0,079	-0,07	-0,069
0,2	-0,079	-0,072	-0,075
0,22	-0,079	-0,073	-0,077
0,24	-0,077	-0,073	-0,079
0,26	-0,074	-0,073	-0,079
0,28	-0,063	-0,068	-0,079
0,3	-0,053	-0,06	-0,073
0,32	-0,041	-0,051	-0,065
0,34	-0,027	-0,044	-0,059
0,36	-0,017	-0,032	-0,051
0,38	-0,01	-0,019	-0,046
0,4	0	-0,008	-0,037
0,42	0,005	0	-0,028
0,44	0,008	0,007	-0,017
0,46	0,009	0,014	-0,007
0,48	0,011	0,021	0,003
0,5	0,012	0,023	0,01

0,52	0,012	0,026	0,018
0,54	0,013	0,027	0,023
0,56	0,013	0,029	0,029
0,58	0,014	0,029	0,032
0,6	0,014	0,03	0,034
0,62	0,014	0,03	0,035
0,64	0,014	0,03	0,036
0,66	0,014	0,031	0,037
0,68	0,014	0,031	0,036
0,7	0,014	0,031	0,021
0,72	0,014	0,03	0,002
0,74	0,014	0,016	0,002
0,76	0,014	0,002	
0,78	0,014	0,002	
0,8	0,014	0,002	
0,82	0,014		
0,84	0,014		
0,86	0,014		
0,88	0,014		
0,9	0,014		
0,92	0,014		
0,94	0,013		
0,96	0,011		
0,98	0,002		
1	0,002		

Quadro C.7 – Valores de  $f$  para  $\alpha = 20^\circ$  e  $Q = 0,71$  L/s (medidas em m).

<b>x (m)</b>	<b>h = 3 cm</b>
0	-0,036
0,02	-0,03
0,04	-0,031
0,06	-0,041
0,08	-0,058
0,1	-0,062
0,12	-0,061
0,14	-0,063
0,16	-0,067
0,18	-0,063
0,2	-0,061
0,22	-0,057
0,24	-0,05
0,26	-0,044
0,28	-0,038
0,3	-0,024
0,32	-0,013
0,34	-0,003
0,36	0,006
0,38	0,012
0,4	0,018
0,42	0,025
0,44	0,027
0,46	0,03
0,48	0,03
0,5	0,031

0,52	0,031
0,54	0,033
0,56	0,032
0,58	0,033
0,6	0,032
0,62	0,032
0,64	0,022
0,66	0,008
0,68	0,007
0,7	0,007
0,72	0,007
0,74	0,007

C.2: COMPARAÇÃO DOS PERFIS OBTIDOS COM A RÉGUA E COM O MODELO 3D.

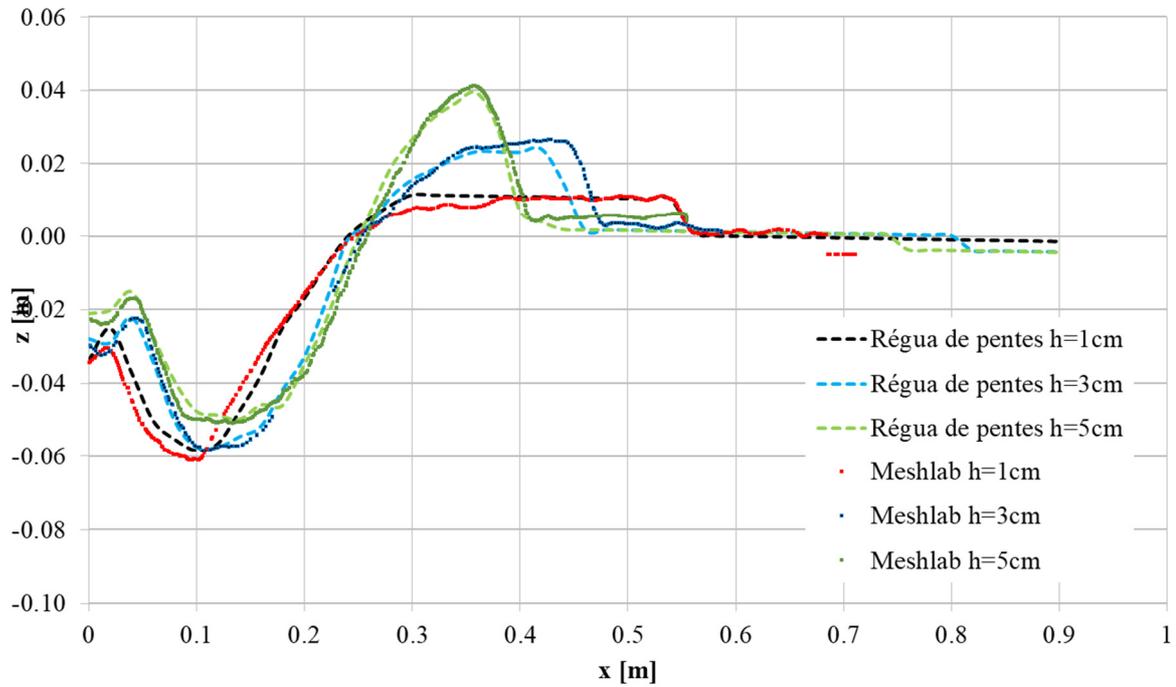


Figura C.1 - Comparação dos perfis longitudinais para  $\alpha = 10^\circ$  e  $Q = 0,51$  L/s.

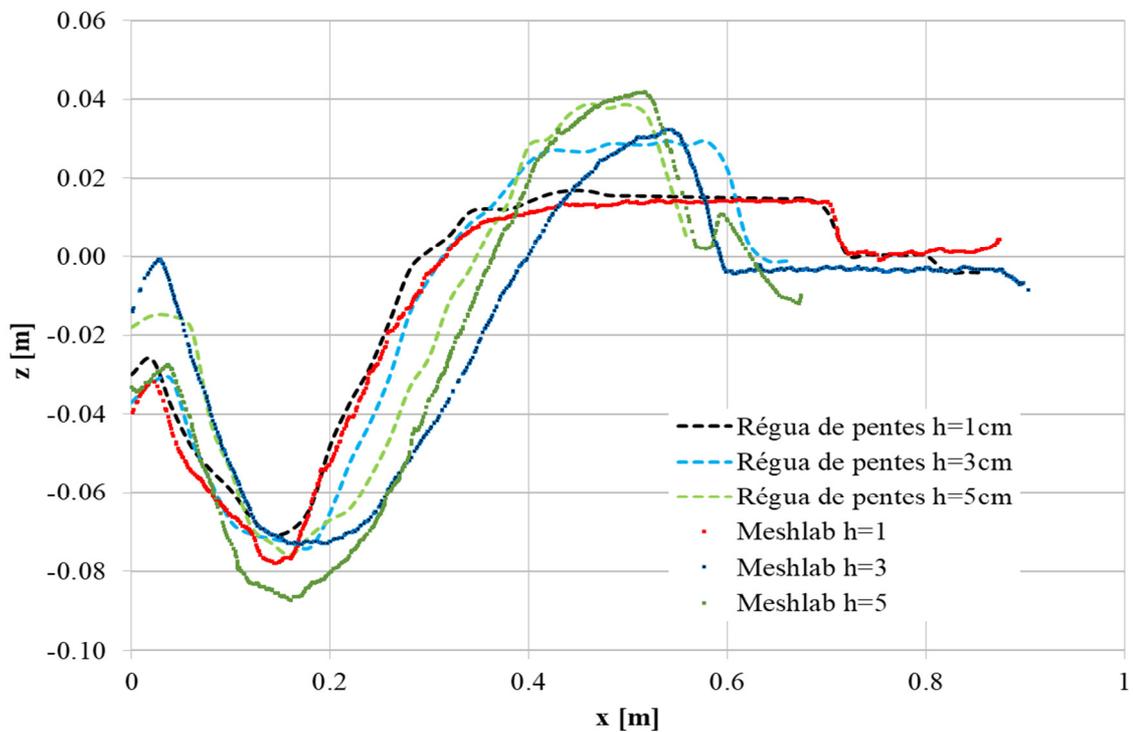


Figura C.2 - Comparação dos perfis longitudinais para  $\alpha = 10^\circ$  e  $Q = 0,71$  L/s.

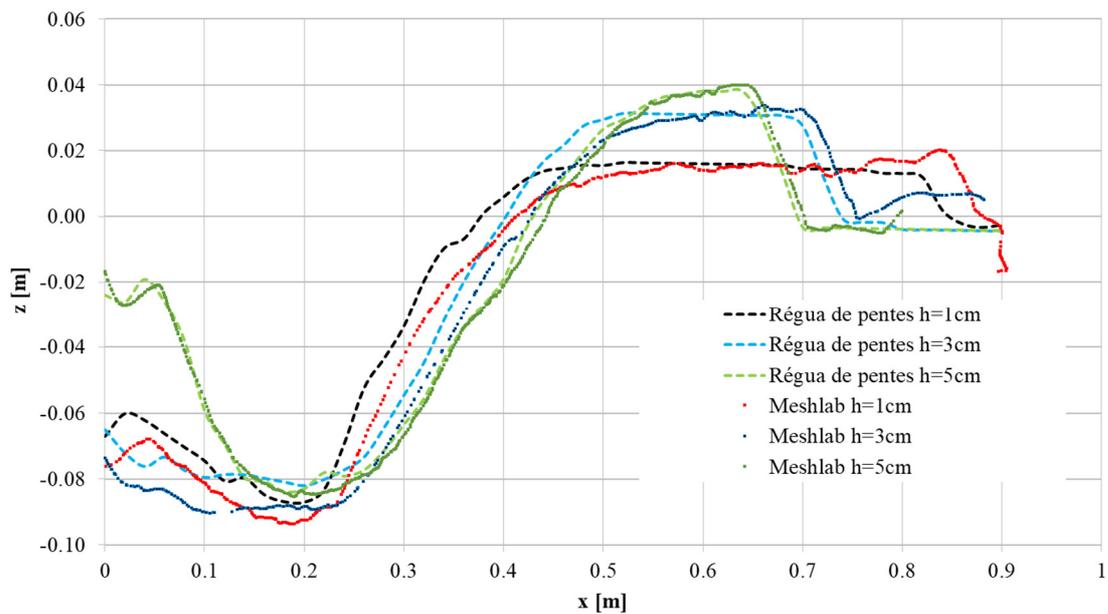


Figura C.3 - Comparação dos perfis longitudinais para  $\alpha = 10^\circ$  e  $Q = 0,85$  L/s.

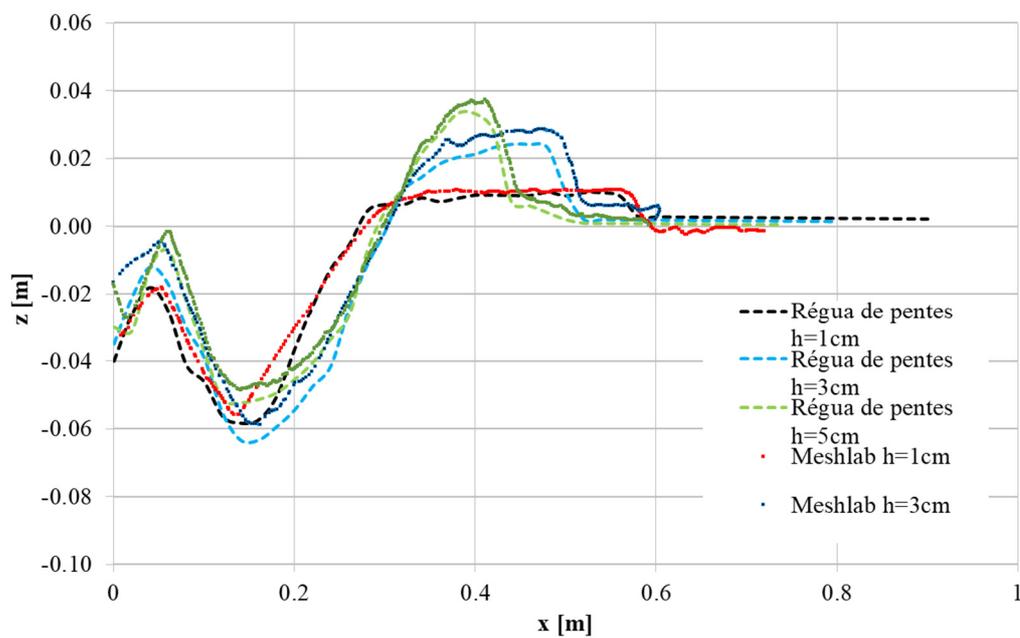


Figura C.4 - Comparação dos perfis longitudinais para  $\alpha = 15^\circ$  e  $Q = 0,51$  L/s.

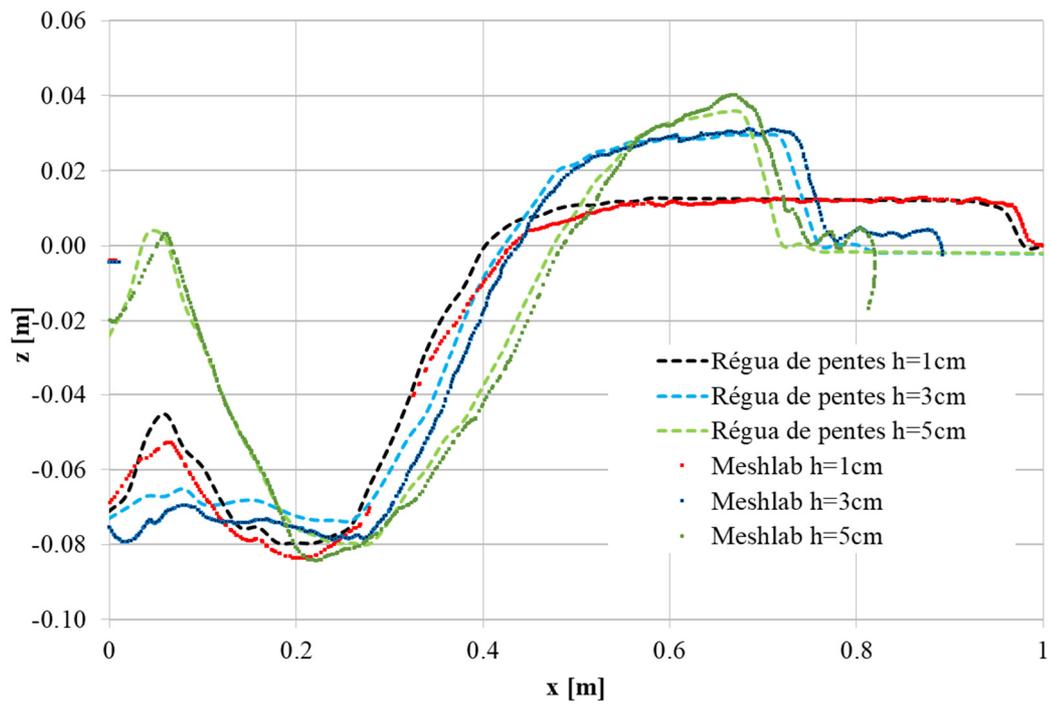


Figura C.5 - Comparação dos perfis longitudinais para  $\alpha = 15^\circ$  e  $Q = 0,85$  L/s.

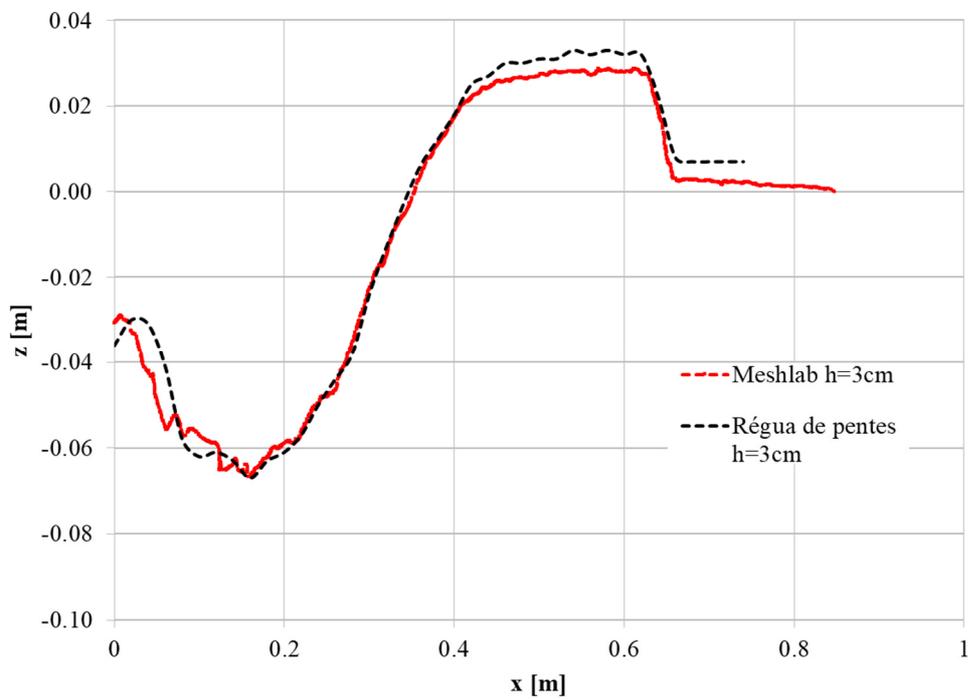


Figura C.6 - Comparação dos perfis longitudinais para  $\alpha = 10^\circ$  e  $Q = 0,51$  L/s.

C.3: INFLUÊNCIA DO CAUDAL

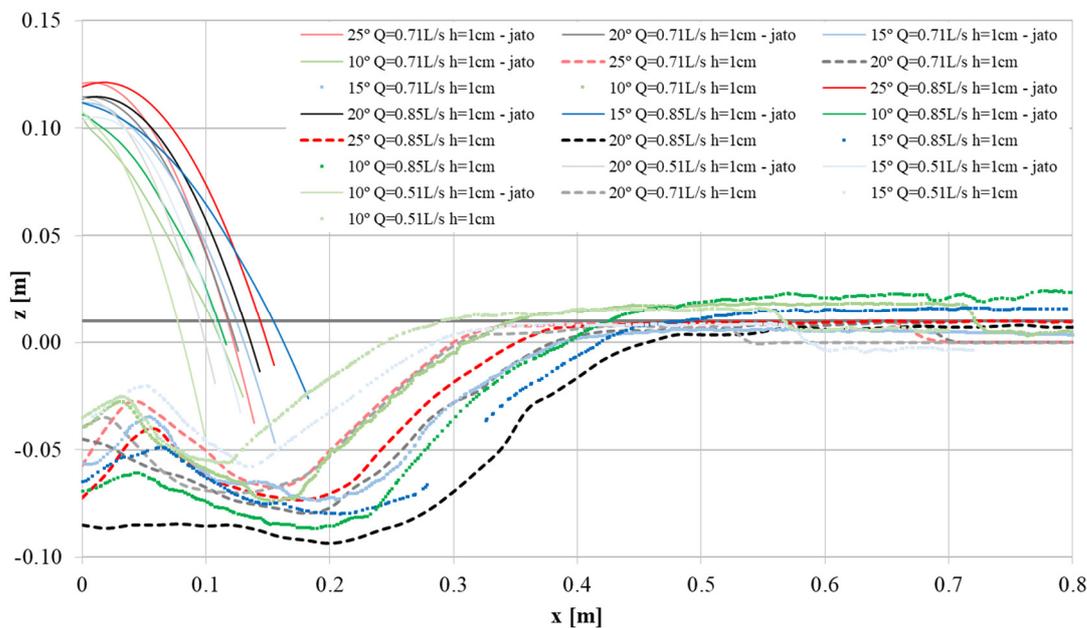


Figura C.7 - Representação gráfica dos perfis de erosão e do jato médio para  $h = 1$  cm.

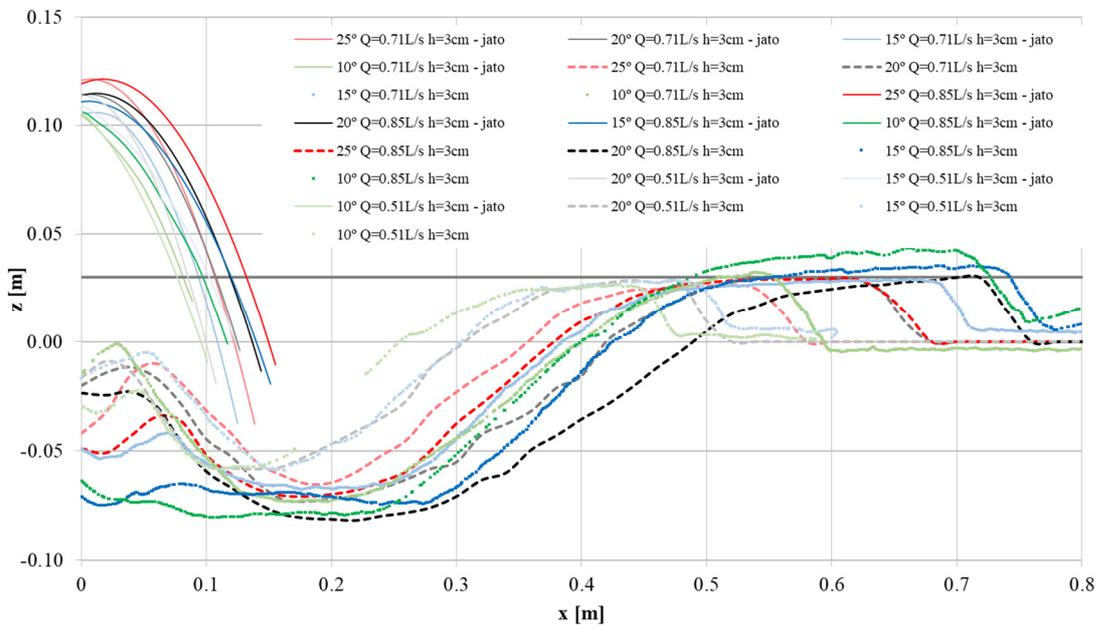


Figura C.8 - Representação gráfica dos perfis de erosão e do jato médio para  $h = 3$  cm.

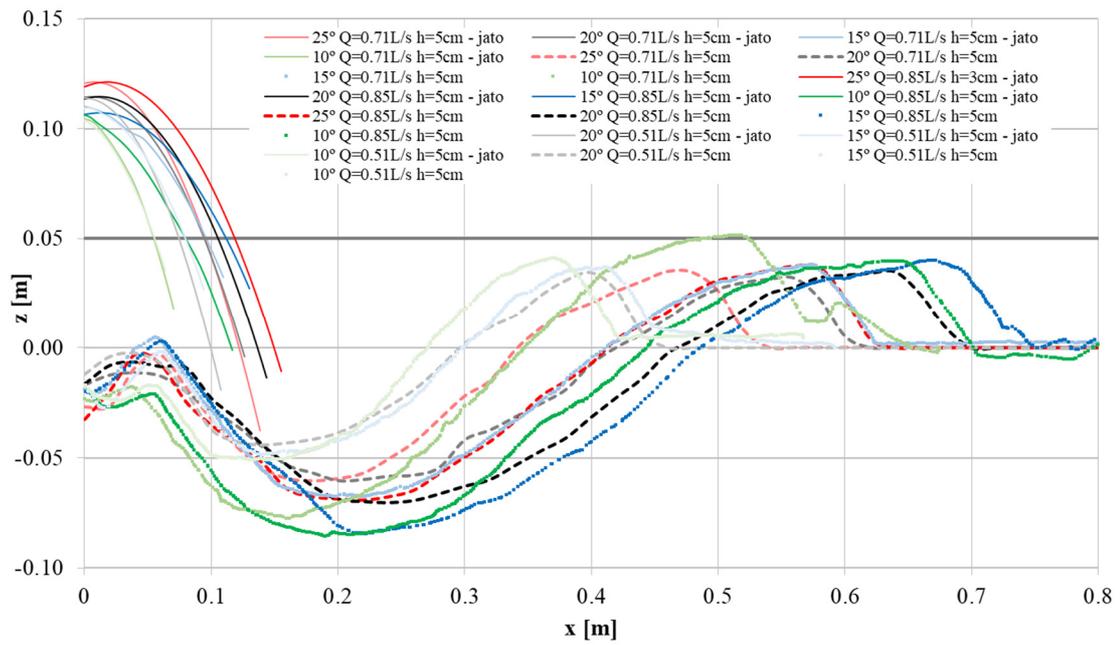


Figura C.9 - Representação gráfica dos perfis de erosão e do jato médio para  $h = 5$  cm.

C.4: INFLUÊNCIA DO ÂNGULO

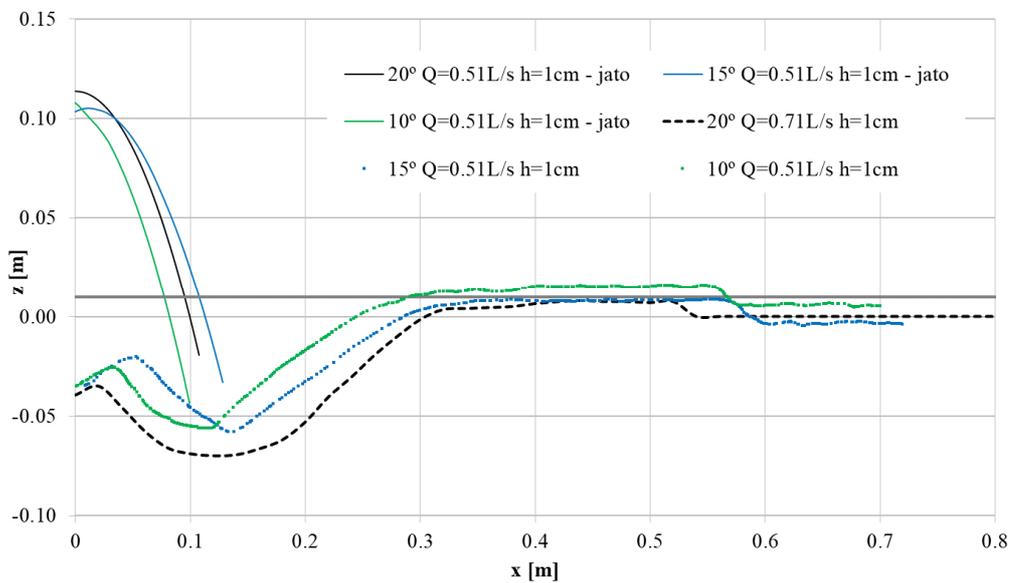


Figura C.10 - Variação dos perfis longitudinais de erosão com o ângulo de saída do trampolim, para  $Q = 0,51 \text{ L/s}$  e  $h = 1 \text{ cm}$ .

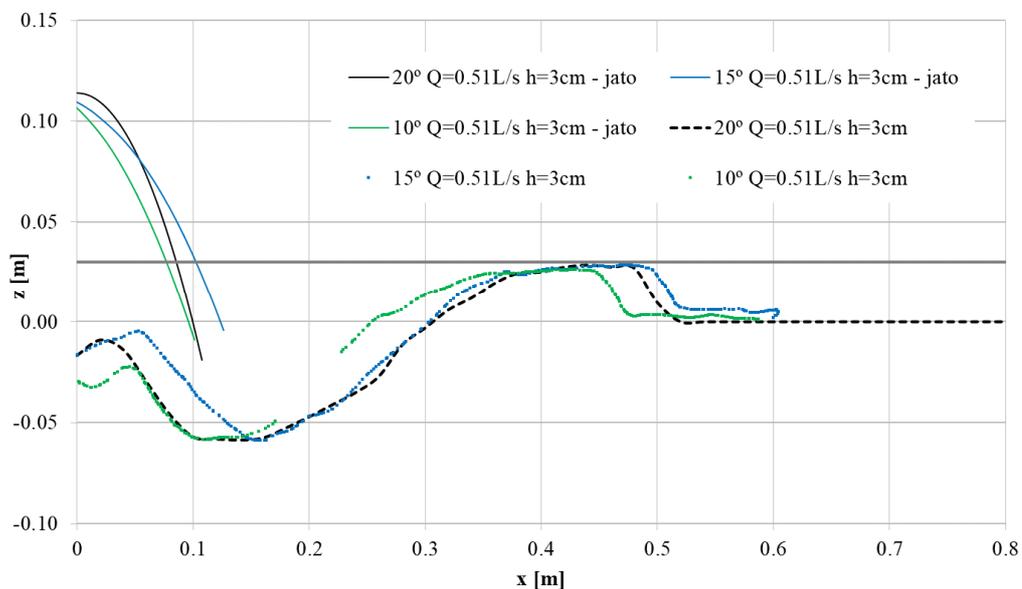


Figura C.11 - Variação dos perfis longitudinais de erosão com o ângulo de saída do trampolim, para  $Q = 0,51 \text{ L/s}$  e  $h = 3 \text{ cm}$ .

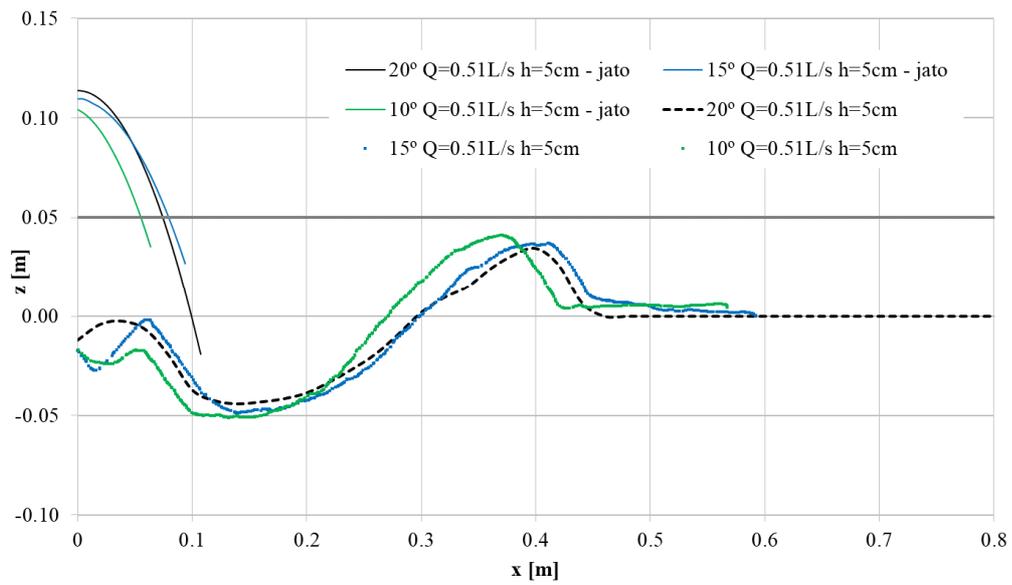


Figura C.12 - Variação dos perfis longitudinais de erosão com o ângulo de saída do trampolim, para  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 5$  cm.

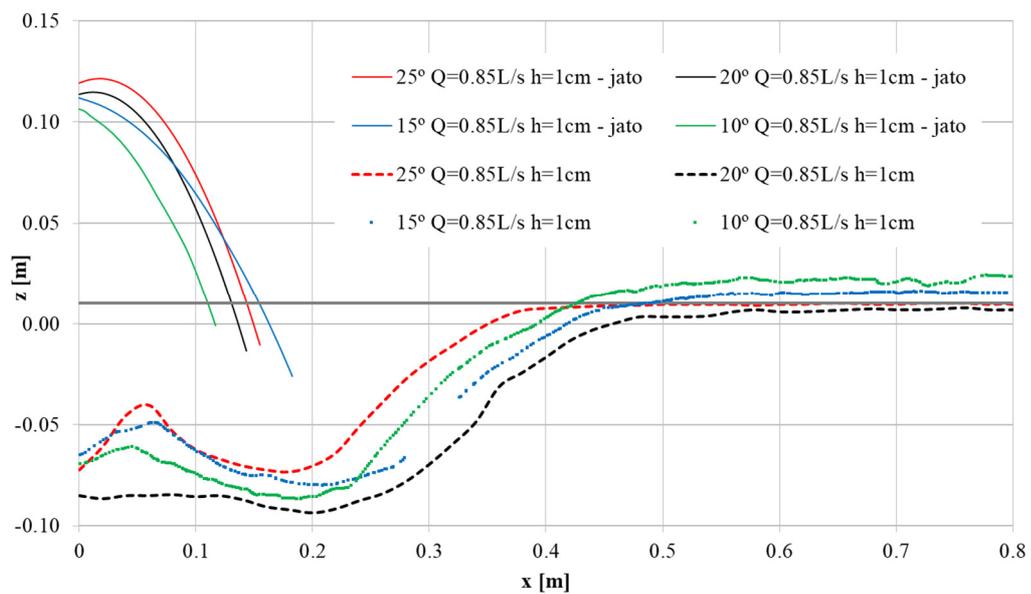


Figura C.13 - Variação dos perfis longitudinais de erosão com o ângulo de saída do trampolim, para  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 1$  cm.

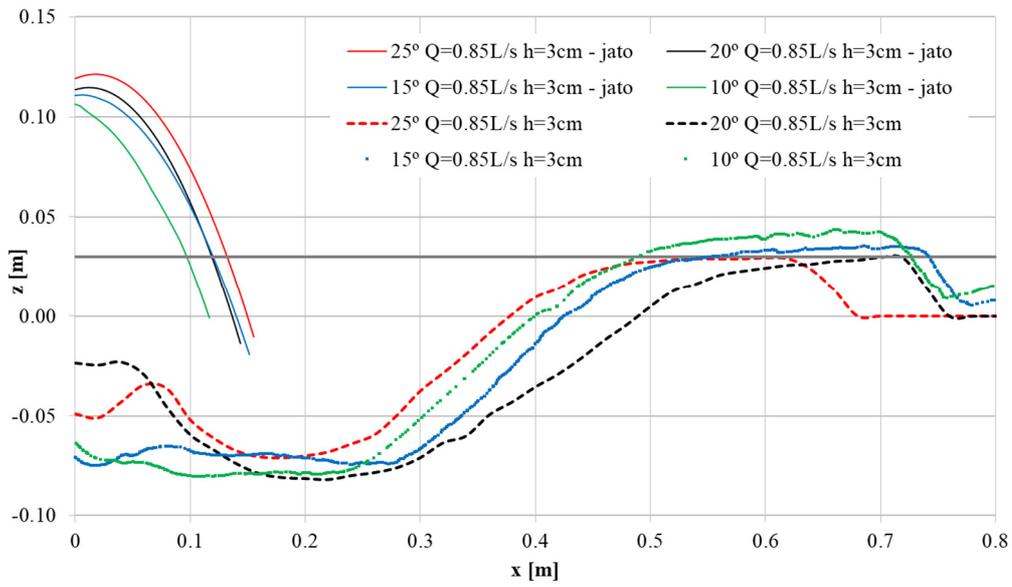


Figura C.14 - Variação dos perfis longitudinais de erosão com o ângulo de saída do trampolim, para  $Q = 0,85 \text{ L/s}$  e  $h = 3 \text{ cm}$ .

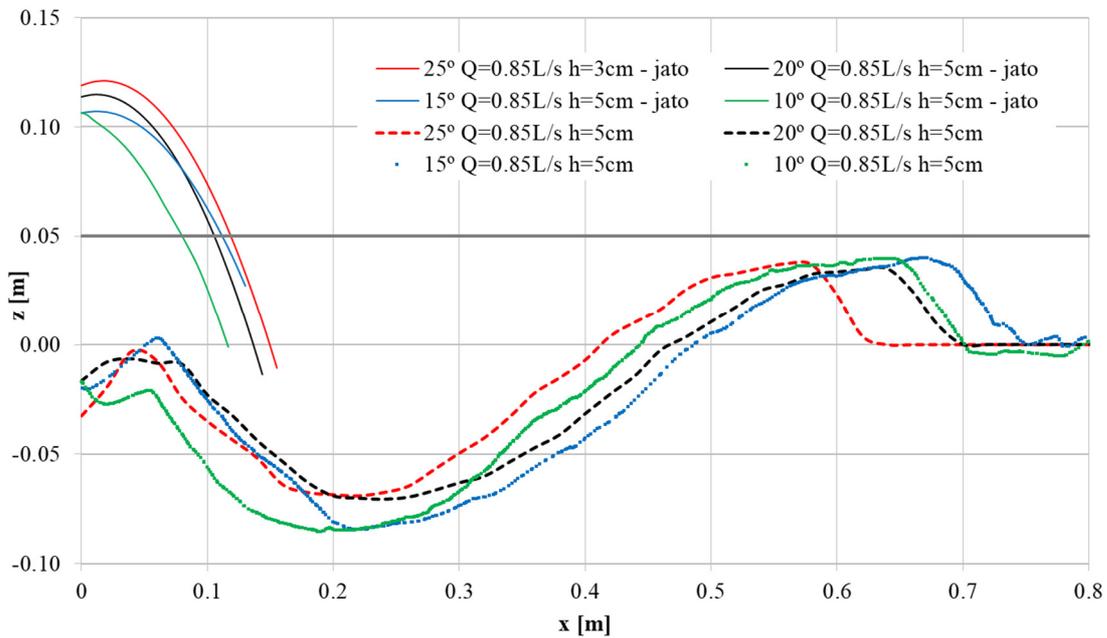


Figura C.15 - Variação dos perfis longitudinais de erosão com o ângulo de saída do trampolim, para  $Q = 0,85 \text{ L/s}$  e  $h = 5 \text{ cm}$ .





## ANEXO D: CONFIGURAÇÃO 3D DA ESCAVAÇÃO NO CÁLCULO DE VOLUME

### D.1: REGIÃO DE INTERESSE

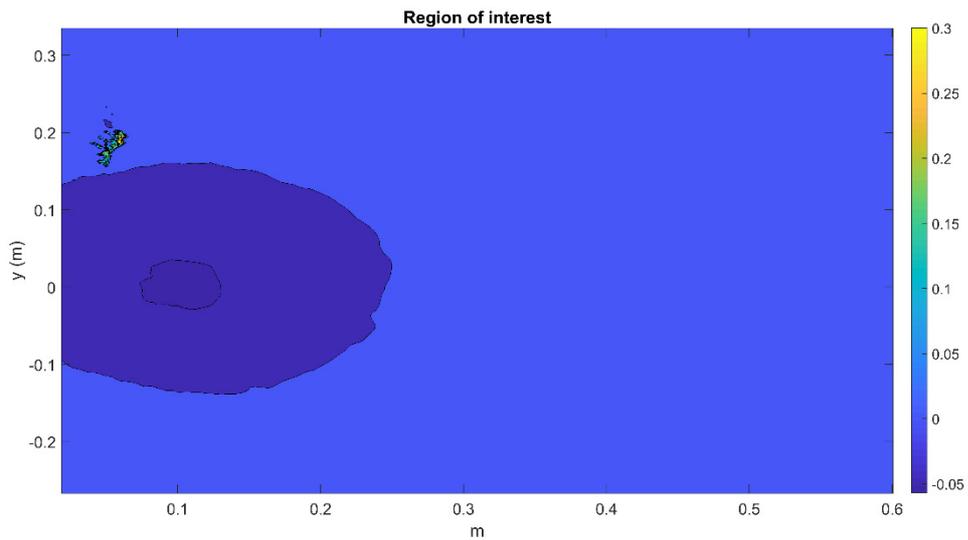


Figura D.1 - Região selecionada para o cálculo do volume da escavação e da barra ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 1$  cm).

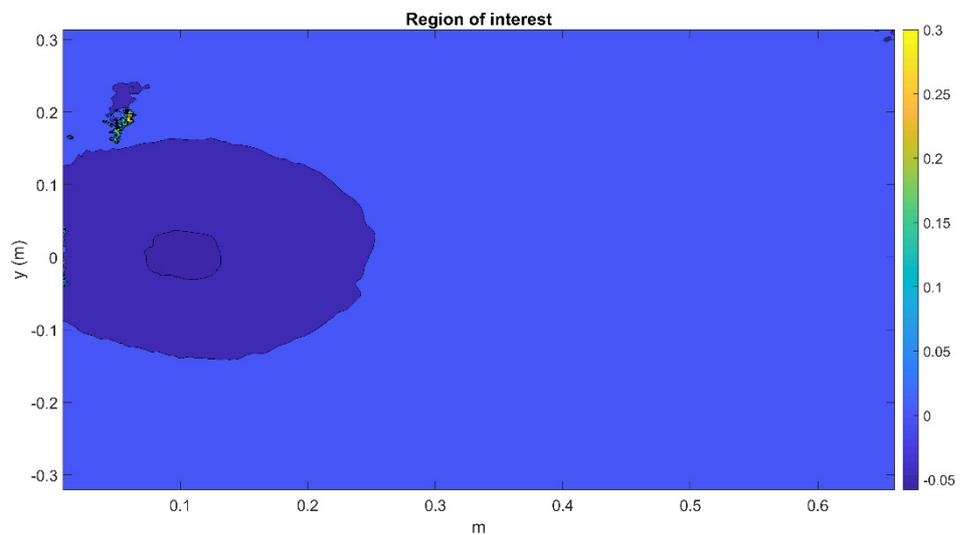


Figura D.2 - Região selecionada para o cálculo do volume da escavação e da barra ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 3$  cm).

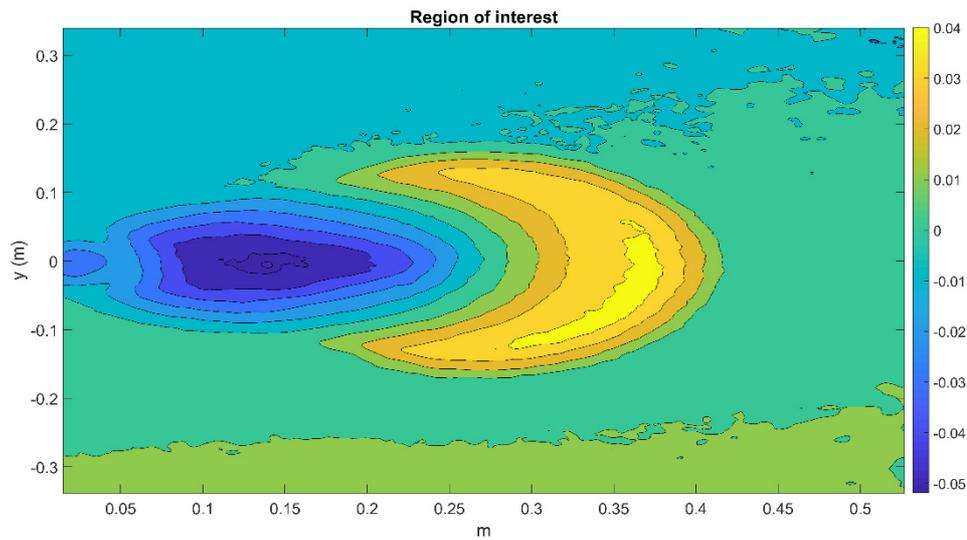


Figura D.3 - Região selecionada para o cálculo do volume da escavação e da barra ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 1$  cm).

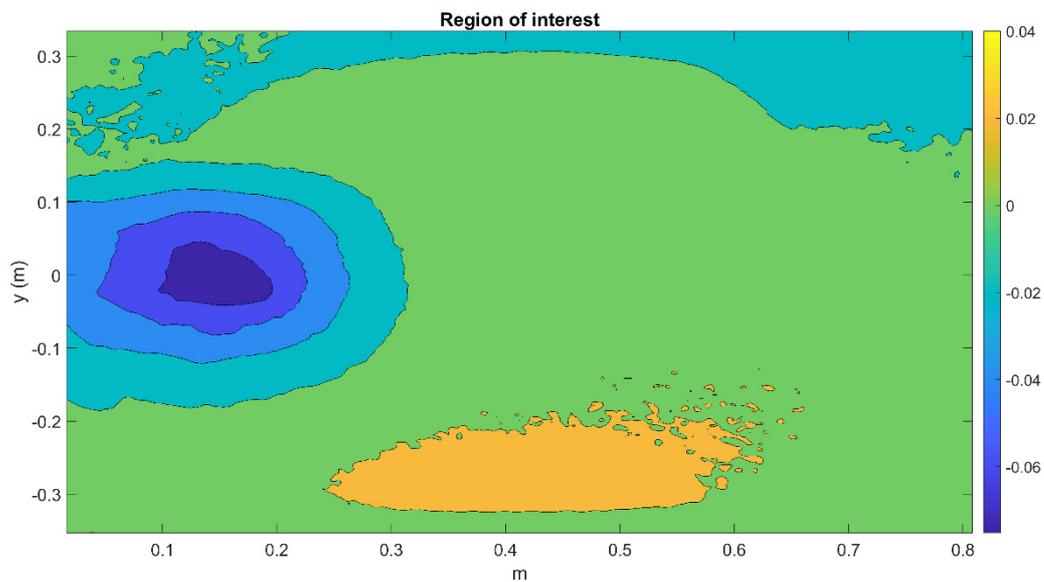


Figura D.4 - Região selecionada para o cálculo do volume da escavação e da barra ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 5$  cm).

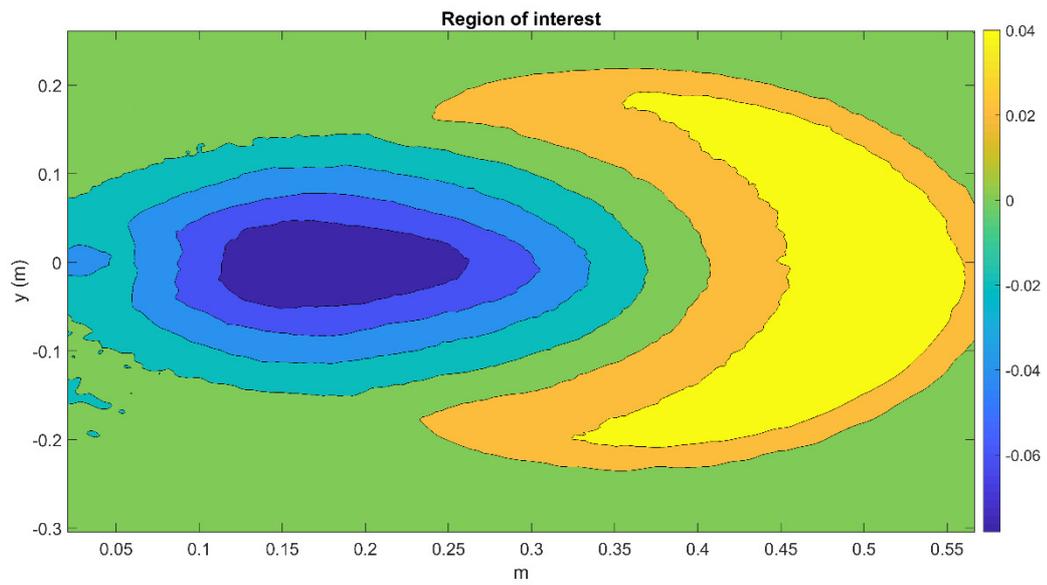


Figura D.5 - Região selecionada para o cálculo do volume da escavação e da barra ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 5$  cm).

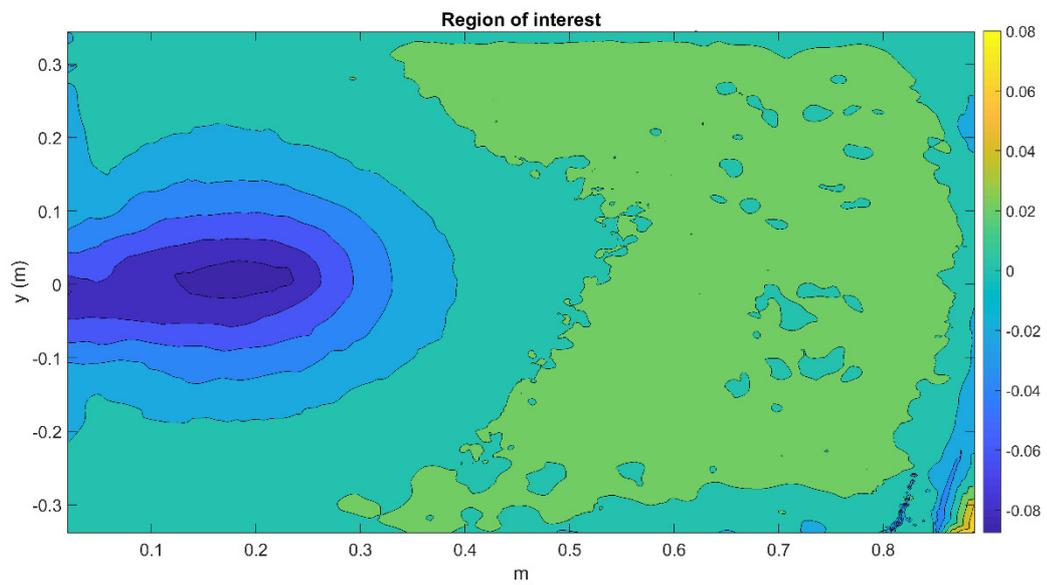


Figura D.6 - Região selecionada para o cálculo do volume da escavação e da barra ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 1$  cm).

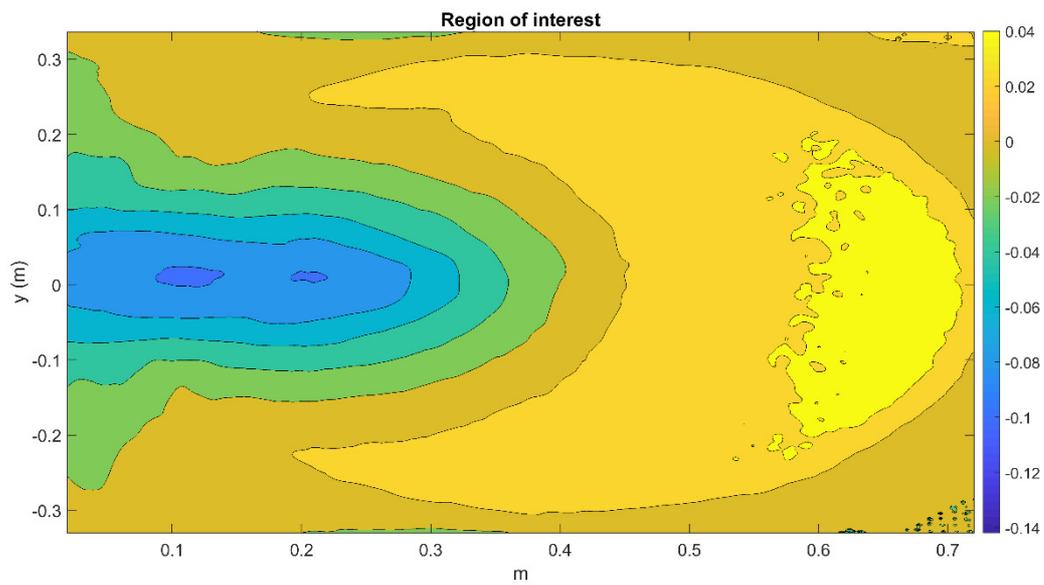


Figura D.7 - Região selecionada para o cálculo do volume da escavação e da barra ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 3$  cm).

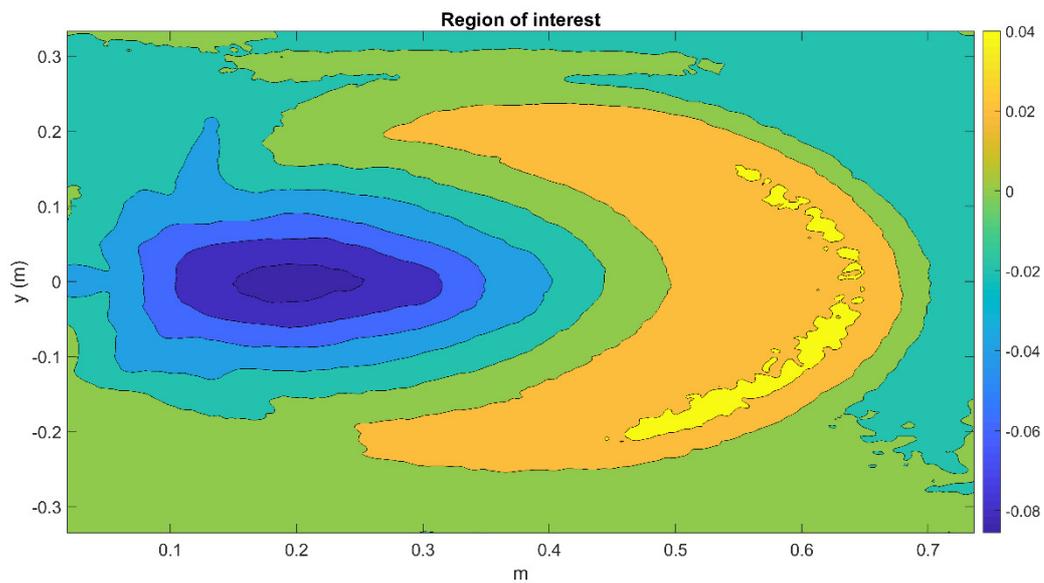


Figura D.8 - Região selecionada para o cálculo do volume da escavação e da barra ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 5$  cm).

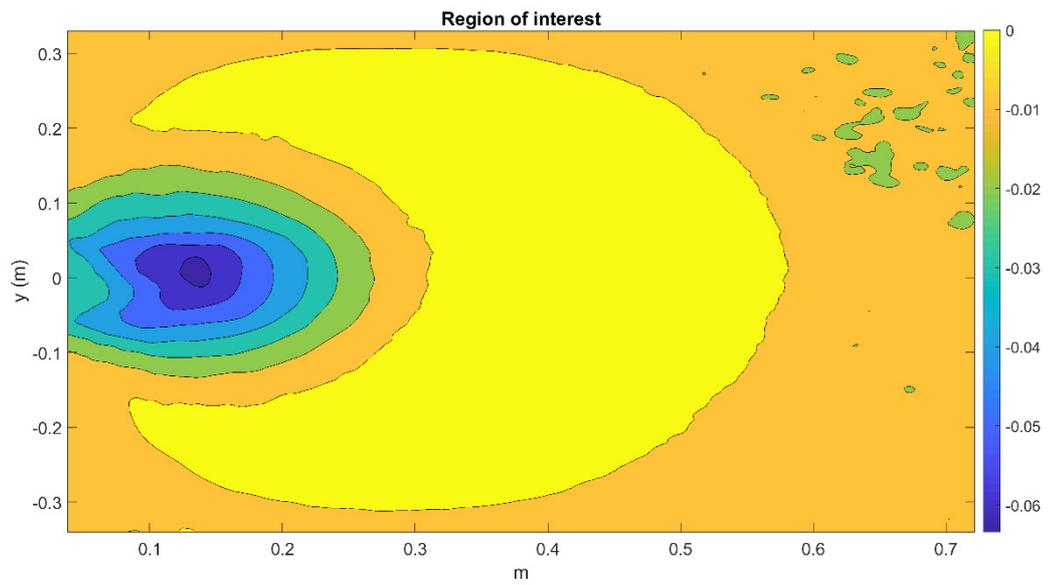


Figura D.9 - Região selecionada para o cálculo do volume da escavação e da barra ( $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 1$  cm).

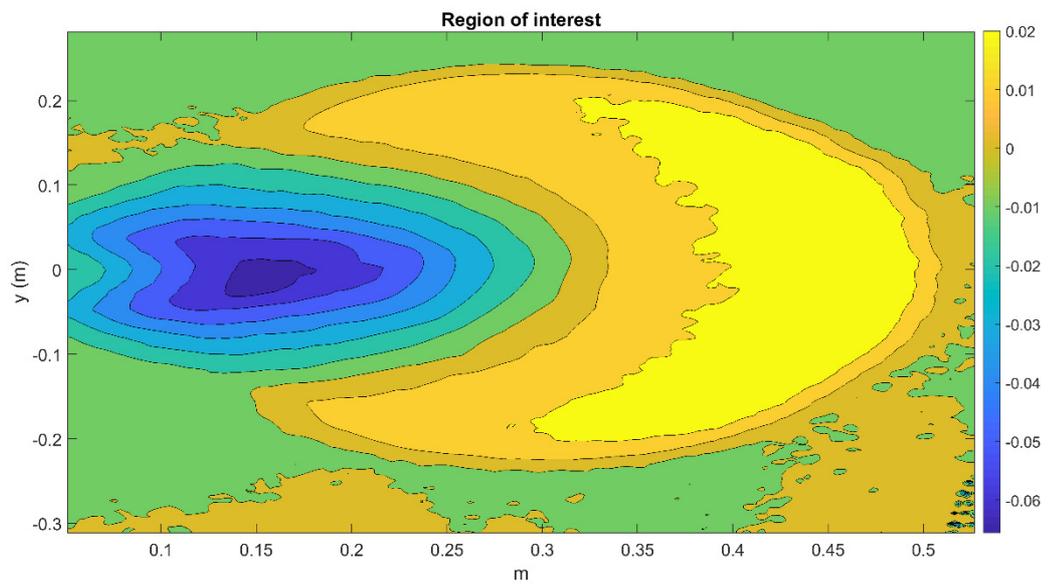


Figura D.11 - Região selecionada para o cálculo do volume da escavação e da barra ( $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 3$  cm).

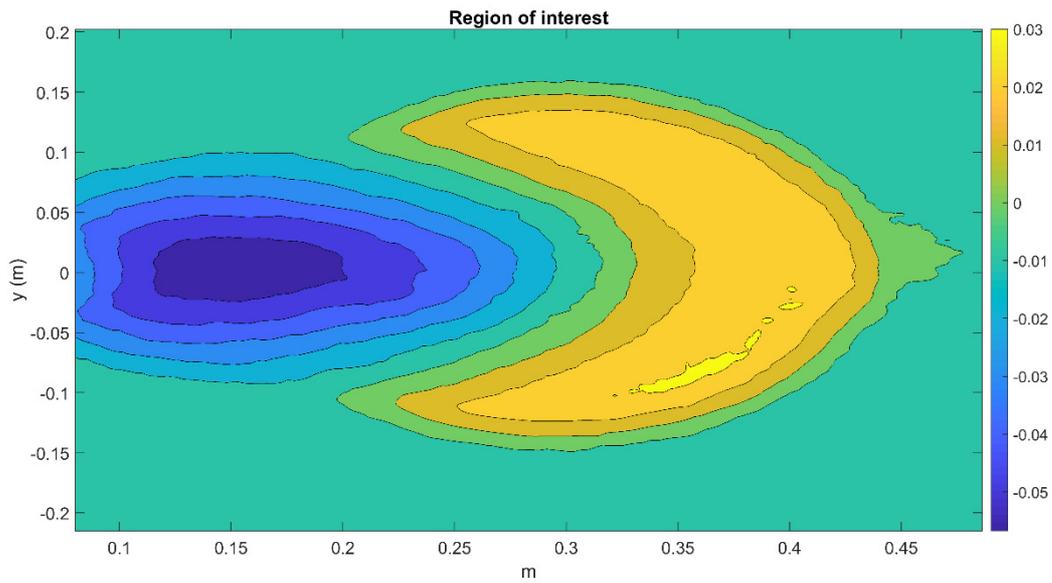


Figura D.11 - Região selecionada para o cálculo do volume da escavação e da barra ( $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 5$  cm).

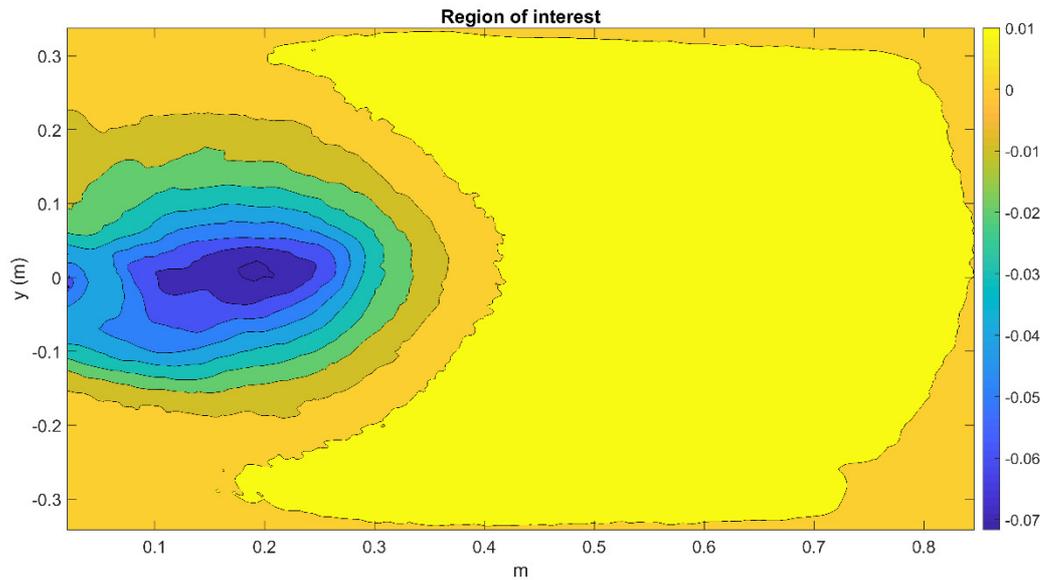


Figura D.12 - Região selecionada para o cálculo do volume da escavação e da barra ( $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 1$  cm).

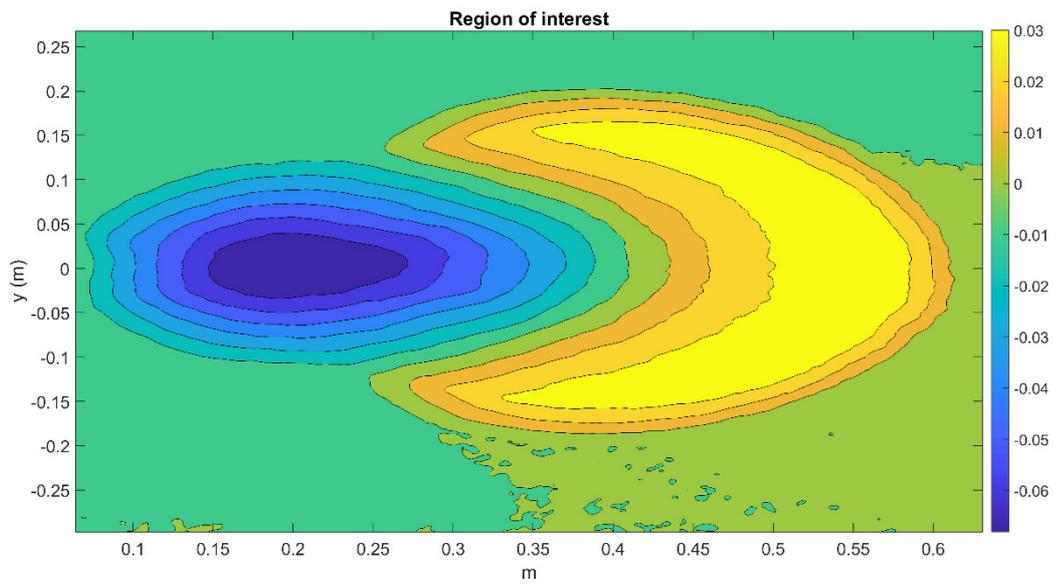


Figura D.13 - Região selecionada para o cálculo do volume da escavação e da barra ( $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 5$  cm).

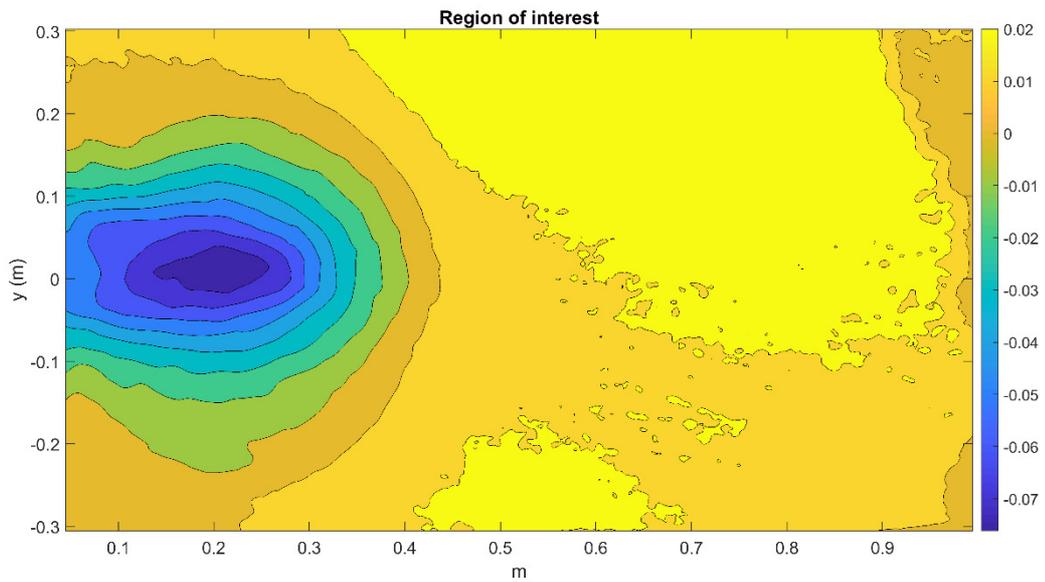


Figura D.14 - Região selecionada para o cálculo do volume da escavação e da barra ( $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 1$  cm).

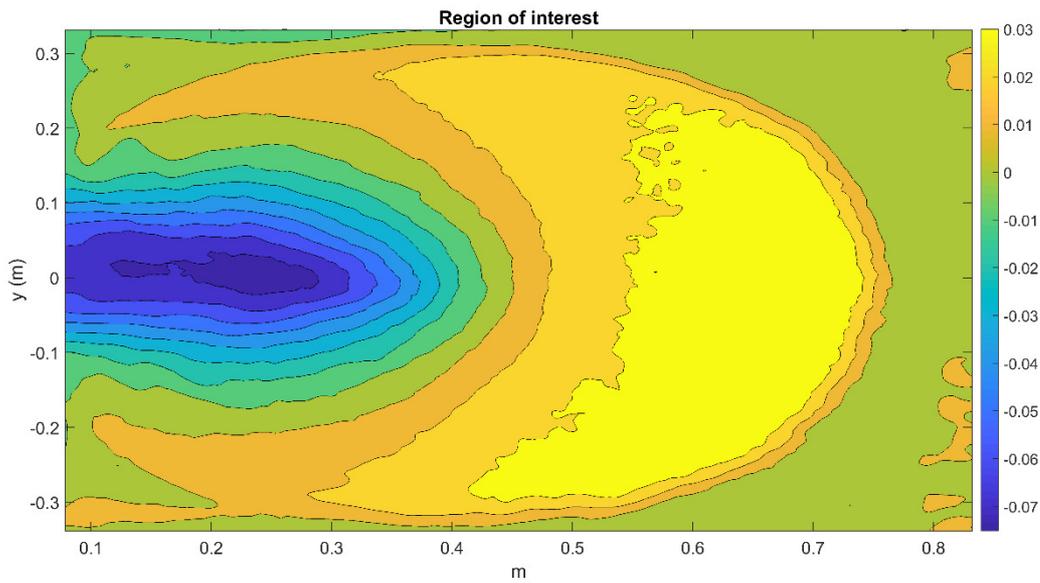


Figura D.15 - Região selecionada para o cálculo do volume da escavação e da barra ( $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 3$  cm).

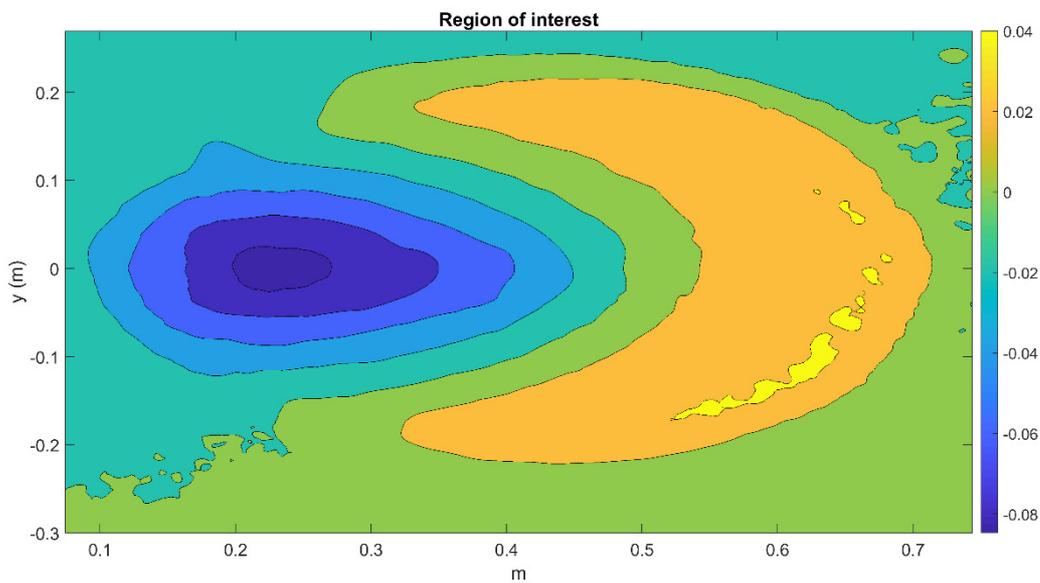


Figura D.16 - Região selecionada para o cálculo do volume da escavação e da barra ( $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 5$  cm).

D.2: ÁREAS NOS QUAIS CALCULARA, OS VOLUMES

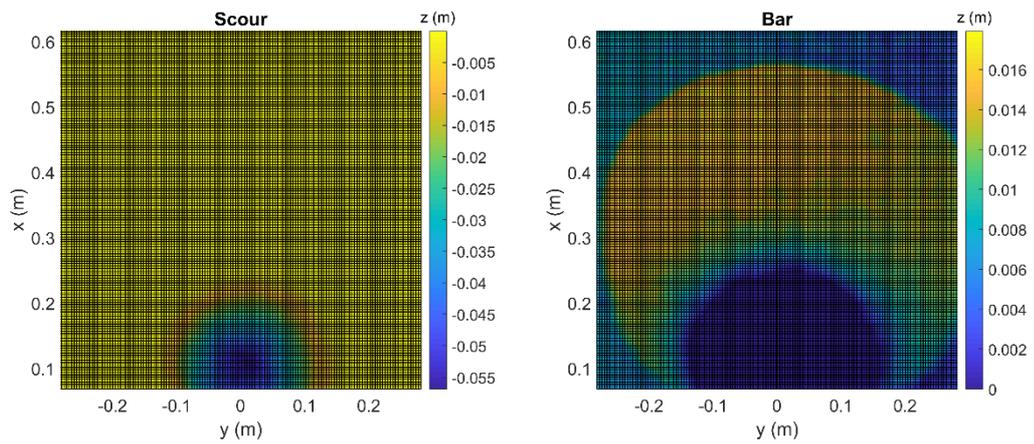


Figura D.17 - Áreas de base para o cálculo dos volumes da escavação e da barra ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 1$  cm).

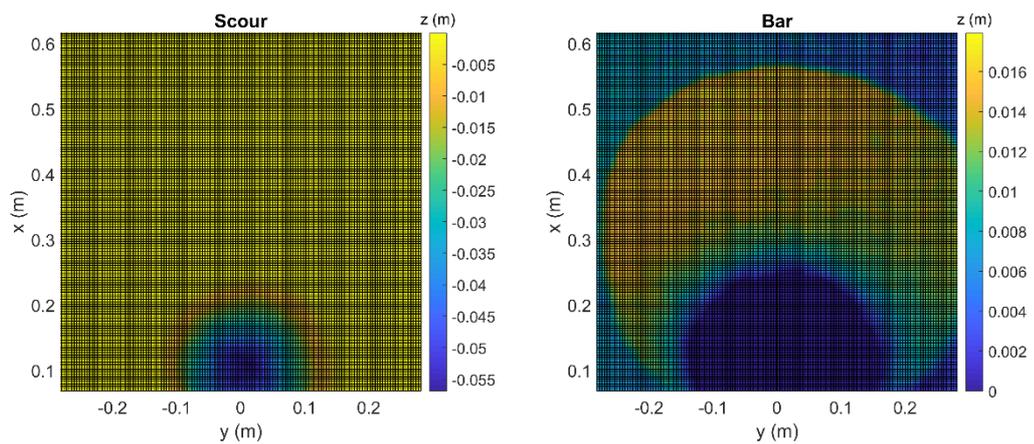


Figura D.18 - Áreas de base para o cálculo dos volumes da escavação e da barra ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 3$  cm).

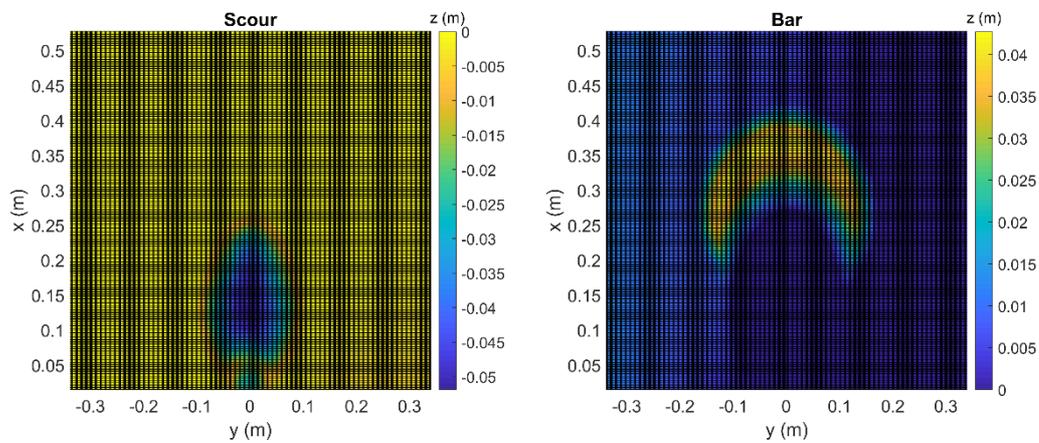


Figura D.19 - Áreas de base para o cálculo dos volumes da escavação e da barra ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 5$  cm).

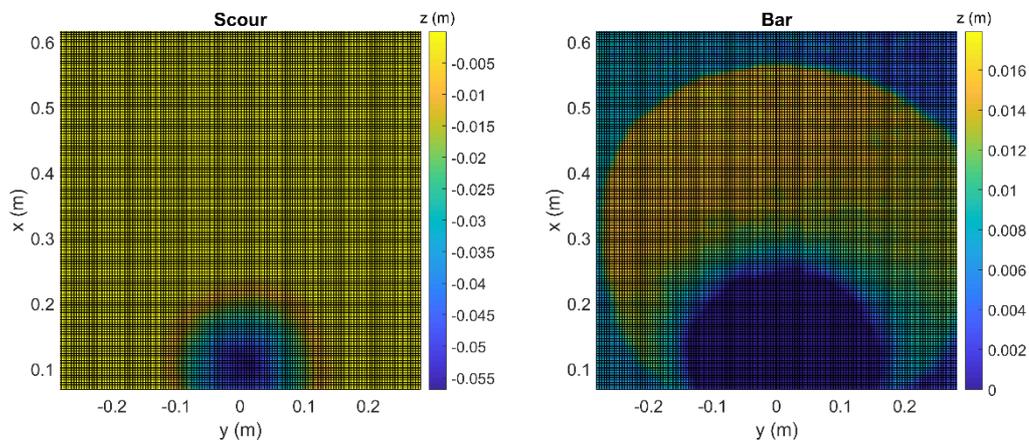


Figura D.20 - Áreas de base para o cálculo dos volumes da escavação e da barra ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 1$  cm).

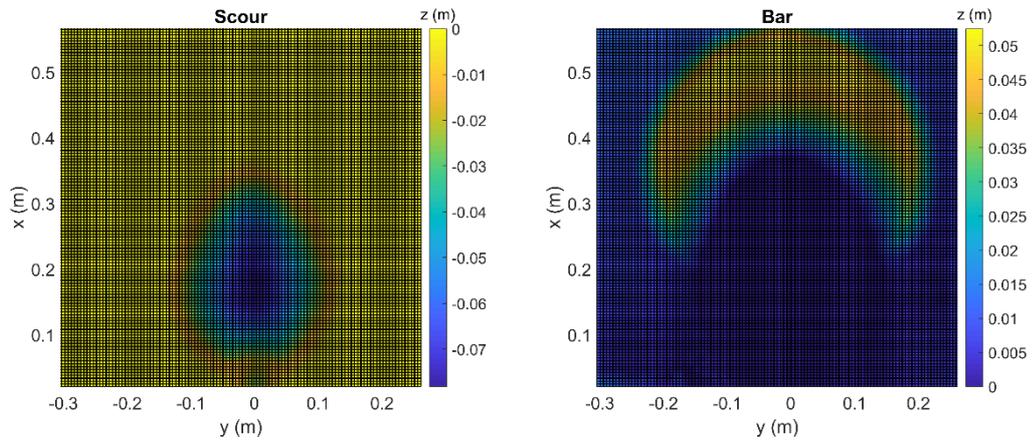


Figura D.21 - Áreas de base para o cálculo dos volumes da escavação e da barra ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 5$  cm).

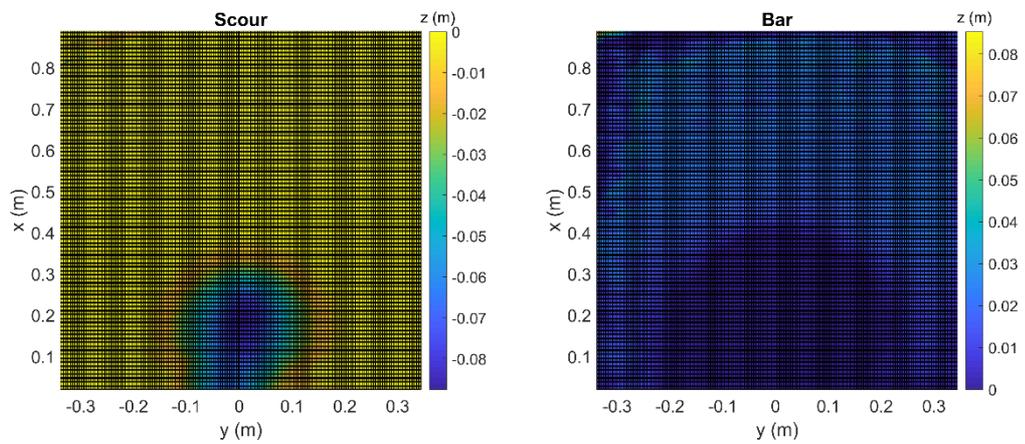


Figura D.22 - Áreas de base para o cálculo dos volumes da escavação e da barra ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 1$  cm).

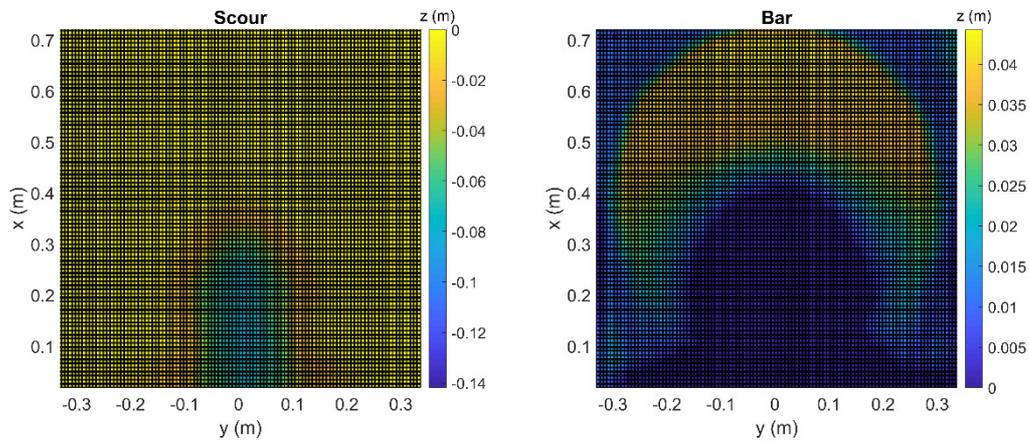


Figura D.23 - Áreas de base para o cálculo dos volumes da escavação e da barra ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 3$  cm).

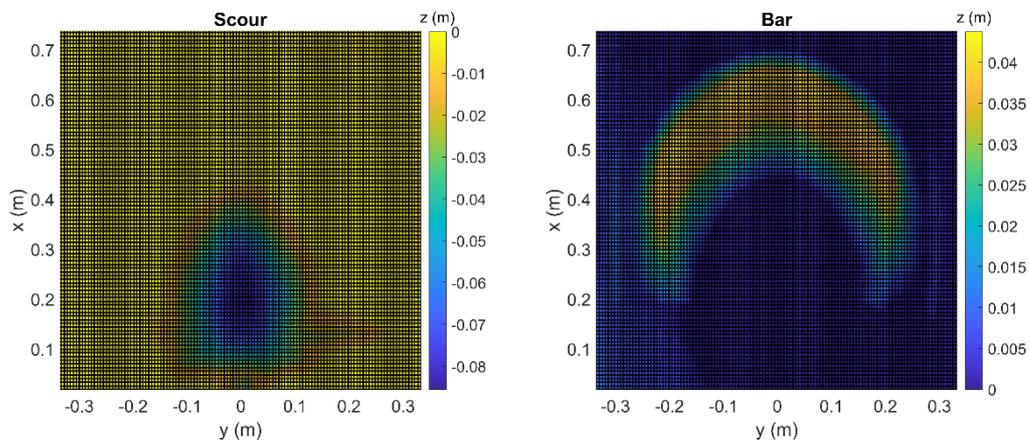


Figura D.24 - Áreas de base para o cálculo dos volumes da escavação e da barra ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 5$  cm).

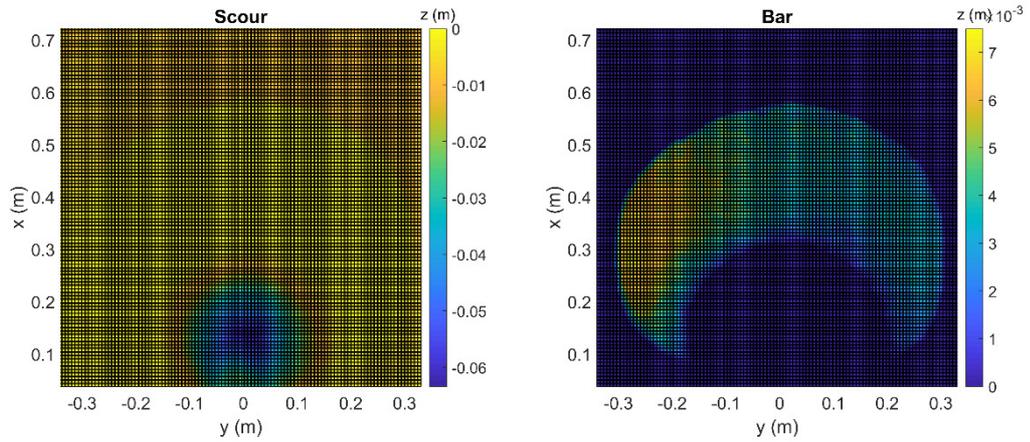


Figura D.25 - Áreas de base para o cálculo dos volumes da escavação e da barra ( $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 1$  cm).

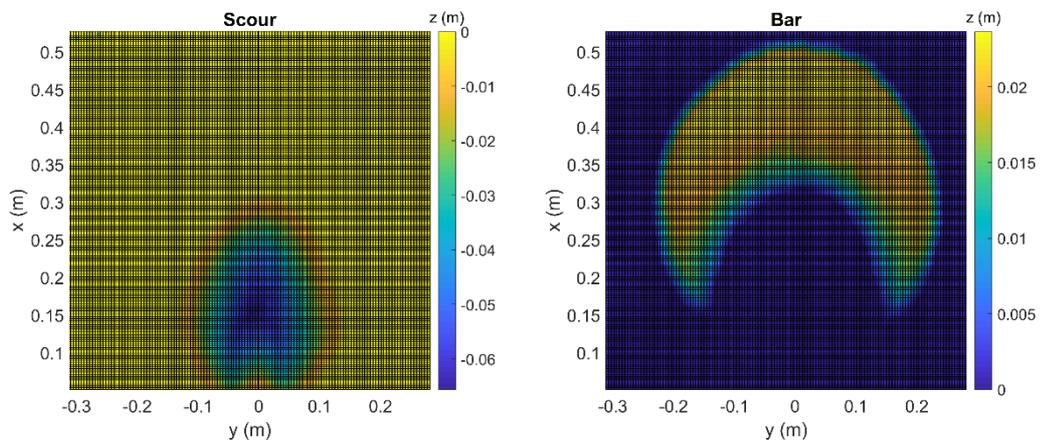


Figura D.26 - Áreas de base para o cálculo dos volumes da escavação e da barra ( $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 3$  cm).

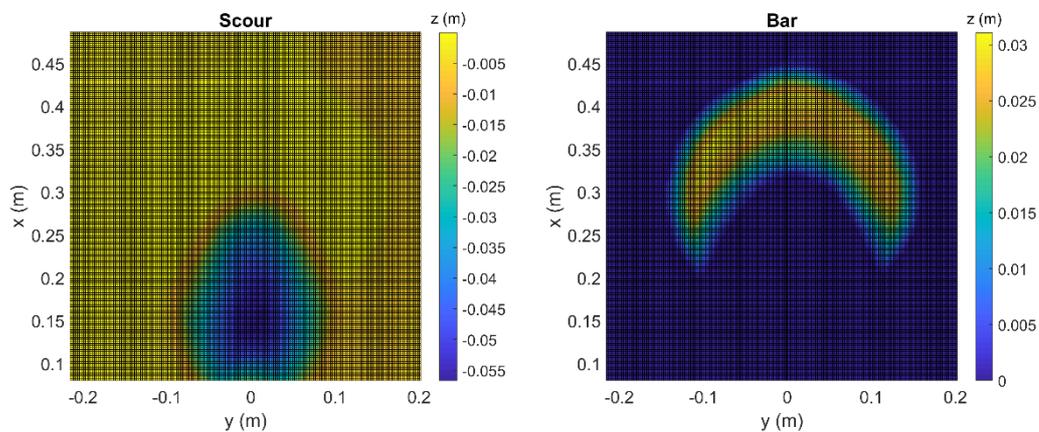


Figura D.27 - Áreas de base para o cálculo dos volumes da escavação e da barra ( $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 5$  cm).

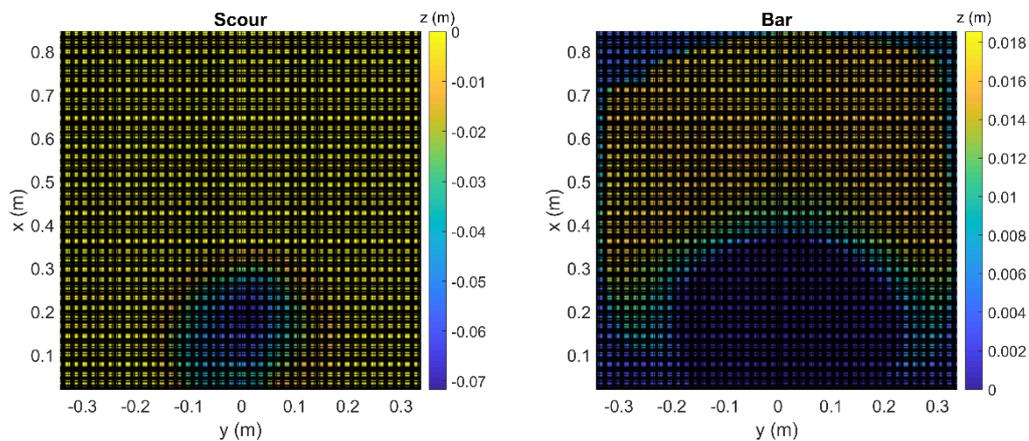


Figura D.28 - Áreas de base para o cálculo dos volumes da escavação e da barra ( $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 1$  cm).

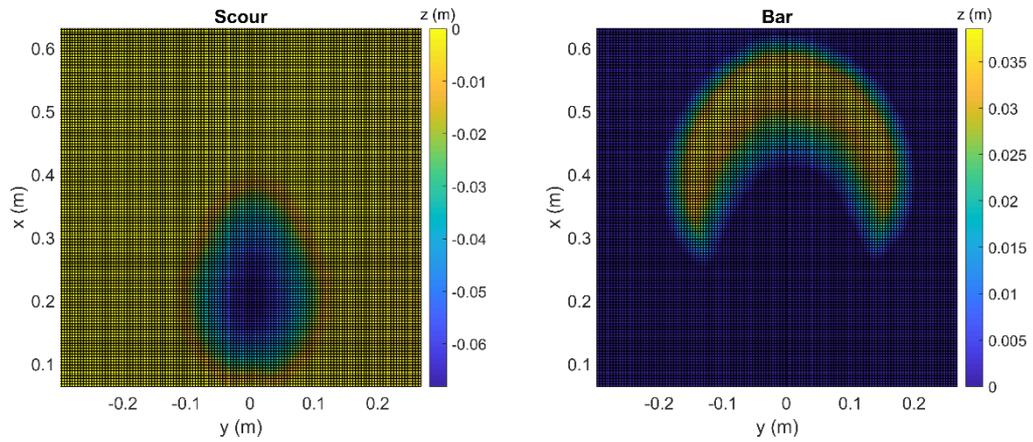


Figura D.29 - Áreas de base para o cálculo dos volumes da escavação e da barra ( $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 5$  cm).

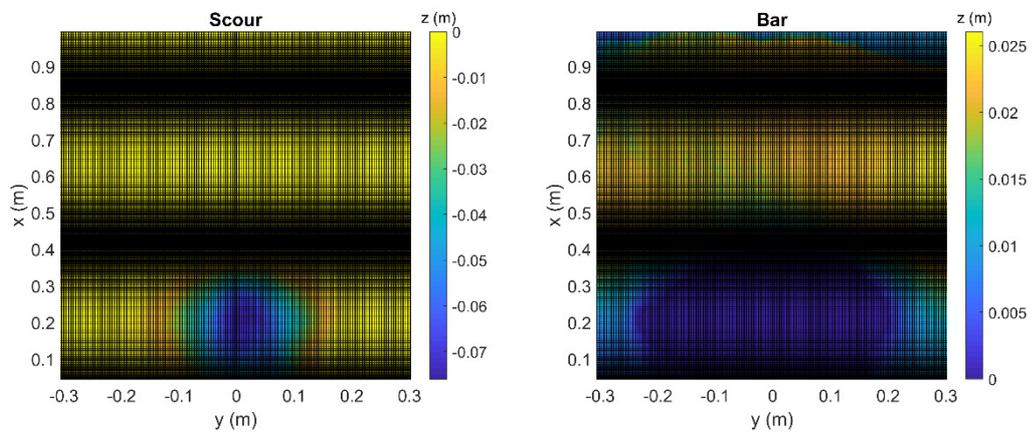


Figura D.30 - Áreas de base para o cálculo dos volumes da escavação e da barra ( $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 1$  cm).

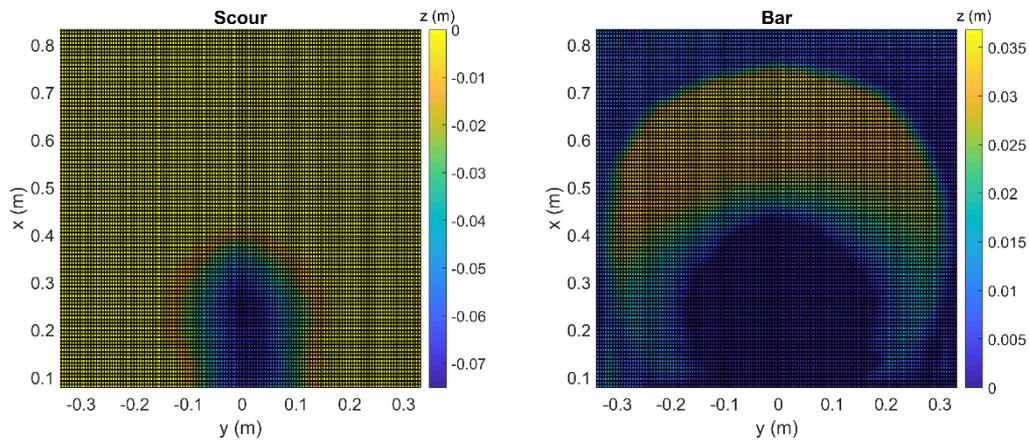


Figura D.31 - Áreas de base para o cálculo dos volumes da escavação e da barra ( $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 3$  cm).

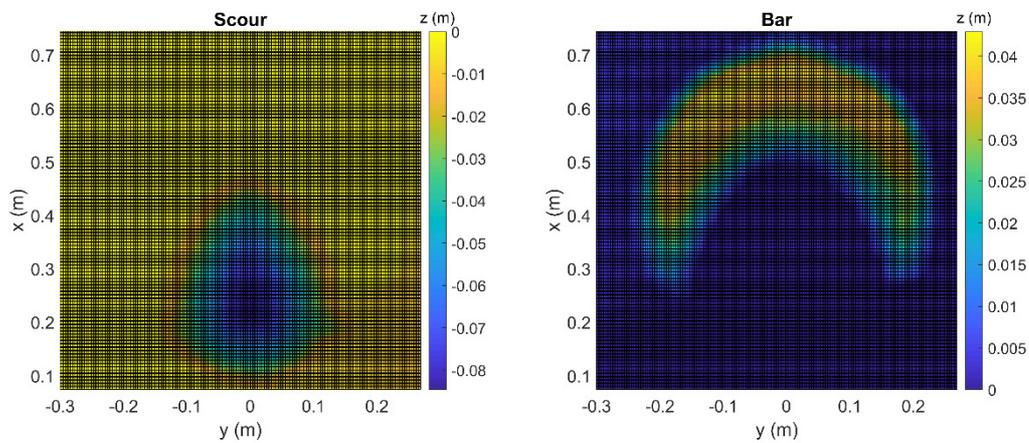


Figura D.32 - Áreas de base para o cálculo dos volumes da escavação e da barra ( $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 5$  cm).

D.3: PERFIL 3D

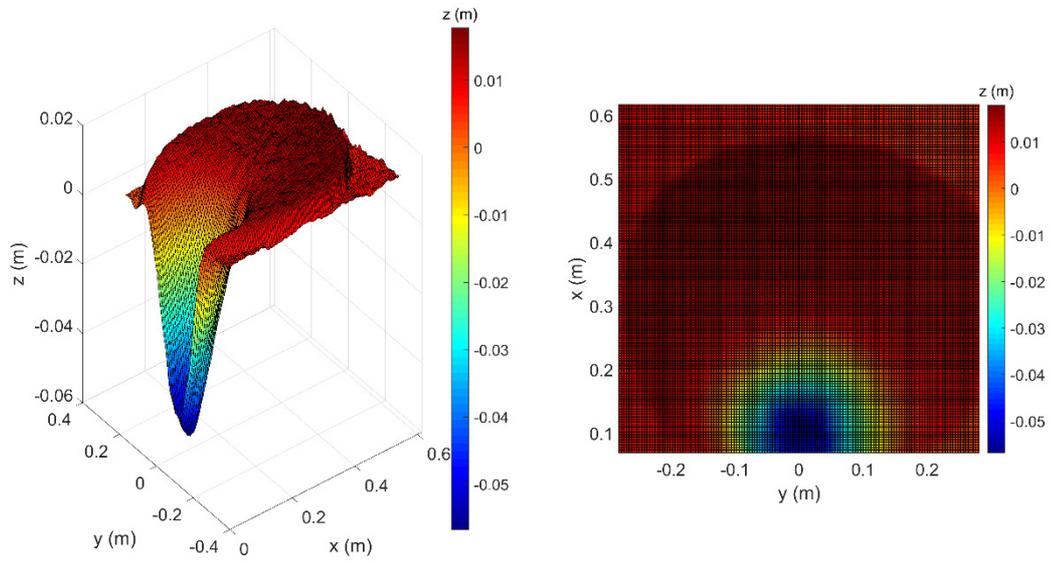


Figura D.33 - Perfil 3D ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 1$  cm).

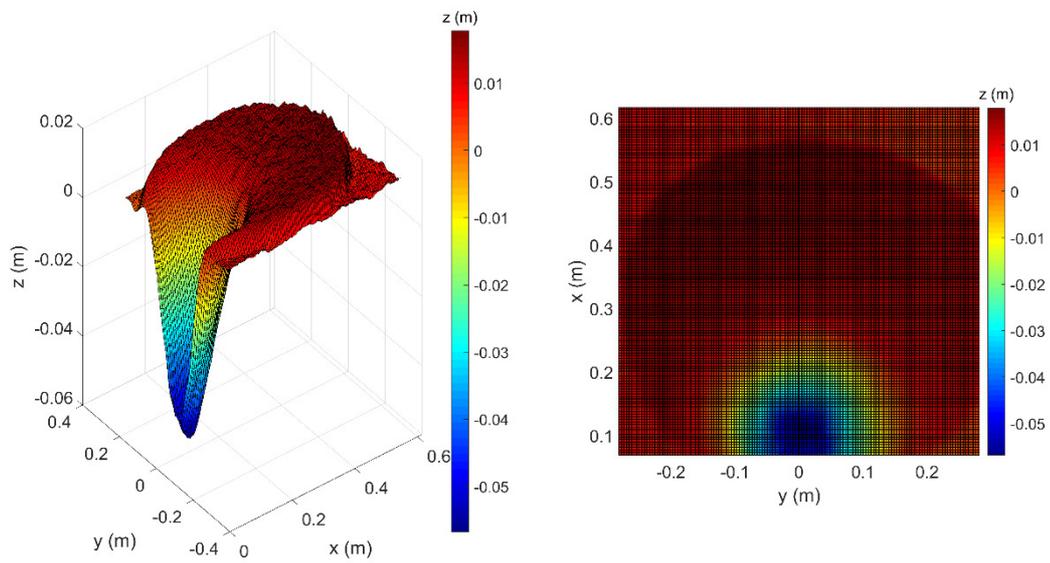


Figura D.34 - Perfil 3D ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 3$  cm).

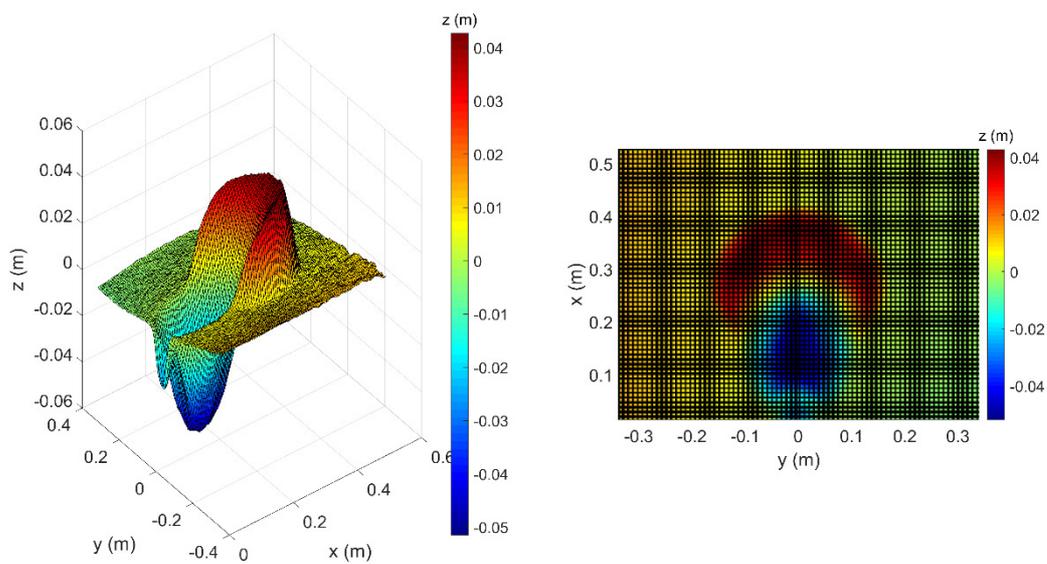


Figura D.35 - Perfil 3D ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 5$  cm).

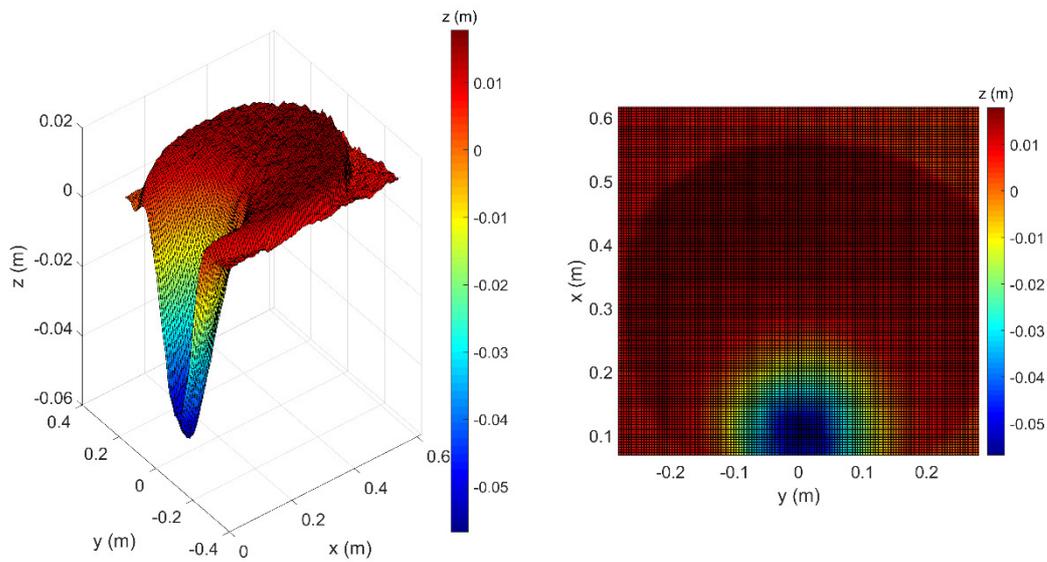


Figura D.36 - Perfil 3D ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 1$  cm).

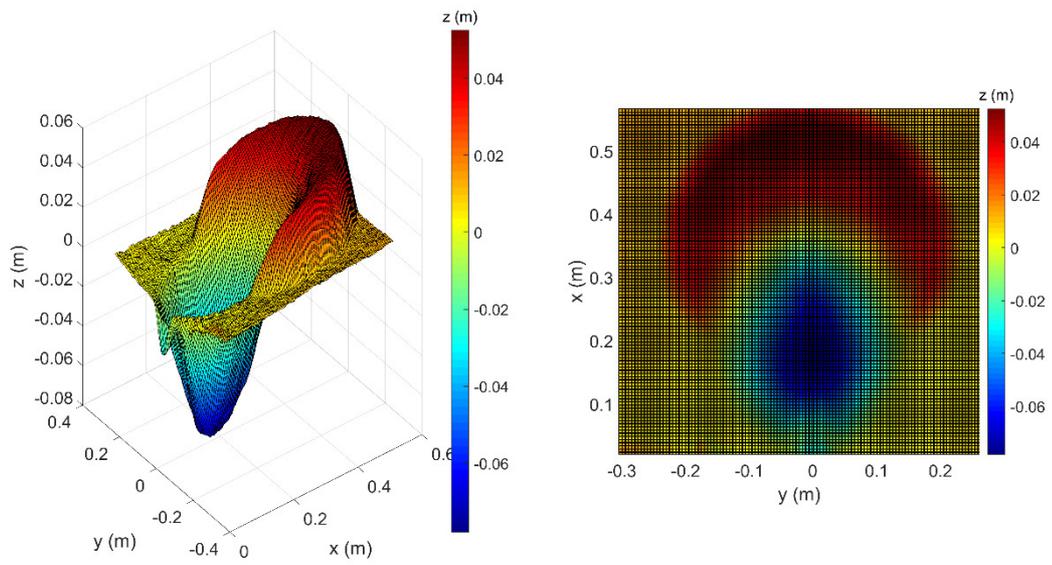


Figura D.37 - Perfil 3D ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 5$  cm).

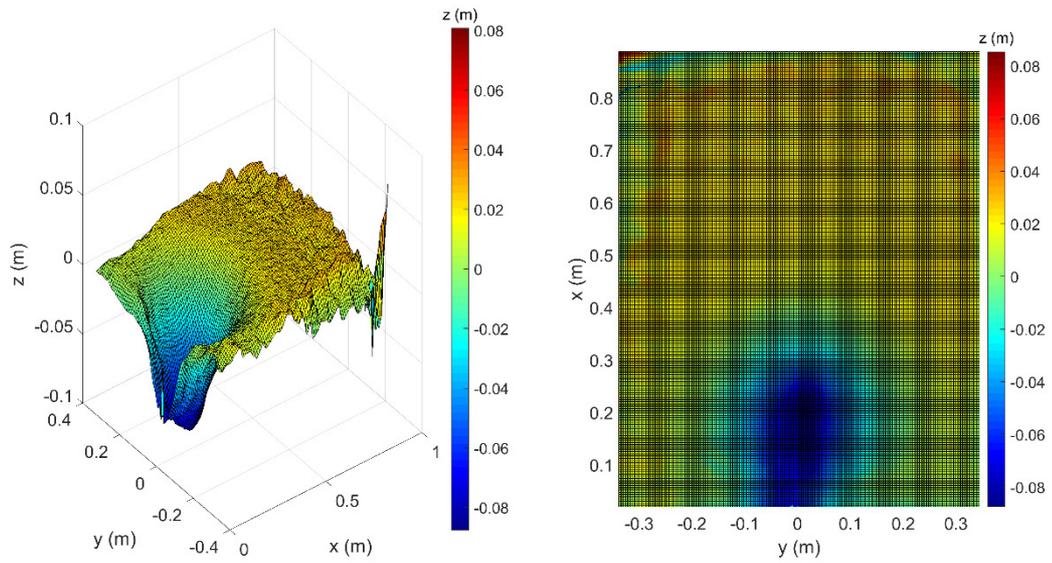


Figura D.38 - Perfil 3D ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 1$  cm).

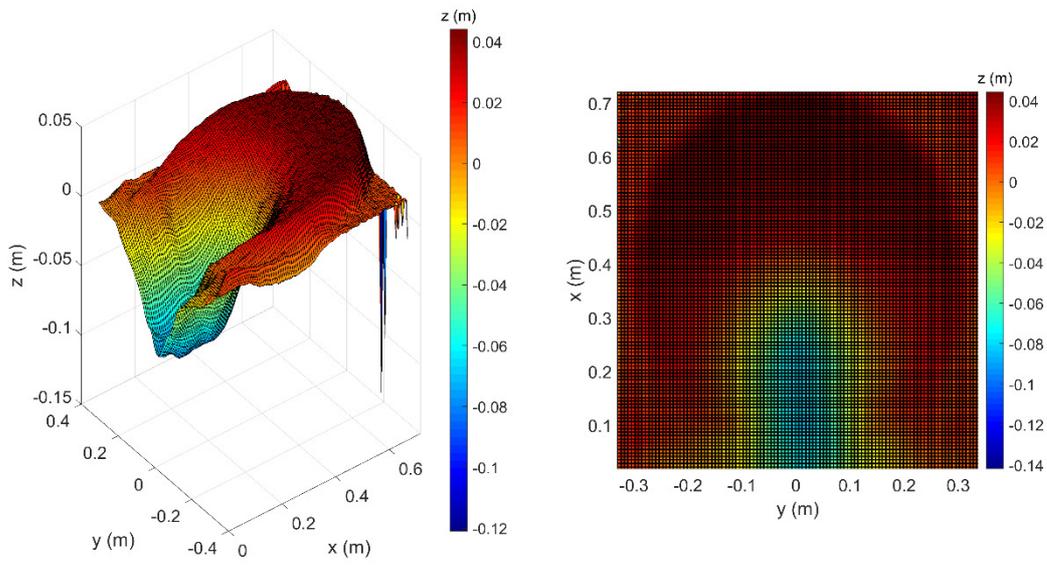


Figura D.39 - Perfil 3D ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 3$  cm).

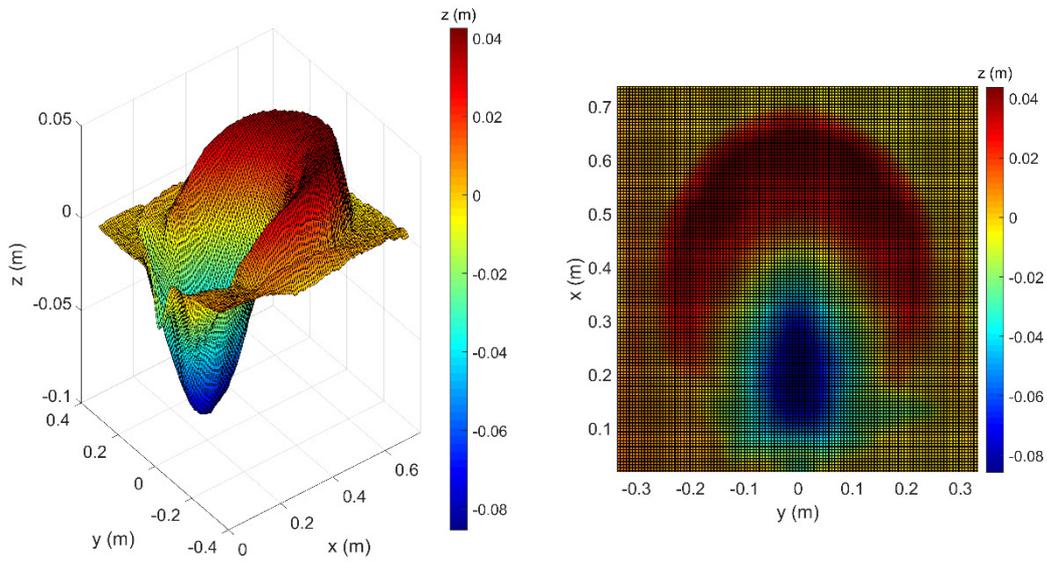


Figura D.40 - Perfil 3D ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 5$  cm).

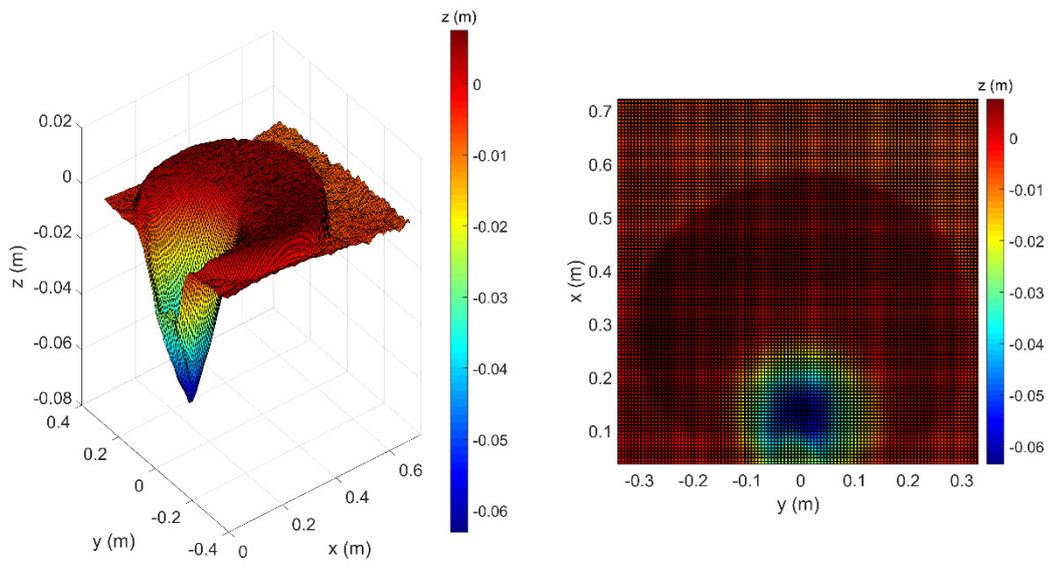


Figura D.41 - Perfil 3D ( $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 1$  cm).

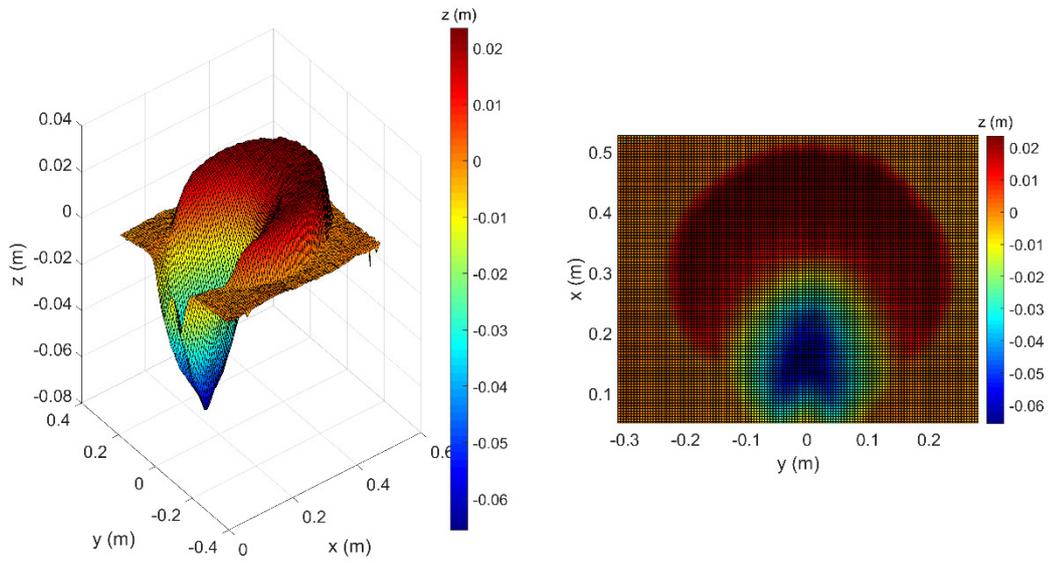


Figura D.42 - Perfil 3D ( $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 3$  cm).

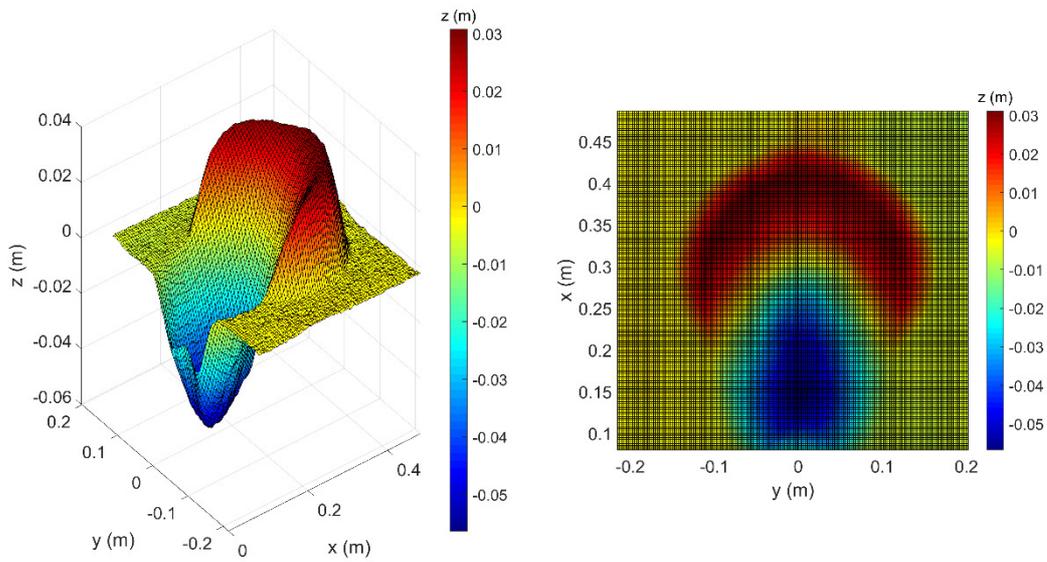


Figura D.43 - Perfil 3D ( $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,51$  L/s e  $h = 5$  cm).

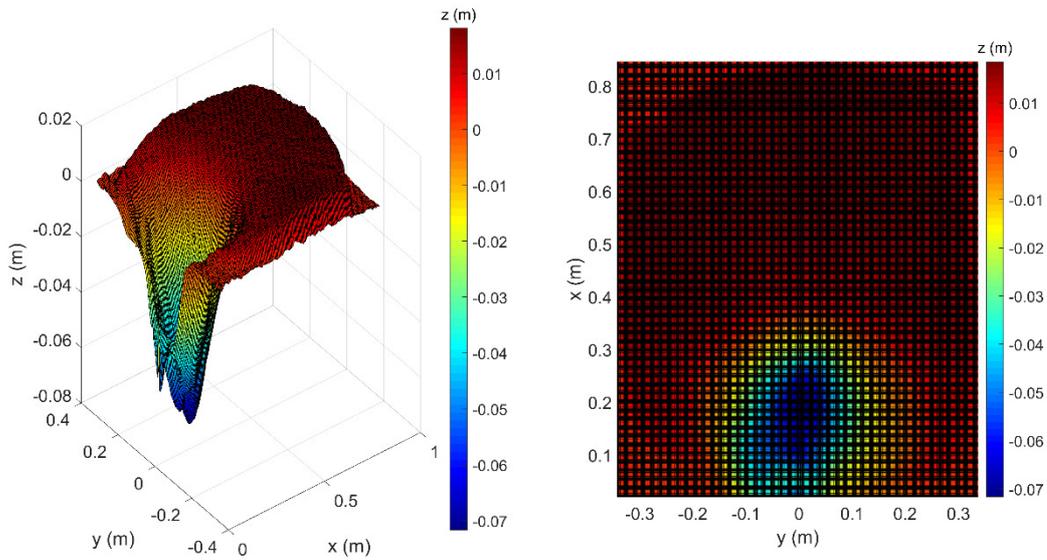


Figura D.44 - Perfil 3D ( $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 1$  cm).

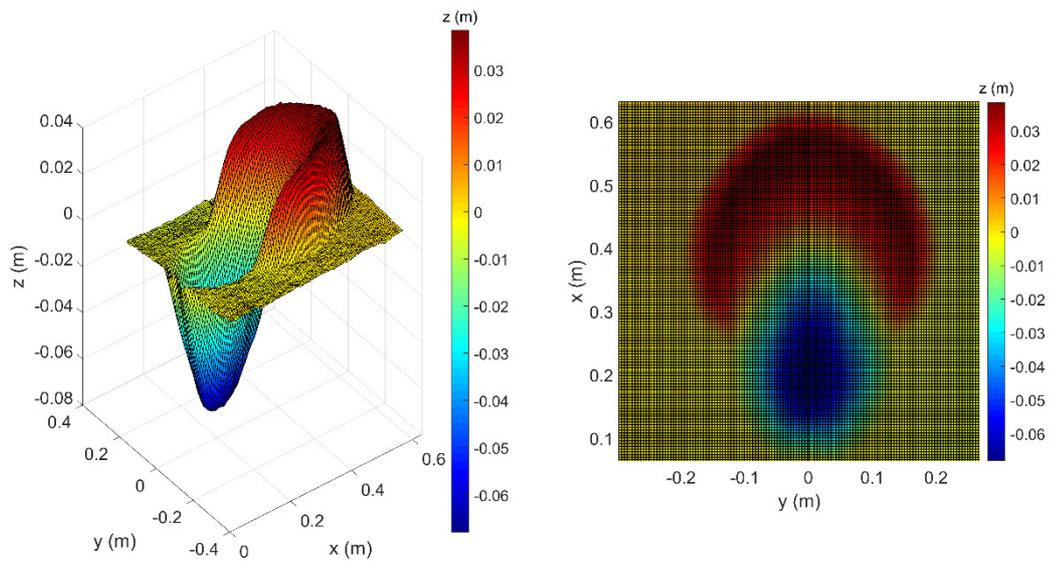


Figura D.45 - Perfil 3D ( $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,71$  L/s e  $h = 5$  cm).

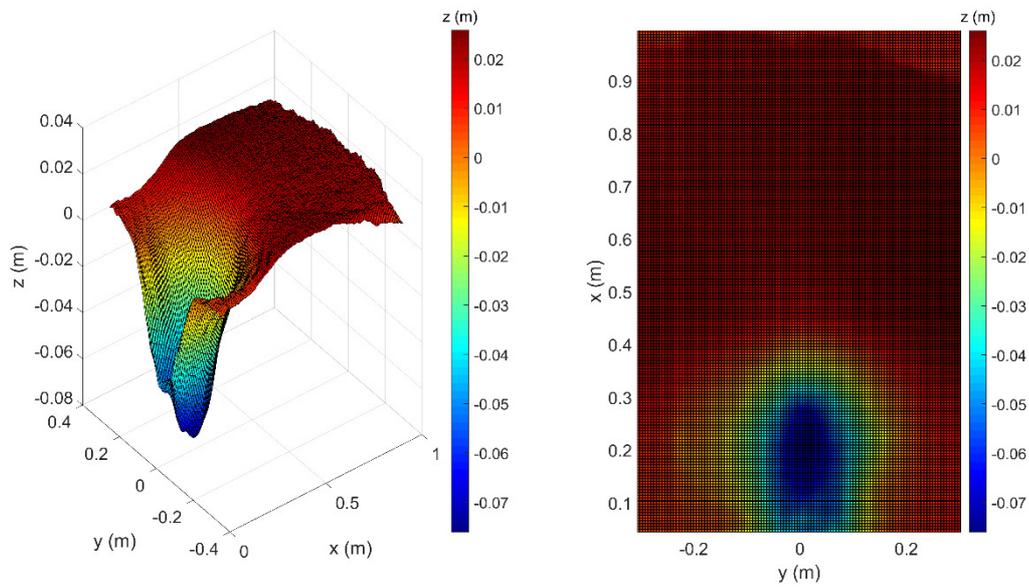


Figura D.46 - Perfil 3D ( $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 1$  cm).

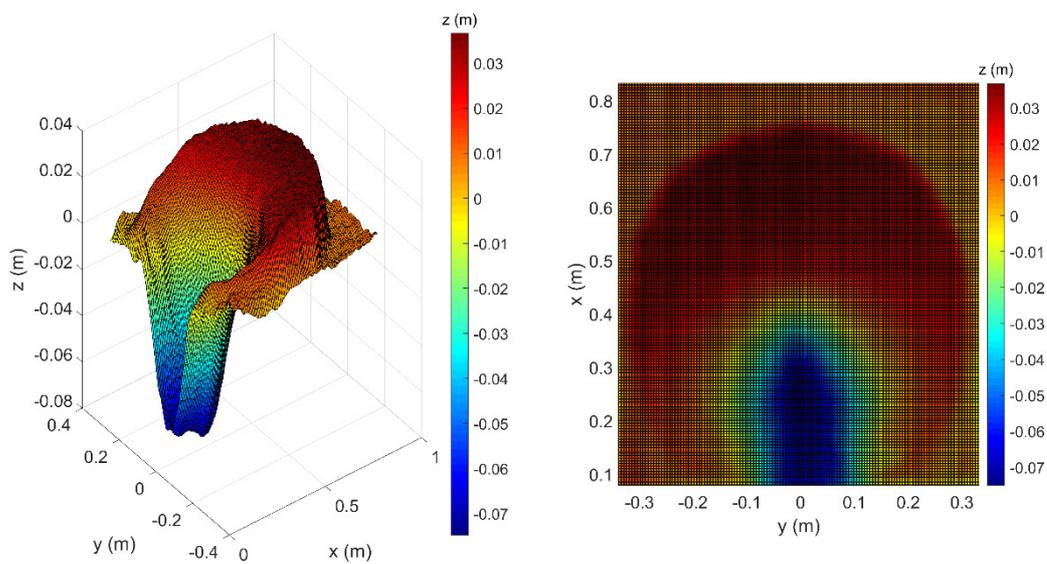


Figura D.47 - Perfil 3D ( $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 3$  cm).

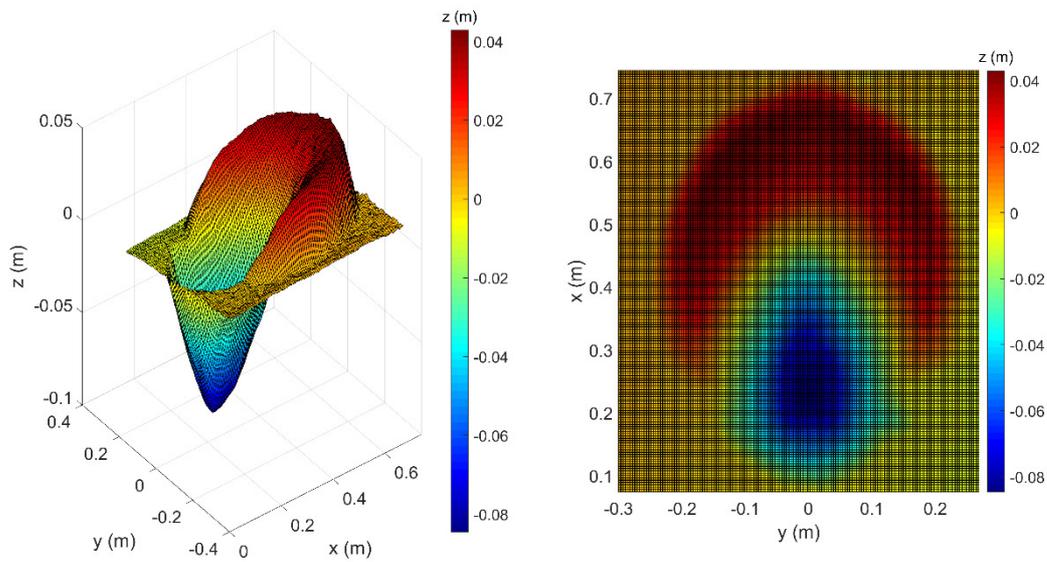


Figura D.48 - Perfil 3D ( $\alpha = 15^\circ$ ,  $Q = 0,85$  L/s e  $h = 5$  cm).